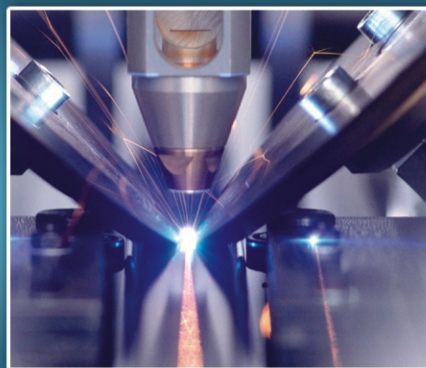


ИННОВАЦИОННОЕ И ЦИФРОВОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

*Всероссийская научно-техническая конференция
«Станкостроение и цифровое машиностроение»*

*Всероссийская научно-техническая конференция
«Состояние и перспективы развития сварочного производства России»*



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

ИННОВАЦИОННОЕ И ЦИФРОВОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

*Всероссийская научно-техническая конференция
«Станкостроение и цифровое машиностроение»*

*Всероссийская научно-техническая конференция
«Состояние и перспективы развития сварочного производства России»*

Научное электронное издание сетевого доступа

ISBN 978-5-4221-1467-2

Уфа 2021

Инновационное и цифровое машиностроение : материалы Всероссийской научно-технической конференции «Станкостроение и цифровое машиностроение», Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития сварочного производства России» [Электронный ресурс] / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа : УГАТУ, 2021. – URL: <https://ugatu.su/elektronnyie-izdaniya/>

Содержатся статьи, включенные в программы Всероссийской научно-технической конференции «Станкостроение и цифровое машиностроение», Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития сварочного производства России», состоявшихся в г. Уфе 07–09 апреля 2021 г.

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

- Adobe Acrobat – текстовый редактор;
- Microsoft Word – текстовый редактор.

Ответственные за выпуск:

Р. А. Мунасыпов – д-р техн. наук, зав. кафедрой АТП УГАТУ

Н. Г. Река – канд. техн. наук, доцент кафедры АТП УГАТУ

Н. И. Фецак – канд. техн. наук, доцент кафедры СМСиКК на базе ООО «Аттестационный центр СваркаТехСервис»

Н. П. Бикмухаметова – старший преподаватель кафедры АТП УГАТУ

Программирование и компьютерный дизайн: *А. П. Меркулова*

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12.

Тел.: +7-908-35-05-007

e-mail: rik.ugatu@yandex.ru

Все права на размножение, распространение в любой форме остаются за разработчиком.

Нелегальное копирование, использование данного продукта запрещено.

СТАНКОСТРОЕНИЕ И ЦИФРОВОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

СЕКЦИЯ 1. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ, ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ

Огородов В. А.

Ogorodov V. A.

ogorodov_v@list.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

ПРИМЕНЕНИЕ РАСТЯГИВАЮЩЕГО УСИЛИЯ ПРИ ХОНИНГОВАНИИ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРОВ

APPLICATION OF TENSION FORCE WHEN HONING THIN WALLED CYLINDERS

***Аннотация.** В среде конечно-элементного моделирования DEFORM-3D V6.1 выполнено исследование возможности обеспечения точности хонингования тонкостенного цилиндра при приложении к нему растягивающего усилия закрепления.*

***Abstract.** In the environment of finite element modeling DEFORM-3D V6.1, a study was carried out of the possibility of ensuring the accuracy of honing a thin-walled cylinder when a tensile clamping force is applied to it.*

***Ключевые слова:** остаточные напряжения сжатия, тонкостенный цилиндр, осевое растягивающая сила, хонингование, отверстие, точность, программный комплекс DEFORM-3D, неравномерность радиальной деформации.*

***Keywords:** residual compressive stresses, thin-walled cylinder, tensile axial force, honing, hole, accuracy, DEFORM-3D software package, non-uniformity of radial deformation.*

Эксплуатационные свойства деталей машин во многом определяются качеством поверхностного слоя их рабочих поверхностей [1 – 5]. В частности, повышение усталостной циклической прочности, коррозионной стойкости и износостойкости трущихся поверхностей обусловлено формированием в них остаточных напряжений сжатия [2, 4, 5].

Вместе с тем в исследовании Овсенко А. Н. [1] установлено, что остаточные напряжения поверхностного слоя детали зависят от технологической наследственности, и управлять ими можно путем предварительного деформирования детали. При этом Тимофеевым М. В. [6] выдвинута гипотеза, что в соответствии с теоремой Г. Генки «о разгрузке» применение осевого растягивающего усилия для закрепления заготовки позволяет снизить остаточные осевые растягивающие напряжения в поверхностном слое на величину напряжений от «преднатяга».

На этом основании в настоящих исследованиях было выдвинуто предположение: применение при хонинговании, являющегося методом окончательной обработки отверстий тонкостенных цилиндров, которые нашли широкое применение в летательных аппаратах, для закрепления заготовки растягивающего усилия может способствовать формированию осевых остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое отверстия.

Однако исследования в области хонингования [7 – 11] показывают, что деформация тонкостенных цилиндров от действия зажимного усилия может являться причиной снижения точности геометрической формы обработанного отверстия.

Поэтому является актуальным исследование влияния растягивающего усилия, прикладываемого к цилиндру малой жесткости для его закрепления, на точность хонингования. Поскольку большинство цилиндров имеет на своих краях наружную резьбу, растягивающее осевое усилие может быть создано навинчиваемой гайкой, опирающейся на корпус станочного приспособления [9, 10].

В работах [7, 8, 10] показано, что достигаемая точность формы отверстия при хонинговании цилиндра малой жесткости обусловлена не столько его деформацией от усилия закрепления, сколько распределением радиальных сил резания, действующих в контакте хонинговальных брусков с обрабатываемой поверхностью и являющихся результатом их упругого взаимодействия с заготовкой.

При разжиге хонинговальных брусков все точки поверхности отверстия, находящиеся в контакте с брусками, перемещаются в радиальном направлении на одинаковую величину радиальной подачи (допущение – податливость контактного слоя не учитывается). В случае толстостенного цилиндра при отсутствии отклонения формы обрабатываемого отверстия радиальные силы резания в контакте брусков с обрабатываемой поверхностью должны распределяться равномерно [7, 10, 11, 12].

Поскольку фактически определить эти силы современными средствами инженерного анализа (ANSYS, DEFORM-3D, APM FEM для КОМПАС-3D и др.) не представляется возможным в настоящей работе было принято решение оценивать характер распределения радиальных сил по косвенному признаку, а именно: по деформации цилиндра от действия системы независимых радиальных сил одинаковой величины (рис. 1), имитирующих действие хонинговальных брусков при их радиальной подаче [10, 11, 12].

Как видно на рис. 2, при действии системы радиальных сил на цилиндр повышенной жесткости (толщина стенки 5 мм) наблюдается равная по величине радиальная деформация во всех точках приложения сил вдоль одной линейной образующей (точки P1, P2 и P3). Отсюда, применительно к цилиндру повышенной жесткости является справедливым обратное утверждение – равная по величине радиальная деформация цилиндра под действием системы радиальных сил свидетельствует о равенстве величины этих сил [12].

Изложенный принцип был положен в основу выявления условий применения растягивающего усилия для закрепления цилиндра малой жесткости для обеспечения требуемой точности формы обрабатываемого отверстия при хонинговании – действие одинаковых радиальных сил вдоль одной образующей должно вызывать равную радиальную деформацию цилиндра в всех точках приложения этих сил.

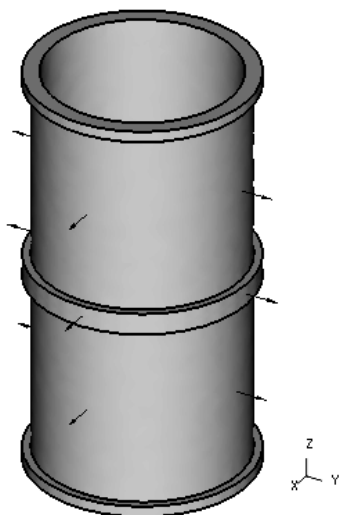


Рис. 1. Исследуемый тонкостенный цилиндр

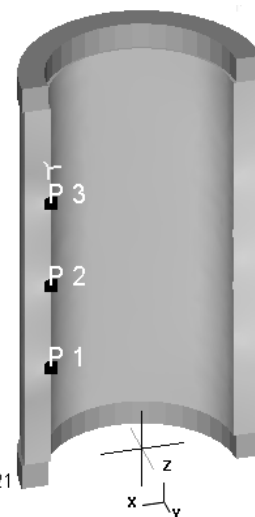
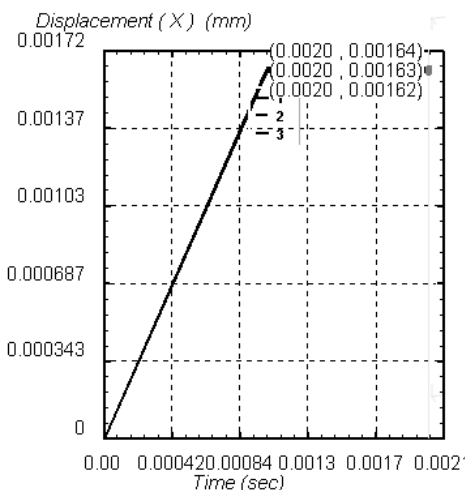


Рис. 2. Деформация (displacement) толстостенного цилиндра в точках приложения радиальных сил

Моделирование напряженно-деформированного состояния цилиндра, приведенного на рис. 1, находящегося под действием растягивающего усилия величиной $T = 2537$ Н и радиальных сил q величиной 100 Н, показало, что величина радиальной деформации w цилиндра в точках точки P1, P2 и P3, соответствующих положению хонинговальных брусков посередине отверстия, составила соответственно 0,003 мм, 0,001557 мм и 0,002995 мм. В результате неравномерность радиальной деформации цилиндра Δw (как разность между максимальной и минимальной величиной радиальной деформации w в местах приложения радиальных сил) составила 0,001438 мм.

Крайние положения брусков в исследовании не рассматривались, поскольку точности отверстия у краев отверстия при хонинговании добиваются регулированием величины выбега брусков из отверстия.

Относительные размеры цилиндра (отношение минимальной толщины его стенки к радиусу срединной поверхности, а также длины к диаметру отверстия) соответствуют размерам реальных цилиндров. Диаметр обрабатываемого отверстия составляет 35 мм, минимальная толщина стенки – 1,5 мм, длина – 75 мм. Материал цилиндра – алюминиевый сплав Д16Т, имеющий следующие характеристики: модуль упругости Юнга – 68,9 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,33, коэффициент трения по стали – 0,4.

Наименьшая величина радиальной деформации w в средней точке P2 объясняется наличием ребра жесткости в этом поперечном сечении цилиндра.

Для обеспечения одинаковой для этих точек радиальной деформации (0,002332 мм) величина радиальных сил должна быть соответственно 82,5 Н, 135 Н и 82,5 Н при постоянности суммы этих сил – 300 Н.

При увеличении радиальных сил q при неизменном осевом растягивающем усилии неравномерность радиальной деформации Δw возрастает (рис. 1, кривая 1).

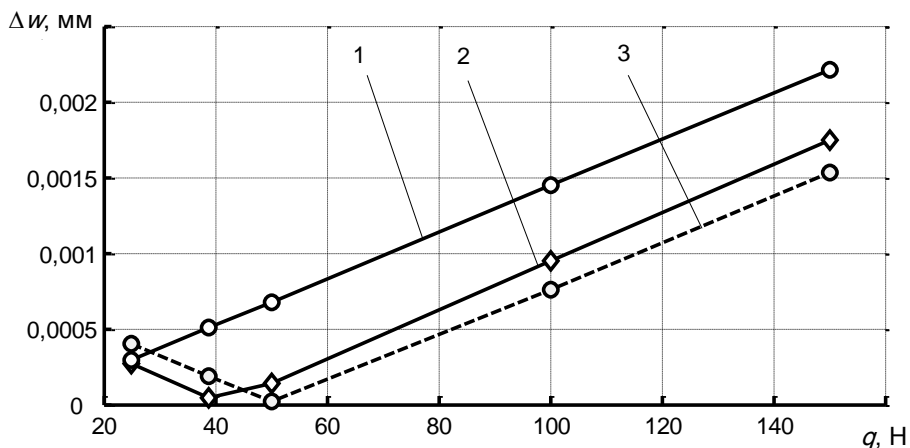


Рис. 3. Неравномерность радиальной деформации образца при закреплении: 1 – растягивающим осевым усилием; 2 – эластичной манжетой; 3 – эластичной манжетой с приложением растягивающего осевого усилия.

Следовательно, применение осевого растягивающего усилия с целью формирования остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое обрабатываемого отверстия может привести к ухудшению точности его формы.

Вместе с тем при изучении неравномерности радиальной деформации цилиндра малой жесткости при его закреплении с помощью эластичной манжетой было выявлено практическое отсутствие неравномерности деформации (рис. 3, кривая 2) при определенной величине радиальных сил q .

На этом основании было предложено для уменьшения неравномерности деформации Δw при закреплении цилиндра малой жесткости растягивающим усилием также обжимать его по наружной поверхности эластичной манжетой. Важно при этом отметить, что обжатие по наружной поверхности цилиндра малой жесткости, как показало моделирование напряжено-деформированного состояния, фактически не создает осевых напряжений и поэтому не может повлиять на формирование осевых остаточных напряжений.

Исследование предложенного способа закрепления цилиндра малой жесткости показало (рис. 3, кривая 3) отсутствие неравномерности его деформации при определенных радиальных усилиях q .

Кроме того, применение растягивающего усилия совместно с обжимом цилиндра малой жесткости эластичной манжетой привело к смещению минимум неравномерности в сторону увеличения радиальных сил q , хотя это смещение является не значительным. Поэтому применение растягивающего усилия как дополнительного компонента при закреплении цилиндра малой

жесткости вполне возможно без ухудшения точности обработки хонингованием.

Выводы

1. Установлено, что применение осевой растягивающей силы для закрепления тонкостенных цилиндров на операции хонингования ограничено точностью обработки их отверстий.

2. Показано, что для обеспечения высокой точности обработки отверстий в цилиндрах малой жесткости при хонинговании следует применять растягивающее усилие для закрепления этих деталей на операции хонингования совместно с их обжатием по наружной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овсеенко А. Н. Технологические основы методов снижения остаточных деформаций и обеспечения качества обработки высоконагруженных деталей энергомашин: Автореферат докт. техн. наук. Москва, 1985. 32с.

2. Клауч Д. Н., Овсеенко А. Н., Овумян Г. Г., Кущева М. Е., Щегольков Н. Н., Кудинов А. А. Технологические методы повышения качества изготовления и ресурса работы турбинных лопаток // Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2008, №: 4 (24). С. 49-53.

3. Технологические основы высокоэффективных методов обработки деталей: учебное пособие для машиностроительных специальностей вузов / П. И. Ящерицын [и др.]. - Новополюцк: ПГУ, 1996. 133 с.

4. Носов Н. В., Шилова Ю. А., Лысенко Н. К. Физико-механическое состояние поверхностного слоя при финишной абразивной обработке поверхностей трения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 18, № 4(2), 2016. С. 303-310.

5. Климова Л. Г. Формирование технологических остаточных напряжений при поверхностном пластическом деформировании // Вестник Иркутского государственного технического университета 2011 № 4(51). С. 33-35.

6. Фоменко Р. Н., Тимофеев М. В. Оптимизация технологических условий обработки тонкостенных деталей из алюминиевых сплав с целью снижения остаточных напряжений // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 4 (65). С. 4-11.

7. Огородов В. А. Имитационное моделирование процесса хонингования // СТИН. 2010. №12. С. 28-33.

8. Лысенко Н. К. Шилова Ю. А. Технологическое обеспечение хонингования отверстий тонкостенных цилиндров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4(3). С. 1104-1105.

9. Огородов В. А. Анализ способов закрепления тонкостенных цилиндров на операции хонингования // Металлообработка. 2019. №1(109). С. 22-29.

10. Огородов В. А. Повышение точности хонингования тонкостенных цилиндров // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника, 2020. № 4, С. 163-168.

11. Ogorodov V. A. Increasing the Accuracy of Honing for Thin-Walled Cylinders // Russian Aeronautics, 2020. Vol. 63. No. 4. PP. 739–745.

12. Огородов В. А. Исследование влияния усилия разжима хонинговальных брусков на точность обработки тонкостенных цилиндров // Тр. российск. конф. «Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста» / Уфимск. гос авиац. техн. ун-т. – Уфа: РИК УГАТУ, 2020. С. 49-52.

Огородов В. А.

Ogorodov V. A.

ogorodov_v@list.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОЦЕССА ХОНИНГОВАНИЯ

QUALITY MANAGEMENT OF THE HONING PROCESS

***Аннотация.** Изложен процессный подход к компьютерному управлению точностью обработанного отверстия при хонинговании в соответствии с концепцией автоматизации управления жизненным циклом продукции.*

***Abstract.** A process approach to computer control of the accuracy of a machined hole during honing is described in accordance with the concept of automation of product life cycle management.*

***Ключевые слова:** процессный подход, хонингование, имитационная модель, отверстие, точность, автоматизация, управление качеством, концепция, жизненный цикл продукции.*

***Keywords:** Process Approach, Honing, Simulation, Hole, Precision, Automation, Quality Management, Concept, Product Life Cycle.*

Обеспечение заданных чертежом требований к обработанному отверстию в ответственных деталях авиационной техники на операции окончательной обработки (рис. 1) при хонинговании зависит от множества факторов [1-6].

К их числу относят конструкцию обрабатываемой детали (толщина стенки цилиндра и наличие на нем ребер жесткости), тип отверстия («глухое» или сквозное), вид и величину исходного отклонения формы отверстия, способ закрепления детали и конструкцию зажимного приспособления, а также конструкцию хонинговальной головки (шарнирная или жесткая, число брусков в ней, их длину), характеристику алмазных брусков, режимы хонингования, способ радиальной подачи брусков, время реверса хода головки и пр.

Кроме того, значение имеет размер партии обрабатываемых деталей, для которой обеспечивается стабильность выполнения требований по точности отверстия, обработанных одним комплектом брусков без их правки [4, 5].

При этом, как показывают результаты исследования [1, 3, 4, 6], в различных случаях сочетание указанных факторов может привести к противоположным результатам по точности и времени обработки. Так, например, исследованиями, установлено, что наилучшая длина брусков для обработки «глухого» отверстия иная, чем для обработки сквозного отверстия, у которого есть отклонение от прямолинейности оси в пространстве при одинаковой величине отклонения от цилиндричности. При хонинговании тонкостенных деталей длину брусков выбирают в зависимости от числа и расположения ребер жесткости, а также от способа закрепления заготовки.

Влияние на результаты хонингования большого числа факторов делает автоматизацию этого процесса проблематичной. В настоящее время

автоматизация хонингования в основном сведена к применению устройств адаптивного активного контроля окончательного размера обрабатываемого отверстия или применению в хонинговальных станках однокоординатной системы ЧПУ. Это либо контроль линейного износа алмазных хонинговальных брусков, либо управление ходом хонинговальной головки. При этом важным фактором обеспечения точности обработки хонингованием является надежность системы активного контроля.

По изложенным причинам функция управления обеспечением точности обрабатываемого отверстия при хонинговании лежит на рабочем-станочнике, а результаты обработки зависят от его опыта, навыков и умений (рис. 1).

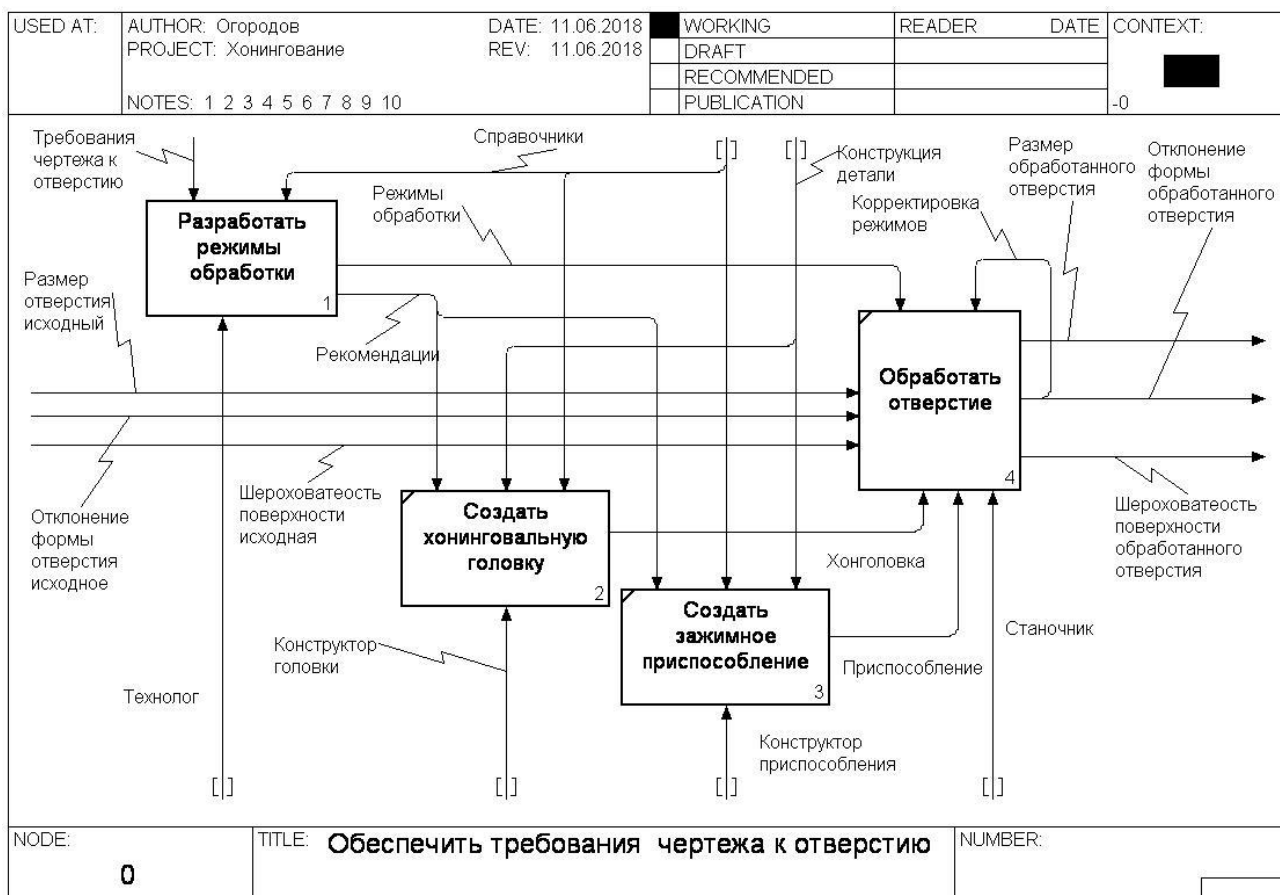


Рис. 1. Обеспечение требований чертежа к обрабатываемому отверстию

Поэтому проблема автоматизация управления качеством обрабатываемых отверстий при хонинговании остается, по-прежнему, актуальной. Однако наличие большого числа взаимозависимых факторов, влияющих на точность обрабатываемого отверстия, недоступность зоны обработки для контроля делают непосредственное управление процессом хонингования проблематичным.

В этой связи в предлагаемой концепции управления качеством обработки отверстий [7, 8] при хонинговании основное место отведено компьютерному моделированию формообразования обрабатываемого отверстия (рис. 2) с

помощью имитационной модели хонингования [9-12], позволяющей учесть весь комплекс факторов, оказывающих влияние на результаты обработки.

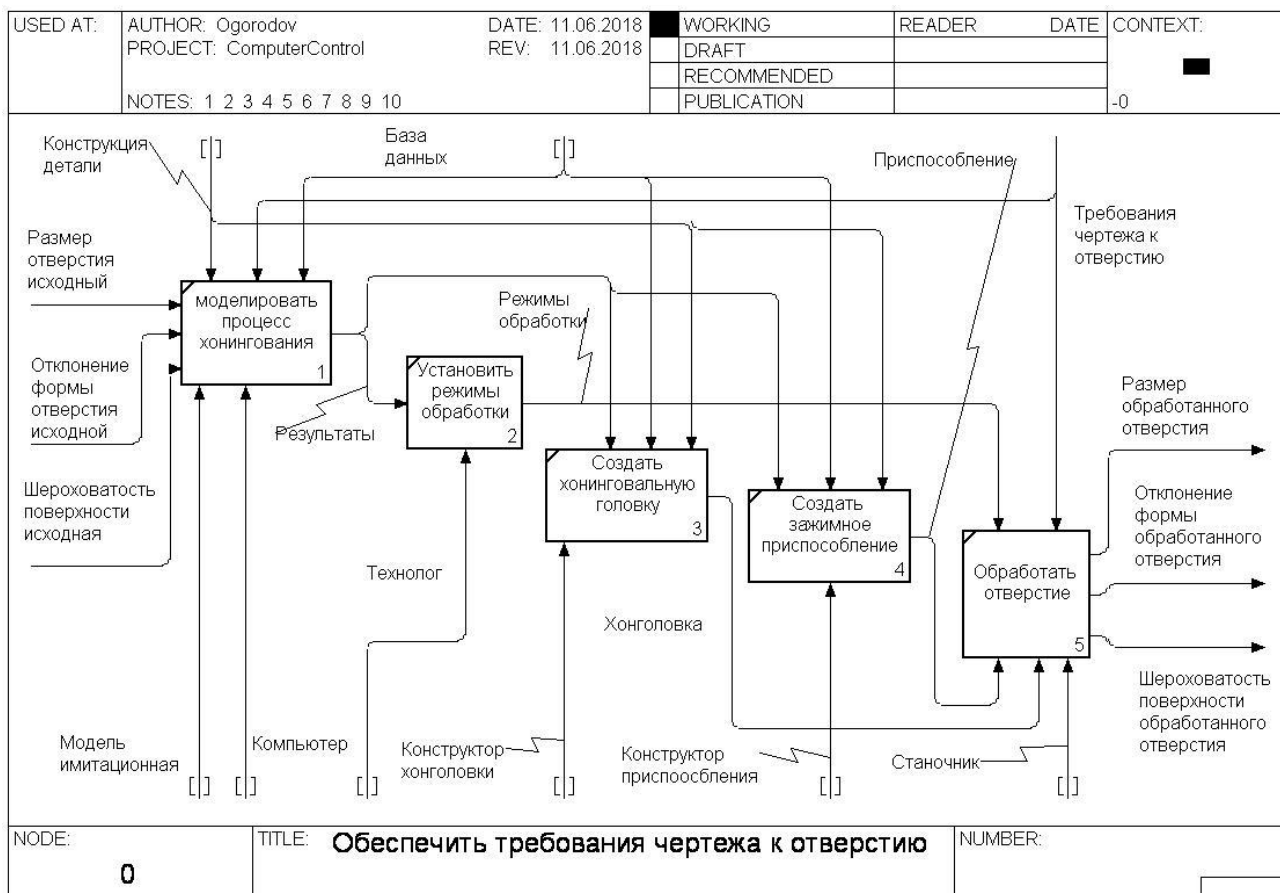


Рис. 2. Компьютерное обеспечение качества при хонинговании

В результате расчетов для заданной конструкции заготовки определяется схема хонингования, выбирается из базы данных способ закрепления, формулируются данные для проектирования зажимного приспособления, а затем для исходного отклонения формы обрабатываемого отверстия и размера партии деталей вырабатываются рекомендации по конструкции хонинговальной головки, число её брусков, их ширины и длины.

Данные об исходных шероховатости обрабатываемого отверстия и отклонении его формы, которые получены на предшествующей хонингованию операции, материале заготовки позволяют рассчитать оптимальный режим резания: скорости вращательного и возвратно-поступательного движений, подобрать время задержки хонинговальной головки в крайних положениях отверстия при реверсе её поступательного движения, величину перебега брусков за край отверстия, определить значение радиальной подачи брусков, выбрать их характеристику. Знание размера партии обрабатываемых деталей позволяет на стадии моделирования определить периодичность правки применяемых алмазных брусков.

Сам процесс хонингования партии деталей предлагается начинать с контрольной обработки случайным образом выбранного типового образца, по результатам которой (отклонение формы отверстия, времени обработки, величине снятого припуска) при необходимости вносятся коррективы в модель формообразования и уточняются режимы хонингования.

Информация, полученная по итогам обработки всей партии деталей, пополнит имеющуюся базу знаний и будет использована при технологической подготовке к хонингованию других деталей.

Выводы

На основе процессного подхода предложена концепция компьютерного управления точностью отверстий при хонинговании, основу которой составляет имитационная модель формообразования обрабатываемого отверстия, позволяющая позволяющей учесть весь комплекс факторов, оказывающих влияние на качество обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудояров Р. Г. Точность деталей машин при алмазном хонинговании. М.: Изд-во МАИ, 2002. 170 с.
2. Хонингование [монография] / [А. П. Бабичев, Ю. Н. Полянчиков, А. В. Славини др.]; под ред. А. П. Бабичева; М-во образования и науки Рос. Федерации; Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т; Донской гос. техн. ун-т. Волгоград: ВолгГАСУ. 2013. 245 с.
3. Лысенко Н. К. Шилова Ю. А. Технологическое обеспечение хонингования отверстий цилиндров малой жесткости // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4(3). С. 1104-1105.
4. Муратов К. Р., Гашев Е. А. Технологические методы повышения точности геометрической формы обрабатываемых отверстий при хонинговании // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. № 1(2). С. 402-404.
5. Муратов К. Р. Эффективный метод хонингования прецизионных сквозных отверстий // Современные организационные, технологические и конструкторские методы управления качеством. 2006. С. 70-72.
6. Курсин О. А. Повышение качества обработанной поверхности и снижение износа абразивного инструмента при хонинговании с возрастающей скоростью резания. автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01. Волгоград, 2009. 17 с.
7. Интегрированные системы управления качеством в автоматизированном производстве / А. Г. Лютов, А. Г. Схиртладзе, В. А. Огородов, Ю. В. Рябов, О. И. Чугунова; под общ. ред. А. Г. Лютова. М.: Машиностроение. 2015. 632с.
8. Управление качеством в автоматизированном производстве: учебник: в 2-х ч. / А. Г. Лютов, Р. Р. Загидуллин, А. Г. Схиртладзе [и др.]. Старый Оскол: ТНТ. 2012.
9. Огородов В. А. Имитационное моделирование процесса хонингования // СТИН. 2010. №12. С. 28-33.
10. Огородов В. А. Идентификация процесса хонингования // СТИН. 2007. №10. С. 37-40.
11. Огородов В. А. Повышение эффективности алмазного хонингования глухих отверстий // СТИН. СТИН. 2007. №11. С. 28-31.
12. Огородов В. А. Управление процессом алмазного хонингования // Вестник УГАТУ / Научный журнал Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2008. Т. 10, №1(26). С. 122-126.

Серегин А. А.

Seregin A.A.

aasdom@yandex.ru

Кравцов А. Г.

Kravtsov A.G.

teplo1955@mail.ru

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», Оренбург

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОГО КОНТУРА

IMPROVING THE ACCURACY OF PROCESSING COMPLEX CONTOUR PARTS

***Аннотация.** Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования, проведенного с целью вскрытия основных причин образования погрешностей деталей сложной формы. Решение данной задачи способствует повышению точности обработки деталей сложной формы как на станках с ЧПУ, так и на полуавтоматах с копировальными устройствами. Предложен новый метод повышения качества изделий, обрабатываемых на станках с ЧПУ.*

***Abstract.** The results of a theoretical and experimental study conducted to uncover the main causes of the formation of errors in complex-shaped parts are presented. The solution of this problem helps to improve the accuracy of processing parts of complex shapes on both CNC machines and semi-automatic machines with copiers. A new method for improving the quality of products processed on CNC machines is proposed.*

***Ключевые слова:** геометрическая точность, погрешность обработки деталей сложной формы, технологическая точность.*

***Keywords:** geometric accuracy, error of processing of parts of complex shape, technological accuracy.*

Задачи исследования. Кроме геометрической точности станка, на качество одной, отдельно взятой детали особое влияние оказывают быстропротекающие и медленные процессы, происходящие в механической системе станка. Именно эти процессы являются определяющими при оценке технологической точности станка методом обработки типовой детали (образца-изделия по ГОСТ 18097-93). Быстропротекающие процессы зависят от жёсткости станка и характера трения в его направляющих [1]. В сумме они определяют последствие системы механической станка. Медленные процессы связаны с износом направляющих [2] и, соответственно, также связаны с процессами трения. Таким образом, жёсткость и трение являются определяющими физическими факторами, определяющими точность обработки на «холодном» станке.

Наименее изученным вопросом является последствие механической системы станка. При этом необходимо отметить, что износ изменяет жёсткость станка и коэффициент трения в направляющих. Механическая система станка обладает нелинейными и замкнутыми свойствами. Поэтому нельзя говорить об

аддитивных свойствах процессов, происходящих в системе станка. При суммировании погрешностей обработки необходимо учитывать нелинейные компоненты, либо переходить к стохастическим величинам.

Теоретическая часть. Известно [3], что погрешность обработки деталей на станках с ЧПУ складывается из большого вариативного числа переменных: погрешность программирования; погрешность настройки станка; погрешность позиционирования; погрешность автоматической смены инструмента; геометрическая погрешность, возникающая от непрямолинейности, непараллельности и неперпендикулярности векторов перемещения исполнительных узлов станка; погрешность от упругих смещений; погрешность от быстропротекающих процессов; процессов, протекающих со средней скоростью; погрешность от медленно протекающих процессов. Необходимо учесть, что основная масса погрешностей является случайными величинами, изменяется во времени и имеет свойство векторов.

Анализ процесса формирования перечисленных погрешностей позволил разработать модель точности обработки на станках с ЧПУ. С помощью полученной модели определены математические зависимости, связывающие показатели технологической точности с параметрами станка и обработанных изделий. Рассмотрим основные блоки модели.

Технологическая точность станка. Геометрическая точность технологической системы – это ожидаемые погрешности готовых изделий. Её связь с технологической точностью носит вероятностный характер. Для вскрытия этой связи необходимо разделить систематические и случайные погрешности, характеризующие технологический процесс. Решение этой задачи возможно сглаживанием полиномом по методу наименьших квадратов, или выделением собственно случайной составляющей – метод скользящей средней. В данной работе используем дисперсионный метод разделения суммарной погрешности обработки, для которого разработаны критерии оценки систематической и случайной составляющих погрешности обработки.

Для этого используем правила, известные из основ технологии машиностроения. Используя формулы для анализа многомерных данных, получим функцию распределения $\Delta(R_i)$ случайного гипервектора погрешности размеров R_i партии деталей для заданного промежутка времени t , которое изменяется от $t=0$ до $t=T$ (T – трудоёмкость изготовления партии деталей):

$$\Delta(R_i) = \frac{1}{\sigma_R^i(t)\sqrt{2\pi}} \int_{\Omega} \frac{1}{\sigma_R^i(t)} \exp \left\{ - \sum_{i=1}^N \frac{[R_i - m_R^i(t)]^2}{2\sigma_R^{i2}(t)} \right\} dt, \quad (1)$$

где Ω – область существования размеров R_i , её размерность равна N ; $m_R^i(t)$ – функция, характеризующая изменения во времени систематических факторов

(износ инструмента, деталей оборудования и станочного приспособления и т.д.) R_i -х размеров; $\sigma^i_R(t)$ – функция, характеризующая изменение мгновенного поля рассеивания R_i -х размеров. В знаменателе (1), перед знаком тройного интеграла происходит умножение показателя $\sigma^i_R(t)$ (i -й индекс у m и σ обозначает номер размера).

Рассмотрим компоненты гипервектора $\Delta(R_i)$ как функцию случайного аргумента t . Для характеристики доли систематической составляющей, вызванной изменением функции $m^i_R(t)$, количественной оценки доли случайной составляющей от изменения функции $\sigma^i_R(t)$ и доли собственно случайной составляющей, вызванной постоянной составляющей функции $\sigma^i_R(t)$, в общей погрешности обработки введем следующие безразмерные коэффициенты:

$$\xi_m^2 = \sigma^2 \{m^i_R(t)\} \cdot \lambda_R; \quad (2)$$

$$\xi_\sigma^2 = \sigma^2 \{\sigma^i_R(t)\} \cdot \lambda_R; \quad (3)$$

$$\xi_M^2 = M^2 \{\sigma^i_R(t)\} \cdot \lambda_R, \quad (4)$$

где $\lambda_R = 1/\sigma^2_R$ – оператор уравнений расчёта коэффициентов. Каждая из строк (2), (3), (4) представляет собой систему из N уравнений (по одному на каждый индекс i).

Основным показателем, определяющим величину систематической составляющей гипервектора погрешности, является коэффициент, рассчитанный по уравнению (2). Коэффициент, определяемый по уравнению (3) описывает изменение случайной составляющей гипервектора погрешности изготовления во времени, а уравнение (4) даёт значение коэффициента, характеризующего стабильность процесса обработки. Коэффициент (4) является комплексным показателем процесса обработки. Он объединяет в себе показатели изменения математического ожидания величины погрешности детали и изменение среднего квадратичного отклонения.

При практической реализации приведённого выше алгоритма установлено, что для практических расчетов можно рассматривать изменение погрешностей по линейной зависимости.

Объекты исследования. В качестве объектов проводимых исследований были выбраны многоцелевой токарный обрабатывающий центр ST–10Y и фрезерно-расточной станок ТМ–1Р производства фирмы HaasAutomation, а также станок 400V Стерлитамакского завода ООО НПО «Станкостроение» компании "СТАН". Профиль обработанной поверхности проверяли с точностью до 0,001 мм на координатно-измерительной машине модели ХО 55 ТМ 1 производства фирмы Wenzel.

Проверку зависимостей (1) – (4) производили при многократной обработке поверхностей, профилированных трансцендентными спиралями.

Результаты эксперимента. Эмпирическая проверка работы станков показала, что погрешность может достигать значений, превышающих допуск на изготовление спирали от 1,5 до 2 раз.

Наиболее важным результатом считаем исследование явления последействия упругой системы станка. В ходе проведения экспериментов отмечено, что последействие системы станка проявляется уже через 0,2 секунды после начала обработки и ее можно выявить не только при прекращении подачи, но и при изменении ее величины и направления.

Перечень мероприятий для повышения точности включает следующие пункты:

1. Оценка состояния технологической системы станка по результатам испытаний на точность отработки программы и проверки на жёсткость.

2. Контроль состояния станка на основе анализа технологической точности обработки. В качестве математического обеспечения здесь выступают полученные зависимости технологической точности от геометрической.

3. Управление точностью обработки по результатам контроля за счёт коррекции программы для системы ЧПУ и изменения режимов обработки.

Выводы

1. Получены математические зависимости технологической точности станка от геометрической. Разработан алгоритм разделения систематических и случайных погрешностей обработки. Анализ эмпирических данных показывает, что доля систематической составляющей погрешностей обработки колеблется от 25 до 30 %.

2. Доказано, что погрешность обработки, связанная с последействием механической системы станка, находится в прямой связи с режимами обработки и комбинации направлений подачи исполнительных узлов при обработке поверхностей сложного контура. При условии неизменности инструмента, СОЖ и теплового состояния станка, последействие системы может составить от 36 до 58% в части случайной составляющей погрешности обработки поверхности сложного контура.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернянский П. М. Последействие механической системы станков / П. М. Чернянский // Вестник машиностроения. 2013. №1. С. 57-59.

2. Проников А. С. Надёжность машин / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. 592 с.

3. Игонин Г. А. Расчёт и баланс составляющих погрешности контурной обработки на фрезерных станках с ЧПУ / Г. А. Игонин, М. И. Коваль // Станки и инструмент. 1985. №6. С. 7-10.

Старочкина С. В.

Starochkina S. V.

Васильева М. А.

Vasilieva M. A.

www.marinochka-96.ru@mail.ru

Глухов И. А.

Glukhov I. A.

ivan9494@mail.ru

Институт технологии и организации производства (АО НИИТ), Уфа

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ НОВОГО ПЕРСПЕКТИВНОГО КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ РЕАКЦИОННО-СПЕЧЕННОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ

RESEARCH OF THE PROCESS OF GRINDING OF A NEW PERSPECTIVE CERAMIC MATERIAL BASED ON REACTION-SINTERED SILICON CARBIDE

Аннотация: В работе проведено исследование по шлифованию реакционно-спечённого карбида кремния алмазным кругом на металлической связке. Рассмотрен вопрос оценки влияния отдельных параметров режимов обработки на исследуемый параметр шероховатости (R_a). Получены эмпирические зависимости шероховатости обработанной поверхности от продольной подачи и глубины резания.

Abstract: In this work, a study was carried out on grinding reaction-sintered silicon carbide with a diamond wheel on a metal bond. The issue of assessing the influence of individual parameters of processing modes on the investigated roughness parameter (R_a) is considered. Empirical dependences of the roughness of the machined surface on the longitudinal feed and on the depth of cut have been obtained.

Ключевые слова: плоское шлифование, реакционно-спечённый карбид кремния, алмазные круги, шероховатость.

Keywords: flat grinding, silicon infiltrated silicium carbide, diamond wheels, roughness.

В настоящее время совершенствование газотурбинных двигателей (ГТД) требует постоянного проведения научно-исследовательских работ в области разработки новых конструкционных материалов, условия работы которых существенно ужесточаются в связи с требованиями повышения технико-эксплуатационных характеристик двигателей. Детали горячей части ГТД находятся под действием высоких температур и значительных знакопеременных нагрузок. При этом только в первых ГТД рабочие температуры материала перед турбиной составляли $700^{\circ}\text{C}\dots 800^{\circ}\text{C}$ и в дальнейшем значительно повысились, достигнув $1050^{\circ}\text{C}\dots 1100^{\circ}\text{C}$.

Перспективными материалами для изделий авиационной промышленности являются тугоплавкие неметаллические соединения, такие как карбиды бора и кремния, алюминия и кремния, для которых характерны высокие эксплуатационные температуры, прочность, коррозионная стойкость в агрессивных средах. Благодаря развитию методов реакционного спекания,

появилась возможность получать на основе реакционно-спеченного карбида кремния высокопрочные и термостойкие материалы (SiSiC).

В ходе выполнения работы проводилось определение рациональных режимов резания реакционно-спеченного карбида кремния (SiSiC) путем исследования влияния технологических параметров (глубины, продольной и поперечной подач) на шероховатость обработанной поверхности (Ra) и качество обработанной поверхности (отсутствие сколов, трещин, осыпи, прижогов и т.п.) при шлифовании алмазным кругом на металлической связке [1].

При проведении исследований по шлифованию керамического материала на основе реакционно-спеченного карбида кремния использовались образцы, представленные на рис. 1, параметры которых приведены в табл. 1.

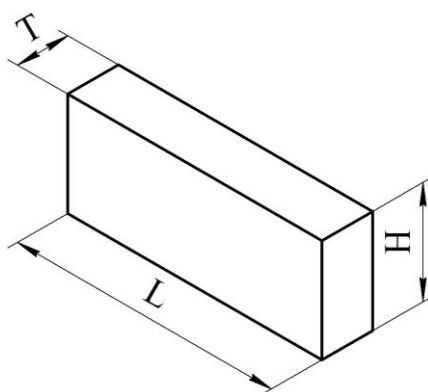


Рис. 1. Эскиз образца для проведения экспериментов

Таблица 1

Весовые и габаритные параметры исследуемых образцов

№ образца	Масса, г	Габаритные размеры, мм		
		L	H	T
1	98,4	74,91	30,43	14,26
2	105,37	74,89	30,51	14,98
3	103,5	74,89	30,50	14,70
4	106,04	74,90	30,51	15,32

Образцы изготовлены из реакционно-спеченного карбида кремния (SiSiC) по ТУ 1915-015-2304285-2009, который является двухфазным конструкционным керамическим материалом.

При проведении экспериментов в данной работе использовался изготовленный по ТУ 3970-003-07545719-2005 алмазный шлифовальный круг на металлической связке: 1A1 200x10x5x32 AC32 315/250 100 M2-01.

Эксперименты проводились на модернизированном плоскошлифовальном станке 3Б71М, реализующем технологическую схему плоского шлифования, представленную на рис. 2.

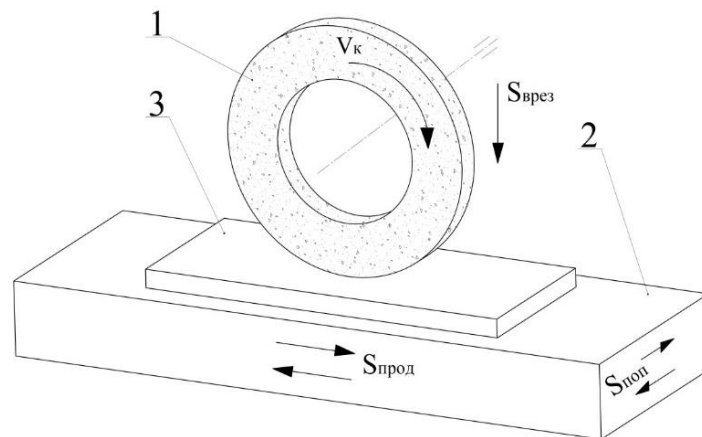


Рис. 2. Схема плоского шлифования:

1 – шлифовальный круг; 2 – стол шлифовального станка; 3 – заготовка

В качестве контрольного инструмента использовался профилометр MarSurf PS1 для измерения шероховатости обработанной поверхности.

Профилометр MarSurf PS1 предназначается для измерения параметров шероховатости поверхности изделий, плоскость которых в сечении измерения представляет линию. На рис. 3 представлен внешний вид прибора.



Рис. 3. Прибор для измерения шероховатости поверхности MarSurf PS1

С целью увеличения достоверности определения влияния отдельных параметров режимов обработки на исследуемую функцию Ra проводились серии однофакторных (классических) экспериментов, определялась фактическая зависимость $Ra = f(S_{\text{прод}})$, $Ra = f(t)$. Значение поперечной подачи выбиралось на основании справочных данных [2].

Проводилась серия экспериментов с целью выявления зависимости (рис. 4) шероховатости от глубины резания при трех различных значениях продольной подачи: $S_{\text{прод}} = 100$ мм/мин, $S_{\text{прод}} = 300$ мм/мин, $S_{\text{прод}} = 600$ мм/мин.

Из графика, представленного на рис. 4, видно, что с увеличением глубины резания до определенной величины, а именно 0,1 мм, шероховатость

поверхности улучшается, с дальнейшим увеличением глубины резания наблюдается тенденция роста величины шероховатости. Зависимости шероховатости при изменении величины глубины резания при различных значениях продольных подач – тождественны, что указывает на сохраняющийся вид зависимости $Ra = f(t)$.

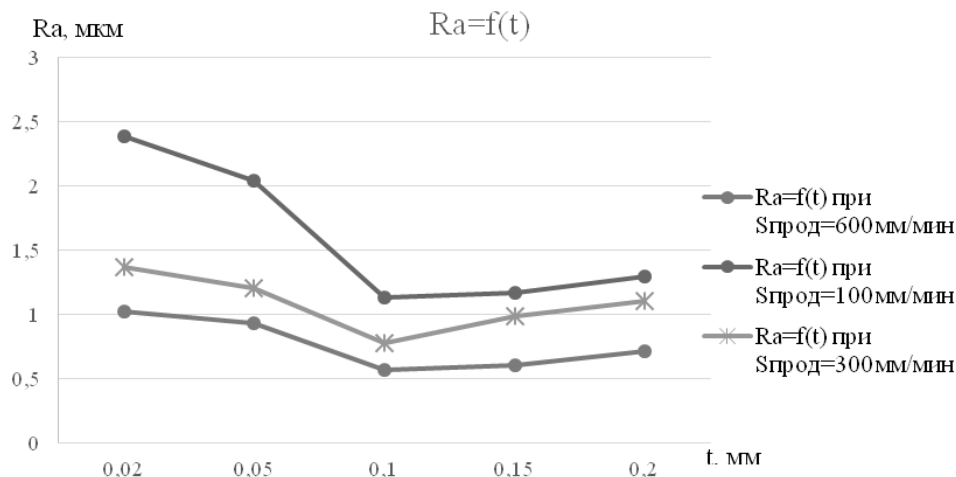


Рис. 4. Зависимость шероховатости от глубины резания

Так же проводилась серия экспериментов для определения зависимости (рис. 5) шероховатости от продольной подачи.

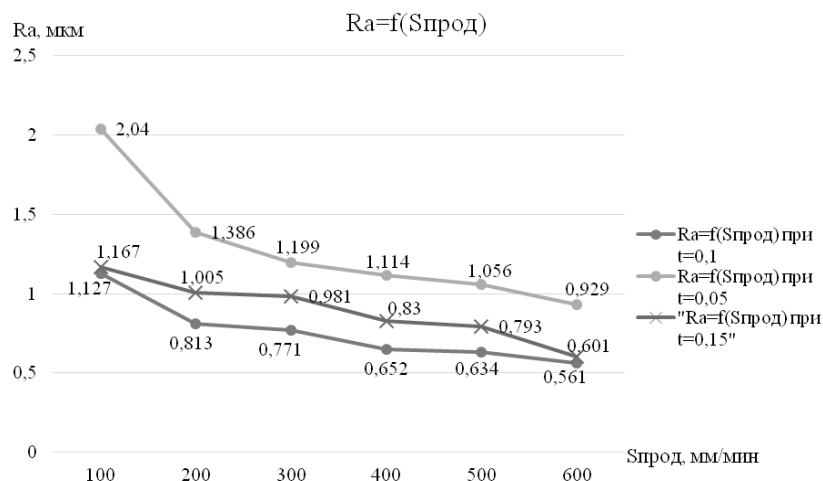


Рис. 5. Зависимость шероховатости от продольной подачи

На рис. 5 видно, что с увеличением продольной подачи величина шероховатости обработанной поверхности уменьшается. Это можно объяснить тем, что при увеличении продольной подачи повышается энергия взаимодействия алмазного шлифовального круга с обрабатываемым образцом, вследствие чего возможно возникновение диспергирования материала. Так же можно сделать вывод, что получившиеся кривые зависимости шероховатости от глубины резания при изменении величины продольной подачи и сохранении прочих условий – тождественны.

На основе проведённых серий экспериментов, зависимость показателя шероховатости (Ra) от величины продольной подачи ($S_{\text{прод}}$) и глубины обработки (t) может быть определена и представлена в виде сложно-фасонной поверхности, представленной на рис. 6, определяющей величину шероховатости от двух аргументов.

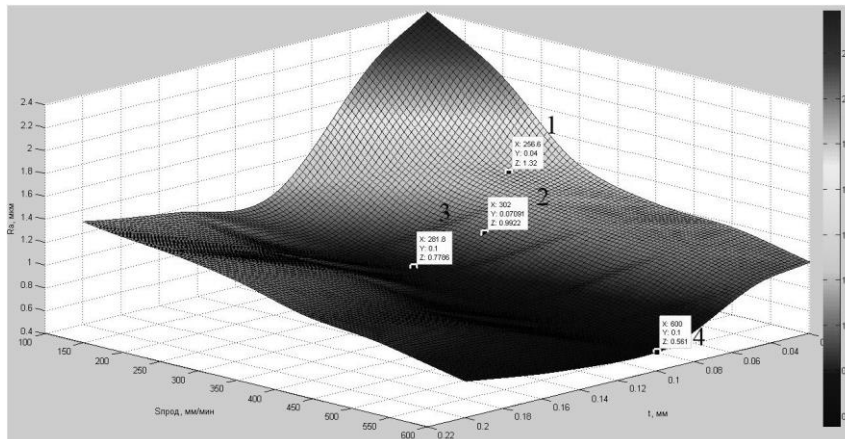


Рис. 6. Поверхность зависимости шероховатости от величины продольной подачи ($S_{\text{прод}}$) и глубины обработки (t)

Полученный график функции, построенный в трёхмерных координатах, позволяет решить обратную задачу, а именно: при заданной величине шероховатости (Ra) определить сочетание переменных продольной подачи ($S_{\text{прод}}$) и глубины обработки (t), обеспечивающих заданную шероховатость обработанной поверхности.

Выводы

С увеличением продольной подачи требуется увеличение количества проходов по строке для полного снятия припуска, что обуславливается увеличением отжатия круга от обрабатываемой детали в виду податливости технологической системы при возрастании нагрузок во время работы.

С увеличением глубины резания величина шероховатости обработанной поверхности уменьшается, что также может быть связано с повышением энергии взаимодействия обрабатываемого материала с алмазным шлифовальным кругом, в следствие чего появляется эффект диспергирования материала.

С уменьшением значения поперечной подачи величина шероховатости обработанной поверхности также уменьшается. Такое влияние поперечной подачи на величину шероховатости обработанной поверхности можно объяснить тем, что при малых значениях поперечной подачи появляется эффект выглаживания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрьев В. Л., Старочкина С. В. Абразивный инструмент на металлической связке для шлифования труднообрабатываемых материалов. М.: Машиностроение, 2012. 138 с.
2. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.

Домнин П. В.

Domnin P. V.

_domnin@rambler.ru

ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет
«СТАНКИН», Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ ЗАДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

STUDY OF THE SHAPE OF THE BACK SURFACE OF HOBS FOR PROCESSING SHAPED SCREW SURFACES

Аннотация. Статья посвящена процессу проектирования и методике исследования формы задних поверхностей фасонных червячных фрез для обработки винтовых поверхностей с использованием современного контрольно-измерительного оборудования.

Abstract. The article is devoted to the design process and research methods of the shape of the rear surfaces of shaped hob cutters for processing helical surfaces using modern control and measuring equipment.

Ключевые слова: червячная фреза, формообразование, винтовая поверхность, режущая кромка.

Keywords: hob cutter, shaping, helical surface, cutting edge.

На предприятии ООО "ИНСТРУМЕНТ" (г. Подольск) была поставлена задача по отработке технологии изготовления партии концевых фрез, в рамках которой операция обработки винтовых стружечных канавок выполняется по методу обкатки специальной червячной фрезой.

Для отработки процесса формообразования винтовых канавок была выбрана концевая фреза: диаметр $D = 19$ мм, диаметр сердцевины $d = 11$ мм число зубьев $z = 5$, углом наклона винтовой канавки $\omega = 20^\circ$, передний угол $\gamma_{\text{п}} = -5^\circ$, угол спинки зуба $\alpha_1 = 30^\circ$.

На рис. 1 показан профиль концевой фрезы в торцевом сечении.

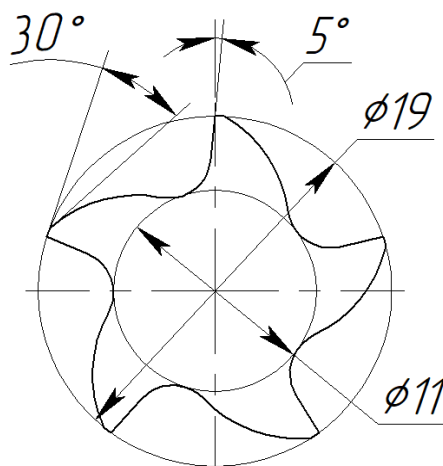


Рис. 1. Профиль фрезы в торцевом сечении

Основной и наиболее сложной задачей при проектировании червячных фрез, является задача определения профиля зубьев.

Для определения профиля была использована разработанная методика [1, 3], в рамках которой использовалась общая модель решения задачи профилирования в среде математического моделирования Mathcad.

Для формирования исходных данных – профиля канавки в торцевом сечении в виде массива точек использовалась разработанная параметрическая математическая модель [2]. Далее задаются дополнительные параметры, которые характеризуют обрабатываемую винтовую поверхность и параметры установки инструмента на станке относительно детали: угол наклона винтовой линии ($\omega = 20^\circ$), угол скрещивания ($\varepsilon = 73^\circ$), радиус начального цилиндра червячной фрезы ($R_n = 39,55$ мм), радиус начального цилиндра концевой фрезы (обрабатываемой поверхности) ($r_n = 10,75$ мм), число заходов червячной фрезы ($g=1$).

В результате расчета модель сформировала множество точек, которые являются винтовыми проекциями винтовых линий направляющих обрабатываемой поверхности [4, 5, 6]. Искомым профилем является огибающая этого множества точек (рис. 2).

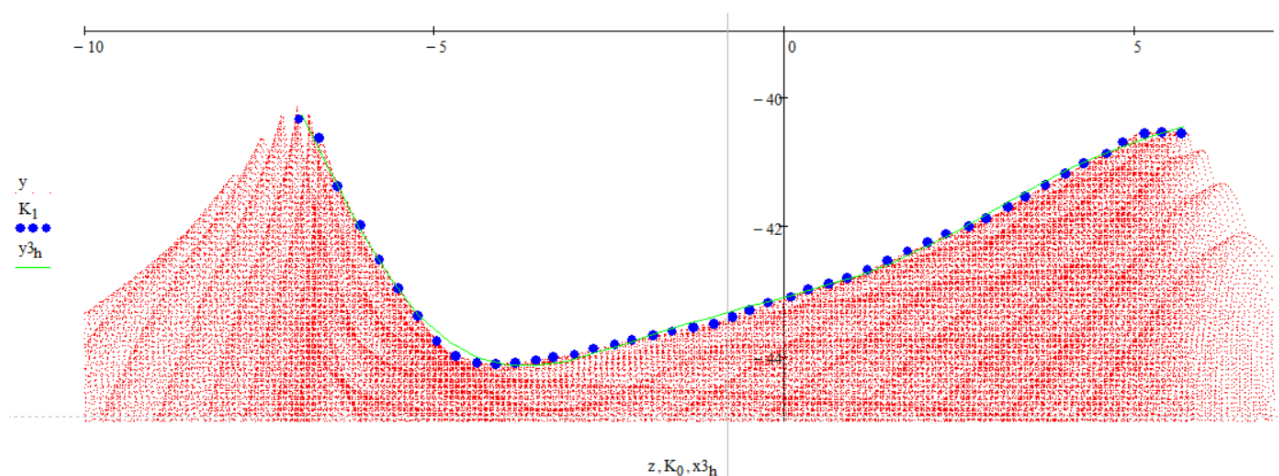


Рис. 2. Результат решения прямой задачи профилирования специальной червячной фрезы

Далее полученные данные были экспортированы в среду графического моделирования T-flex CAD. Был сформирован профиль червячной фрезы в осевом и нормальном сечениях (рис. 3).

Проектирование конструктивных элементов проводилось исходя из оборудования, на котором предполагалось использовать фрезы, в частности для использования на зубофрезерном станке фирмы PFAUTER RS00S. Спроектированная червячная фрезы была изготовлена на заводе ПАО «МИЗ» (рис. 4).

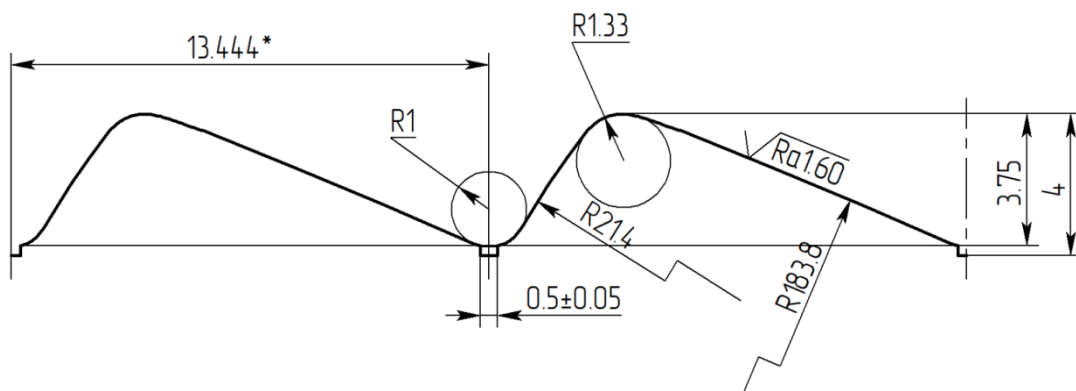


Рис. 3. Профиль в нормальном сечении



Рис. 4. Изготовленная специальная червячная фреза для обработки винтовых стружечных канавок концевых фрез

Изготовленная фреза была проконтролирована на участке технического контроля компании GALIKA на высокоточной координатно-измерительной машины фирмы GLOBAL (модель EVO) (рис. 5).

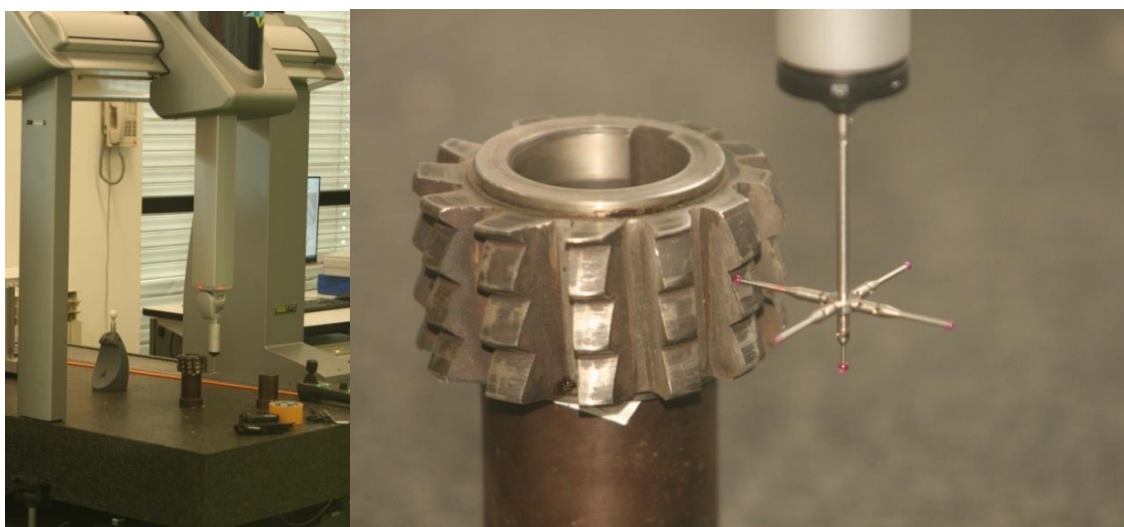


Рис. 5. Процесс сканирования режущей кромки на координатно-измерительной машине GLOBAL EVO

Были проконтролированы основные конструктивные параметры фрезы в соответствии с ГОСТ 9324-2015 (ISO 2490:2007, ISO 4468:2009). Наибольшее внимание было уделено контролю профиля зубьев червячной фрезы. Контроль профиля осуществлялся на координатно-измерительной машине GLOBAL EVO с помощью программного комплекса Curve Analyzer фирмы Hexagon.

Процедура контроля профиля производилась путем непрерывного сканирования фасонной режущей кромки зуба щупом с точностью измерений до 1 микрона. В результате такого контроля формируются три линейных массива данных с координатами (по трем осям соответственно) множества точек, которые принадлежат режущей кромке. Процесс контроля представлен на рис. 5, а результат контроля одного зуба приведен в виде программно-сформированного отчета на рис. 6.

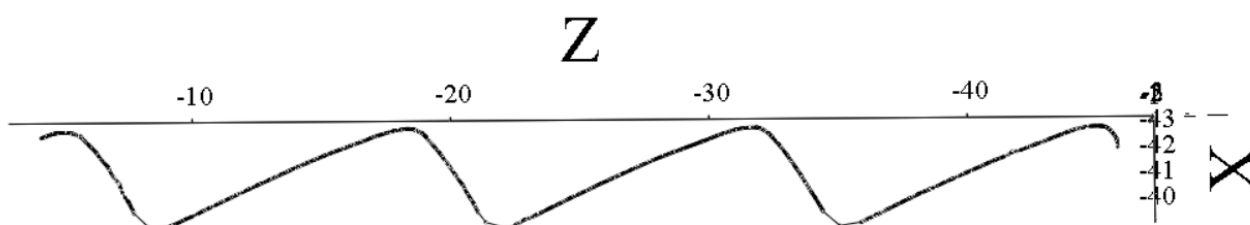


Рис. 6. Визуализация точек профиля зуба после первой переточки

Таким образом были проконтролированы все зубья червячной фрезы. Массивы координат полученных точек были экспортированы в виде файла данных и были смоделированы в трехмерном пространстве в среде Mathcad (рис. 7). Данный массив точек может быть использован в качестве исходных данных для последующих исследований в рамках разработки метода решения обратной задачи профилирования при обработке фасонных винтовых поверхностей инструментом, работающим по методу обкатки.

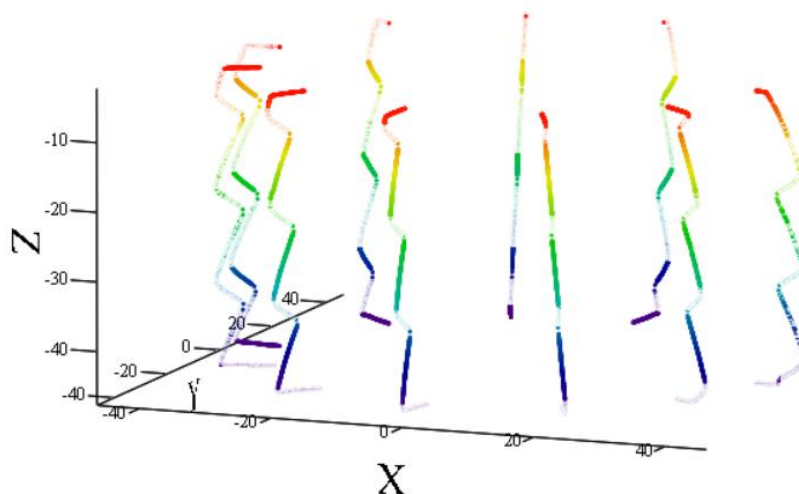


Рис. 7. Трехмерная модель массива точек режущих кромок червячной фрезы в среде Mathcad

С целью исследования влияния количества переточек на искажение формы профиля зуба специальной червячной фрезы было выполнено 10 переточек одного зуба.

Переточка производилась в лаборатории «Технологий изготовления и контроля режущего инструмента» МГТУ «СТАНКИН» на универсальном шлифовально-заточном 4-х координатном станке с ЧПУ U-95 (фирма производитель LTF, Италия).

Фреза была закреплена на оправке с посадочным диаметром 40h7. Оправка была установлена в центрах, один из которых был установлен в поворотную головку (управляемую ось А), вращение осуществлялось с помощью поводкового механизма.

Станок позволяет устанавливать угловое положение шлифовальной головки по двум осям (вертикальной и горизонтальной). Поворотом вокруг вертикальной оси был задан угол положения оси шлифовального круга, угол задавался в соответствии углу винтовой нарезки специальной червячной фрезы ($3^{\circ}6'$).

Для заточки использовался шлифовальный круг 12D9 100x25x20 33A F60 L 7 K. При каждой переточке снимался припуск равный 0,5 мм, режимы обработки:

- скорость резания – 31 м/с;
- число оборотов – 6000 мин⁻¹;
- скорость продольной подачи 6 м/мин;
- подача на глубину шлифования за один проход 0,02 мм;

Обработка производилась в масляной среде.

После каждой переточки производился контроль профиля путем сканирования режущей кромки на координатно-измерительной машине GLOBAL EVO. Сканирование производилось непрерывным движением щупа по режущей кромке зуба с фиксацией 1152 точек в системе координат инструмента, которая задавалась по оси посадочного отверстия и торцу буртика. Визуализация зафиксированных точек после первой переточки отражена на трехмерном графике на рис. 7. В результате проведения десяти экспериментов был получен общий массив точек из 11520 точек. Обработка полученных данных производилась в среде математического моделирования Mathcad.

Была сформирована модель, в которой полученные точки режущих кромок были собраны в поверхность – заднюю поверхность зуба фрезы на переточенном участке (рис. 8).

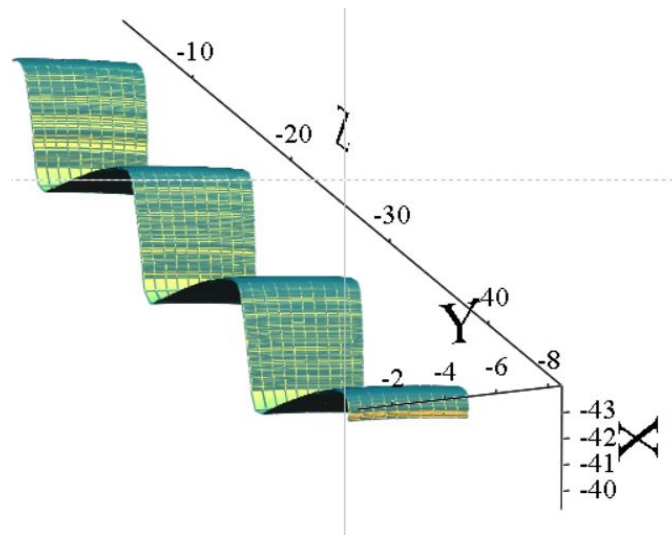


Рис. 8. Трехмерная визуализация в среде Mathcad общего массива зафиксированных точек режущих кромок после каждой переточки

Выводы

Полученные результаты позволяют исследовать пространственную форму режущей кромки с учетом числа переточек фрезы, оценивать изменение формы и суммарную погрешность путем сопоставления их с теоретически заданной формой кромки и формой, полученной при изготовлении новой фрезы, а в перспективе использовать эти данные при решении обратной задачи профилирования [7] с учетом погрешностей, которые были выявлены после переточек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Домнин П. В., Петухов Ю. Е. Численный метод профилирования червячной фрезы для обработки фасонной винтовой поверхности / В сборнике: Будущее машиностроения России. Сборник докладов Двенадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием). 2019. С. 41-44.
2. Домнин П. В. Математическое моделирование винтовой канавки концевой фрезы с помощью средств математического программирования в среде Mathcad / Петухов Ю. Е., Домнин П. В. // Вестник МГТУ Станкин. 2017. № 4 (43). С. 100-104.
3. Yu. E. Petukhov, P. V. Domnin . Determining worm-mill profiles / Russian Engineering Research. 2020. Т. 40, С. 283-286.
4. Petukhov, Y. E., Domnin, P.V. Numerical shaping method for hobbingtools / Russian Engineering Research. 2020. Т. 40, С. 76-78.
5. Петухов Ю. Е. Формообразование численными методами. М., Станкин, 2004 г. 200 с.
6. Домнин П. В. Математическая модель определения профиля червячных фрез / Петухов Ю. Е., Домнин П. В., Сяочуан Ч. // Вестник машиностроения. 2020. № 1. С. 10-13.
7. Петухов Ю. Е., Домнин П. В. Способ определения профиля обрабатываемой поверхности по известному профилю инструмента / В сборнике: Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы – перспективные направления научно-исследовательской деятельности молодых ученых и специалистов. сборник научных статей II международной молодежной научно-технической конференции: в 2 томах. 2016. С. 86-90.

Тагиров А. Ф.

Tagirov A. F.

ainurtagirov@mail.ru

Агзамов Р. Д.

Agzamov R. D.

vipt127@yandex.ru

Николаев А. А.

Nikolaev A. A.

nikolaev.aleksej95@gmail.com

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ИОННОЕ АЗОТИРОВАНИЕ ИМИТАТОРА СЕКТОРА МОНОКОЛЕСА ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT6

LOW-TEMPERATURE ION NITRIDING OF A MONOWHEEL SECTOR SIMULATOR MADE OF TITANIUM ALLOY VT6

***Аннотация.** Представлены результаты двух серий экспериментов по процессу низкотемпературного ионного азотирования имитатора моноколеса из титанового сплава VT6 в несамостоятельном сильноточном разряде и в тлеющем разряде. Приведены результаты измерения микротвердости по глубине модифицированного слоя. Представлены результаты остаточных напряжений в поверхностном слое образцов после низкотемпературного ионного азотирования.*

***Abstract.** The paper presents the results of two series of experiments on the process of low-temperature ion nitriding of monowheel simulator made of titanium alloy VT6 in a non-self-maintained high-current discharge and in a glow discharge. The results of measuring the microhardness along the depth of the modified layer are presented. The results of residual stresses in surface layer of the samples after low-temperature ion nitriding are presented.*

***Ключевые слова:** низкотемпературное азотирование, титановый сплав, микротвердость, остаточные напряжения.*

***Keywords:** Low-temperature nitriding, titanium alloy, microhardness, residual stresses.*

Введение

Титановые сплавы занимают важное место среди современных конструкционных материалов в лопаточном производстве [1, 2].

Лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) относятся к одним из ответственных деталей двигателя, определяющие его ресурс и эксплуатационную надежность. В настоящее время для новых поколений ГТД характерной особенностью является замена традиционно используемых дисков с лопатками на моноколеса с целью снижения массы конструкции двигателя. В авиадвигателестроении стоит проблема повышения прочностных характеристик лопаток компрессора [3].

Надежность и долговечность лопаток в значительной степени зависят от физико-химического и структурно-фазового состава, микрогеометрии и остаточных поверхностных напряжений. Остаточные напряжения в

поверхностном слое оказывают значительное влияние на сопротивление усталости деталей, работающих в условиях статических и знакопеременных нагрузок [3, 4].

В настоящее время формирование сжимающих остаточных напряжений на поверхности деталей решается различными методами, например, поверхностной пластической деформации (ППД) и ионной имплантации. Однако ионная имплантация ввиду своих возможностей не применима для обработки моноколес вследствие перекрытия межлопаточного пространства (возможна только обработка одиночных лопаток), а ППД может привести к изменению геометрических параметров деталей.

Для решения проблемы предлагается применить низкотемпературное ионное азотирование с целью сохранения высокого уровня механических свойств и формирования на поверхности остаточных напряжений сжатия.

Методика проведения исследования

В качестве объекта исследования были использованы лопатки из титанового сплава ВТ6, которые были собраны в специальной оснастке и представляли собой имитатор сектора моноколеса (рис.1).



Рис. 1. Имитатор сектора моноколеса

Исходя из результатов предыдущих работ [5, 6], были выбраны режимы обработки и проведены сравнительные эксперименты по низкотемпературному ионному азотированию имитатора моноколеса из титанового сплава ВТ6 в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде и в тлеющем разряде. Азотирование проводили при температуре 500 °С и при длительности процесса

$t = 1$ час. Эксперименты проводились на модернизированных установках ННВ-6,6-И1 и ЭЛУ-5М.

Измерения микротвердости по глубине азотированного слоя проводили по методу восстановленного отпечатка в соответствии с ГОСТ 9450-76 с помощью микротвердомера Struers Duramin-1/-2. Глубину упрочненного слоя определяли по кривой распределения твердости до значения твердости исходного материала.

Исследование микроструктуры образцов проводились с помощью оптического микроскопа Olympus GX-51.

Замер поверхностных остаточных напряжений осуществлялся на рентгеновском дифрактометре «ДРОН-4».

Результаты исследование и их обсуждение

Визуальный анализ показал, что после азотирования в тлеющем разряде лопатки сектора имитатора моноколеса приобрели равномерный золотистый оттенок, который свидетельствует об образовании на поверхности тонкого слоя монокристаллического нитрида титана [7]. На лопатках, обработанных в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде, наблюдаются цвета побежалости – «синева», которая образуется в результате локального повышения температуры в «зоне перекрытия» межлопаточного пространства (рис. 2б).

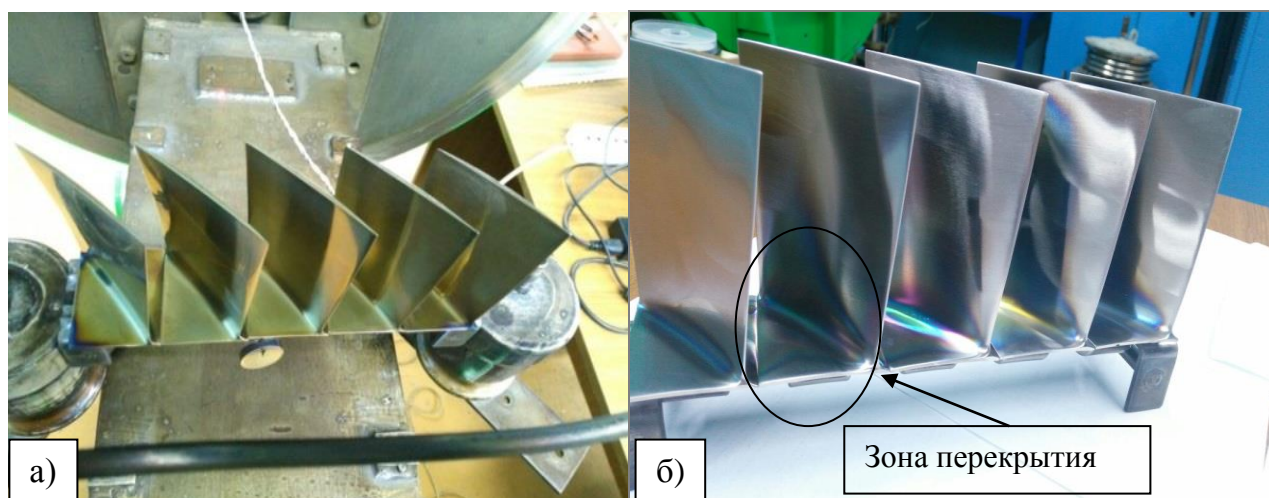


Рис. 2. Имитатор сектора моноколеса после ионного азотирования:
а) в тлеющем разряде; б) в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде

Для анализа микротвердости из пера лопаток были вырезаны образцы (рис. 3): образец №1 – из пера лопатки, обработанной в тлеющем разряде, образцы №2 и №3 – обработанные в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде (из разных зон).

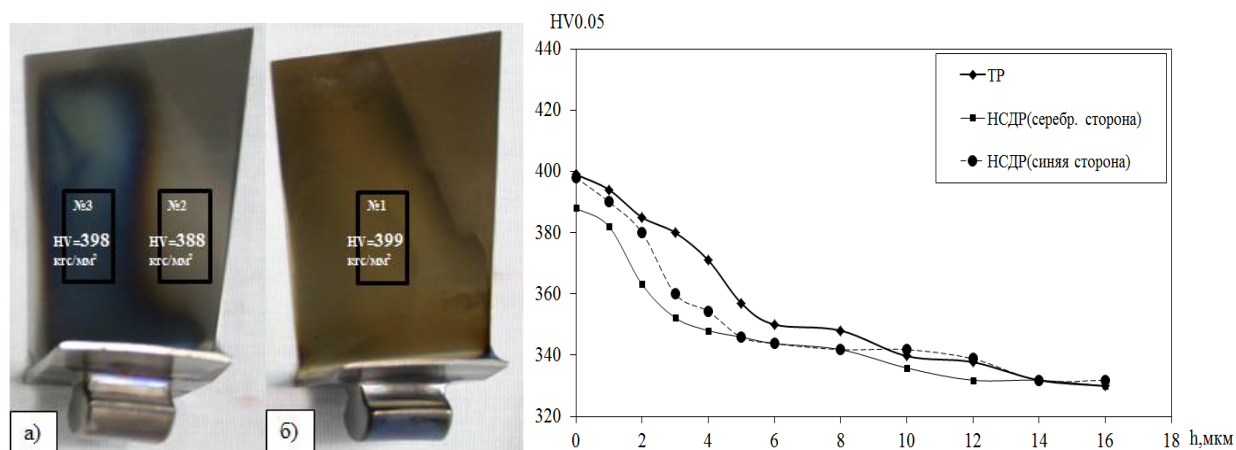


Рис. 3. Зоны вырезки образцов и изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя после ионного азотирования

Измерения микротвердости на поверхности образцов показали, что азотирование, как в несамостоятельном сильноточном разряде, так и в тлеющем разряде приводит к росту поверхностной микротвердости 11-13 %.

На графиках изменения микротвердости по глубине азотированного слоя видно, что с удалением от поверхности микротвердость на образцах снижается плавно, что свидетельствует о наличии протяженного слоя с повышенной твердостью. На рис. 3 видно, что глубина модифицированного слоя на образце, обработанном в тлеющем разряде, составляет около 12 мкм. Глубина модифицированного слоя на образцах, обработанных в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде, составила около 12 мкм в серебристой зоне и около 8 мкм в зоне «синевы», что является результатом локального термического воздействия и, возможно, образования химических соединений на поверхности.

С целью определения влияния низкотемпературного ионного азотирования на микроструктурные параметры, был проведен анализ структуры и расчет среднего размера зерна. На рис. 4 представлены оптические фотографии микроструктуры образцов, вырезанных из лопаток имитатора сектора моноколеса.

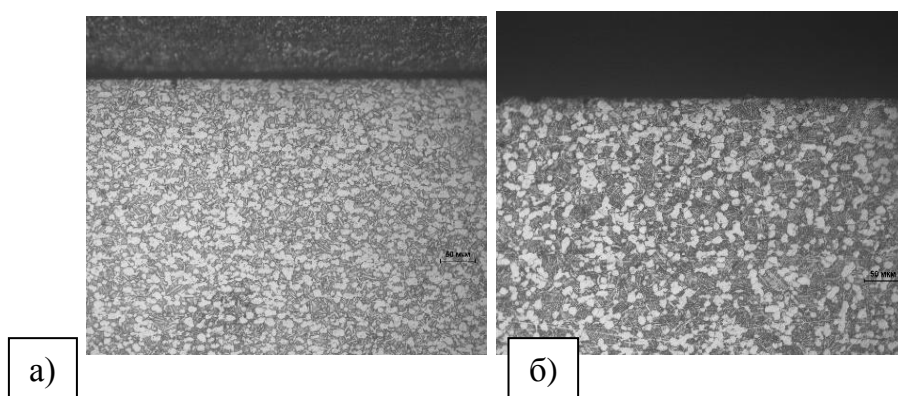


Рис. 4. Микроструктура лопаток после ионного азотирования: а) в тлеющем разряде; б) в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде

В результате низкотемпературного ионного азотирования к в тлеющем разряде, так и в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде микроструктура образцов представлена равноосными зернами α -фазы с пограничными выделениями β -фазы каплевидной и игольчатой, вытянутой формы. Средний размер зерна первичной α -фазы составляет около 9,7 мкм. Каких-либо изменений микроструктуры на поверхности и по глубине материала не наблюдается.

Известно, что с увеличением постоянных поверхностных растягивающих напряжений предел выносливости деталей уменьшается, постоянные сжимающие напряжения, наоборот, в большинстве случаев повышают выносливость. С целью определения влияния низкотемпературного ионного азотирования на поверхностные остаточные напряжения были проведены исследования рентгеноструктурным методом на образцах, вырезанных из пера лопаток имитатора сектора моноколеса со стороны спинки и корыта.

Значения поверхностных остаточных напряжений (ПОН) после ионного азотирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения остаточных напряжений на образцах

Вид обработки	Значения ПОН σ , кгс/мм ²	
	спинка	корыто
ИА в НСДР	-3,1	-1,2
ИА в ТР	-15,3	-16,9

Ионное азотирование в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде приводит к наведению на поверхности образцов незначительных сжимающих и около нулевых напряжений, которые не оказывают значительное влияние на повышение усталостной прочности.

В свою очередь на поверхности образцов, обработанных в тлеющем разряде, наблюдаются остаточные сжимающие напряжения величиной 15-17 кгс/мм², что благоприятно на повышении усталостной прочности.

Таким образом, из полученных результатов видно, что азотирование в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде имеет такой недостаток, как неоднородность генерируемой плазмы по объёму, что требует применения в данной системе дополнительного механизма вращения обрабатываемых изделий. Кроме того, данный процесс характеризуется определенной направленностью потока ионов, что усложняет обработку сложнопрофильных изделий.

Выводы

1. Из анализа результатов, полученных в данной работе, следует, что низкотемпературное ионное азотирование при температуре 500 °С различными методами приводит к увеличению поверхностной микротвердости на 11-13%.

2. После низкотемпературного ионного азотирования как в тлеющем разряде, так и в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде каких-либо изменений микроструктуры на поверхности и по глубине материала не наблюдается.

3. После ионного азотирования в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде на поверхности образцов возникают небольшие сжимающие напряжения. На поверхности образцов, обработанных в тлеющем разряде, наблюдаются сжимающие напряжения величиной 15-17 кгс/мм².

4. Низкотемпературное ионное азотирование в несамостоятельном сильноточном дуговом разряде не применимо для обработки сложнопрофильных деталей в виду возникновения неоднородности в межлопаточном пространстве. Предпочтительным для обработки лопаток моноколес и блисков, с целью формирования сжимающих остаточных напряжений, видится процесс низкотемпературного ионного азотирования в плазме тлеющего разряда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Improving the operating properties of parts of titanium alloys by surface hardening in high density plasma of glow discharge / Ramazanov K. N., Zolotov I. V., Khusainov Yu. G., Khusnutdinov R. F. // Journal of Physics: Conference Series 652(2015) 012055 doi:10.1088/1742-6596/652/1/01205

2. Zhecheva A., Malinov S., Sha W. Studying and modeling surface gas nitriding for titanium alloys // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 2007, Volume 59, Issue 6, pp 38-40.

3. Смыслов А. М., Смыслова М. К., Дубин А. И. О взаимосвязи релаксационной стойкости лопаток компрессора из титановых сплавов с параметрами сопротивления усталости // Вестник УГАТУ, 2012. Т.16, №1 (46). С. 24-29.

4. Смыслов А. М., Смыслова М. К., Дубин А. И. и др. Исследование влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости лопаток газотурбинного двигателя с учетом фрактографических признаков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2016, №1(37). С. 121-130.

5. Агзамов Р. Д., Тагиров А. Ф., Николаев А. А. Исследование влияния режимов низкотемпературного ионного азотирования на структуру и свойства титанового сплава ВТ6 // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2017. Т. 21. № 4 (78). С. 11-17.

6. Агзамов Р. Д., Тагиров А. Ф., Варданян Э. Л., Шулаков К. К. Исследование технологии низкотемпературного ионного азотирования титанового сплава ВТ6 // Вакуумная техника и технология. 2017. Т. 27. № 3. С. 6.1-6.4.

7. Ахмадеев Ю. Х., Гончаренко И. М., Иванов Ю. Ф., Коваль Н. Н., Щанин П. М. Азотирование технически чистого титана в тлеющем разряде с полым катодом // Письма в Журнал технической физики. 2005. Т. 31. № 13. С. 24-30.

Желтиков С. А.

Zheltikov S. A.

sergik-0072007@yandex.ru

Домнин П. В.

Domnin P. V.

_domnin@rambler.ru

Петухов Ю. Е.

Petukhov Yu. E.

u.petuhov@stankin.ru

ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет
«СТАНКИН», Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЦЕЛЬНЫХ МЕЛКОМОДУЛЬНЫХ ТВЁРДОСПЛАВНЫХ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

RESEARCH OF THE PROCESS OF FORMING CARBIDE SOLID FINE- MODULAR SOLID HOB CUTTERS BY USING THE TECHNOLOGY OF ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

Аннотация. В данной статье проводится исследование процесса формообразования мелко модульной твердосплавной червячной фрезы с использованием технологии электроэрозионной обработки.

Abstract. In this article is being conducted research of the process of forming solid fine-modular carbide solid hob cutter by using the electrical discharge machining technology.

Ключевые слова: червячная фреза, часовое зубчатое колесо, технология электроэрозионной обработки, формообразование, твёрдый сплав.

Keywords: hob cutter, clock wheel, EDM technology, shaping, carbide.

В рамках проведения была спроектирована специальная мелко модульная червячная фреза. Основные параметры червячной фрезы: наружный диаметр фрезы $D_e = 12$ мм; число зубьев $z = 12$; модуль $m = 0,0332$; угол наклона винтовой линии $\tau = 0^\circ 08'$. Точность изготовления профиля зубьев – в пределах 0,01 мм. Материал заготовки фрезы – твёрдый сплав ВК8 (рекомендуется для обработки латуни). Изготовление червячной фрезы производилось в инструментальном цехе Чистопольского часового завода «Восток».

Для изготовления фрез используются специальные заготовки из твёрдого сплава в форме трубы. Заготовка разрезается на отдельные кольца-заготовки при помощи электроэрозионного станка [1]. Затем на электроэрозионном станке с ЧПУ формируются стружечные канавки червячной фрезы.

Основным и наиболее сложным этапом проектирования специальных червячных фрез является определение профиля инструмента [2, 3]. Для этого была разработана параметрическая модель [4] зубчатого колеса для часовых механизмов. Для определения профиля использовался разработанный метод профилирования, основанный на поиске огибающей семейства винтовых

проекций винтовых линий на плоскость [5, 6, 7, 8]. На рис. 1 представлен результат компьютерного моделирования для решения задачи профилирования фрезы в виде массива винтовых проекций винтовых линий на плоскость.

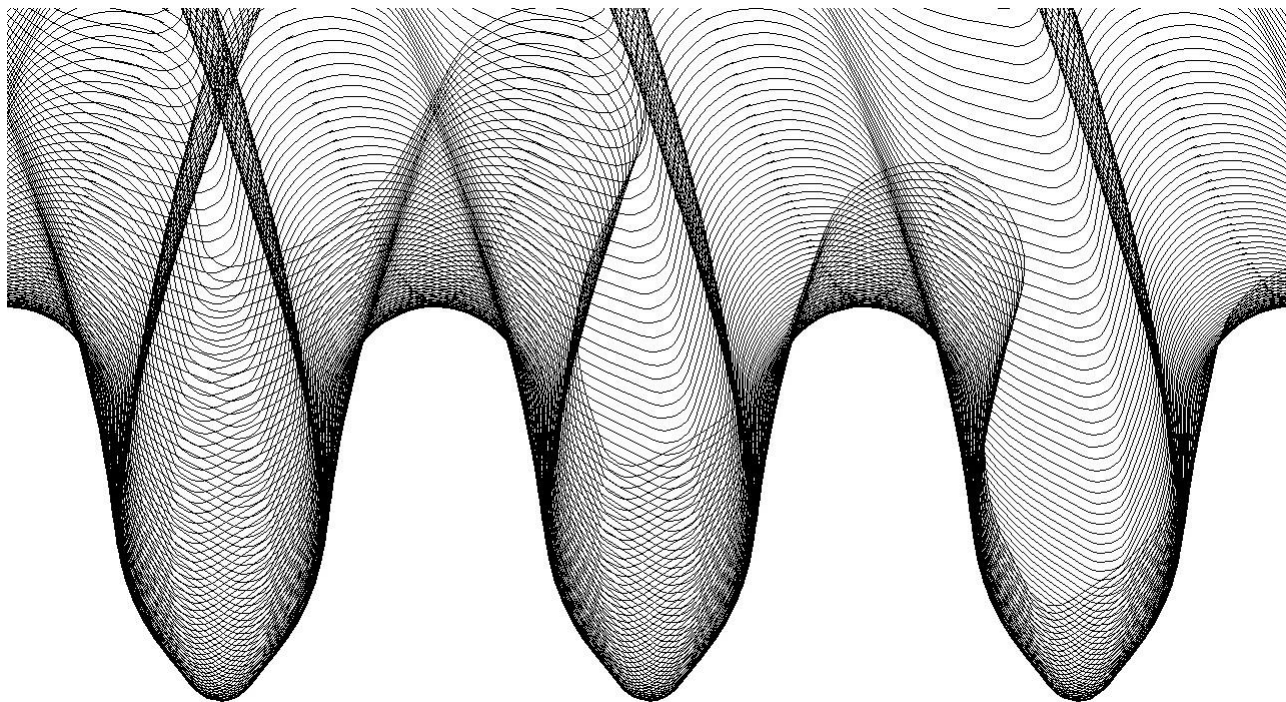
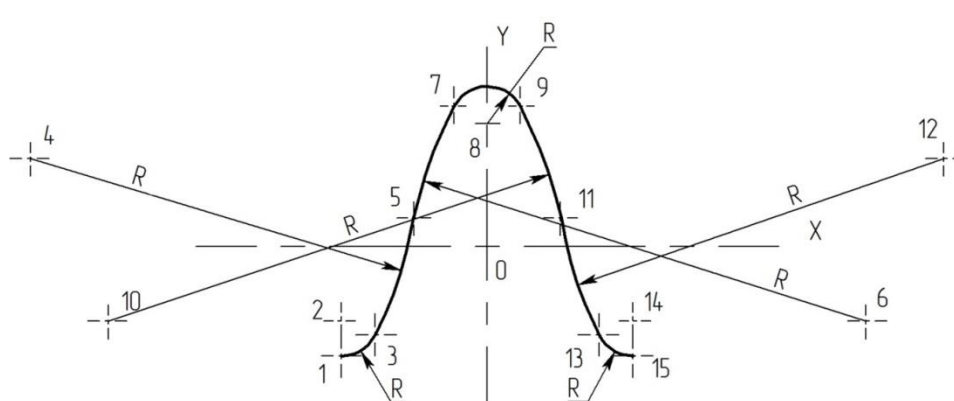


Рис. 1. Массив спроецированных винтовых линий на плоскость

Огибающая семейства кривых вычисляется в виде массива точек, число которых и точность поиска задается. Для изготовления инструмента второго порядка полученные точки профиля были аппроксимированы окружностями, и был сформирован чертеж профиля зуба фрезы (рис. 2). На рис. 2 приведены координаты опорных точек профиля в масштабе 100:1, точка 0 располагается на начальной прямой.



Nm	X	Y	R
0	100,000	100,000	
1	62,300	71,860	
2	62,300	80,820	4,940
3	71,100	77,240	
4	-17,950	122,75	50,000
5	119,130	107,390	
6	197,890	80,820	60,000
7	91,430	136,200	
8	100,000	131,740	4,830
9	108,570	136,200	
10	2,110	80,820	60,000
11	80,870	107,390	
12	217,950	122,390	50,000
13	128,900	77,240	
14	137,700	80,820	4,940
15	137,700	71,860	

Рис. 2. Аппроксимированный профиль для изготовления инструмента второго порядка

Был спроектирован и изготовлен инструмент второго порядка – специальный фасонный алмазный круг. После этого на специальном шлифовальном станке был сформирован профиль зубьев червячной фрезы с затылованной задней поверхностью [9].

Готовая цельная мелко модульная твердосплавная червячная фреза представлена на рис. 3.



Рис. 3. Цельная твердосплавная мелко модульная червячная фреза

В табл. 1 приведены полученные в ходе изготовления фрезы экспериментальные данные, которые демонстрируют влияние параметров электроэрозионной обработки на шероховатость обработанного поверхностного слоя инструмента из твёрдого сплава ВК8.

В табл. 2 представлены рекомендуемые режимы обработки твёрдого сплава ВК8 в зависимости от требуемого параметра шероховатости обработанной поверхности червячной фрезы.

Таблица 1

Влияние параметров электроэрозионной обработки на шероховатость обработанной поверхности.

Материал проволочного электрода (площадь обработки, мм ²)	Частота, кГц	Длительность импульсов, мкм	Сила тока, А	Производительность, мм ³ /мин	Относительный объёмный износ ЭИ, %	Шероховатость обработанной поверхности, мкм
МНБ-3 (400)	8	100	46	155	66	Rz=20
	44	19	40	128	37	Rz=10
	100	7	29	84	34	Ra=2,0...2,5
	200	3	19	40	40	Ra=1,25...2,0
М1 (180)	66	14	10	26	140	Ra=1,25...2,5
	88	10	6	10	130	Ra=1,25...2,0
	200	3	0,5	5	110	Ra=0,63...1,25
	200	3	0,1	3	100	Ra=0,32...0,4

Таблица 2

Режимы обработки твёрдого сплава ВК8 в зависимости от требуемой шероховатости

Параметр шероховатости, мкм	Электрические параметры импульса				Относительный объёмный износ электрода, %
	Частота, кГц	Длительность импульсов, мкм	Скважность	Сила рабочего тока, А	
Rz=40	8	60...100	2	40...60	150/65
Rz=40	8; 22; 44	10...60	2	25...40	(110...130)/(35...40)
Ra=1,6	88; 200	1,5...7,0	2	10...30	(70...80)/(35...40)
Ra=0,8	200; 440	1,0...3,0	2,3	3...15	(70...80)/40
Ra=0,4	200; 440	1,0...3,0	2	0,1...1	100/40

Выводы

После проведения данного исследования и анализа применения технологии электроэрозионной обработки для изготовления цельной мелко модульной червячной фрезы можно сделать вывод, что процесс электроэрозионной обработки твёрдосплавных режущих инструментов является весьма перспективным. Рассмотренный в работе процесс характеризуется взаимосвязью параметров процесса электроэрозии (табл. 1, 2), специфики конструкции режущих инструментов (геометрию, шероховатость поверхностей и физико-химические характеристики поверхностного слоя). При этом технология электроэрозионной обработки достаточно эффективна по сравнению и традиционными методами изготовления режущих инструментов из твёрдых сплавов из-за их высокой твёрдости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Немилов Е. Ф. Электроэрозионная обработка материалов: Учебник для ПТУ Л Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1983. 160 с.
2. Петухов Ю. Е., Домнин П. В. Способ определения профиля обрабатываемой поверхности по известному профилю инструмента / В сборнике: Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы – перспективные направления научно-исследовательской деятельности молодых ученых и специалистов. сборник научных статей II международной молодежной научно-технической конференции: в 2 томах. 2016. С. 86-90.
3. Домнин П. В., Петухов Ю. Е. Численный метод профилирования червячной фрезы для обработки фасонной винтовой поверхности / В сборнике: Будущее машиностроения России. Сборник докладов Двенадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием). 2019. С. 41-44.
4. Домнин П. В. Математическое моделирование винтовой канавки концевой фрезы с помощью средств математического программирования в среде Mathcad / Петухов Ю. Е., Домнин П. В. // Вестник МГТУ Станкин. 2017. № 4 (43). С. 100-104.
5. Yu. E. Petukhov, P. V. Domnin . Determining worm-mill profiles / Russian Engineering Research. 2020. Т. 40, С. 283-286.
6. Petukhov, Y. E., Domnin, P.V. Numerical shaping method for hobbingtools / Russian Engineering Research. 2020. Т. 40, С. 76-78.
7. Петухов Ю. Е. Формообразование численными методами. М., Станкин, 2004 г. 200 с.
8. Домнин П. В. Математическая модель определения профиля червячных фрез / Петухов Ю. Е., Домнин П. В., Сяочуан Ч. // Вестник машиностроения. 2020. № 1. С. 10-13.
9. Domnin P. V. Nondestructive assessment of the cutting properties of wheels with a single-layer diamond-galvanic coating / Petukhov Y. E., Domnin P. V., Rubets A. A. // Russian Engineering Research. 2016. Т. 36. № 4. С. 309-311.

Кильметова Л. Р.
Kilmetova L. R.
kilmetovalr@gmail.com
Новикова С. К.
Novikova S. K.
Хадиуллин С. Х.
Khadiullin S. H.
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕХАНООБРАБОТКИ МЕТОДОМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF TURNING BY THE FINITE ELEMENT METHOD

***Аннотация.** Моделирование позволяет получить описание моделируемого объекта, представляющее собой такую организацию информации, которая обеспечивает более легкое получение необходимой информации, с возможностью усложнения объекта. В статье представлены результаты моделирования процесса точения жаропрочного сплава ХН73МБТЮ.*

***Abstract.** Modeling allows you to get a description of the object being modeled, which is an organization of information that provides easier access to the necessary information, with the possibility of complicating the object. The article presents the results of modeling the process of turning the heat-resistant alloy KHN73MBTU.*

***Ключевые слова:** остаточные напряжения, моделирование процесса резания.*

***Keywords:** residual stresses, modeling of the cutting process.*

3 D моделирование позволяет без существенных материальных затрат на проведение реального эксперимента исследовать процессы механической обработки на этапах технологической подготовки производства. Оно позволяет учитывать множество различных факторов, влияющих на ход технологического процесса. [1, 2]

При механической обработке в первичной и вторичной зонах сдвига возникают высокие скорости деформации, в то время как остальная часть заготовки деформируется при умеренной или низкой скорости деформации. [3]

Алгоритм моделирования процесса резания представляют следующие этапы:

1. Создание геометрической модели заготовки и инструмента. Программа позволяет проводить два вида моделирования: демонстрационный и стандартный, отличаются они временем моделирования и точностью. Моделирование проводилось в формате 2-D, с целью снижения общего времени.

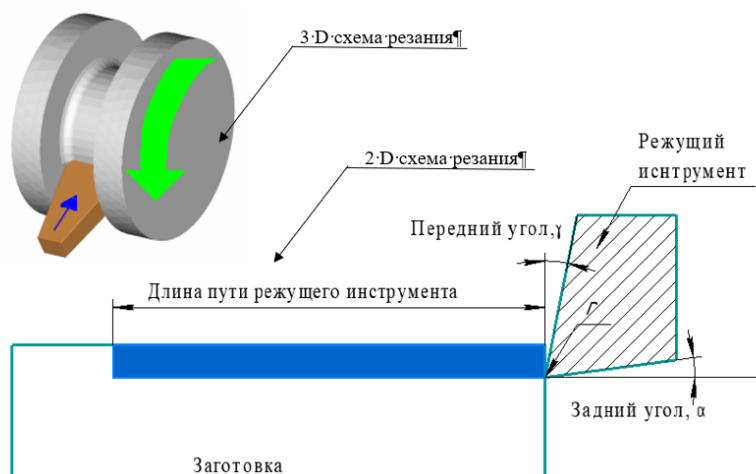


Рис. 1. Модель резания [6]: $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 1^\circ$, $r = 0,01$ мм

2. Задание режимов резания, граничных условий происходит отдельном окне ПО.

3. Задание материалов заготовки и инструмента.

4. Генерация конечно-элементной сетки на основе геометрической модели. При построении сетки применяется адаптивная сетка Лагранжа-Эйлера (ЛЭ).

Эта формулировка сетки используется в моделировании, чтобы избежать серьезного искажения элемента сетки и ее частой перестройки, которое является типичной проблемой при подходе Лагранжа. При этом подход Эйлера используется в области контакта инструмента и заготовки, где происходит процесс резания. Формирование стружки происходит в зависимости от пластической деформации материала. Тогда точки сетки имеют собственные уравнения движения. В ЛЭ описании материальные точки представлены набором Лагранжевых координат \vec{X} , пространственные точки с набором эйлеровых координат \vec{x} , а также опорные или сеточные точки с набором произвольных координат $\vec{\xi}$. В момент времени t пространственная точка получается путем отображения материальной точки \vec{X} с материальным движением $\vec{X} = \Psi(\vec{X}, t)$ или путем отображения опорной точки с движением сетки. Материальная скорость частиц получается с использованием классической производной материала. [4]

5. Анализ результатов.

В результате анализа литературных источников [5, 6, 7] установлено, что наибольшее влияние на формирование остаточных напряжений оказывают производственно-технологические причины, такие как режимы резания, геометрия режущего инструмента, применение СОТС и т.д. Что касается элементов режимов резания, то наибольшее влияние оказывают скорость резания и подача режущего инструмента.

В связи с этим были проведены исследования методом конечно-элементного анализа влияния скорости резания и подачи режущего

инструмента (табл.1) на формирование остаточных напряжений при точении жаропрочного сплава ХН73МБТЮ-ВД ГОСТ 5632-14.

Таблица 1

Режимы резания		
№	S, мм/об	V, м/мин
1	25	0,05
2	30	0,05
3	40	0,05
4	25	0,1

Скорость резания является самым сложным фактором, оказывающим влияние на характер остаточных напряжений. Влияние скорости резания на формирование остаточных напряжений неоднородно, вследствие взаимного влияния пластической деформации и физико-механических превращений.

В результате проведенного моделирования получена зависимость (рис.2) величины остаточных напряжений от глубины их залегания.

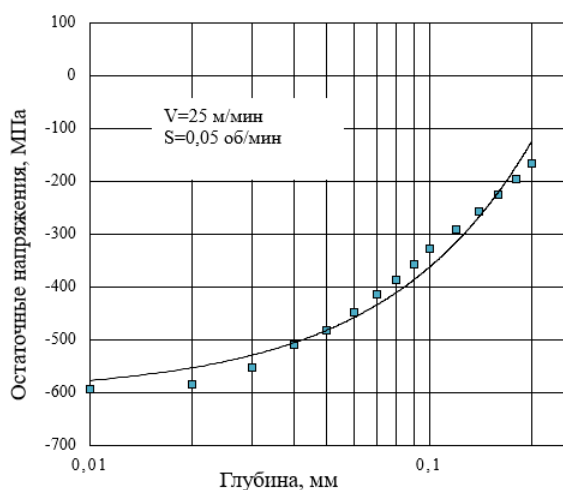


Рис. 2. Зависимость остаточных напряжений от глубины залегания

Как видно, в результате механообработки на поверхности образца сформировались напряжения сжатия. Уровень остаточных напряжений на поверхностном слое составляет -600 МПа. С увеличением глубины залегания абсолютное значение остаточных напряжений уменьшается. Это свидетельствует о том, что на нижележащих слоях формируются напряжения растяжения. До глубины 0,04 мм зависимость изменяется монотонно, после этого идет резкое снижение абсолютных значений остаточных напряжений, и на глубине залегания 0,2 мм уровень остаточных напряжений составляет -100 МПа. Это связано со сложными механизмами упрочнения обрабатываемого материала при возрастании скорости деформирования в условиях относительно невысоких температур [8].

Аналогичные зависимости изменения уровня остаточных напряжений от глубины их залегания были получены при различных скоростях резания (рис. 3).

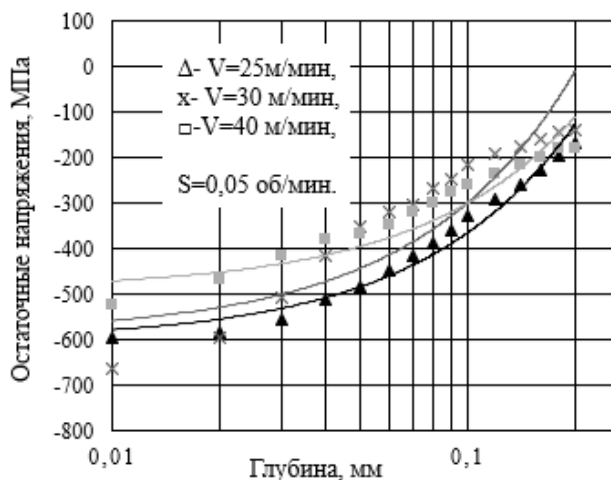


Рис. 3. Зависимость величины остаточных напряжений от глубины залеганий, полученных методом компьютерного моделирования

Как видно, изменение уровня остаточных напряжений от глубины их залегания при различных скоростях резания меняется не интенсивно. При увеличении V скорости резания до 30 м/мин уровень остаточных напряжений повышается до значений – 650 МПа. С дальнейшим увеличением V скорости резания до 40 м/мин значение остаточных напряжений снижается до -480 МПа. При значении V скорости резания 25 м/мин уровень остаточных напряжений возвращается на среднее значение. При этом диапазон уровня остаточных напряжений находится в пределах (–650) – (–480) МПа.

Аналогичные исследования были проведены, когда в качестве варьируемого параметра выступала подача режущего инструмента (рис. 4).

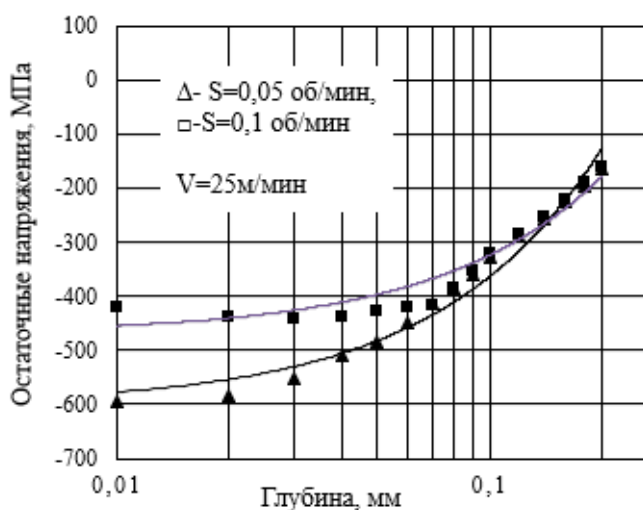


Рис. 4. Зависимость величины остаточных напряжений от глубины залеганий при точении, полученных методом компьютерного моделирования ($V=25$ м/мин)

Анализ результатов показал, что при снижении подачи от 0,1 до 0,05 мм/об абсолютные значения остаточных напряжений и глубина их залегания увеличиваются. Исходя из этого формирование обработанной поверхности происходит с существенным участием вспомогательной режущей кромки инструмента и закономерности, имеющие место при точении с меньшими подачами, где преимущественно работают главная режущая кромка и вершина резца, не выполняются.

Зависимость значений напряжений и глубины залегания при изменении подачи имеет более интенсивный характер по сравнению с изменением скорости резания.

Выводы

Остаточные напряжения в поверхностном слое при обработке резанием возникают под действием нескольких причин. С каждым снимаемым слоем интенсивность увеличения остаточных напряжений остаётся практически неизменной до некоторого значения, а затем происходит резкое изменение уровня остаточных напряжений. Это связано с тем, что в процессе снятия нижележащих слоев, напряжения стремятся к компенсации.

Проведенные численные исследования влияния элементов режимов резания, на формирование остаточных напряжений показали, что при точении жаропрочного сплава ХН73МБТЮ-ВД на поверхности заготовки сформировались напряжения сжатия ~ 400-600 МПа.

Наиболее значимым параметром при формировании остаточных напряжений при обработке жаропрочного материала является величина подачи режущего инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Многодисциплинарный инженерный анализ на базе решений ANSYS: [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании «ПЛМ Урал». URL: <https://www.plm-ural.ru/resheniya/mnogodisciplinarnyy-inzhenernyy-analiz-na-baze-resheniya-ansys> (дата обращения 02.10.2020).
2. Deform-3D : [Электронный ресурс] // Официальный сайт инжиниринговой компании Тесис. URL: <https://tesis.com.ru/> (дата обращения 02.10.2020).
3. Евсеев Д.Г., попов А.Ю. Процессы и оборудование для формообразования деталей: Учебное пособие. М.: РУТ (МИТ), 2018. 279 с.
4. Корендяев Г. К. О конечноэлементном моделировании процесса обработки металлов резанием, Вестник научно-технического развития, №2(90) 2015г.
5. Биргер И. А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. 232 с.
6. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
7. Подзей А. В., Сулима А. Н., Евстигнеев М. И. Технологические остаточные напряжения. М.: Машиностроение, 1973. 216 с., С.89.
8. Васькин К. Я. Расчет остаточных напряжений при точении поверхности с износостойкими покрытиями //Вектор науки ТГУ. 2012. № 3 (21), с.60-65.

Шакуров Д. Р.
Shakurov D. R.
shakurov.deen@mail.ru

Кирилов К. С.
Kirilov K. S.
kostkirill96@gmail.com

Мукаева В. Р.
Mukaeva V. R.
veta_mr@mail.ru

Фаррахов Р. Г.
Farrakhov R. G.
frg1982@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПЭО НА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКЕ С ФУНКЦИЕЙ IN-SITU СПЕКТРАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ

STUDY OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF PEO ON AUTOMATED EQUIPMENT WITH IN-SITU SPECTRAL DIAGNOSTICS

Аннотация. В статье исследован процесс плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО) циркониевого сплава. Построена структурная схема установки. Проведены экспериментальные исследования для исследования динамики тока и напряжения в ходе технологического процесса, построения вольт-амперной характеристики. Отработана программа in-situ спектральной диагностики в диапазоне частот от 30 Гц до 10 кГц и построена электрическая эквивалентная схема замещения процесса ПЭО для различных длительностей обработки.

Abstract. The paper studies the process of plasma-electrolytic oxidation (PEO) of a zirconium alloy. A block diagram of the installation is constructed. Experimental studies were conducted to study the dynamics of current and voltage during the technological process, and to construct the current-voltage characteristic. The program of in-situ spectral diagnostics in the frequency range from 30 Hz to 10 kHz was developed and an electrical equivalent circuit of the PEO process for various processing durations was constructed.

Ключевые слова: плазменно-электролитическое оксидирование, технологический источник питания, инвертор, вольт-амперная характеристика, импедансная спектроскопия.

Keywords: plasma electrolytic oxidation, technological power supply, inverter, current-voltage characteristic, impedance spectroscopy.

Введение

Плазменно-электролитическое оксидирование (ПЭО) – перспективный технологический процесс обработки металлов и сплавов [1]. Данный метод проводится в экологичных водных растворах электролитов. В ходе ПЭО используется напряжение от 200 В до 600 В, обрабатываемая деталь подключается в качестве анода. В таких условиях у поверхности

обрабатываемой детали возникают микроразряды, активно воздействующие на поверхность.

В настоящее время одним из наиболее перспективных применений ПЭО-покрытий является функционализация поверхности медицинских имплантатов, так как покрытие создает костеподобную поверхность [2]. В настоящей работе исследуется процесс формирования биосовместимого покрытия на поверхности циркониевого сплава.

Проведение экспериментов

Экспериментальные исследования проводились на автоматизированной установке ПЭО с управлением от персонального компьютера. Структурная схема установки представлена на рис. 1.

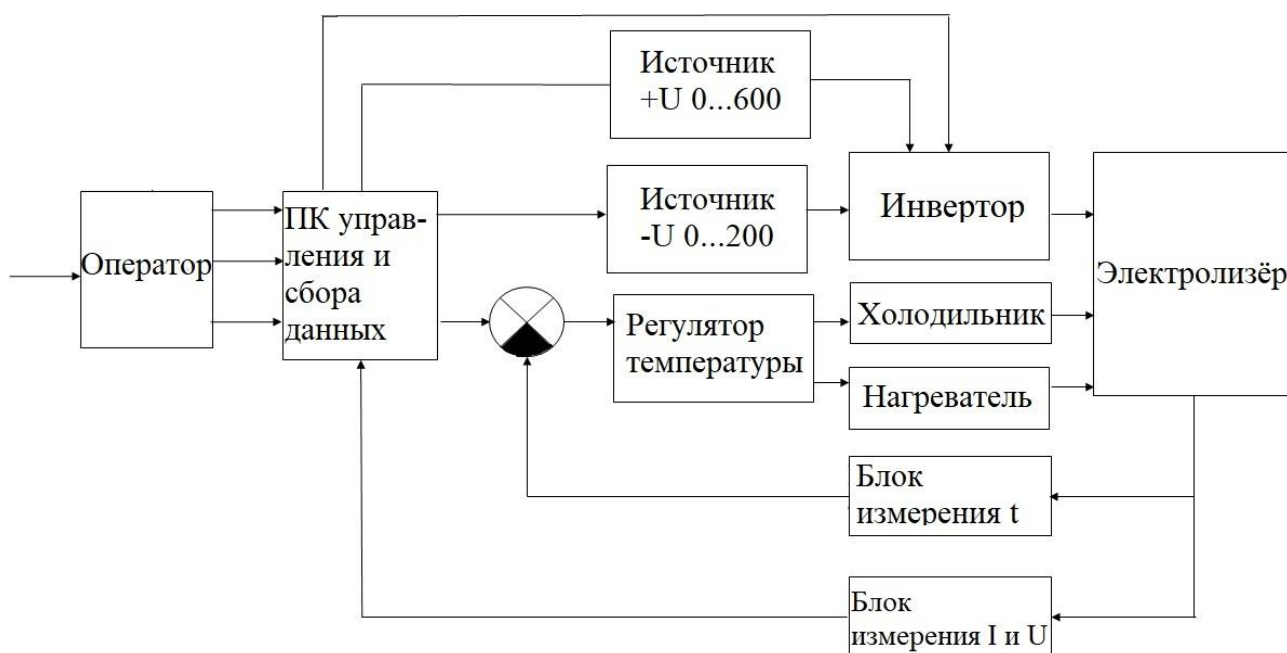


Рис. 1. Структурная схема установки ПЭО

Схема питания 24 кВт построена на модульной основе и состоит из полумостового инвертора и двух источников постоянного напряжения. Положительный обеспечивает напряжение до +600 В, отрицательный – до -200 В. Средняя точка позволяет получить биполярное выходное напряжение.

Выходное напряжение блоков постоянного тока +600 В и -200 В регулируется с помощью цифровой системы управления (ЦСУ), в основе которой лежит микроконтроллер ATmega328 и аналого-цифровой преобразователь MCP3201. DCS подключается к главному компьютеру с помощью интерфейса RS-232. Управляющие сигналы с уровнями напряжения от 0 до 6 В подаются на управляющие входы каждого блока постоянного тока через оптически изолированные усилители HCPL-7800, которые обеспечивают плавную регулировку выходных напряжений от 0 до +600 В и от 0 до -200 В [3].

ПЭО проводилось на цилиндрических образцах циркониевого сплавы площадью $8,8 \text{ см}^2$ в импульсном униполярном режиме с амплитудой импульсов 480 В, частотой 700 Гц и скважностью 26% в водном растворе электролита, содержащем 15 г/л $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ и 25 г/л ацетата кальция в течение 10 минут.

In-situ импедансная спектроскопия проводилась по методике [4, 5] при ступенчатом изменении частоты импульсов с равным шагом в логарифмическом масштабе 20, 28, 38, 62, 101, 164, 268, 435, 713, 1161, 1845, 3137, 4481, 7843, 10457 Гц. Обработка данных проводилась в среде Matlab с использованием специализированного программного обеспечения и программы ZView Scribner Associates.

Характеристики технологического процесса

На рис. 2 показано изменение величины действующих значений тока и напряжения в ходе обработки. На основе полученных закономерностей построена ВАХ (рис. 3). ВАХ показывает явления, проходящие в процессе плазменного электролиза [6]. ВАХ процесса ПЭО имеет нелинейный характер. На отрезке АВ наблюдается небольшой линейный рост тока, несмотря на значительный рост напряжения, т.к. присутствует сопротивление имеющейся оксидной пленки. Когда достигается напряжение пробоя ток резко возрастает и достигает своего пикового значения в точке С. Здесь можно наблюдать возникновение множества микроарзрядов и искровое напряжение. В области CD можно наблюдать увеличение напряжения и резкое падение тока. Это связано с тем, что поверхность металла начала покрываться оксидной пленкой, в следствии чего повысилось и сопротивление. В области DE ток уменьшается плавно, с медленным ростом покрытия. Напряжение при этом растет из-за возникающего переходного процесса, постоянная времени которого связана с сопротивлением и емкостью покрытия. Аналогичные закономерности можно наблюдать на временных характеристиках (рис. 2а, б).

Было получено пористое покрытие толщиной 15-20 мкм. На рис. 4 показана микрофотография вида сверху покрытия.

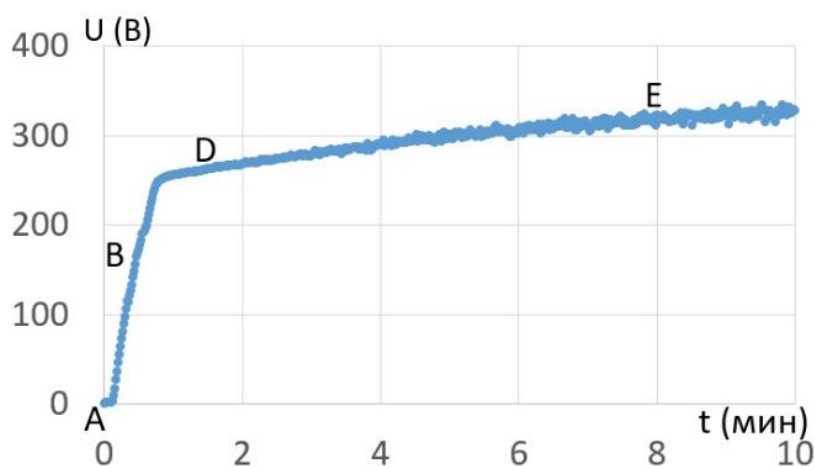


Рис.2а. Изменение во времени напряжения U в ходе обработки

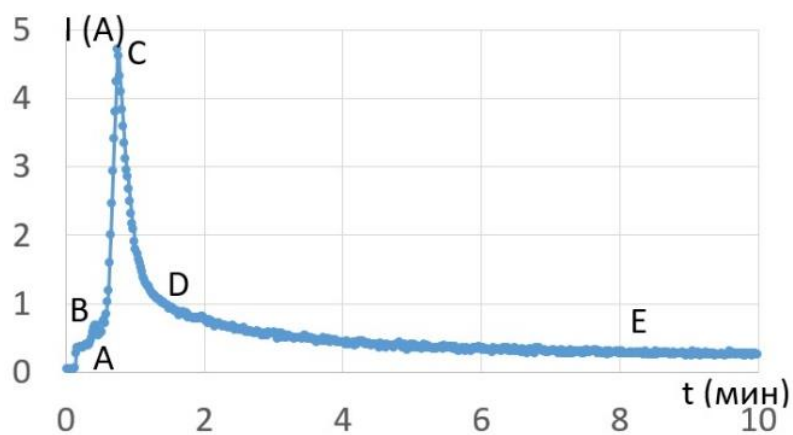


Рис.2б. Изменение во времени напряжения тока I в ходе обработки

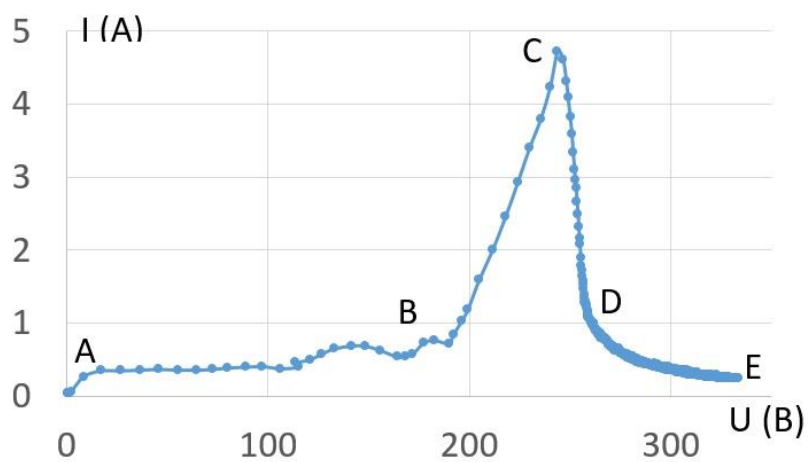


Рис.3. Вольт-амперные характеристики процесса ПЭО

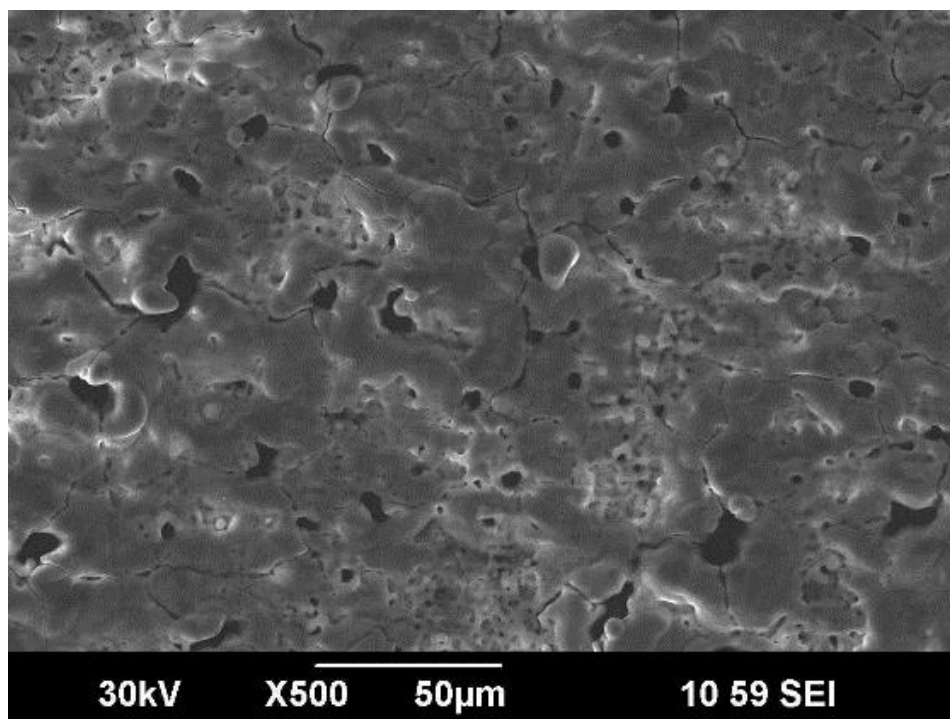


Рис. 4. СЭМ-микрофотография вида сверху образца циркония с ПЭО-покрытием

In-situ импедансная спектроскопия

In-situ импедансная спектроскопия позволяет оценивать свойства электрохимического процесса без его остановки. На рис. 2 представлены спектры импеданса ПЭО. На рис. 5 показаны спектры модуля и фазы импеданса Z для двух длительностей обработки 1 и 5 минут. Данные были аппроксимированы в программе ZView при помощи электрической эквивалентной схемы замещения, представленной на рис. 6. Численные значения параметров схемы показаны в табл. 1. Схема представляет собой последовательно-параллельную цепочку, где $R1$ -сопротивление электролита, $R2$ и $CPE1$ характеризуют резистивные и емкостные свойства покрытия.

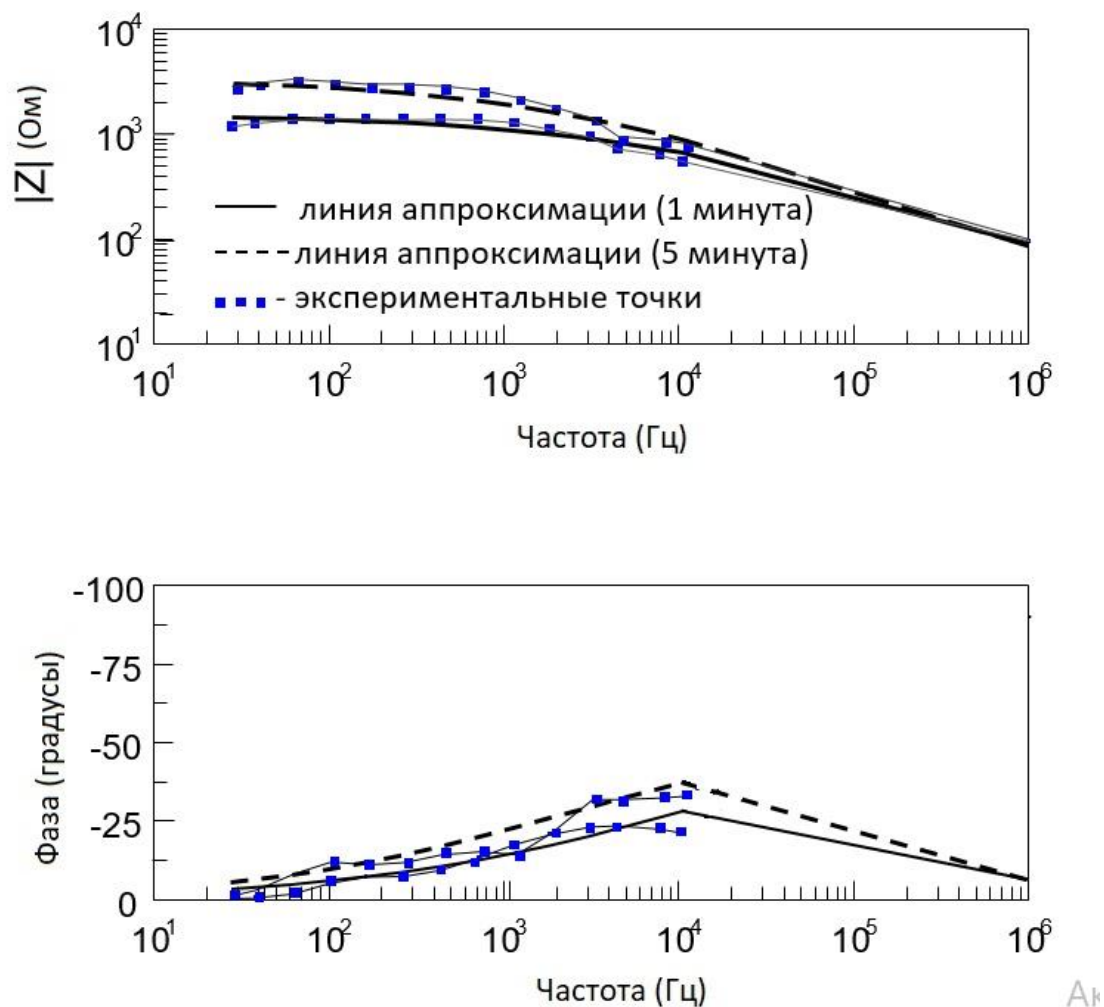


Рис. 5. Частотные характеристики модуля и фазы Z после 1 и 5 минут ПЭО

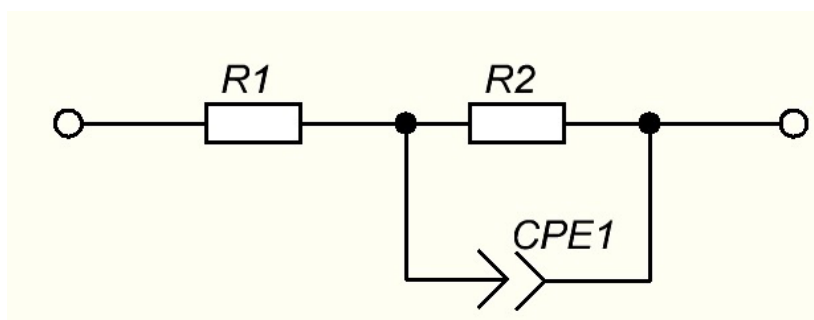


Рис.6. Электрическая эквивалентная схема замещения

Параметры элементов эквивалентной схемы замещения

Время, мин.	R1, Ом	R2, Ом	CPE1	
			Q (мкФ ⁿ⁻¹ ·см ⁻²)	n
1	477,5	898	$1,2554 \cdot 10^{-7}$	0,95097
5	387,9	3322	$3,929 \cdot 10^{-7}$	0,74389

Выводы

В ходе данной работы исследована вольтамперная характеристика формирования Ca-содержащего покрытия на циркониевом сплаве методом ПЭО. ВАХ имеет нелинейный характер с резкими перепадами, поэтому важно точно контролировать электрические параметры при выходе на рабочий режим и в ходе обработки. Проведена in-situ спектральная спектроскопия процесса ПЭО. Получена электрическая эквивалентная схема замещения, состоящая из последовательно соединенного сопротивления электролита и параллельной R-CPE цепочки покрытия.

Работа поддержана грантом РФФ № 20-79-10189

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Simchen F., Sieber M., Kopp A., Lampke T. Introduction to plasma electrolytic oxidation-an overview of the process and applications. Coatings 10(7), 628, 2020
2. Aktug L S, Durdu S, Yalcin E, Usta M. In vitro properties of bioceramic coatings produced on zirconium by plasma electrolytic oxidation. Surface & Coating Technology 324 (2017) 129-139
3. Mukaeva, V.R., Gorbatkov, M.V., Farrakhov, R.G., Lazarev, D.M., Stotskiy, A.G., Parfenov, E.V. Advanced plasma electrolysis research equipment with in-situ process diagnostics Proceedings - ICOECS 2020: 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems 27 October 2020, Номер статьи 9278498
4. Parfenov E. V, Yerokhin A Methodology of data acquisition and signal processing for frequency response evaluation during plasma electrolytic surface treatments Process Control: Problems, Techniques and Applications, pp. 63-96, 2011
5. Yerokhin A, Parfenov E. V, Matthews A, In situ impedance spectroscopy of the plasma electrolytic oxidation process for deposition of Ca- and P-containing coatings on Ti, Surf. Coat. Technol., vol. 301, pp. 54–62, 2016
6. Parfenov E. V, Yerokhin A, Nevyantseva R.R. Gorbatkov M.V, Liang C.-J, Matthews A, Towards smart electrolytic plasma technologies: An overview of methodological approaches to process modelling, Surf. Coat. Technol., vol. 269, pp. 2–22, 2015.

Сайфуллин А. Н.

Sayfullin A. N.

ags1997@yandex.ru

НПА «Технопарк авиационных технологий», Уфа

Фецак С. И.

Fetsak S. I.

format_invest@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РИФЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОД ДИФФУЗИОННУЮ СВАРКУ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

MECHANICAL TREATMENT OF THE CORRUGATED SURFACE FOR DIFFUSION WELDING OF ALUMINUM ALLOYS

***Аннотация.** В данной статье идет речь о предлагаемой технологии обработки рифленной поверхности, предназначенной для диффузионной сварки. Рассмотрены виды и методы диффузионной сварки, приведен один из методов получения необходимой поверхности. Показаны примерные результаты по данной задаче.*

***Abstract.** In this article, we are talking about the proposed technology for processing a grooved surface intended for diffusion welding. The types and methods of diffusion welding are considered, one of the methods for obtaining the required surface is given. The indicative results of the task are shown.*

***Ключевые слова:** диффузионная сварка, рифленая поверхность, технология нанесения рифленной поверхности.*

***Keywords:** diffusion welding, grooved surface, technology for applying a corrugated surface.*

Диффузионная сварка – это процесс, при котором детали, находясь в тесном контакте при контролируемом давлении, нагреваются до определенной температуры в течении определенного периода времени. Данные условия позволяют посредством местной пластической деформации, создающей максимальное сближение поверхностей и массопереноса (диффузии) атомов между двумя соединяемыми частями детали обеспечить равнопрочность основного материала. Впервые технология принудительного соединения металлов под давлением и высокой температурой в вакуумной установке была опробована в 1953 году советским ученым Н. Ф. Казаковым [1]. В настоящее время разработано много методик соединения различных материалов, обобщенных в стандарте ГОСТ 19521-74. Данный вид сварки применяется для соединений разнородных материалов в различных сочетания, например, стали и бронзы, стали и керамики и тому подобное. Этот способ особенно эффективен, если надо добиться прочного монолитного соединения разнородных материалов без образования грубого сварного или паечного шва. Его применяют, если невозможно использовать стандартные средства крепежа, и в некоторых других случаях. Кроме того, диффузионная сварка приходит на

помощь, если необходимо сваривать очень тугоплавкие металлы, такие, как вольфрам и тантал. И этот же способ позволяет создавать элементы высокоточной электронной промышленности, различные датчики, полупроводниковые элементы. Общими словами можно сказать что основная сфера применения диффузионной сварки — область высоких технологий — авиационной, космической, иных видов тяжелого машиностроения. Но в то же время именно этот метод позволяет создавать микроскопические детали из сферы сложной электроники.

Для того чтобы приступить к экспериментальному решению поставленной задачи необходимо понять процесс диффузионной сварки металлов. Для проведения такой сварки применяются специальные стенды, в которых возможно создание вакуума, а также установлен пресс с силой сжатия 1-4 кгс/мм² и нагревательные устройства радиационного, электрического или индукционного типов. На рис. 1 представлена типовая схема установки применяемая для диффузионной сварки.

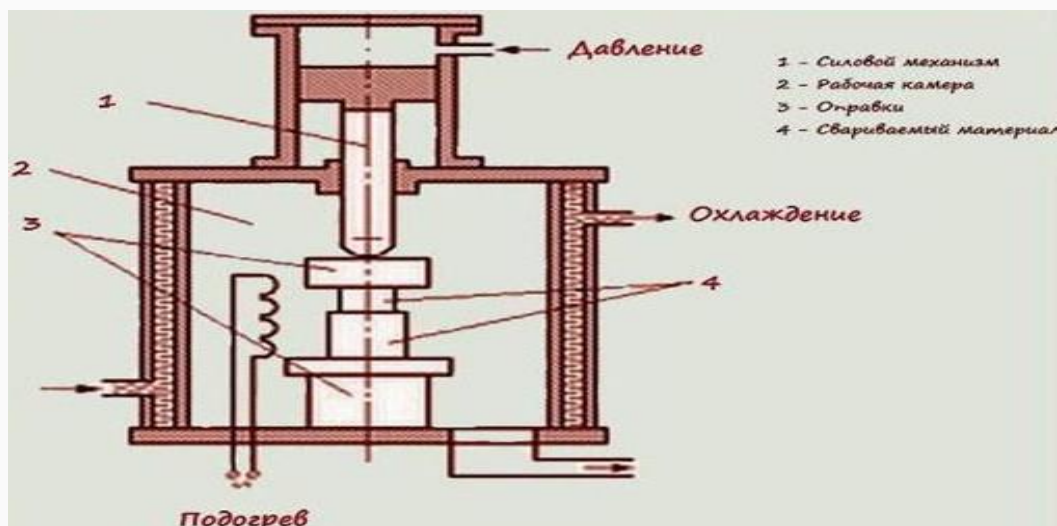


Рис.1. Типовая схема установки для диффузионной сварки:

1 – силовой механизм, состоящий из прижимного жаропрочного винта, гидравлических цилиндров и масляного насоса для создания давления на соединяемые детали; 2 – рабочая камера для проведения процесса сварки; 3 – оправки (места для установки соединяемых деталей); 4 – вакуумный насос для удаления воздуха из камеры; 5 – система подачи газов (для устройств, в которой вакуум замещается газом, либо производится газовое охлаждение); 6 – индукционный генератор для создания системы нагрева и регулирования охлаждения.

Выделяется два основных вида сварки в вакууме.

1. Свободное деформирование – при данном способе производится постоянная нагрузка, не достигающая предела текучести. Такой способ широко распространен благодаря своей простоте.

2. Принудительное деформирование – специальное устройство, движущееся с определенной скоростью, обеспечивает создание нагрузки для пластической деформации материала. При этом создаваемое напряжение должно быть выше предела текучести. Такой способ применяется для создания

деталей с большими габаритами и большой площадью свариваемой поверхности.

С учетом выше перечисленного вернемся к заданию по получению рифленой поверхности. Необходимо получить такую поверхность при которой будут сваривать поверхности двух металлов: сплава алюминия и титана. Проблема состоит в том, что при обычном диффузионном сваривании сплава алюминия и титана, алюминий покрывается оксидной пленкой и данный процесс практически становится невозможным. Было принято решение создать такую рифленую поверхность при которой процесс сварки будет протекать наилучшим образом.

Проведя анализ рифленых поверхностей, было решено получить такую поверхность в виде небольших пирамидок, которые можно сделать с помощью резбонарезной фрезы.

Используется фреза твердосплавная с углом заточки 60 градусов [2]. Параметры фрезы будут уточняться с накоплением данных проведенных экспериментов.

Технология получения рифленой поверхности:

- заготовка устанавливается на планшайбу;
- раскручивается планшайба до необходимых оборотов, примерно 4 оборота в минуту;
- подводится фреза с шагом резьбы 4 мм;
- нарезается правая резьба;
- нарезается левая резьба.

В результате получается двунаправленная резьба. Данная механическая обработка поверхности выполнялась на вертикальном станке с ЧПУ.

На рис. 2, 3 приведены примеры полученных рифленых поверхностей.



Рис.2. Полученная рифленая поверхность



Рис. 3. Полученная рифленая поверхность

Поэтапно данный процесс показан на рисунках 4, 5, 6, 7.

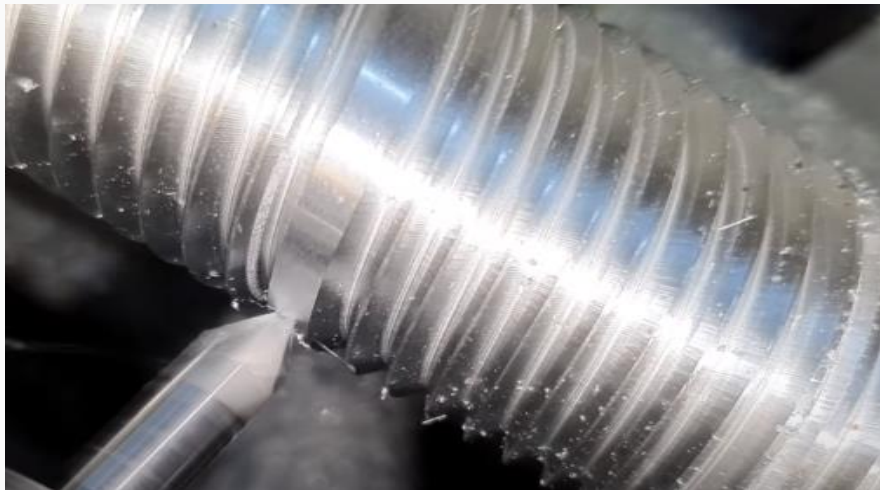


Рис. 4. Обработка поверхности резбонарезной фрезой

На рис. 4 можно видеть, что ведется обработка резьбы в одном направлении. Далее после получения резьбы обрабатывается в другую сторону, что показано на рис. 5.



Рис. 5. Обработка резьбы в другом направлении.

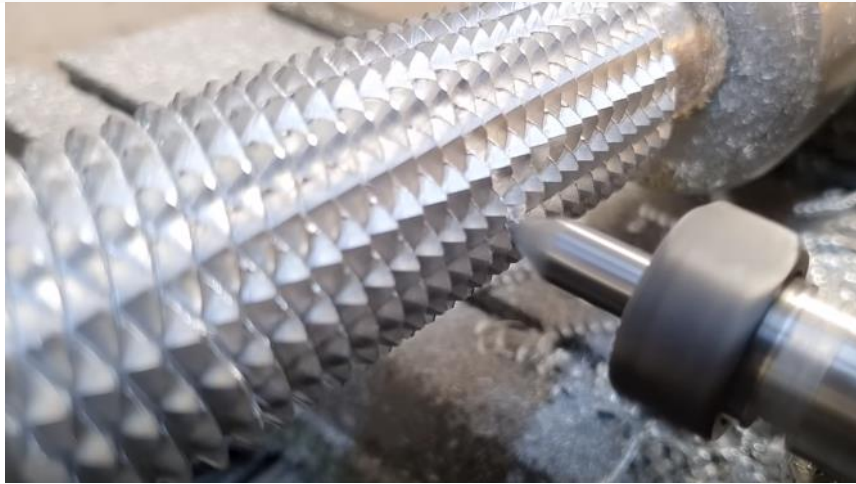


Рис. 6. Обработка двунаправленной резьбы

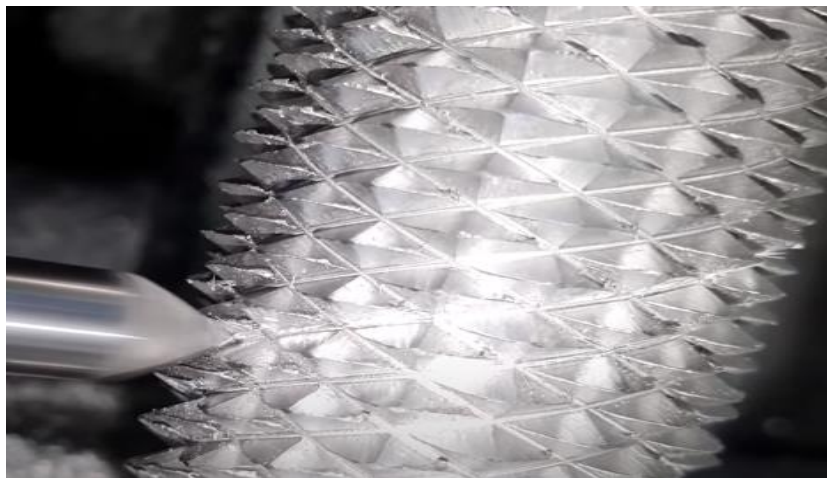


Рис. 7. Обработка двунаправленной резьбы

Данная поверхность будет проверена на свариваемость при помощи диффузионной сварки. Стоит подчеркнуть, что сегодня данный метод является теоретическим, нежели практический. Предложенная технология будет улучшаться и дорабатываться.

Вывод

Проблема сваривания различных материалов с помощью диффузионной сварки актуальна, поэтому необходимо разработать метод обработки (подготовки) поверхности детали при котором разные металлы будут свариваться более качественно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка материалов. М.: Машиностроение, 1976. 312с.
2. Кожевников Д.В., Гречишников В.А., Кирсанов С.В., Кокарев В.И., Схиртладзе А.Г. Режущий инструмент: Учебник для вузов / Под редакцией С.В. Кирсанова. М.: Машиностроение, 2007. 528 с.

Макаров В. Ф.
Makarov V. F.,
makarovv@pstu.ru

Песин М. В.
Pesin M. V.
m.pesin@pstu.ru

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь

Ворожцова Н. А.
Vorozhцова N. A.
vorozhtcova@reductor-pm.com

Горбунов А. С.
Gorbunov A. S.
gorbunov-as@reductor-pm.com
АО «Редуктор-ПМ», Пермь

РАЗРАБОТКА НОВОГО МЕТОДА ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЬЕВ ШЕСТЕРЕН КОМБИНИРОВАННЫМ ШЛИФОВАЛЬНО- ПОЛИРОВАЛЬНЫМ ЧЕРВЯЧНЫМ КРУГОМ

WORKING OUT OF A NEW METHOD OF FINISHING PROCESSING OF TEETHS OF GEAR WHEELS THE COMBINED WORM GRINDING- POLISHING WHEEL

***Аннотация.** В статье приведены результаты исследований технологических возможностей финишного зубошлифования зубчатого венца цилиндрических колес комбинированным шлифовально-полировальным червячным кругом с обеспечением геометрической точности и параметров качества поверхностного слоя.*

***Abstract.** This article contains the results of research on technological capabilities of the finishing grinding of toothings cylindrical gears with the combined worm grinding-polishing wheel. For tests selected cylindrical gear of the fifth degree of accuracy. Cylindrical gears are cut into test samples to study the quality of the surface layer. The use of new technology finishing will increase the reliability and durability of the cylindrical gears.*

***Ключевые слова:** зубошлифование, зубохонингование, зубополирование, геометрическая точность, качество поверхностного слоя, комбинированный червячный круг.*

***Keywords:** gear grinding, gear honing, gear polishing, precision, the quality of the surface layer, the combined worm grinding-polishing wheel.*

Задача совершенствования технологических операций, раскрытие потенциальных возможностей оборудования применительно к комбинированным способам воздействия решена для цилиндрического зубчатого колеса планетарной передачи главного редуктора, передающего мощность от пары газотурбинных двигателей на несущий винт вертолета. Конструкторской документацией определены требования, предъявляемые к зубчатому венцу сателлита числом зубьев $z=29$, модулем $m=6$, углом профиля $\alpha=28^\circ$ и шириной $b=48$ мм. Твердость поверхностей зубьев сателлита

обеспечивается цементацией на глубину 1,5 – 1,8 мм и последующей объемной закалкой до поверхностной твердости $HRC \geq 61$. Контроль поверхности на шлифовочные прижоги травлением после операции зубошлифования. Зубчатый венец изготавливают по 5-5-4 степени точности согласно ГОСТ 1643-81 [1]. Шероховатость профилей зубьев не должна превышать $Ra \leq 0,16$ мкм. Оптимальный контакт зацепления обеспечивается за счет применения модификации профиля по головки зуба, глубина которого составляет $f_{ko} = 36 \dots 26$ мкм, длина его развернутости 3,3...4,0 мм.

Для обеспечения вышеуказанных требований серийной технологией, предусмотрено выполнение двух операций. Зубошлифование направлено на нивелирование коробления после химико-термической обработки и обеспечение требуемой геометрической точности зубчатого венца, толщин зубьев и погрешности профиля зубьев. Несмотря на достигаемую точность (рис. 1а), сдерживающим фактором применения зубошлифования в качестве окончательной операции является получаемая шероховатость профиля зубьев $Ra = 0,4$ мкм.

Для обеспечения требуемой шероховатости $Ra \leq 0,16$ мкм по серийной технологии после зубошлифования предусмотрено зубохонингование алмазным хонем. При этом геометрическая точность эвольвенты не всегда обеспечивается, а иногда и ухудшается – погрешность профиля зуба F_a и размер фланка f_{ko} и в некоторых случаях может превышать допуск. Ухудшение погрешности профиля зубьев на операции зубохонингования обусловлено несовершенством изготовления профилей зубьев алмазного зубчатого хона. Эти погрешности инструмента переносятся на профиль зубьев, что ухудшает класс точности зубчатого венца по нормам плавности зацепления, достигнутого на предшествующей операции зубошлифования. Дополнительная правка профиля алмазного хона позволяет несколько улучшить показатели погрешности профиля зубьев сателлита до $F_a = 5,8$ мкм. Однако, правка достаточно трудоемкий процесс шлифования профиля алмазного хона, который выполняется за несколько операций на основном технологическом оборудовании для обработки зубчатых колес, максимально возможное количество правок – 26.

Таким образом, при изготовлении зубчатого венца сателлита возникает два противоречия. Первое противоречие заключается в том, что процесс обкатного зубошлифования позволяет достигать высокую степень точности зубчатых колес, не обеспечивая при этом требуемую шероховатость поверхности зуба. Второе противоречие заключается в том, что процесс зубохонингования позволяет обеспечить требуемую шероховатость поверхности профиля зуба, но при этом ухудшает степень точности зубчатого венца – увеличивается погрешность профиля зуба.

Аналогичные противоречия окончательной обработки зубьев встречаются и при производстве автомобильных зубчатых колес. В работе [2] отмечается негативное воздействие вибрационной отделочной обработки на геометрические параметры профилей зубьев. Компанией Reishauer AG

предпринята попытка решения противоречия процесса обкатного зубошлифования, заключающаяся в том, чтобы объединить две операции зубошлифования и зубополирования за счет присоединения полировального круга к классическому червячному шлифовальному кругу. Подобные технические решения использования абразивных инструментов переменной абразивной способностью в осевом направлении для повышения производительности за счет объединения стадий черновой, чистовой и отделочной обработки поверхности на бесцентровых шлифовальных станках приводится в работах российских ученых [3].

В работе [2] автор утверждает, что комбинированным кругом возможно достичь шероховатость поверхности профилей зубьев $Ra=0,15$ мкм и ниже, в зависимости от выбранной последовательности обработки, но не раскрывает стратегии обработки, режимов резания, характеристики абразивного круга, параметров точности зубчатого венца и шероховатости поверхностей профиля зубьев. Однако приводятся экспериментальные данные центра исследования шестерен Мюнхенского технического университета о снижении потерь мощности на 15% зубчатых колес, обработанных комбинированным кругом. Отмечается, что снижение потерь мощности достигается за счет уменьшения трения в зубчатой передаче под нагрузкой, в сравнении с образцами зубчатых колес обработанными классическим методом обкатного шлифования.

Появление у червячного шлифовального круга нового свойства – полирования раскрывает для существующего зубошлифовального оборудования новые возможности при обеспечении требований точности и шероховатости поверхности зубьев. Общеизвестно, что внедрение новых технологий обработки связано с затратами, при этом стоимость инструмента от общих затрат составляет лишь порядка 1%, примерно 3% составляют затраты на СОТС, 10% – затраты на обеспечение качества, 19% – заработная плата рабочих, 32% – стоимость обслуживания оборудования и 35% – стоимость оборудования. Поэтому внедрение нового инструмента считается обоснованным вложением, при обеспечении качества и повышении производительности.

Работа комбинированного червячного шлифовально-полировального круга (рис.1а) заключается в снятии основного припуска шлифовальной частью круга, при обеспечении заданной точности, и срезании вершин микронеровностей полировальной частью (рис.1б), обеспечивая снижение величины шероховатости поверхности. Шлифовальная часть состоит из мелкокристаллических соединений зерен Al_2O_3 , смешанных с белым оксидом алюминия, размер частиц при самозатачивании ≤ 30 мкм (рис. 1в). Каждое отдельное зерно размером 150-200 мкм состоит из агломерата острых частиц, которые легко самозатачиваются при высокой скорости удаления материала, поддерживают устойчивый процесс.

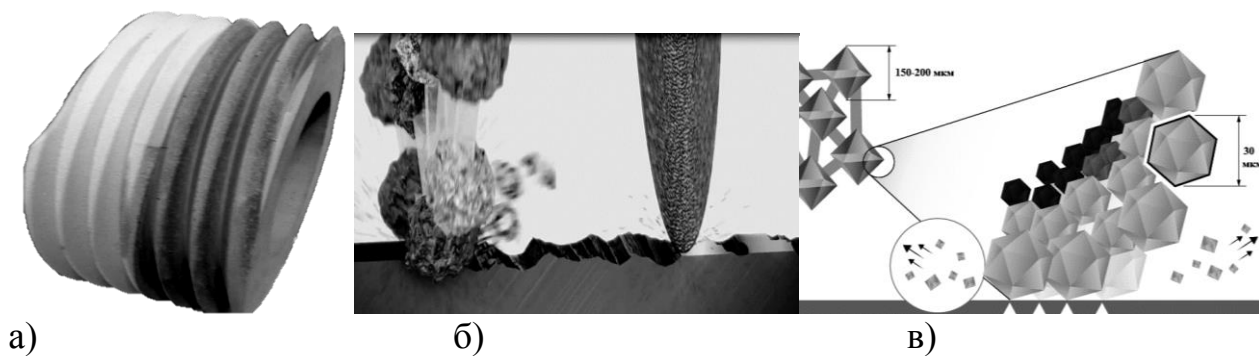


Рис. 1. Моделирование резания комбинированным кругом:
 а) комбинированный червячный круг
 б) образование шероховатости после шлифовальной и полировальной частей
 в) схема самозатачивания

Анализ результатов экспериментальных исследований [4] процесса зубошлифования комбинированным шлифовально-полировальным кругом с на станке RZ basic фирмы «Reishauer» позволяет сделать вывод о том, что применение комбинированного круга позволяет достигать высоких показателей по степени точности и шероховатости поверхности. На операцию зубошлифования цилиндрическое зубчатое колесо поступает после химико-термических операций с шероховатостью профиля зубьев $Ra=3,05$ мкм (рис. 2а). Шероховатость после зубошлифования первой частью комбинированного круга составила $Ra=0,242$ мкм (рис. 2б). После зубошлифования полировальной частью величина микронеровности профиля зуба составила $Ra=0,089$ мкм (рис. 2в).

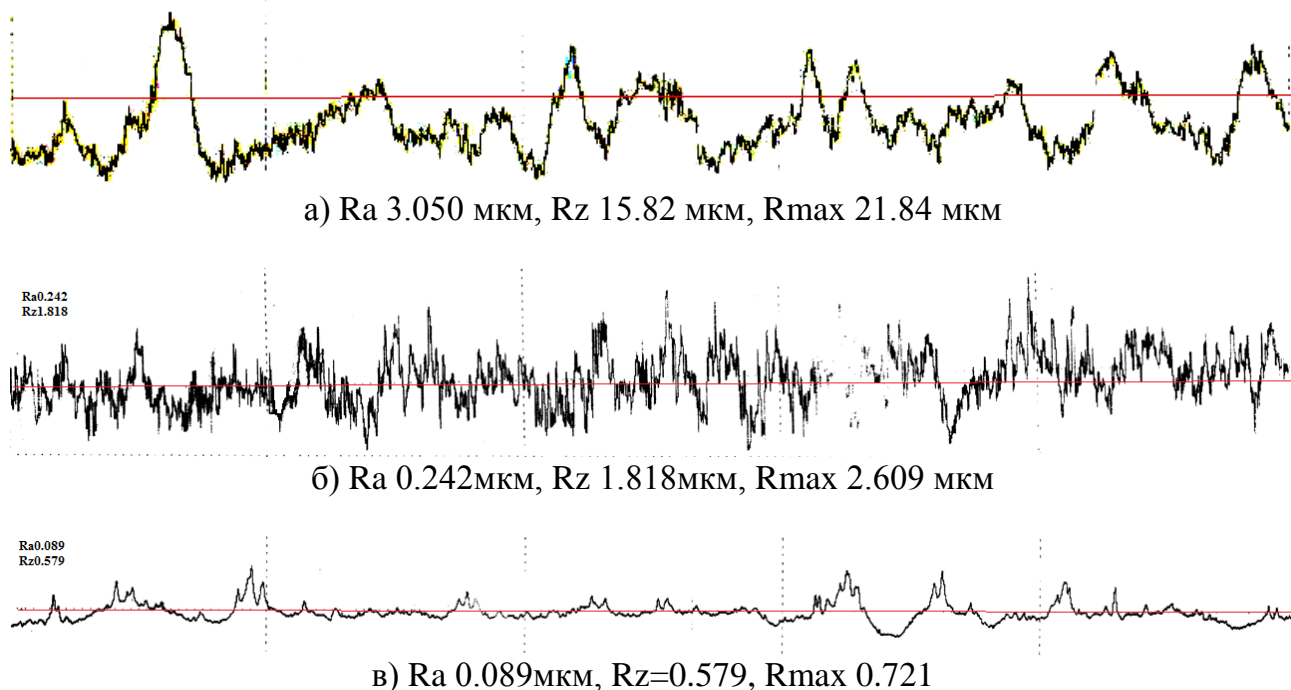


Рис. 2. Профилограммы шероховатости поверхностей после:
 а) химико-термической обработки;
 б) зубошлифования;
 в) зубошлифования

Достигнутая погрешность эвольвентного профиля зуба составила $F_a=1,6$ мкм при допуске $F_a=6$ мкм. Согласно DIN 3962 [6] для 1-ой степени точности допуск погрешности профиля зуба сателлита составляет $F_a=2,5$ мкм.

Выводы

1. Применение комбинированного шлифовально-полировального червячного круга при обкатном зубошлифовании на станке RZ basic обеспечивает высокую степень точности и позволяет достичь шероховатости поверхности $Ra = 0,089$ мкм.

2. Анализ исследования остаточных напряжений, микроструктуры и микротвердости в ранее проведенных исследованиях [6] показал, что комбинированная шлифовально-полировальная обработка обеспечивает более высокое качество поверхностного слоя зубьев шестерен, что очень важно для повышения эксплуатационных параметров авиационных зубчатых колес.

3. При внедрении новой технологии повышается производительность обработки шестерен на 25-30%, не требуются значительные дополнительные затраты, обеспечивается значительный экономический эффект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 1643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. М.: Изд-во стандартов. 1981. С.45
2. Walter Graf. Шлифование и полирование зубчатых колес // Ритм машиностроения [Электронный ресурс]. 2016. Режим доступа <https://ritm-magazine.ru/ru/public/shlifovanie-i-polirovanie-zubchatyh-koles> (дата обращения: 10.05.2020).
3. Патент 2240913, Российская Федерация, МПК⁷ В24В 5/18, В24В 1/00. Способ бесцентрового шлифования / Свирщев В.И., Флегентов В.К., Макаров В.Ф., Подборнов И В. 2303108147/02. заяв. 24.03.2003. опубл. 27.11.2004 Бюл. №33. с.4.
4. Ворожцова Н.А., Макаров В.Ф., Песин М.В. Обработка зубчатых колес сборными шлифовально-полировальными кругами // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2020 Т.22 №1. С.79-87
5. Ворожцова Н.А., Горбунов А.С., Макаров В.Ф. Обеспечение качества зубчатого венца цилиндрических колес при обработке комбинированным шлифовально-полировальным червячным кругом// Научно-технические технологии в машиностроении. 2019. № 2. С.22-28.
6. DIN 3962-1-1978 Tolerances for Cylindrical Gear Teeth; Tolerances for Deviations of Individual Parameters. German Institute for Standardisation, 1978. 18 p.

Волковский А. А.

Volkovskiy A. A.

VolkovskiiWork@mail.ru

Филиал ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Лысьва

Макаров В. Ф.

Makarov V. F.

makarovv@pstu.ru

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ЖЕСТКИМИ ШЛИФОВАЛЬНЫМИ КРУГАМИ

PROBLEMS OF ENSURING THE QUALITY OF THE SURFACE LAYER OF FIBERGLASS PRODUCTS DURING ABRASIVE TREATMENT WITH RIGID GRINDING WHEELS

***Аннотация.** В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований направленных на определение причин низкого качества поверхностного слоя изделий из стеклопластика, при абразивной обработке на плоскошлифовальном станке. В ходе исследований было определено, что наиболее влияющим фактором на качество обработанной поверхности является технология изготовления полимерных композиционных материалов. Так же представлена зависимость значений параметра шероховатости обработанной поверхности от режимов обработки жесткими шлифовальными кругами из электрокорунда нормального и карбида кремния зеленого.*

***Abstract.** This article presents the results of experimental studies aimed at determining the reasons for the poor quality of the surface layer of fiberglass products during abrasive processing on a flat-grinding machine. In the course of research, it was determined that the most influential factor on the quality of the treated surface is the technology of manufacturing polymer composite materials. The values of the roughness parameter of the treated surface are also presented, depending on the processing modes with hard grinding wheels made of normal electrocorundum and green silicon carbide.*

***Ключевые слова:** стеклопластик, абразивная обработка, шероховатость поверхности, полимерный композиционный материал, инновационные технологии.*

***Keywords:** fiberglass, abrasive processing, surface roughness, polymer composite material, innovative technologies.*

Введение. Развитие машиностроения, и как следствие техники, на каждом этапе зависело от применяемых конструкционных материалов. На сегодняшний день, все большую актуальность набирают полимерные композиционные материалы (ПКМ). Основной причиной выступает уникальность их свойств, которые определяются низкой удельной массой и высокой прочностью. Наибольшее применение ПКМ, в частности стеклопластик и углепластик, получили в авиационной промышленности. На

сегодняшний день большой процент изготавливаемых изделий авиадвигателей серии ПС-90А2, ПД14, ПД8 и ПД35 выполнены из полимерных композиционных материалов. Так же самолет МС-21 с авиадвигателями ПД14 успешно выполняет целевое назначение. Таким образом, вопрос о повышении качества и надежности деталей из ПКМ является крайне актуальным. Однако, широкое распространение ПКМ, влечет за собой сложности связанные смеханической обработкой, причинами которых служит анизотропия свойств материала [1-3]. Резание слоистого композита сопровождается рядом дефектов, таких как расслоение, ворсистость, растрескивание и прочие. Наличие данных дефектов послужило толчком для проведения исследований протекания процесса резания с целью снижения величины дефектного слоя, по результатам которых были предложены инновационные методы, одним из которых выступает абразивная обработка [4, 5]. В результате проведенных исследований, авторами представлено подконтрольное регулирование параметра шероховатости поверхности при наименьшем количестве дефектов. Так же предполагается, что для эффективного перерезания армирующего волокна необходима высокая скорость резания и острая режущая кромка [5]. Основанием данной гипотезы выступает явление прерывистого резания при осевой обработке композиционного материала [6]. В первоначальный момент взаимодействия режущего клина с поверхностью заготовки, силы резания увеличиваются, после чего происходит их резкое снижение, далее силы снова возрастают, после чего повторяется скачок, и так далее по циклу (рис.1).

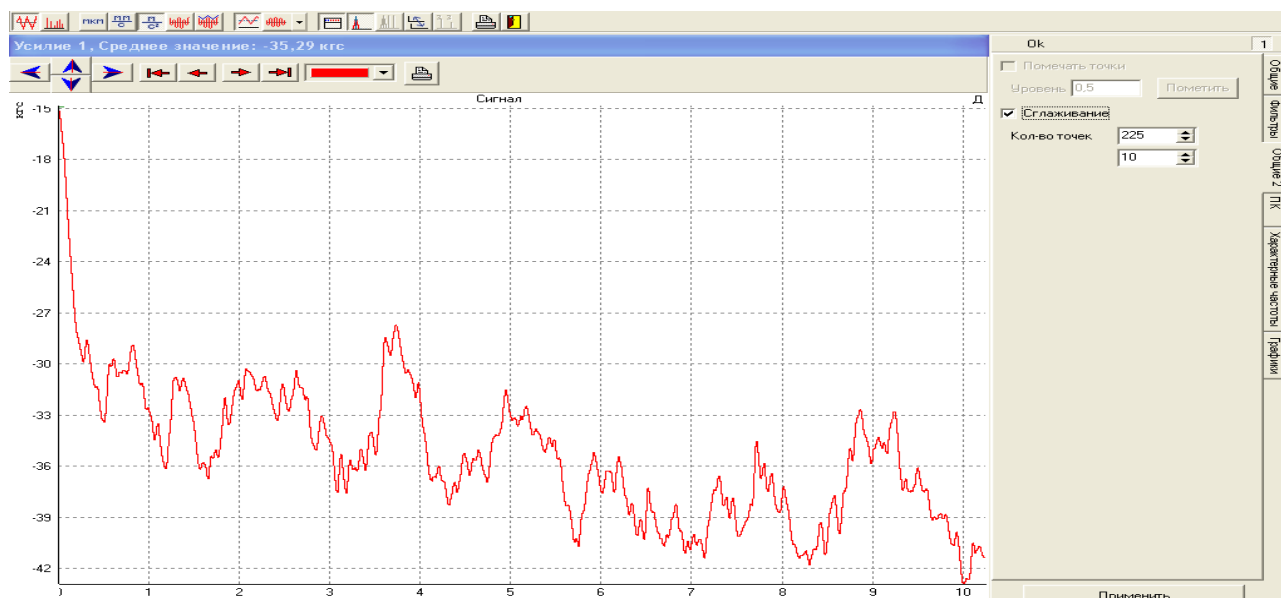


Рис. 1. Динамика изменения силы резания P_z при ортогональном резании углепластика ВКУ39 с подачей 90мм/мин и глубиной 0,1мм

Для проверки гипотезы были проведены экспериментальные исследования процесса абразивной обработки углепластика жесткими

шлифовальными кругами. В результате проведенных опытов были получены данные по качеству поверхностного слоя представленные в табл. 1 [5].

Таблица 1

Шероховатость обработанной поверхности углепластика жесткими шлифовальными кругами

Марка круга	V м/с	№ поверхности образца	S м/мин	tмм	Rамкм			\overline{Ra}
					1	2	3	
14AF60G7 V2250	25	1	5	0.05	0.664	0.404	0.521	0.530
		2	10		0.732	0.662	0.565	0.653
25AF60G14V2250		3	5		0,490	0,560	0,616	0.555
		4	10		0,858	0,850	0,766	0.825
14AF60G7 V2250		0.1	5	5	0,461	0,551	0,441	0.484
			6	10	0,766	0,545	0,572	0.628
25AF60G14V2250			7	5	0,521	0,511	0,480	0.571
			8	10	0,755	0,894	0,682	0.710

Однако, результаты предварительных опытов, при прочих идентичных режимах обработки показали значительное увеличение шероховатости обработанной поверхности стеклопластика относительно ПКМ армированного углеродным волокном [5]. Для определения причин данного явления был проведен ряд опытов, направленный на анализ профиля обработанной поверхности, а также уточнения типа дефектов, которые стимулируют снижение качества поверхности.

Основная часть. Экспериментальные исследования проводились на плоскошлифовальном станке марки JETJPSG 1224 H, при этом в качестве режущего инструмента были применены жесткие шлифовальные круги из электрокорунда нормального 14AF60G7 и карбида кремния зеленого 63CF54G14. Габаритные размеры абразивного инструмента составляли 300x30x76,2 мм. Обрабатываемый полимерный композиционный материал был выполнен из препрега ВПС-34 на основе стеклоткани Т-10-14 и имел размерность исходной заготовки 50x50x7 мм. Методика проведения опытов повторяла ранее проведенные исследования в области обрабатываемости абразивным инструментом заготовок из углепластика, результаты которых представлены в работе «Повышение производительности и качества обработки композиционных материалов на основе выбора и рационального применения абразивного инструмента» [5].

Результаты исследований зависимости параметра шероховатости Ra от скорости подачи стола S и глубины шлифования t при скорости резания 25 м/с представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерения шероховатости поверхностного слоя образца из стеклопластика

Абразивный круг 14AF60G7 V2250					
S м/мин	t мм	Ra мкм			\overline{Ra} мкм
		1	2	3	
5	0,05	2,986	3,136	3,095	3,072
10		6,398	5,330	5,671	5,799
Абразивный круг 63CF54G14V35					
S м/мин	t мм	Ra мкм			\overline{Ra} мкм
		1	2	3	
5	0,05	4,880	5,905	4,781	5,189
10		8,159	8,116	8,712	8,329

Анализ полученных результатов обработки заготовок из стеклопластика (табл. 2.) в совокупности с результатами, представленными в вышеуказанной работе по обрабатываемости углепластика (табл. 1.), позволяет утверждать о глобальном отличии процессов протекающих в зоне резания, основанием чего служит увеличение шероховатости обработанной поверхности при прочих равных условиях обработки. Для уточнения причин способствующих повышению значений параметра шероховатости Ra на обработанной поверхности, были построены профилограммы, полученные при помощи профилометра марки MarSurf – PSI, с образцов подвергавшихся резанию при скорости подачи стола 5м/мин и 10м/мин. (рис. 2).

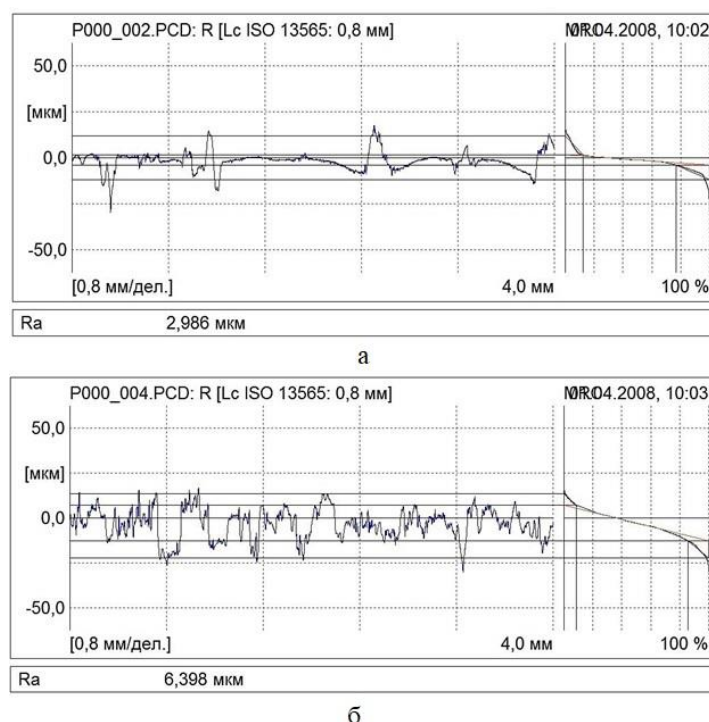


Рис. 2. Профилограмма профиля обработанной поверхности стеклопластика жестким абразивным кругом марки 14AF60G7 при скорости подачи стола 5м/мин (а) и 10м/мин (б)

Как можно отметить, профиль обработанной поверхности в обоих случаях имеет протяженные максимальные значения впадин, что может быть вызвано такими дефектами как порообразование и растрескивание матрицы полимерного композиционного материала [7]. С целью уточнения вида дефектов, обработанная поверхность образца была представлена в масштабе при помощи цифрового LCD микроскопа VM 200 (рис. 3).

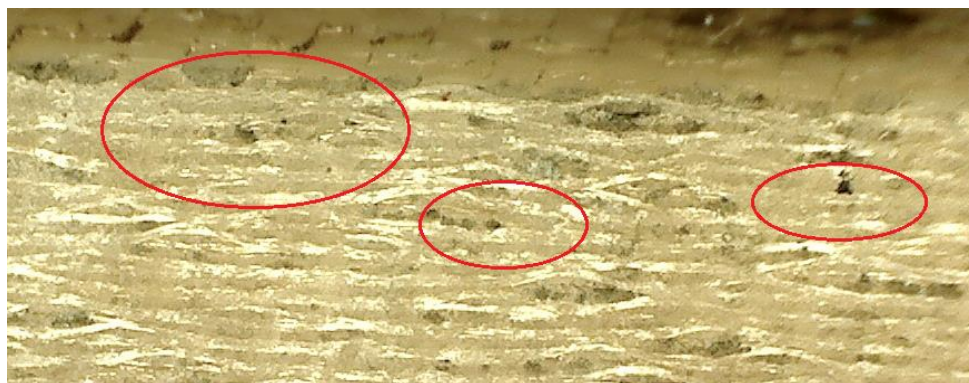


Рис. 3. Обработанная поверхность заготовки из стеклопластика жестким шлифовальным кругом 14AF60G7

Согласно рис. 3, подтверждается наличие порообразования, причинами возникновения которых могут выступать как адгезионное взаимодействие оксидов алюминия, так и качество изготовления исходной заготовки. Второе в свою очередь определяет пригодность материала к эксплуатационному назначению и не является допустимым дефектом в ряду случаев. Однако, адгезионное взаимодействие оксидов алюминия, было исключено ввиду наличия на обработанной поверхности жесткими абразивными кругами из карбида кремния зеленого 63CF54G14 аналогичных дефектов (рис. 4.) Таким образом, основополагающим дефектом принимается порообразование в процессе изготовления исходной заготовки.



Рис. 4. Профиль поверхности после обработки шлифовальным кругом 63CF54G14 при скорости подачи стола равной 5м/мин

Выводы

Абразивная обработка жесткими шлифовальными кругами из электрокорунда нормального и карбида кремния зеленого позволяют обеспечить значения шероховатости поверхности конкурентные фрезерной обработке. В свою очередь, ввиду малого количества проведенных экспериментов, для уточнения полученных результатов и повышения показателей качества поверхности требуется большее количество опытов, которое позволит выявить зависимость показателей качества от режимов обработки. Так же к ряду корректирующих мероприятий предлагается замена производителя исходной заготовки, что позволит оценить качество поверхности без пор образованных в процессе ее изготовления. Таким образом, в результате проведенных исследований можно утверждать, что основополагающим фактором, влияющим на эксплуатационные характеристики изделия, служит качество изготовления исходной заготовки, дефекты которой в процессе механической обработки могут быть непоправимы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров В. Ф. Исследование проблем механической обработки современных высокопрочных композиционных материалов, используемых для производства деталей авиационной и ракетно-космической техники/ В.Ф. Макаров// Вестник ПНИПУ. 2015. №2. Т17. С.30-41.
2. Рубцов С. М. Полимерные волокнистые композиты в конструкции турбовентиляторного авиационного двигателя ПС-90А // Конверсия в машиностроении. 2007. № 3. С. 19-26.
3. Ярославцев В. М. Новые технологии повышения качества поверхностного слоя при резании волокнистых полимерных композиционных материалов // Вестник МГТУ им. Баумана. Серия Машиностроение. 2017. № 6. С.15-18.
4. Козулько Н. В. Механизация абразивной обработки деталей из полимерных композиционных материалов/ Н. В. Козулько// Вестник Донского государственного технического университета. 2018г. №2. Т18. С. 179-189
5. Макаров В. Ф., Волковский А. А., Сабирзянов А. И. Повышение производительности и качества обработки композиционных материалов на основе выбора и рационального применения абразивного инструмента/ В. Ф. Макаров, А. А. Волковский, А. И. Сабирзянов// Научно-технические технологии в машиностроении. 2020. №9. С40-48.
6. Макаров В. Ф., Койнов, И. И., Кумар, Д. Особенности деформационных явлений в процессе стружкообразования при ортогональном резании композиционных материалов // Научно-технические технологии в машиностроении. 2018. №6 (84). С. 38-43.
7. Донецкий К. И. Некоторые особенности применения семипрегов для вакуумного формирования ПКМ (обзор)/ К. И. Донецкий, М. И. Душин, М. И. Мищун, Д. В. Севастьянов // Труды ВИАМ. 2017г. №12(60). С81-93.

Новикова С. К.

Novikova S. K.

svetlananovikova.2013@yandex.ru

ПАО «ОДК – Уфимское моторостроительное производственное объединение»

Кильметова Л. Р.

Kilmetova L. R.

Хадиуллин С. Х.

Khadiullin S. H.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕЖУЩИХ СВОЙСТВ ИНСТРУМЕНТА С ПОКРЫТИЕМ НА ЭТАПЕ ТПП

COMPUTER MODELING AS A METHOD FOR PREDICTION OF THE CUTTING PROPERTIES OF A COATED TOOL AT THE STAGE OF CCI

***Аннотация.** В условиях современного автоматизированного производства проблема повышения износостойкости инструмента и управления этой характеристикой приобретает исключительное значение, так как износостойкость в итоге определяет и производительность операций механической обработки.*

В настоящее время не существует достаточного количества методов по эффективному использованию режущих инструментов в производственных условиях, хотя любому современному предприятию эти методы просто необходимы. Выходом из сложившейся ситуации видится разработка комплексных методик с использованием компьютерных систем, на основе научного подхода, которые обобщают известные теоретические наработки и с минимальными затратами времени позволяют добиться хороших результатов благодаря использованию механизмов прогнозирования и компьютерного анализа.

***Abstract.** In the conditions of modern automated production, the problem of increasing the wear resistance of the tool and the control of this characteristic acquires exceptional importance, since the wear resistance ultimately determines the productivity of machining operations.*

Currently, there are not a sufficient number of methods for the effective use of cutting tools in a production environment, although any modern enterprise, these methods are essential. The way out of this situation is the development of complex methods using computer systems, based on a scientific approach, which generalize the known theoretical developments and, with a minimum amount of time, make it possible to achieve good results through the use of forecasting mechanisms and computer analysis.

***Ключевые слова:** режущий инструмент, износостойкость, интенсивность износа, специальные покрытия, компьютерное моделирование.*

***Keywords:** cutting tool, wear resistance, wear rate, special coatings, computer simulation.*

Различные методики прогнозирования режущих свойств инструмента на этапе ТПП

Применение оптимальной марки инструментального материала всегда являлось одной из важных задач обработки металлов резанием. Известно [1],

что при обработке жаропрочных сплавов за счет замены одной марки инструментального материала на другую удавалось повысить стойкость инструмента до 10 раз, при одновременном повышении уровня оптимальных скоростей резания. Следовательно, только применением оптимальных марок инструментальных материалов можно в значительной степени повысить производительность и снизить себестоимость обработки.

Несмотря на значительное количество опубликованных работ [2], разработанных нормативов на механическую обработку жаропрочных материалов (НИАТ, ЦНИИТМАШ и др.), производители оказываются в затруднительном положении при появлении новых инструментальных и обрабатываемых материалов. Отсутствие научно обоснованных рекомендаций по выбору инструментального материала и режимов резания новых жаропрочных материалов резко затягивает сроки их освоения. Очевидно, для сокращения этих сроков необходимы новые, более совершенные методы решения подобных задач.

В настоящее время наиболее распространенным способом выбора рациональной марки инструментального материала является использование рекомендаций, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе [3]. Но имеющиеся рекомендации не всегда отвечают все возрастающим требованиям производства. Поэтому часто для решения конкретных технологических задач необходимо проводить дополнительные экспериментальные исследования.

Применение износостойких покрытий для увеличения режущей способности инструмента

Повышение работоспособности режущего инструмента можно обеспечить благодаря улучшению свойств поверхностного слоя инструментального материала, при котором рабочая поверхность инструмента наиболее эффективно сопротивляется характерным видам износа [4]. Подобный материал должен обладать значительным запасом прочности при изгибе, сжатии и выдерживать ударные нагрузки. Одной наиболее важной проблемой долговечности инструмента является то, что после деформации инструмента его отправляют на заточку, перед тем, как заточить, снимают слой покрытия. Это ведет к снижению срока службы инструмента. Решение данной проблемы: вторичное покрытие.

Таким образом, совершенствование технологии нанесения покрытий для режущего инструмента, разработка новых модификаций защитных покрытий позволяют существенно повышать работоспособность инструмента и расширять область его эффективного применения. По ряду требований, защитное покрытие, в конечном счёте, должно соответствовать высокой степени износостойкости. Следовательно, оно должно быть термически стойким и прочно сцепляться с телом инструмента. Покрытие выбирается с учётом типа обрабатываемого материала и технологии использования конкретного инструмента [5].

Компьютерное моделирование как метод прогнозирования режущих свойств инструмента на этапе ТПП.

В настоящее время не существует достаточного количества методов по эффективному использованию режущих инструментов производственных условиях, хотя любому современному предприятию эти методы просто необходимы. Выходом из сложившейся ситуации видится разработка комплексных методик с использованием компьютерных систем, на основе научного подхода, которые обобщают известные теоретические наработки и с минимальными затратами времени позволяют добиться хороших результатов благодаря использованию механизмов прогнозирования и компьютерного анализа [6].

Для разработки процесса моделирования и проверки адекватности использовали рекомендуемые режимы резания, определенные в процессе проведения литературного обзора точения жаропрочного сплава на никелевой основе ХН73МБТЮ резцом из материала ВК8. Ключевую роль в данной работе занимает режущий инструмент с покрытием. В качестве износостойкого покрытия был выбран нитрид титана TiN толщиной 2 мкм. Данное моделирование проводилось в ПО Deform [6].

В ходе проведения исследования были получены результаты проведения симуляции процессов резания заготовок из сплава ХН73МБТЮ пластинами ВК6 на скоростях 20, 25, 30 м/мин и аналогичные процессы с использованием пластин ВК6 с износостойким покрытием TiN.

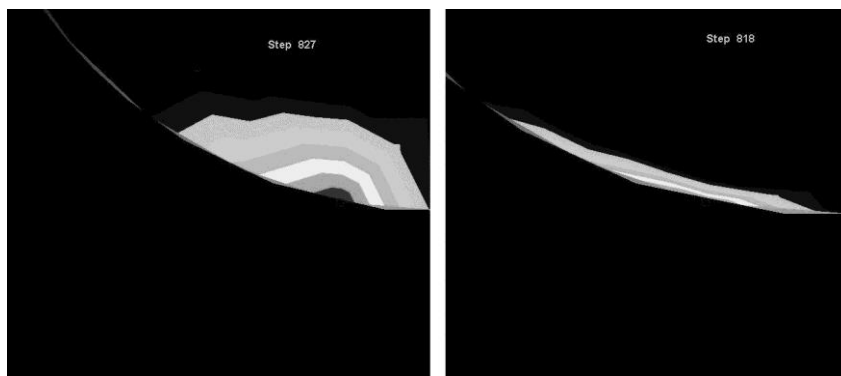


Рис. 1. Износ инструмента без покрытия и с покрытием TiN на одинаковых режимах резания

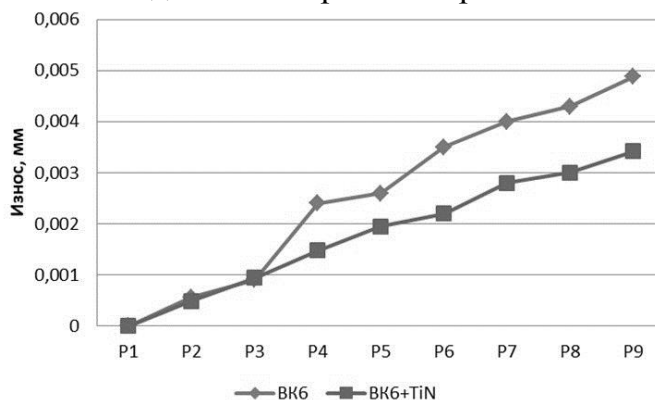


Рис. 2. Рост износа инструмента с покрытием и без по передней поверхности

Упрощенное моделирование дало картину распределения износа инструмента по задней поверхности, которое позволяет проследить рост величины износа с увеличением скорости резания – рис. 1, 2. На основе полученных данных и приведённых выше графиков можно проследить то, что износ инструмента с покрытием ниже, чем износ инструмента без него. Натурные эксперименты находятся на стадии планирования, поэтому на данный момент проверить сходимость полученных результатов не представляется возможным.

Выводы

На сегодняшний день актуальной задачей видится прогнозирование режущих свойств инструментальных материалов и покрытий. Одним из методов, позволяющих на стадии технологической подготовки производства спрогнозировать процесс резания без проведения дорогостоящих экспериментов, а также дающих возможность назначить режимы резания для определенного сочетания обрабатываемого и инструментального материалов, тем самым сократив время технологической подготовки, является метод компьютерного моделирования.

В ходе проведения компьютерного моделирования получили результаты распределения износа по передней поверхности инструмента. Полученные результаты в ходе проведения моделирования не позволяют сделать вывод об адекватности данного метода, так как не проведена сходимость результатов. На стадии технологической подготовки производства пока нельзя пользоваться лишь этими результатами моделирования, исключив при этом проведение экспериментов, так как это не исключает дальнейшие риски. В данный момент планируется проведение натурных экспериментов, поэтому объективно оценить адекватность метода и обновить этот вывод сделается возможным в дальнейшем. Предлагаемая же методика имеет право на существование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухин В. С. Особенности механизма износа твердосплавного инструмента при обработке жаропрочных никелевых сплавов [Текст] // Проблемы обрабатываемости жаропрочных сплавов резанием: тез. докл. Всесоюзн. конф. Уфа, 1975. С. 143-147.
2. Хадиуллин С. Х. Механика процесса деформации срезаемого слоя при нестационарном резании жаропрочных сталей и сплавов [Текст] / С.Х. Хадиуллин // Сб. науч. трудов «Современные организационные, технологические и конструкторские методы управления качеством». Пермь: Изд. Пермского гос. техн. ун-та. 2006. С. 24-27.
3. Армареги И. Дж. А. Обработка металлов резанием [Текст] / И. Дж. А. Армареги, Р. Х. Браун; пер. В. А. Пастунова. М.: Машиностроение, 1977. 325 с.
4. Варданян Э. Л. Повышение эксплуатационных свойств металлорежущего инструмента [Текст] / Э. Л. Варданян, А. Ю. Назаров, К. Н. Рамазанов /Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: сб. статей. 2019. С.85-87.
5. Давлетбаева Р. Р. Покрытие для режущего инструмента [Текст] / Р. Р. Давлетбаева // Молодой ученый. 2017. № 2 (136). С. 98-101.
6. Scientific Forming Technologies Corporation: [сайт].URL: <https://www.deform.com/>.

Песин М. В.

Pesin M. V.

m.pesin@mail.ru

Макаров В. Ф.

Makarov V. F.

Мельников С. А.

Melnikov S. A.

Павлович А. А.

Pavlovich A. A.

Халтурин О. А.

Khalturin O. A.

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРОЧНЯЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

IMPROVEMENT OF STRENGTHENING TECHNOLOGIES OF HIGHLY LOADED SURFACES OF OIL AND GAS PRODUCTION EQUIPMENT PARTS

***Аннотация.** Предоставлен анализ основных методов упрочнения высоконагруженных резьб деталей технологического оборудования с целью повышения сопротивления усталости. В качестве рационального метода предложено поверхностное пластическое деформирование резьбы для повышения значения показателя надежности, особенную роль это имеет при эксплуатации резьбового соединения в критических условиях. Проектирование технологического процесса обработки деталей с резьбой, применяемых в нефтяной и газодобывающей отраслях промышленности, связано с использованием специального деформирующего ролика, с определением силы его прижима к обрабатываемой поверхности. В результате работы установлено, что применение поверхностного пластического деформирования приводит к образованию в резьбе сжимающих остаточных напряжений, что обеспечивает увеличение надежности резьбового соединения.*

***Abstract.** The analysis of the main methods of hardening highly loaded threads of technological equipment parts in order to increase fatigue resistance is presented. As a rational method, surface plastic deformation of the thread is proposed to increase the value of the reliability indicator; this has a special role in the operation of a threaded connection under critical conditions. The design of the technological process for the processing of threaded parts used in the oil and gas industry is associated with the use of a special deforming roller, with the determination of the force of its pressing to the surface to be treated.*

***Ключевые слова:** резьбы, обкатывание роликом, остаточные напряжения, поверхностное пластическое деформирование, упрочнение.*

***Keywords:** threads, rolling with a roller, residual stresses, surface plastic deformation, hardening*

К технологическим службам предприятий машиностроения поступают запросы заказчиков на продукции с увеличенными эксплуатационными требованиями, что приводит к соответствующей организации технологической

подготовки производства, обеспечивающей повышение характеристик товара. Как правило, существенное повышение себестоимости товара происходит из-за замены марки материала детали, что делает его более прочным.

Для повышения конкурентоспособности ответственных деталей машин разработчики применяют технологии упрочняющей обработки, что, в значительной степени, определяет повышение их эксплуатационных параметров.

В машиностроении, где применяются разъемные соединения, важной составляющей конструкции является резьба как элемент, отвечающий за ее долговечность. На рис. 1 показана замковая резьба утяжеленной бурильной трубы. Исследователями проделана значительная работа по определению направлений в упрочнении резьбового соединения, например, химико-термическая обработка, использование высококонцентрированной энергии в виде плазмы, поверхностное пластическое деформирование с использованием ультразвука и разновидность методом поверхностного пластического деформирования – обкатыванием профильным роликом [1-5].



Рис. 1. Замковая резьба утяжеленной бурильной трубы

Суть метода упрочнения плазмой поверхности детали основана на свойстве плазменной струи формировать на сравнительно малом участке обрабатываемой поверхности поток тепловой энергии достаточно высокой плотности, который требуется нагрева металла детали.

По величине температурного поля, принимаемого за основной показатель плазмы, есть возможность исследовать структурное состояние и фазовый состав поверхностного слоя материала в зависимости от скорости нагрева и охлаждения [6].

Можно выделить следующие основные преимущества химико-термической обработки [7]: слой, контактирующий с ответной поверхностью, становится упрочненным; после обработки существенно повышается микротвердость поверхности.

При исследовании метода отмечено, что он является существенно затратным. Установлено, что процесс обработки ультразвуком имеет значительно большую мощность по отношению к технологическому процессу обкатывания [8-10].

Формирование упрочненной структуры поверхностного слоя обусловлено физической сущностью статико-импульсной обработки, основой которой являются динамические и статические нагрузки деформирующего инструмента на обрабатываемую поверхность. Первое воздействие создает напряжения в зоне контакта инструмента и заготовки при сравнительно небольшой величине затраченной энергии, а второе воздействие способствует эффективной трансляции ударного импульса. Для формирования ударных импульсов при статико-импульсной обработке, как правило, используют генераторы импульсов на основе принципов гидравлики или электричества. Данные устройства обеспечивают передачу удара на деформирующий инструмент с помощью специальной системы, формирующей ударные импульсы, которые, при соответствующих условиях приводят к пластической деформации материала [11].

Повышение сопротивления усталости резьбовых соединений бурильных труб целесообразно выполнять поверхностно пластической деформацией. Достигается изменение надежности за счет упрочнения поверхности впадины резьбы в условиях обеспечивающие при оптимальной силе прижатия ролика. Особенности разбиения твердотельной конструкции обкатывающего ролика и детали для моделирования процесса упрочнения показано на рис. 2.

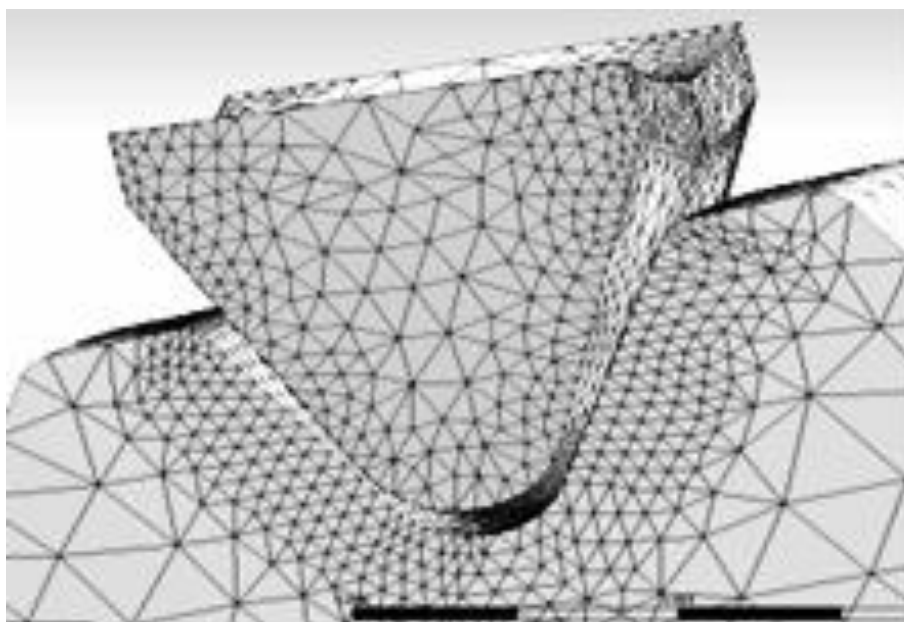


Рис. 2. Моделирование процесса упрочнения профиля замковой резьбы

Введение в технологический процесс поверхностного пластического деформирования резьбовой поверхности ведет к формированию в поверхностном слое рациональных сжимающих остаточных напряжений, что повышает сопротивление усталости и долговечность деталей с высоконагруженными резьбами.

Выводы

По итогам проведенной научно-практической работы оформлены следующие выводы:

- метод поверхностной пластической деформации является эффективным технологическим методом, повышающим сопротивление усталости резьбовых соединений;
- метод обкатывания поверхности специальным профильным роликом имеет ряд существенных преимуществ;
- для осуществления технологии обкатывания поверхности требуются минимальные затраты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Песин М. В. Исследование остаточных напряжений при упрочнении резьбы бурильных труб. Экспозиция Нефть Газ. 2018. №4 (64). С. 67-69.
2. Григорьева А. В., Туранский Р. А., Шакиров Р. К., Песин М. В. Повышение усталостной прочности резьбы деталей машиностроения. Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. 2014. Т. 2. С. 437-443.
3. Песин М.В. К моделированию обкатки резьбовой поверхности бурильных труб // «Академический журнал Западной Сибири», №4 (47), 2013. С. 27-28.
4. Песин М.В. Повышение надежности резьбовых соединений нефтегазовых изделий // Технология машиностроения - М. №9. 2011. С.49- 50.
5. Песин М.В. Повышение надежности резьбовых соединений труб / СТИН. 2011, №11. С. 39-40.
6. Песин М.В. Повышения надежности бурильных труб на стадии проектирования путем использования математического моделирования процесса упрочнения резьбовой поверхности / М.В. Песин, Е.Д. Мокроносов / «Экспозиция Нефть Газ», №2 (27), 2013. С. 56-57.
7. Афонин А.Н., Макаров А. В., Ларин А. И., Мартынов Е. М. Гетерогенное упрочнение резьб и профилей поверхностным пластическим деформированием. Научно-технический вестник Поволжья №6 2018. С. 41.
8. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. В 2-х томах. Т. 2. / С.К. Амбросимов, А.Н. Афонин А.П. Бабичев и др. Под общ. ред. А.Г. Суслова. — М.: Машиностроение, 2014. — 444 с.
9. Справочник технолога – машиностроителя. В 2 т. Т.2 / В.Н. Андреев, А.Н. Афонин, В.Ф. Безъязычный и др. – М.: Инновационное машиностроение, 2018. – 818 с.
10. Афонин, А.Н. Резьбонакатывание. Библиотека технолога. [Текст] / А.В. Киричек, А.Н. Афонин. - М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.
11. Pesin M.V. Improving the Reliability of Threaded Pipe Joints // Russian Engineering Research. - 2012. - Vol. 32. - №2. - P. 210-212.

Песин М. В.

Pesin M.V.

m.pesin@mail.ru

Макаренков Е.С.

Makarenkov E. S.

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь

ПРИМЕНЕНИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА

APPLICATION OF INNOVATIVE TECHNOLOGY FOR STRENGTHENING OF PARTS OF OIL AND GAS PRODUCTION EQUIPMENT BY THE PROCESS SIMULATION

Аннотация. представлены технологические процессы упрочнения нефтегазового оборудования. Описаны преимущества компьютерного моделирования над натурными испытаниями.

Abstract. The technological processes of hardening of oil and gas equipment are presented. The advantages of computer modeling over field tests are described.

Ключевые слова: электромеханическая обработка, надежность, резьба, упрочнение, моделирование, поверхностная пластическая деформация.

Keywords: electromechanical processing, reliability, thread, hardening, modeling, surface plastic deformation.

Нефтедобывающая промышленность является одной из ведущих промышленных отраслей в России. Постоянно ведется разработка новых месторождений, где применяют различные методы увеличения нефтеотдачи пластов, и, вместе с тем, в эксплуатацию вводится новое оборудование. Актуальной задачей нефте- и газодобывающих предприятий является увеличение надежности работы наземного и подземного оборудования, т.к. частая смена требует больших затрат и приводит к увеличению межремонтного периода и снижению суточной добычи нефти. Осложняющие факторы сокращают ресурс оборудования, что приводит к большому числу аварий.

С целью снижения негативного влияния износа оборудования, потерь прибыли, увеличения добычи и снижения аварийных ситуаций необходимо решение многих задач: проектирование, изготовление оборудования, проведение исследований, анализ причин его низкой надежности. Проведение данных исследований вызывает значительные затраты, а это увеличивает срок ввода в эксплуатацию оборудования.

В настоящее время существует большое количество программных продуктов по компьютерному моделированию, которые используются в различных отраслях промышленности. Работа многих программ основана на методе конечных элементов, который является численным методом решения

дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений. Метод моделирования широко используется для решения задач механики деформируемого твёрдого тела, теплообмена, гидродинамики и электродинамики [1].

Необходимо отметить то, что ресурсные показатели наземного и подземного оборудования нефтегазовой отрасли в основном определяются качеством поверхностного слоя, который формируется в течение всего технологического процесса изготовления детали. Задачей современного машиностроения является повышение долговечности изделий. Так электромеханическая обработка (ЭМО) может обеспечить повышение износостойкости изделий, и как следствие надежности оборудования. ЭМО – технология поверхностного упрочнения концентрированными потоками энергии, основанная на комплексном термомодеформационном воздействии при пропускании электрического тока большой плотности и низкого напряжения через зону контакта детали. В итоге формируется эффективный упрочненный поверхностный слой на глубину 0,2...0,3 мм с повышенной микротвердостью и одновременным поверхностным наклёпом, значительно повышающим износостойкость и сопротивление усталости детали [2].

Выбор параметров упрочнения (силы прижима, радиуса профиля ролика и др.), обеспечивающих нужный эффект, зависит от механических свойств упрочняемого конструкционного материала, а также размеров и формы детали [3]. Технологический процесс упрочняющей обработки выполняется на основе результатов испытаний реальных образцов. Пример проведения ЭМО резьбы показан на рис. 1.



Рис. 1. Отделочно-упрочняющая электромеханическая обработка резьбы

Использование специальной оснастки позволяет проводить ЭМО резьбы и отверстий, показаны на рис. 2.



Рис. 2. Повышение твердости резьб и отверстий

Актуальной задачей является уменьшение влияния концентратора напряжений, изменение технологических остаточных напряжений на благоприятные, моделирование процесса упрочняющей обработки, выбор программного комплекса для решения этих задач. Известны задачи, решаемые компьютерным моделированием, которые помогают полностью переработать конструкцию изделия и выбрать технологические режимы обработки. Одним из самых популярных и производительных программных комплексов (ПК) является *ANSYS*. Универсальность этого ПК позволяет использовать одну и ту же модель для решения таких связанных задач, как прочность при тепловом нагружении, влияние магнитных полей на прочность конструкции и т.д. Средства *ANSYS* позволяют проводить расчеты статического и динамического напряженно деформированного состояния конструкций, в том числе геометрически и физически нелинейных задач механики деформируемого твердого тела. Возможности постпроцессинга *ANSYS* позволяют изучить поведение изделия при нагрузке.

Проведение реальных испытаний весьма затруднительно без специальной аппаратуры и установок, в результате чего сложно оценить конечный эффект [4-8]. Однако современные компьютерные технологии позволяют моделировать механические процессы обработки, определять напряженное состояние в элементах конструкций, тем самым облегчая поиск рациональных технологических параметров упрочняющей обработки.

Выводы

В результате проделанных исследований сделаны следующие выводы:

- поставленная задача повышения надежности технологического оборудования при использовании моделирования процесс упрочнения является актуальной;
- основными элементарными поверхностями деталей, таких как, трубы НКТ, резьба НКТ, плунжеры насосов для закачки проппанта это – отверстие и резьба;
- наиболее эффективный метод улучшения износостойкости поверхности деталей – электромеханическая обработка;
- для практического использования требуются дополнительные исследования в подборе технологических режимов упрочняющей технологии электромеханической обработки;
- программные продукты дают возможность пользователю реализовать данную задачу, при этом позволяя максимально сократить количество дорогостоящих опытных образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковтун В. А., Короткевич С. Г. Обзор современных прикладных программных комплексов для проведения исследований композитных изделий // Интернет-журнал "Технологии техносферной безопасности – 1-65.-2016. С.1-9.
2. Аскинази Б. М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. М.: Машиностроение. 1989. 200 с.
3. Федоров С. К., Федорова Л. В. Восстановление резьбы электромеханической обработкой // Вестник УлГТУ 1-2 -2003. С. 36-39.
4. Мокронос Е. Д., Песин М. В. Повышение надежности горных машин на стадии проектирования путем использования математического моделирования процесса упрочнения резьбовой поверхности. Восстановление резьбы электромеханической обработкой // Вестник УлГТУ 1-2 -2003. С. 36-39.
5. Блюменштейн В. Ю., Киричек А. В., Бабичев А. П. Современные конкурентоспособные технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием / Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 5. С. 47-52.
6. Песин М. В. Научные основы моделирования процесса упрочнения впадины резьбы бурильных труб обкатыванием роликом // Экспозиция Нефть Газ. 2013. №5 (30). С. 68–70.
7. Pesin M. V. Improving the Reliability of Threaded Pipe Joints. Russian Engineering Research 2012. Vol. 32. №2. pp. 210–212.
8. Simulation of the Technological Process of the Strengthened Treatment of the Drill Pipes Thread / M. V. Pesin // Urgent Problems of Up-to-Date Mechanical Engineering : Intern. Conf., UTI TPU, December 11-12, 2014, Yurga, Russia. Durnten-Zurich : TTP, 2015. P. 476-482. ([Applied Mechanics and Materials; Vol. 770]).

Кудашкин В. Н.

Kudashkin V. N.

viok20@list.ru

Криони Н. К.

Krioni N. K.

nkrioni@mail.ru

Янбухтин Р. М.

Yanbukhtin R. M.

rishyan@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

МОДУЛЬНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ – ОДНО ИЗ ОСНОВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

MODULAR CONSTRUCTION OF GAS TURBINE ENGINES IS ONE OF THE BASIC REQUIREMENTS DURING THEIR OPERATION IN THE TECHNICAL CONDITION

***Аннотация.** Рассмотрены особенности авиационных двигателей модульной конструкции и технологические проблемы их производства. Приведено обоснование экономической целесообразности эксплуатации двигателей по техническому состоянию в отличие от эксплуатации по назначенному ресурсу.*

***Abstract.** The features of modular aircraft engines and technological problems of their production are considered. The substantiation of the economic feasibility of operating engines according to their technical condition, as opposed to operating according to the assigned resource, is given.*

***Ключевые слова:** модуль, модульность, ресурс, эксплуатация по техническому состоянию.*

***Keywords:** module, modularity, resource, operation according to technical condition.*

Современные авиационные двигатели должны соответствовать высоким требованиям по надёжности, минимальной массе, экономичности, ремонтпригодности и ресурсу. Для двигателей гражданского назначения дополнительным условием является снижение уровня шума и загрязнения атмосферы. Эти задачи успешно решаются путём совершенствования конструкции, улучшения аэродинамических и термодинамических характеристик двигателей, а также благодаря использованию новых, более эффективных материалов, технологий изготовления деталей и узлов, поверхностного упрочнения нанесения покрытий и др. Также немаловажным требованием является создание ГТД с высокими эксплуатационными качествами. Данное требование, как подтверждает современный опыт эксплуатации, диагностики и ремонта ГТД различного назначения, можно обеспечить за счёт разработки и создания авиационных двигателей модульной конструкции, позволяющей:

- наиболее эффективно решать вопросы эксплуатации двигателя по техническому состоянию (ЭТС), вплоть до физической выработки его ресурса;
- обеспечить ремонт двигателя в условиях эксплуатирующих организаций (ЭО), без снятия его с эксплуатации и возвращения на предприятие-изготовитель для проведения восстановительного ремонта;
- сократить обменный фонд двигателей в воинских частях и ЭО, который иногда достигает ~ 30 % от числа эксплуатируемых на летательных аппаратах (ЛА);
- достичь более совершенных средств и методов механизации и автоматизации выполнения сборочно - переборочных работ на предприятии – изготовителе уже на этапе отработки конструкции изделия на технологичность и улучшить эти показатели в дальнейшем в процессе серийного освоения при постановке двигателя на производство.

Модульный принцип построения технологических процессов изготовления изделий открывает новые перспективы в решении проблемы совершенствования сборочного производства. Он позволяет выработать единый подход в проектировании сборочных процессов, средств их осуществления, широкого внедрения унификации, типизации и стандартизации.

Сам модульный принцип давно известен и достаточно широко используется в различных областях техники. Однако степень эффекта от его применения во многом зависит от того содержания, которое вкладывается в понятие модуля.

Рассмотрим применение модульного принципа в организации сборочного производства.

В настоящее время все вновь проектируемые ГТД создаются с учётом нового конструктивно-технологического качества – модульности, позволяющего значительно улучшить ремонтпригодность двигателя в условиях эксплуатации. Примерами таких двигателей являются: двигатель большой тяги ПС-90; двигатель ПД-14 для самолета МС-21 и нового поколения узкофюзеляжных самолетов; двигатель SaM 146 для самолета SUNKOJ SUPER JTТ100 (SSJ); двигатель АЛ-31ФП; АЛ-55И; современный двухконтурный двигатель фирмы Pratt&Whitney и др.

Существуют различные подходы к этому вопросу, что отражено в разработке руководящих технических материалов (РТМ) по методам обеспечения ремонтпригодности ГТД на этапах технического предложения и НИОКР [1, 2].

Накопленный опыт модульной сборки и замены модулей позволяет сделать следующие предварительные выводы по исходным положениям модульности:

1) модульность – конструктивно-технологическое качество двигателя, позволяющее производить оперативное восстановление двигателя в условиях эксплуатации путём замены, вышедших из строя модулей;

2) модули – взаимозаменяемые как по геометрическим, так и по функциональным параметрам сборочные единицы, замена которых на двигателе возможна в условиях эксплуатации;

3) модули могут представлять собой либо отдельные функциональные узлы двигателя (вентилятор, компрессор, турбина, камера сгорания, газогенератор), либо основные сборочные единицы этих узлов (ротор компрессора или турбины, статоры или сопловые аппараты турбины и т.д.).

Таким образом, создание модульных ГТД является логически и экономически обоснованным результатом эволюционного развития в авиационном двигателестроении.

Модульная конструкция позволяет наиболее полно использовать возможности эксплуатации двигателя по техническому состоянию.

Двигатель модульной конструкции состоит из отдельных модулей (блоков), которые при необходимости можно заменить, как в условиях серийного предприятия – изготовителя по результатам неудовлетворительных стендовых испытаний, так и в условиях ЭО. Разъёмы, которыми пользуются при замене модулей, обеспечивают соосность корпусов статора, соплового аппарата и др., а сами модули обеспечивают посадки и уровень балансировки роторов и других вращающихся частей двигателя в пределах норм ТТ и ТУ соответствующих чертежей. Модульная конструкция должна удовлетворять ряду условий и требований, в частности:

- деление двигателя на модули должно производиться с учётом прогнозируемой повреждаемости, безотказности и долговечности элементов конструкции, при этом необходимо учитывать собранную статистику по эксплуатируемым двигателям аналогичного типа;

- модулям в составе двигателя должны устанавливаться ресурсы;

- замена модулей на двигателе должна производиться, как правило, без разборки самих модулей;

- постановка на двигатель нового или отремонтированного модуля не должна снижать эксплуатационных характеристик двигателя и самолётных систем в целом;

- подшипники опор роторов двигателя при замене модулей должны сохранять свою комплектность, т.е. элементы подшипников следует включать в состав одного модуля [1].

В отечественном двигателестроении впервые с практикой проектирования двигателей модульной конструкции столкнулись на ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко при создании трёхвального турбореактивного двухконтурного двигателя Д-36 для установки на пассажирском самолёте Як-42 и транспортных самолётах Ан-72 и Ан-74 и мощного двигателя Д-136 для вертолёта рекордной грузоподъёмности Ми-26.

На рис.1, 2 представлены двигатели Д-36 и Д-136, расчленённые на составляющие модули. Двигатель Д-36 состоит из 12 модулей, Д-136 – из 10 модулей. Все модули, кроме главного, можно заменить при частичной переборке в условиях ЭО. Замена главного «базового» модуля требует

выполнения полной переборки двигателя и в условиях ЭО нецелесообразна. Замена труднодоступных модулей компрессора среднего давления и камеры сгорания составляет по трудоёмкости примерно 50 нормо-часов, производится при частичной переборке двигателя и в условиях ЭО вполне реальна, что подтверждается практическим опытом.

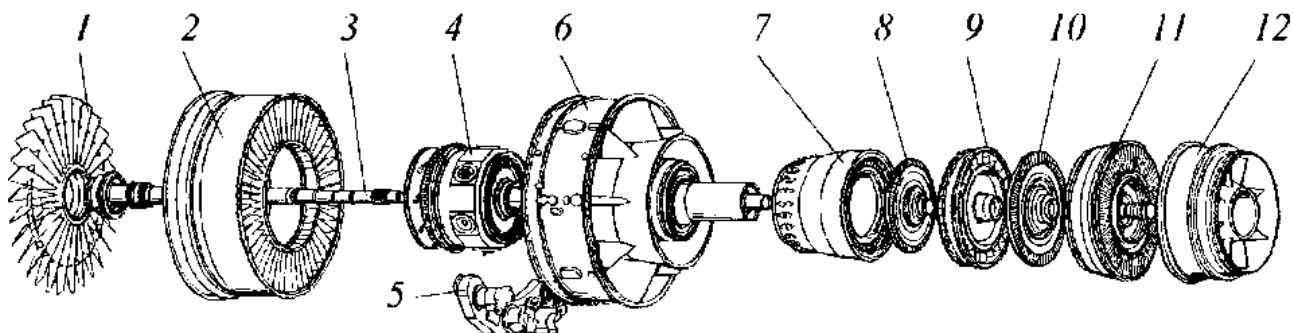


Рис. 1. Модули двигателя Д-36

- 1 – колесо вентилятора; 2 – корпус вентилятора со спрямляющим аппаратом;
 3 – вал вентилятора; 4 – компрессор низкого давления; 5 – коробка приводов;
 6 – промежуточный корпус с компрессором высокого давления;
 7 – камера сгорания; 8 – ротор турбины высокого давления; 9 – корпус опоры турбины;
 10 – ротор турбины низкого давления; 11 – турбина вентилятора;
 12 – корпус задней опоры

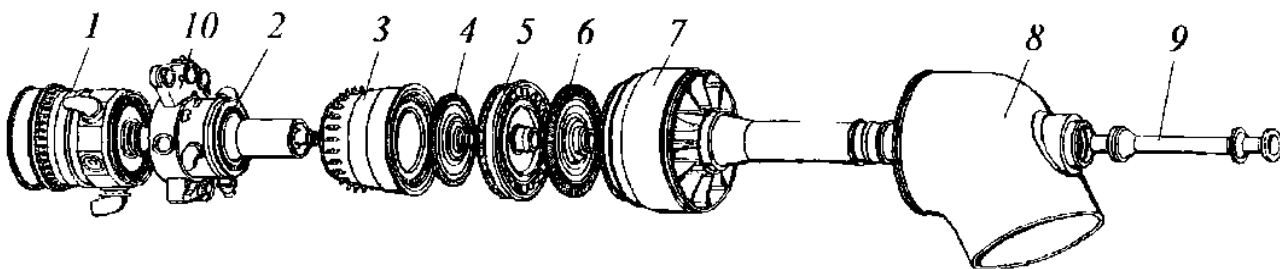


Рис. 2. Модули двигателя Д-136

- 1 – компрессор низкого давления; 2 – промежуточный корпус с компрессором высокого давления; 3 – камера сгорания с корпусом; 4 – ротор турбины I ступени;
 5 – корпус опоры турбины; 6 – ротор опор турбины; 7 – свободная турбина; 8 – турбина выхлопная; 9 – выходной вал привода редуктора несущего винта;
 10 – коробка приводов

Оценить модульность двигателей Д-36 и Д-136 можно по коэффициенту модульности, предлагаемому в РТМ по методам обеспечения модульности [1] он составит (1) и (2):

$$K_{Д-36} = \frac{M}{N} = \frac{11}{12} = 0,916, \quad (1)$$

$$K_{Д-136} = \frac{M}{N} = \frac{19}{110} = 0,9, \quad (2)$$

где: M – количество модулей на двигателе, замена которых возможна в условиях эксплуатации;

N – количество сборочных единиц, стыкуемых при сборке двигателя на участке общей сборки двигателя в условиях сборочного цеха.

Современный двигатель АЛ-31ФП (рис. 3.) для новейшего многоцелевого сверхманёвренного истребителя – перехватчика Су-30МК и других модификаций базового самолёта Су-27 (Су-34, Су-37 и др.), а также ЛА для штурмовой авиации имеет десять модулей

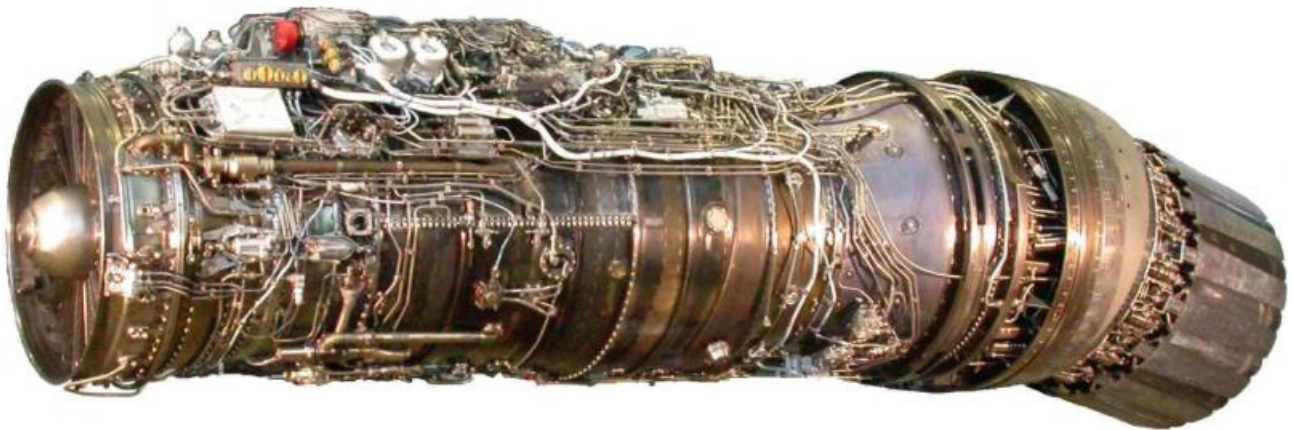


Рис. 3. Общий вид двигателя АЛ-31ФП

От базового АЛ-31Ф двигатель отличается наличием ещё одного модуля – поворотного устройства (ПУ), которое совместно с реактивным соплом составляют единый модуль поворотно – реактивного сопла (ПРС). [2].

Модульная конструкция этого двигателя, по результатам эксплуатации, ещё раз наглядно подтвердила преимущества конструкции такого типа, а именно: ресурс до 1-ого капитального ремонта двигателя АЛ-31ФП составляет 1000 часов наработки, в то время как назначенный ресурс ПРС – всего 500 часов, из них 250 часов – до 1-ого капитального ремонта. Таким образом, в процессе эксплуатации двигателя АЛ-31ФП, модуль ПРС должен меняться не менее четырёх раз.

Благодаря же модульной конструкции и отработанной технологии, выработавший ресурс модуль ПРС успешно заменяется в условиях ЭО на новый, без дополнительных регулировок параметров и подгоночных работ на самолёте силами эксплуатирующих организации, с привлечением технических специалистов предприятия, занимающихся обслуживанием гарантийных двигателей.

Основные требования к модульным ГТД [1].

1. *Геометрическая взаимозаменяемость.* Это основное требование достигается за счёт высокой точности исполнения стыковочных поверхностей (фланцев) модулей. Отклонение координат центров отверстий под призонные

болты должно обеспечиваться при изготовлении корпусных деталей в пределах 0,05 мм.

2. *Функциональная взаимозаменяемость.* Это требование достигается за счёт высокой точности и стабильности изготовления деталей газовоздушного тракта (ГВТ), а также модульной балансировки составных частей роторов, входящих в разные модули

3. *Сборка в горизонтальном положении.* В условиях ЭО подъёмные средства не позволяют производить перекантовку двигателя из вертикального в горизонтальное положение. Поэтому сборка двигателя в вертикальном положении невозможна. Для решения этой проблемы, в конструкции стыков модулей должны быть предусмотрены направляющие заходные фаски и конусные поверхности, обеспечивающие плавный заход сочленяющихся поверхностей при стыковке модулей в горизонтальном положении.

Выводы

1. Проведённые экспериментальные работы подтверждают значительное преимущество двигателей модульной конструкции как при изготовлении серийными предприятиями – изготовителями, так и в части обеспечения восстановительного ремонта в условиях эксплуатации.

2. Переход от фиксированных ресурсов ГТД к более прогрессивному и эффективному обслуживанию по техническому состоянию, существенно сокращают затраты на обслуживание и ремонт, в основном, за счёт значительного уменьшения оборотного фонда ГТД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбатенко Г. Н. Модульность и проблемы модульной сборки ГТД.//Вопросы авиационной науки и техники. Серия – технология авиационного двигателестроения. М.: НИИД.; 1987 (выпуск 4). 97с.

2. Кудашкин В. Н., Павлинич С.П. Селезнев А. С. Модульная сборка газотурбинных двигателей: учебное пособие. Уфа: РИК УГАТУ, 2007. 76с.

Кудашкин В. Н.

Kudashkin V. N.

viok20@list.ru

Криони Н. К.

Krioni N. K.

nkrioni@mail.ru

Янбухтин Р. М.

Yanbukhtin R. M.

rishyan@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ВИБРАЦИЮ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

INFLUENCE OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL FACTORS ON VIBRATION GAS TURBINE ENGINES

***Аннотация.** Рассмотрены основные причины вибрации газотурбинных двигателей. Показаны виды неуравновешенности деталей и сборочных единиц и способы их выявления и снижения. Отмечено отрицательное влияние вибраций на надежность и долговечность ГТД, на безопасность полета и здоровье летного состава. Названы приборы для измерения статического момента лопаток ГТД и определение частоты собственных колебаний лопаток (ЧСК) на электродинамических или магнитострикционных преобразователях.*

***Abstract.** The main causes of vibration in gas turbine engines are considered. The types of imbalance of parts and assembly units and methods of their identification and reduction are shown. The negative influence of vibrations on the reliability and durability of the gas turbine engine, on the safety of the flight and the health of the flight personnel is noted. Devices for measuring the static moment of GTE blades and determining the frequency of natural vibrations of the blades (CSF) on electrodynamic or magnetostrictive converters are named.*

***Ключевые слова:** неуравновешенность деталей и узлов двигателя, вибрации, ресурс, надежность.*

***Key words:** imbalance of engine parts and assemblies, vibration, resource, reliability.*

В современных авиационных двигателях многие сборочные единицы вращаются с большими скоростями и имеют большие массы (роторы компрессора и турбины, колеса вентиляторов, крыльчатки и др.). В случае их неуравновешенности возникают вибрации, оказывающие негативное влияние на подшипники роторов, в целом на двигатель, летательный аппарат и здоровье летного состава.

Для снижения уровня вибраций все они подвергаются балансировке на разных стадиях производства: до сборки, после сборки и после стендовых испытаний и ремонта

Различают 3 вида неуравновешенности [1, 2, 3].

1. Неуравновешенность сил (рис. 1), когда неравные массы расположены на равных расстояниях: $m_1 \neq m_2$, а $r_1 = r_2$ или равные массы, расположенные на неравных расстояниях: $m_1 = m_2$, а $r_1 \neq r_2$.

2. Неуравновешенность моментов, когда вращающиеся массы располагаются не в одной плоскости вращения, хотя и $m_1 = m_2$, а $r_1 = r_2$. В этом случае центр тяжести не смещен относительно оси вращения. Неуравновешенность может быть выявлена только динамическим способом балансировки т.е. при вращении.

3. Аэродинамическая неуравновешенность вследствие неуравновешенности аэродинамических сил, действующих на лопасти винтов, лопатки, крыльчатки. Эта неуравновешенность вызвана погрешностями механической обработки (искажением формы лопаток, нарушением углов закрутки лопаток и неравномерной их жесткости и др.).

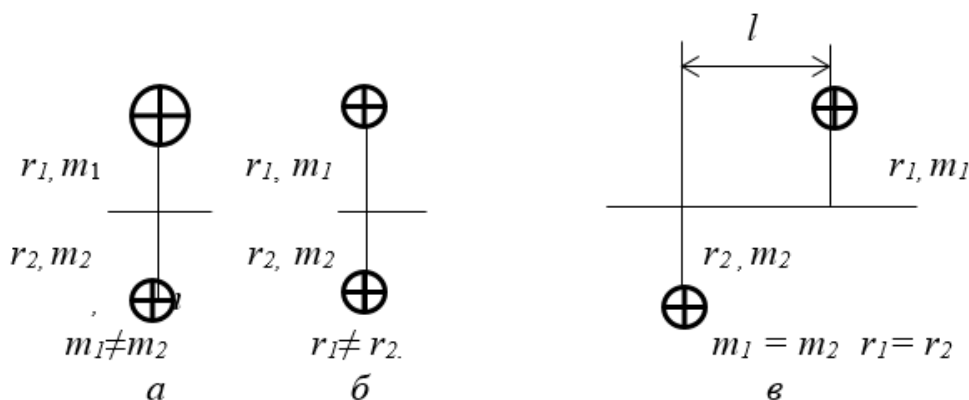


Рис.1. Схема вариантов неуравновешенности сил (а, б) и моментов (в)

3. Аэродинамическая неуравновешенность вследствие неуравновешенности аэродинамических сил, действующих на лопасти винтов, лопатки, крыльчатки. Эта неуравновешенность вызвана погрешностями механической обработки (искажением формы лопаток, нарушением углов закрутки лопаток и неравномерной их жесткости и др.).

При неуравновешенности любого вида возникают инерционные силы и изгибающие моменты, создающие дополнительные нагрузки на опоры и вибрации изделия. Инерционные силы $P_{и}$ – действуют перпендикулярно оси вращения и могут быть рассчитаны по следующим формулам (1, 2).

$$P_{и} = M\omega^2 e, \quad (1)$$

$$P_{и} = m\omega^2 r, \quad (2)$$

где M – масса вращающегося ротора;

m – неуравновешенная масса;

ω – угловая скорость вращения;

r – расстояние вращающейся массы от оси вращения;

e – смещение центра масс в мкм.

Приравняв правые части уравнений: $M\omega^2 e = m\omega^2 r$, получим $e = mr/M$ обозначим $q = mr$, тогда $e = q/M$. Это соотношение называется *удельной неуравновешенностью* в гсм или в гмм.

Рассмотрим основные причины и источники вибраций ГТД [3, 5, 6]

Получение экстремальных значений параметров двигателя приводит к постоянному усложнению конструкции, появлению все новых и новых систем и устройств (регулируемых направляющих аппаратов, лент или клапанов перепуска воздуха из компрессора, регулируемых систем охлаждения турбины, теплообменников, подогревателей топлива, систем антиобледенения и др.).

Эти усложнения конструкции вызывают, с одной стороны, предрасположение к возникновению колебаний отдельных параметров, а с другой, возможность влияния колебаний в одних системах на работу других систем и возбуждение многочастотных колебаний в двигателе.

Наиболее распространенными колебательными процессами являются:

- вибрации с частотами, кратными частотам вращения роторов;
- автоколебания давлений и расходов газа по тракту двигателя (помпаж);
- колебания давлений и расходов газа по тракту двигателя при его дросселировании или выключении;
- субгармонические и супергармонические колебания давлений и расхода газа по тракту двигателя, вызываемые колебаниями давления на входе двигателя;
- пульсационное или вибрационное горение в форсажной камере;
- колебания створок сопла;
- колебания режимов работы двигателя в зонах совместной работы двух регуляторов;
- релаксационные колебания (перехлопывания) механизации компрессора или охлаждения турбины, включения и выключения форсажа и т.д.;
- колебания режимов работы двигателя, причины которых, как правило, заранее не известны (так называемые «пички», «клевки», «раскачки», «вождения» и т.д.).

Технологическими факторами, влияющими на стабильность динамики роторных систем, являются:

- отклонения геометрических параметров (размеры, первая и вторая характеристики точности, зазоры, биения);
- отклонения физических параметров (жесткость, качество поверхностного слоя, теплопроводность, плотность материала);
- отклонения кинематических параметров.

Для авиационных ГТД влияние колебаний на параметры и ресурс двигателя и на безопасность полета в целом, как правило, отрицательное. Общеизвестно, что в случае колебаний параметров с большими амплитудами реальна угроза поломок и создание аварийной ситуации. Однако даже при небольших амплитудах колебаний и без того напряженная конструкция

двигателя (лопатки, диски, оболочки и т.д.) подвергается дополнительным переменным силовым или температурным нагрузкам, что приводит к снижению ресурса двигателя.

Кроме того, если какой-либо параметр (например, температура перед турбиной или частота вращения ротора) содержит переменную составляющую, то, чем больше величина этой переменной составляющей, тем меньше должен быть, из соображений прочности, допустимый максимальный осредненный уровень.

Отсюда ясно, что основная практическая задача по отношению к колебаниям на двигателе – это их устранение или максимальное снижение.

Доминирующим является снижение сил инерции вращательного движения. Снижение может быть получено применением соответствующих методов балансировки и сборки роторов. Разработка технологических процессов сборки и балансировки построена на решении задач оптимального сочетания геометрических и физических параметров.

Есть ситуации, когда силы на опорах существенно зависят от физических параметров: резонансные колебания от сил тяжести, резонансные маятниковые колебания, близость критических частот вращения, резонансные колебания от возбуждающих сил в рабочем процессе. Решение этой группы задач построено на оптимизации взаимодействия разнородных технологических параметров, применением специальных методов сборки (метод подбора).

Рассмотрим способы определения и устранения неуравновешенности деталей и сборочных единиц.

Статическая балансировка может быть применена при неуравновешенности сил, т.е. когда смещен центр тяжести относительно оси детали или сборочной единицы [3].

Неуравновешенность устраняют путем высверливания, сошлифовкой с тяжелого места металла или установкой грузиков на легкое место в виде пробок, винтов.

Недостатки:

- 1) малая точность метода;
- 2) невозможность определить неуравновешенность моментов.

Статическая балансировка применяется в тех случаях, когда по ТУ не требуется динамической балансировки (малые обороты или как предварительная перед динамической балансировкой).

Обычно статическую балансировку делают для деталей типа дисков при следующем соотношении ширины диска B и его диаметра $D/B \leq (0,5 \dots 1,0)D$.

Лопатки роторов компрессора и турбины, для снижения неуравновешенности роторов, подвергаются весовому контролю и определению статического момента.

Подбор и расстановку лопаток по пазам дисков начинают после измерения статического момента, в процессе которого применяются специализированные приборы (рис. 2 а, б) [4].



Рис. 2. Приборы для измерения статического момента лопаток ГТД:
а – прибор «Мера-ИСМ-2D-0,6»; б – прибор «Мера-ИСМ-0,01»

Определение частот собственных колебаний лопаток (ЧСК) производится на электродинамических или магнитострикционных преобразователях. Данные по ЧСК и статическому моменту заносятся в таблицы с привязкой к порядковым номерам лопаток и передаются на ЭВМ, в которую введена программа для расчета расстановки лопаток по пазам диска. Результаты расчета выдаются в виде таблиц, в которых каждому номеру паза диска соответствует свой номер лопатки.

Пользуясь этим документом, комплектовщик раскладывает лопатки для установки в диск и одновременно проверяет правильность выполненной машиной расстановки. Лопатки с максимальным и минимальным статическим моментом должны чередоваться, а лопатки, имеющие близкие по величине ЧСК, должны быть разнесены (например, через 120°). В комплекте, в целом, разница частот не должна быть меньше расчетной величины, устанавливаемой требованиями конструкторской документации в зависимости от номинального значения ЧСК. Подобранные лопатки окончательно маркируются номером паза диска.

Помимо подбора, рассмотренного выше, лопатки ротора вентилятора подбираются по зазору в пазах диска, который выдерживается в пределах $0,005...0,03$ мм, а контролируются косвенным способом – по качке лопаток в плоскости, перпендикулярной пазу диска. Если качка отсутствует или меньше установленной по техническим требованиям чертежа, то применяют подгонку – шлифуют подошву хвостовика. Подобные методы нежелательны в сборочном процессе, тем более что в данном случае нарушается ранее сделанный подбор, поэтому может быть оправдан переход на метод полной взаимозаменяемости с некоторым повышением точности обработки посадочных поверхностей.

При сборке не удастся избежать и еще одной механической операции – шлифования торцов лопаток, связанной с необходимостью обеспечения радиального зазора в компрессоре (допустимое торцевое биение – до $0,015$ мм).

Перед балансировкой устанавливают передний роликовый и задний шариковый подшипники, прошедшие подготовительные операции, лабиринтные кольца и другие детали в составе ротора. Балансировка (статическая в динамическом режиме) ведется в плоскостях коррекции, при-

надлежащих первой и последней ступеням ротора. Допустимый остаточный дисбаланс – не более 20 г × см.

Ротор балансируется в собственных опорах, а при конструктивном отсутствии одной из них, – с технологической цапфой.

Динамическая балансировка – применяется для устранения неуравновешенных сил и моментов. Она более точная по сравнению со статической, но не позволяет выделить их раздельное влияние на неуравновешенность ротора или сборочной единицы. Поэтому устраняется их совместное влияние [3,6].

Установка корректирующих грузов (или удаление металла) производится в местах, называемых плоскостями приведения, указанных конструктором. Плоскость действительного приложения сил остается неизвестной. Определяют только угловое расположение и величину неуравновешенной массы.

Балансировку роторов ГТД производят на горизонтальных балансировочных станках фирмы «ДИАМЕХ 2000». Наилучшее качество балансировки при минимуме затрат обеспечивают резонансные балансировочные станки [3]. Наиболее востребованным во многих отраслях промышленности является станок ВМ-3000 грузоподъемностью от 30 кг до 3 тонн.

Выводы

Причинами вибраций ГТД являются конструкторско-технологические и эксплуатационные факторы, которые оказывают отрицательное воздействие на ресурс, надежность изделия и здоровье летного состава. Снижение уровня вибраций является важнейшей задачей начиная с этапа проектирования, изготовления и на протяжении всего жизненного цикла изделия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 24347 - 80. Вибрация. Обозначения и единицы измерения. – М.: Изд-во стандартов, 1986. 5с.
2. ГОСТ 26382- 84. Двигатели газотурбинные гражданской авиации. Допустимые уровни вибрации и общие требования к контролю вибрации. – М.: Изд-во стандартов, 1985. 15с.
3. Кудашкин В.Н., Смыслов А.М., Селезнев А.С., Храпутский В.Ф. Вибрация газотурбинных двигателей и способы их снижения: учеб. Пособие; Уфимск. Гос. авиац. техн. ун-т.- Уфа: УГАТУ. 2012. 141с.
4. ОСТ 1.41127 – 79.Лопатки роторов ГТД. Статические моменты. Методы измерения. – М.: Изд-во НИАТ, 1979. 10с.
5. Писменный И.Л. Многочастотные нелинейные колебания в газотурбинном двигателе. – М.: Машиностроение, 1987. 128с.
6. Максименко А.И. Влияние технологических факторов на динамику роторных систем // Семинар по сборке и балансировке роторов. МАИ, 1996.

Чертовских С. В.

Chertovskikh S. V.

chertovskikh@mail.ru

Шустер Л. Ш.

Shuster L. Sh.

retsush@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

Фокс-Рабинович Г. С.

Foks-Rabinovich G. S.

gfox@mcmaster.ca

Университет Макмастер, Гамильтон, Канада

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ С ПОКРЫТИЕМ TiB₂ ПРИ ОБРАБОТКЕ СПЛАВА TiAl6V4

TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF TiB₂ COATED CARBIDE TOOLS WHEN TREATING TiAl6V4 ALLOY

***Аннотация.** В настоящей работе исследовано влияние различных режимов обработки на триботехнические характеристики и износостойкость режущих инструментов с покрытием TiB₂ по сравнению с твердосплавными инструментами без покрытия при обработке труднообрабатываемого аэрокосмического сплава TiAl6V4. Установлено, что при обработке сплава TiAl6V4 эффективность нанесения покрытия TiB₂ на твердосплавные режущие инструменты сильно зависит от условий резания. Покрытие TiB₂ очень эффективно при черновой обработке на низких скоростях (с сильным образованием наростов), и, напротив, при чистовых операциях на более высоких скоростях резания, когда преобладает кратерный износ, характеристики износа инструмента с покрытием такие же, как и инструмента без покрытия.*

***Abstract.** In this work, we investigated the effect of different processing modes on the tribotechnical characteristics and wear resistance of cutting tools with TiB₂ coating in comparison with uncoated carbide tools when processing the difficult-to-machine aerospace alloy TiAl6V4. It has been established that, when processing TiAl6V4 alloy, the efficiency of TiB₂ coating on carbide cutting tools strongly depends on the cutting conditions. TiB₂ coating is very effective in roughing at low speeds (with strong build-up), and, conversely, in finishing operations at higher cutting speeds, when crater wear predominates, the wear characteristics of coated tools are the same as those of uncoated tools.*

***Ключевые слова:** износ режущего инструмента; обработка TiAl6V4; инструмент с покрытием TiB₂; условия обработки*

***Keywords:** wear of the cutting tool; TiAl6V4 processing; TiB₂ coated tool; processing conditions*

1. Введение

Титановые сплавы широко используются для изготовления изделий в аэрокосмической промышленности благодаря хорошему сочетанию механических свойств (высокотемпературная прочность, высокая пластичность и ударная вязкость) и коррозионной стойкости при повышенных температурах

[1]. Однако обработка этих сплавов представляет собой проблему из-за высоких температур, возникающих во время резания в результате интенсивного прилипания материала заготовки к поверхности инструмента. Эти характеристики делают титановые сплавы труднообрабатываемыми материалами [2]. Одной из наиболее важных проблем поведения режущего инструмента во время обработки Ti является низкая эффективность наиболее широко используемого PVD-покрытия, такого как TiAlN. Это может быть связано с высокой твердостью и уровнем остаточных напряжений данного семейства покрытий [3]. Следовательно, слой покрытия имеет тенденцию отслаиваться от поверхности инструмента во время обработки материалов, таких как титановые сплавы [4]. Из-за этого явления твердосплавные инструменты без покрытия часто превосходят инструменты с покрытием в данном применении [5]. Напротив, покрытие TiB₂ с оптимизированным набором характеристик является многообещающим для обработки титановых сплавов [6]. Однако процессы резания значительно различаются во время обработки титановых сплавов при различных режимах обработки (черновых и чистовых операциях) [7,8].

По этой причине особый интерес представляет исследование влияния условий обработки на износостойкость режущего инструмента с покрытием TiB₂ по сравнению с инструментами из цементированного карбида без покрытия.

Основным явлением при обработке титановых сплавов при более низкой скорости резания является интенсивное образование наростов кромок [10]. Это типично для черновой токарной обработки на малых скоростях [12]. Однако на более высоких скоростях (при чистовой операции) нарост удаляется с поверхности трения [13], и кратерное изнашивание становится преобладающим [14]. Предположительно эффективность применения покрытия TiB₂ может сильно различаться при разных скоростях резания.

Таким образом, цель исследования состоит в том, чтобы связать различные режимы обработки с различными преобладающими механизмами износа с трибологическими характеристиками и износостойкостью инструмента с покрытием TiB₂. В этом исследовании изучались три типа условий обработки: (1) черновая токарная обработка на низкой/средней скорости резания (45 м/мин) с сильным образованием наростов кромок; (2) точение на более высокой скорости 80 м/мин (с заметным образованием наростов); и (3) высокоскоростное чистовое точение со скоростью 150 м/мин (без заметного образования наростов), но с сильными диффузионными процессами (кратерами), связанными с высокой температурой на границе раздела стружка/инструмент [15].

2. Методика эксперимента

TiB₂ наносился методом магнетронного распыления на постоянном токе из стехиометрической мишени TiB₂. Свойства покрытия TiB₂ показаны в табл. 1. Покрытие нанесено на твердосплавные пластины Kennametal для токарной обработки марки K313 (CNMG432 и CNGG432FS) со следующими

геометрическими характеристиками: задний передний угол, $\lambda_0 = -5$; клиренс, $\alpha_0 = 5^\circ$; угол режущей кромки $\beta_0 = 90^\circ$; передний угол, $\gamma_0 = -5^\circ$; угол боковой режущей кромки, $\chi_r = 95^\circ$; и радиус при вершине $R_\varepsilon = 0,8$ мм.

Таблица 1

Свойства покрытия TiB₂ [11]

Покрытие (монослой)	Характеристики		
	Толщина (мкм)	Твердость (ГПа)	Остаточные напряжения (ГПа)
TiB ₂	1,79	15,5 ± 4,3	-0,633 ± 0,0838

Эксперименты по механической обработке сплава TiAl6V4 проводились на токарно-обрабатывающем центре NAKAMURA SC450. Токарные испытания проводились для черновых и чистовых операций в условиях резания с применением смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). СОЖ подавалась со скоростью 14 л/мин через сопло, расположенное непосредственно над режущим инструментом и направленное к кромке инструмента, и представляла собой полусинтетический XTREME CUT. Режимы резания представлены в табл. 2. Эти параметры резания были выбраны в соответствии со стандартами, широко используемыми в промышленности для черновой и чистовой обработки аэрокосмических сплавов. Критерий стойкости инструмента был установлен на износ по задней поверхности 0,3 мм. Во время испытания на резание износ по задней поверхности инструмента измеряли с помощью оптического микроскопа. Испытания на резание повторяли три раза для каждого условия испытания. Износ по задней поверхности для каждой пластины измеряли трижды. Разброс значений износа по задней поверхности составил около 5%.

Таблица 2

Параметры резания для проведенных экспериментов

Операция обработки	Подложки (пластины) для режущего инструмента	Материал заготовки	Твердость (HRC)	Скорость (м/мин)	Подача (мм/об)	Глубина резания (мм)
Черновая токарная обработка с применением СОЖ	Kennametal CNMG432 Grade K 313	Сплав TiAl6V4	37–38	45	0,15	2
Чистовая токарная обработка с применением СОЖ				80	0,1225	0,25
Чистовая токарная обработка с применением СОЖ				150	0,1225	0,25

Адгезионная составляющая коэффициента трения в зависимости от температуры определялся с помощью специально сконструированного прибора

(адгезиометра), описанного в [16-19]. Это устройство было разработано для имитации адгезионного взаимодействия инструмента с обрабатываемой деталью. Вращающийся образец подложки с покрытием помещался между двумя плоскопараллельными полированными образцами из обрабатываемого материала (сплав TiAl6V4). Чтобы смоделировать условия трения при механообработке образцы нагревали электроконтактным способом до температур от 25° С до 1000° С. Для достижения пластической деформации в зоне контакта прикладывалась сила 2400 Н. Значение коэффициента трения рассчитывалось как отношение прочности адгезионных связей на срез и нормального контактного давления (τ_{mn} / p_{rn}). Для каждого покрытия было проведено три испытания. Расчетная величина погрешности расчета коэффициента трения составила 5%.

Исследования прогрессирующего износа были выполнены для режущих пластин без покрытия и с покрытием как при черновой, так и при чистовой обработке. После каждых 600 м пути резания пластины исследовали с помощью оптического микроскопа Alicona Infinite Focus 3D и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Vega 3-TESCAN.

Образование трибооксидов оценивали с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) (XPS, Quantera II) как на боковой, так и на передней поверхности для пластин с покрытием TiB₂. Установка РФЭС, оснащенная полусферическим анализатором энергии и источником анода из алюминия для генерации рентгеновских лучей и монохроматором на кристалле кварца для фокусировки генерируемого рентгеновского излучения. Источник монохроматического рентгеновского излучения Al K α (1486,7 эВ) работал при 50 Вт / 5 кВ. Базовое давление в системе составляло всего 1,0×10⁻⁹ Па, а рабочее давление не превышало 2,0×10⁻⁸ Па. Энергия связи 280 эВ использовалась для получения всех обзорных спектров, а энергия связи 55 эВ использовалась для сбора данных спектров с высоким разрешением. Все спектры получены при угле взлета 45°. Двухлучевая система компенсации заряда обеспечивала нейтрализацию всех образцов. Спектры высокого разрешения были откалиброваны путем установки пика C1s C–C на 284,8 эВ. Все данные анализировались с использованием программного обеспечения RNI Multipak версии 9.4.0.7.

4. Результаты и обсуждение

4.1. Характеристики износа при различных условиях обработки

Свойства исследованного покрытия TiB₂ представлены в табл. 1. Из данных видно, что покрытие TiB₂ имеет низкие остаточные напряжения и низкую твердость. Таким образом, покрытие способно выдерживать жесткие условия обработки при резании TiAl6V4, особенно на низких скоростях (более низких температурах резания), в условиях интенсивного образования наростов кромок. Однако его эффективность варьируется в зависимости от условий обработки (более высокие температуры резания).

4.2. Черновая токарная обработка на низкой скорости

Данные об износе по задней поверхности представлены на рис. 1. Твердосплавная пластина с покрытием TiB_2 показывает значительное улучшение износостойкости, при этом пластина без покрытия демонстрирует интенсивный износ более 300 микрон. СЭМ-изображения показывают сильное образование наростов на передней поверхности вставки без покрытия. Напротив, на поверхности пластины с покрытием TiB_2 наблюдается очень низкая интенсивность образования наростов.

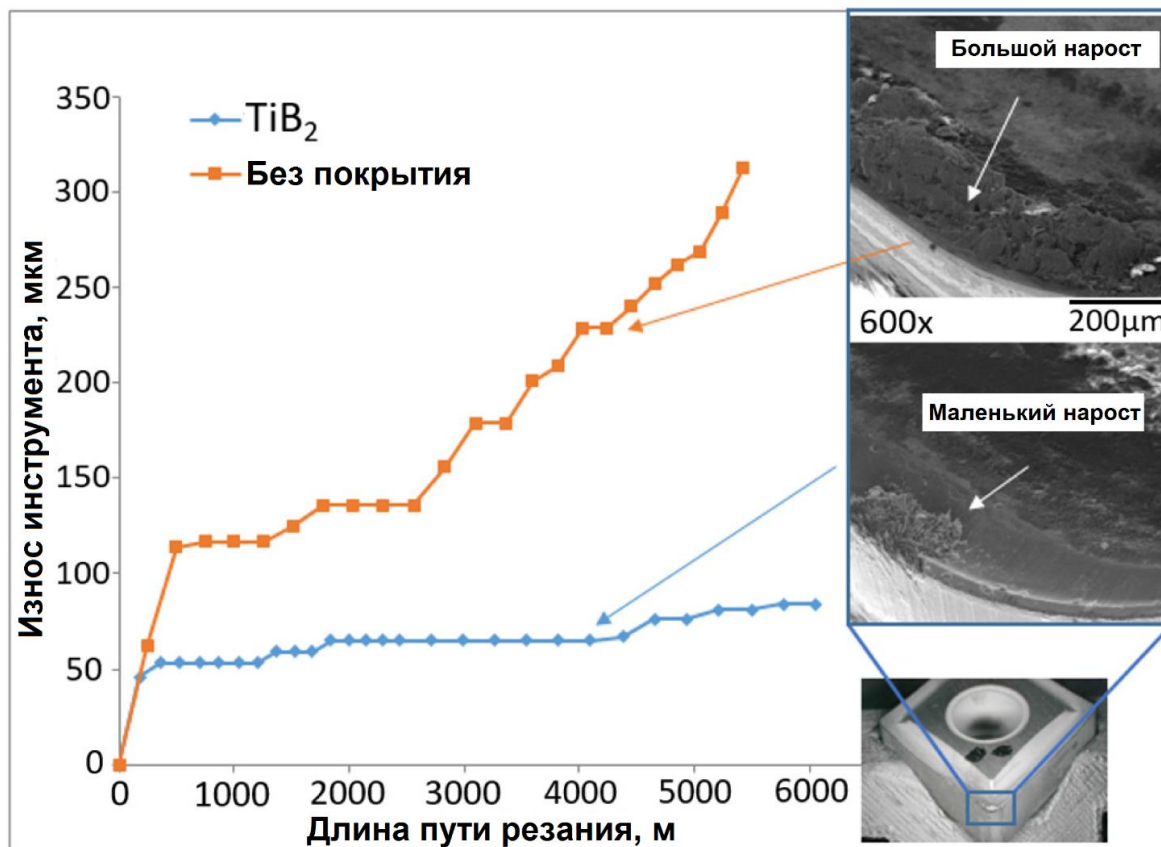


Рис. 1. Данные об износе по задней поверхности в зависимости от длины пути резания для твердосплавных токарных пластин без покрытия и с покрытием TiB_2 с изображениями изношенной поверхности, полученными с помощью СЭМ (после длины резания 4000 м)

РФЭС исследования изношенной передней и боковой поверхности режущего инструмента показывают, что при черновой токарной обработке происходят сложные явления, в том числе:

- формирование термобарьерной прослойки TiC на границе раздела деталь/инструмент [16];
- образование значительного количества (около 24,9 ат. %) смазывающих трибо-пленок V_2O_5 , которые снижают интенсивность образования кромок наростов за счет поверхностной смазки на передней поверхности;
- образование меньшего количества (всего 6,5 %) смазочных трибопленок V_2O_5 из-за более низких температур на боковой поверхности.

На рис. 2 представлены данные об адгезионной составляющей коэффициента трения в зависимости от температуры контакта для пластин без покрытия и с покрытием TiB_2 . Приведенные данные свидетельствуют об образовании трибопленок B_2O_3 , плавящихся при $450^\circ C$ и служащих жидкой смазкой [11]. Температура во время черновой токарной обработки относительно низкая (около $650-700^\circ C$), и эти трибопленки все еще достаточно эффективны.

При более высоких температурах (обработка на более высоких скоростях) они не выполняют свою смазочную роль с аналогичной эффективностью (см. раздел 4.3).

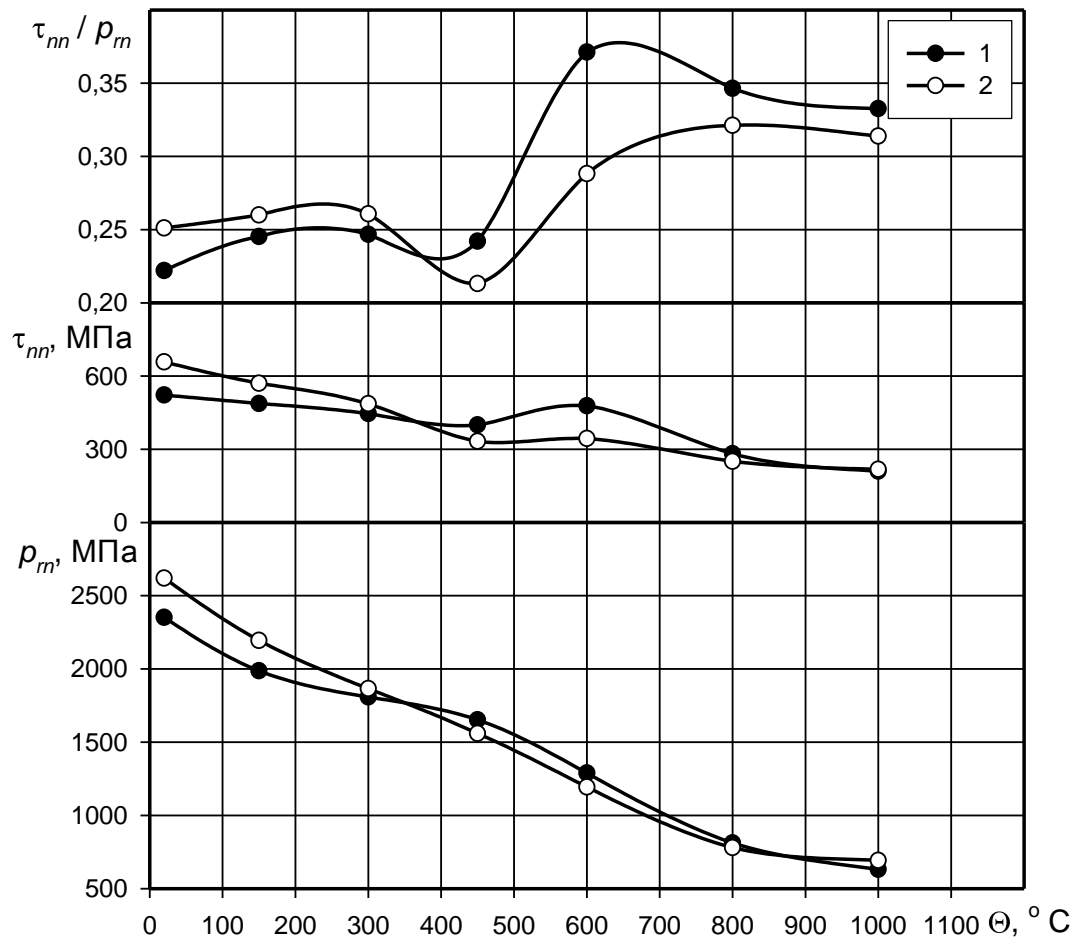


Рис. 2. Адгезионная составляющая коэффициента трения (τ_{nn} / ρ_m) в зависимости от температуры для пластин без покрытия и пластин с покрытием TiB_2 : (1) без покрытия; (2) покрытие TiB_2

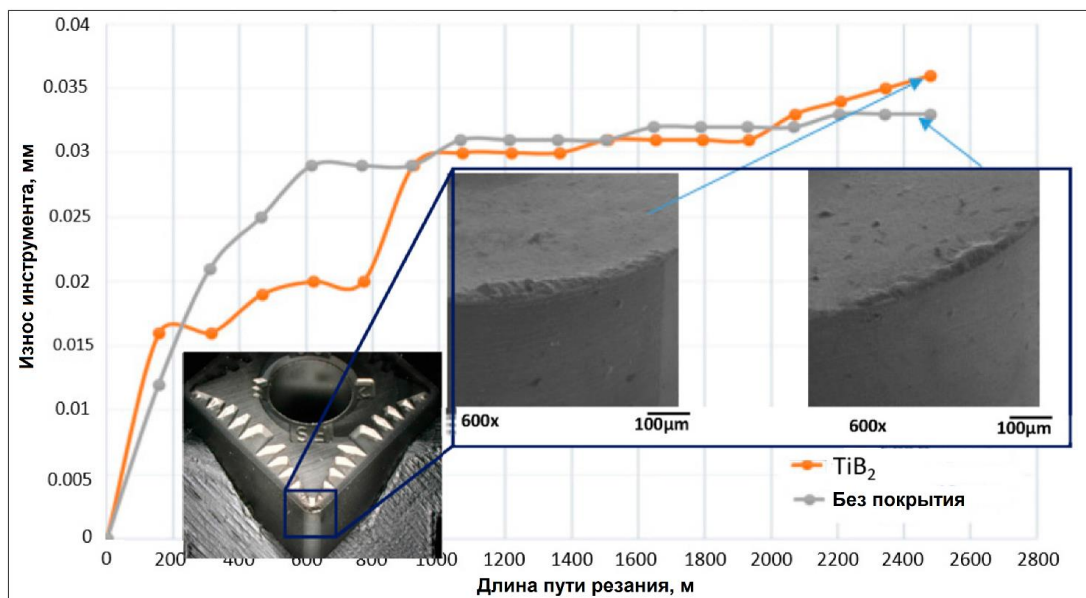
4.3. Финишная обработка

4.3.1. Обработка на более низких скоростях: 80 м/мин

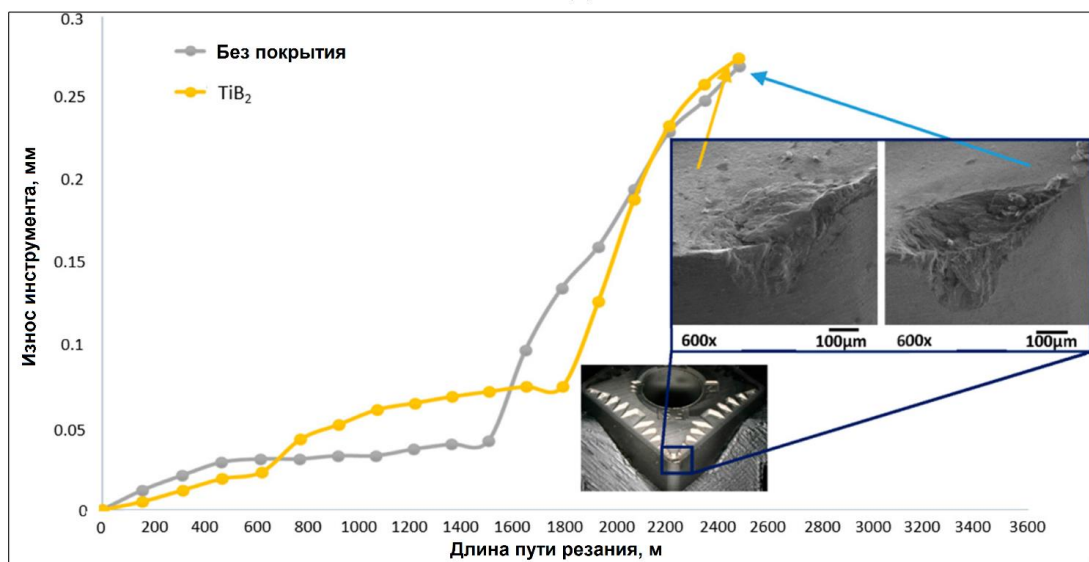
Данные по скорости износа по задней поверхности представлены на рис. 3. Стойкость инструмента для пластин с покрытием и без покрытия очень похожа.

Согласно РФЭС исследованиям формирование прослойки TiC происходит на передней поверхности при более низкой скорости 80 м/мин. На

боковой поверхности происходит незначительное трибоокисление с образованием только фазы TiO_x . Значительные количества смазывающей трибофазы WO_x также образуются в зоне режущей кромки со скоростью 80 м/мин. Это влияет на износостойкость режущего инструмента. Похоже, что при температурах $750-800^\circ C$ на передней поверхности твердые смазывающие трибофазы $W-O$ работают так же эффективно, как жидкие трибофазы $B-O$. Это объясняет, почему значения адгезионной составляющей коэффициента трения при этих температурах очень похожи (рис. 2). Образование как трибофаз B_2O_3 , так и WO_3 происходит на боковой поверхности, но трибоокисление менее интенсивно по сравнению с передней поверхностью из-за более низких температур (см. рис. 1).



(а)



(б)

Рис. 3. Данные об износе по задней поверхности в зависимости от длины резания для твердосплавных пластин без покрытия и с покрытием TiB_2 при чистовых операциях на скоростях (а) 80 м/мин и (б) 150 м/мин

4.3.2. *Обработка на более высоких скоростях 150 м/мин*

На начальной стадии износа можно наблюдать интенсивное прилипание материала заготовки к передней поверхности как для инструментов без покрытия, так и для инструментов с покрытием TiB_2 . Образование нестабильной структуры нароста и его дальнейшее разрушение приводит к образованию сколов на режущей кромке. Кроме того, выкрашивание режущей кромки приводит к увеличению интенсивности образования нароста кромки. Это связано с тем, что разрыв нароста кромки также удаляет часть режущей кромки, что, соответственно, может усилить выкрашивание режущей кромки.

При более высоких скоростях 150 м/мин механизм износа меняется: наросты быстро изнашиваются, и поэтому слой термобарьера TiC не образуется. Более высокие температуры в процессе эксплуатации (выше 900–950° С) приводят к интенсивному образованию кратеров. Таким образом, два одновременно происходящих явления влияют на скорость износа по задней поверхности пластины (рис. 3): (а) отрыв кромки нароста и (б) кратерный износ. Интенсивность износа по задней поверхности инструмента с покрытием TiB_2 аналогична износу инструмента без покрытия. Образование большого количества смазывающих трибопленок B_2O_3 и WO_x не приводит к увеличению стойкости инструмента. Вероятно, это связано с более высоким коэффициентом трения как покрытия TiB_2 , так и инструмента без покрытия при повышенных температурах (рис. 2) и преобладающим механизмом кратерного износа в сочетании с интенсивным выкрашиванием. На боковой поверхности мы видим только трибоокисление как слоя изнашиваемого покрытия, так и подложки.

Выводы

Проведенные исследования показывают, что при обработке аэрокосмического сплава $TiAl6V4$ эффективность нанесения покрытия TiB_2 на твердосплавные режущие инструменты сильно зависит от условий резания.

Оценки износа в сочетании с РФЭС и СЭМ исследованиями изношенных поверхностей показывают, что покрытие TiB_2 очень эффективно в условиях черновой токарной обработки (при низких скоростях резания 45 м/мин и большой глубине резания 2 мм) при интенсивном образовании наростов на кромке. Предполагается, что это связано с образованием термобарьерных пленок TiC , а также большого количества трибооксида B_2O_3 , который служит жидкой смазкой. Напротив, покрытие TiB_2 практически не показывает эффективности при более высоких скоростях резания 80 и 150 м/мин при чистовой обработке при финишной операции. Это указывает на то, что не существует универсального решения для различных условий обработки, когда доминируют разные механизмы износа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Veiga, C.; Davim, J.P.; Loureiro, A.J.R. Properties and applications of titanium alloys: A brief review. Rev. Adv. Mater. Sci. 2012, 32, 133–148.

2. Guo, Y.B.; Li, W.; Jawahir, I.S. Surface integrity characterization and prediction in machining of hardened and difficult-to-machine alloys: A state-of-art research review and analysis. *Mach. Sci. Technol.* 2009, 13, 437–470.
3. Vogli, E.; Tillmann, W.; Selvadurai-Lassl, U.; Fischer, G.; Herper, J. Influence of Ti/TiAlN-multilayer designs on their residual stresses and mechanical properties. *Appl. Surf. Sci.* 2011, 257, 8550–8557.
4. Biksa, A.; Yamamoto, K.; Dosbaeva, G.; Veldhuis, S.C.; Fox-Rabinovich, G.S.; Elfizy, A.; Wagg, T.; Shuster, L.S. Wear behavior of adaptive nano-multilayered AlTiN/MexN PVD coatings during machining of aerospace alloys. *Tribol. Int.* 2010, 43, 1491–1499.
5. M'Saoubi, R.; Axinte, D.; Soo, S.L.; Nobel, C.; Attia, H.; Kappmeyer, G.; Engin, S.; Sim, W.M. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials. *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 2015, 64, 557–580.
6. Cherukuri, R.; Molain, P. Lathe Turning of Titanium Using Pulsed Laser Deposited, Ultra-Hard Boride Coatings of Carbide Inserts. *Mach. Sci. Technol.* 2003, 7, 119–135.
7. Arrazola, P.-J.; Garay, A.; Iriarte, L.-M.; Armendia, M.; Marya, S.; Le Maître, F. Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3). *J. Mater. Process. Technol.* 2009, 209, 2223–2230.
8. Ikuta, A.; Shinozaki, K.; Masuda, H.; Yamane, Y.; Kuroki, H.; Fukaya, Y. Consideration of the adhesion mechanism of Ti alloys using a cemented carbide tool during the cutting process. *J. Mater. Process. Technol.* 2002, 127, 251–255.
9. Che-Haron, C.H.; Jawaid, A. The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti–6%Al–4%V. *J. Mater. Process. Technol.* 2005, 166, 188–192.
10. Armendia, M.; Garay, A.; Iriarte, L.M.; Arrazola, P.J. Comparison of the machinabilities of Ti6Al4V and TIMETAL® 54M using uncoated WC–Co tools. *J. Mater. Process. Technol.* 2010, 210, 197–203.
11. Chowdhury, M.S.I.; Chowdhury, S.; Yamamoto, K.; Beake, B.D.; Bose, B.; Elfizy, A.; Cavelli, D.; Dosbaeva, G.; Aramesh, M.; Fox-Rabinovich, G.S.; et al. Wear behaviour of coated carbide tools during machining of Ti6Al4V aerospace alloy associated with strong built up edge formation. *Surf. Coat. Technol.* 2017, 313, 319–327.
12. Pamanik, A.; Littlefair, G. Machining of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V)—Theory to application. *Mach. Sci. Technol.* 2015, 19, 1–49.
13. Corduan, N.; Himbart, T.; Poulachon, G.; Dessoly, M.; Lambertin, M.; Vigneau, J.; Payoux, B. Wear mechanisms of new tool materials for Ti-6Al-4V high performance machining. *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 2003, 52, 73–76.
14. Hatt, O.; Crawforth, P.; Jackson, M. On the mechanism of tool crater wear during titanium alloy machining. *Wear* 2017, 374–375, 15–20.
15. Zhang, S.; Li, J.; Deng, J.; Li, Y. Investigation on diffusion wear during high-speed machining Ti-6Al-4V alloy with straight tungsten carbide tools. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2009, 44, 17–25.
16. Fox-Rabinovich, G.S.; Kovalev, A.I.; Shuster, L.S.; Boki, Y.; Dosbaeva, G.K.; Wainstein, D.L. Characteristic features of alloying HSS-based deformed compound powdered materials with consideration for tool self-organization at cutting. *Wear* 1997, 206, 214–220.
17. Misochenko A.A., Chertovskikh S.V., Shuster L.Sh., Stolyarov V.V. Influence of Grain Size and Contact Temperature on the Tribological Behaviour of Shape Memory Ti49.3Ni50.7 Alloy // *Tribology Letters*. 2017. Vol. 65 (4):131. P. 1-7.
18. Шустер Л.Ш., Мигранов М.Ш., Чертовских С.В., Садыкова А.Я. Триботехнические характеристики титана с ультрамелкозернистой структурой // *Трение и износ*. 2005. Т. 26, № 2. С. 208-214.
19. Чертовских С.В., Шустер Л.Ш. Зависимость триботехнических характеристик титановых сплавов от дисперсности микроструктуры // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2008. № 12. С. 18-24.

Чертовских С.В.

Chertovskikh S.V.

chertovskikh@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОФОТОЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ КРУПНОЗЕРНИСТОГО И УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ТИТАНА

APPLICATION OF X-RAY PHOTOELECTRONIC SPECTROSCOPY FOR STUDYING FRICTION SURFACES OF LARGE-GRAINED AND ULTRAFINE-GRAINED TITANIUM

***Аннотация.** При помощи рентгенофотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) установлено, что на поверхностях трения ультрамелкозернистого (УМЗ) титана содержится в 1,6-1,9 раза больше оксидов титана по сравнению с крупнозернистым аналогом, которые, выполняя роль защитной пленки, уменьшают адгезионное взаимодействие контактирующих поверхностей и способствуют снижению коэффициента трения.*

***Abstract.** Using X-ray photoelectron spectroscopy, it was found that the friction surfaces of ultrafine-grained titanium contain 1.6-1.9 times more titanium oxides compared to their coarse-grained analogue, which, acting as a protective film, reduce the adhesive interaction of contacting surfaces and help to reduce the coefficient of friction.*

***Ключевые слова:** рентгенофотоэлектронная спектроскопия, трение, адгезия, ультрамелкозернистый титан.*

***Keywords:** X-ray photoelectron spectroscopy, friction, adhesion, ultrafine-grained titanium.*

Введение. Титан и его сплавы широко используются в аэрокосмической промышленности благодаря своим свойствам: коррозионной стойкости, низкому весу, высокотемпературной прочности, высокой пластичности и ударной вязкости, но их применение в подвижных соединениях (особенно традиционного крупнозернистого (КЗ) титана) сдерживается низкими триботехническими характеристиками. Титан, обладая незначительной толщиной оксидной пленки и большой реакционной способностью ювенильных участков поверхностей, образующихся в процессе трения, склонен к схватыванию с последующим повреждением поверхностей контакта (особенно при повышенных температурах контакта). Триботехнические исследования [1, 2, 3] титана, подвергнутого равноканальному угловому прессованию (РКУП), показали, что формирование УМЗ структуры повышает его прочностные характеристики, снижает адгезионную составляющую коэффициента трения и уменьшает его склонность к схватыванию. Этот эффект тем заметнее, чем меньше размер зерен и выше температура контакта.

В ранее проведенных теоретических исследованиях [2, 3] с использованием термодинамического подхода к процессам трения и изнашивания УМЗ материалов показано, что избыточное производство энтропии для трибосистемы с неравновесным состоянием контактирующих

поверхностей может стать отрицательным, а система может потерять устойчивость и снизить интенсивность изнашивания при соблюдении условий одновременного снижения коэффициента трения, теплопроводности и плотности вещества, участвующего в массопереносе. Заметное снижение плотности переносимого вещества может возникнуть вследствие увеличения содержания в нем вторичных более легких структур, например, оксидов.

В данной работе представлены результаты РФЭС исследований поверхностей трения, объясняющие улучшение трибологических свойств УМЗ титана по сравнению с КЗ аналогом.

Методика исследования. Для установления качественного и количественного элементного состава поверхности испытуемых образцов и определения валентного состояния титана на их поверхности было проведено исследование при помощи РФЭС образцов после триботехнических испытаний (на адгезиометре) из технически чистого титана ВТ1-0 в двух состояниях: с КЗ структурой (средний размер зерна $d = 15$ мкм) и с УМЗ структурой (после РКУП с дополнительной холодной прокаткой 75 % – $d = 0,1$ мкм). Материал контртела (индентора) – сплав ВК8. Из образцов после триботехнических испытаний были вырезаны электроискровым методом образцы размерами 8×8 мм и толщиной 5 мм с целью их размещения на столике анализатора. Участок анализа на образцах составлял 4×6 мм. На поверхности каждого такого образца оставалась лунка от индентора после испытаний на адгезиометре при разных температурах контакта 20°C , 350°C , 800°C . Для сравнения были проанализированы поверхности образцов до триботехнических испытаний. Полученные обзорные рентгенофотоэлектронные (РФЭ) спектры были использованы для качественной идентификации элементов и количественного расчета элементного состава поверхности образца. Спектры высокого разрешения были использованы для идентификации химического состояния элементов.

РФЭ спектры были получены с помощью спектрометра ЭС 2403 М-Т. Для фотоэлектронного возбуждения использовалось характеристическое Mg K α излучение ($h\nu = 1253,6$ эВ). Мощность источника излучения 200 Вт. Был использован полусферический концентрический анализатор энергий с задерживающим потенциалом. Спектры записаны при давлении не выше 10^{-7} Па с предварительно дегазированных в сверхвысоком вакууме образцов [4, 5].

В ходе исследований были зарегистрированы обзорные спектры поверхностей ($0 \div 1100$ эВ с шагом 1,0 эВ и выдержкой 3 с/точка) и спектры высокого разрешения подуровня Ti 2p (шаг 0,1 эВ, выдержка 7 с/точка) и C 1s (шаг 0,1 эВ, выдержка 2 с/точка).

Результаты исследования. В работе получены обзорные РФЭ спектры образцов КЗ титана и УМЗ титана как до, так и после триботехнических испытаний на адгезиометре при различных температурах контакта. На рис. 1

представлен пример одного из таких спектров, а именно РФЭ спектр УМЗ титана после триботехнических испытаний при температуре контакта 800° С.

Как видно из рис. 1, РФЭ спектр формируется фотоэлектронными пиками и Оже линиями (элементы с индексами KLL, LMM, KVV). Фотоэлектронные пики образованы электронами, полученными в результате первичного фотоэффекта, т.е. они выбиты из атомов элементов квантом рентгеновского излучения. Оже линии формируются электронами, возникшими в результате вторичного фотоэффекта. На основе таких спектров выявлено, что поверхности образцов из УМЗ и КЗ титана ВТ1-0 после адгезионных испытаний имеют одинаковый качественный элементный состав (обнаружены следующие элементы: углерод, кислород, титан, цинк, натрий, железо, кремний, фтор, хлор), но различный количественный.

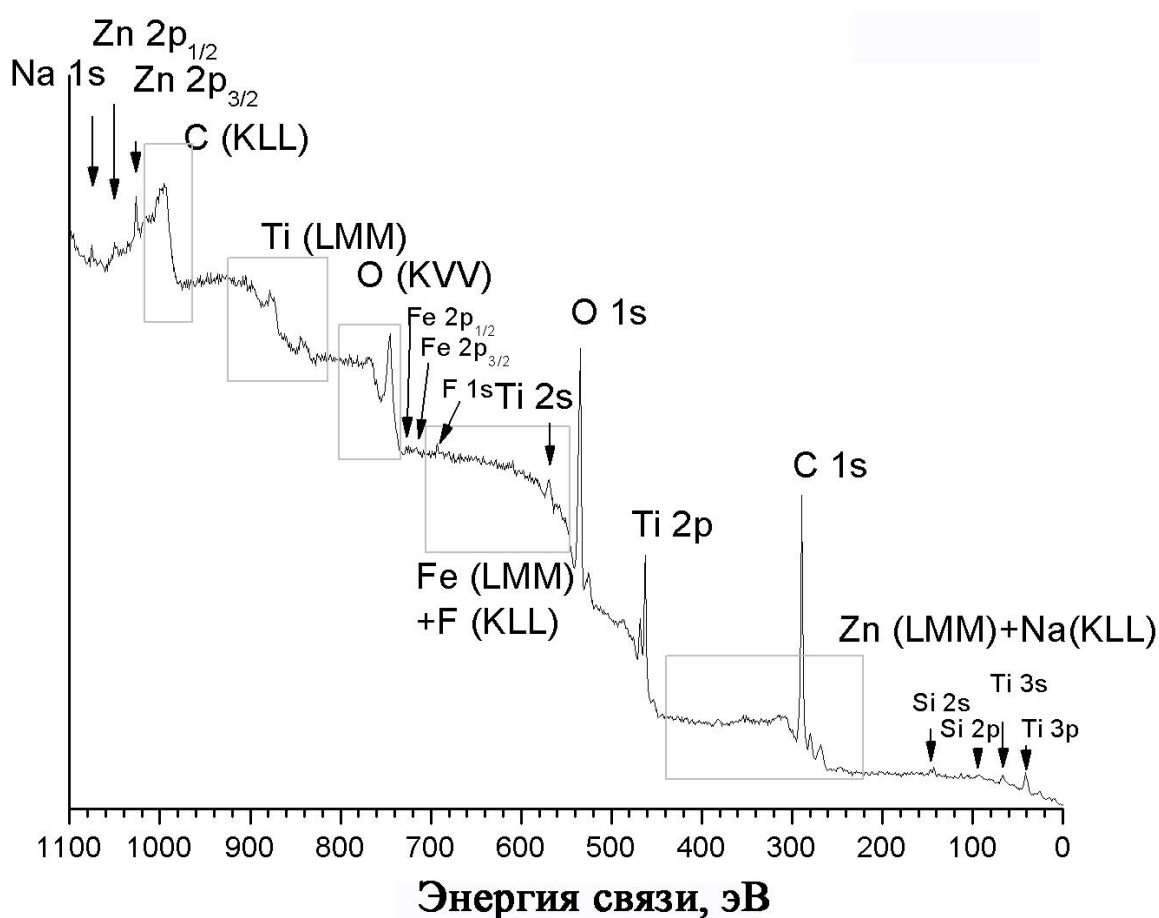


Рис. 1. Пример обзорного РФЭ спектра УМЗ титана после триботехнических испытаний при температуре контакта $\Theta = 800^{\circ}\text{C}$

При помощи спектров высокого разрешения для подуровня Ti 2p (рис. 2) установлено, что образцы из КЗ и УМЗ титана после триботехнических испытаний не содержат на своей поверхности металлический титан, однако содержат этот элемент в его соединении TiO₂ (линия, соответствующая энергии связи 458.4 эВ, отвечает элементу титана в соединении TiO₂ [5]).

Количественный элементный состав поверхности (толщина около 10 ангстрем) образцов КЗ и УМЗ титана представлен в табл. 1 (элементы, не вошедшие в таблицу, содержатся в следовых количествах). Наносными считали элементы: Na, Zn, Cl. Образцы не содержали на своей поверхности вольфрам, который мог бы остаться как продукт износа индентора из ВК8.

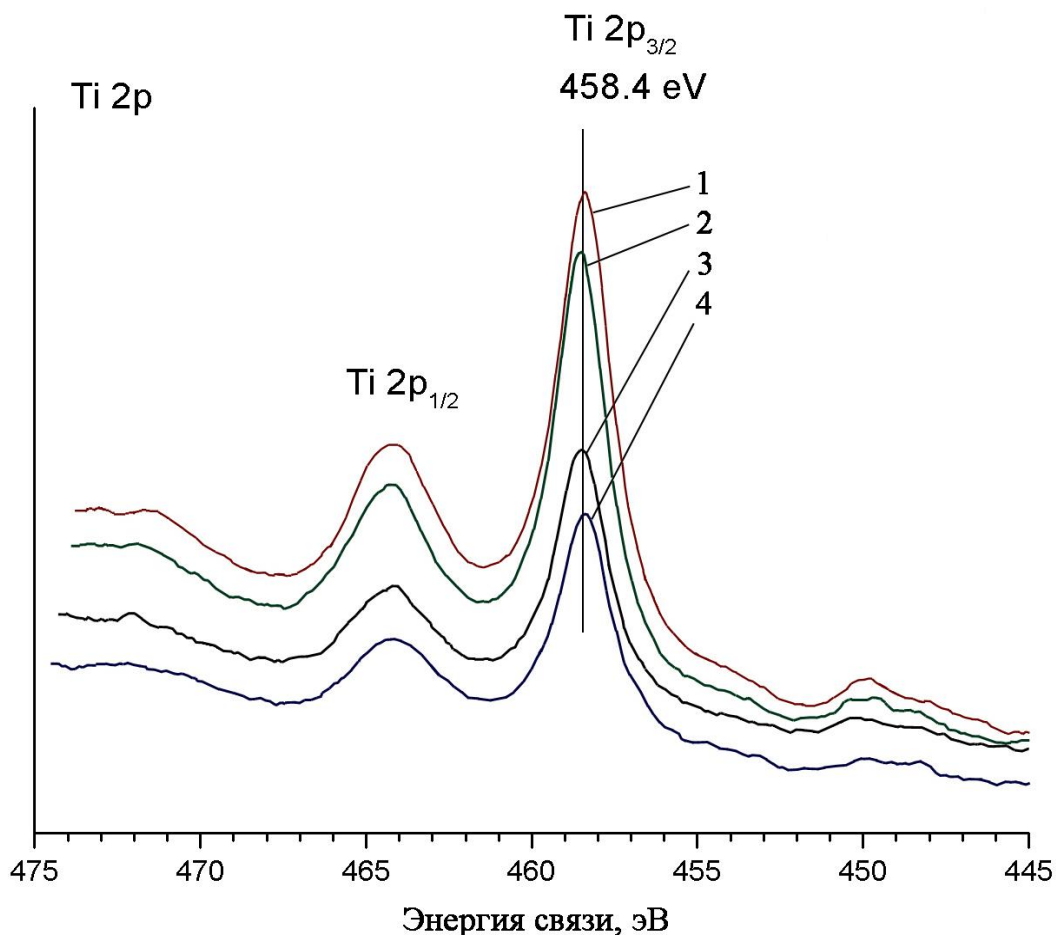


Рис. 2. Пример спектров высокого разрешения подуровня Ti 2p образцов из УМЗ титана: 1 – $\Theta = 800^{\circ}\text{C}$; 2 – 350°C ; 3 – 20°C ; 4 – до триботехнических испытаний

Выявлено, что поверхности образцов из УМЗ титана после триботехнических испытаний (при исследованных температурах контакта) содержат в 1,6-1,9 раза больше элементов титана (в % атомной массы) по сравнению с КЗ аналогом. Одновременно с увеличением содержания элемента титана на поверхности происходит увеличение содержания связанного с ним кислорода. Так как титан находится в соединении TiO_2 , то, таким образом, на поверхности УМЗ титана после триботехнических испытаний присутствует в 1,6-1,9 раза больше оксидов титана TiO_2 по сравнению с КЗ аналогом. При этом, количество оксидов титана для УМЗ и КЗ титана увеличивается с увеличением температуры контакта. Оксиды титана, выполняя роль защитной пленки, предохраняют от схватывания контактирующих поверхностей и способствуют снижению коэффициента трения.

Таблица 1

Количественный элементный состав поверхности образцов из КЗ и УМЗ титана

Состояние	Хим. состав	Элемент	Содержание элементов в % ат. массы на поверхности	
			КЗ титана	УМЗ титана
До триботехнических испытаний		C	82,5	76,8
		O	13,4	17,9
		Ti	2,2	5,2
		Zn	0,9	Следы ($\leq 0,1$)
		Na	1,0	Следы
После триботехнических испытаний при температуре контакта 20° С		C	80,2	72,5
		O	14,4	19,9
		Ti	3,4	6,3
		Zn	0,9	Следы
		Na	1,1	1,3
После триботехнических испытаний при температуре контакта 350° С		C	79,4	66,2
		O	14,8	25,3
		Ti	4,0	7,2
		Zn	0,8	0,7
		Na	1,0	0,6
После триботехнических испытаний при температуре контакта 800° С		C	75,9	65,2
		O	16,6	25,7
		Ti	4,8	7,8
		Zn	1,3	0,7
		Na	1,4	0,6

Выводы

Таким образом, экспериментальные данные [1, 2, 3] и РФЭС исследования позволяют объяснить снижение интенсивности изнашивания УМЗ материалов за счет снижения коэффициента трения, теплопроводности [6] и плотности вещества (TiO_2), участвующего в массопереносе, как это показано в данной работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Столяров В. В., Шустер Л. Ш., Чертовских С. В. Трибологическое поведение ультрамелкозернистых титановых сплавов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2006. № 10. С. 11-19.
2. Чертовских С. В., Шустер Л. Ш. Зависимость триботехнических характеристик титановых сплавов от дисперсности микроструктуры // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2008. № 12. С. 18-24.
3. Чертовских С. В., Шустер Л. Ш. Анализ трения и изнашивания ультрамелкозернистых материалов с позиции термодинамики // Вестник УГАТУ. 2016. № 2 (72). С. 55-60.
4. Анализ поверхности методами ОЖЕ- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / Под ред. Д. Бриггса и М. П. Сиха. М.: Мир, 1987. 482 с.
5. Нефедов В. И. Рентгеновская спектроскопия химических соединений. Справочник. М.: Химия, 1984. 256 с.
6. Валиев Р. З., Александров И. В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272 с.

Каримов И. Г.

Karimov I. G.

Юрьев В. Л.

Yuriev V. L.

Старочкина С. В.

Starochkina S. V.

Сайдуганов А. Р.

Saiduganov A. R.

Хабибуллин Р. О.

Khabibullin R. O.

Сакаева М. И.

Sakaeva M. I.

uf_niit@mail.ru

office-aoniit@ufa-niit.ru

АО «Институт технологии и организации производства», Уфа

**РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ТРУДОЕМКОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ДЕТАЛЕЙ ГТД МЕТОДОМ АНАЛОГОВОГО СОПОСТАВЛЕНИЯ
В ПРОГРАММЕ «КЛАССИФИКАТОР ДСЕ»**

**THE LABOUR INTENSITY CALCULATION OF THE GAS TURBINE
ENGINE WORKPIECES PRODUCTION REALIZED BY THE ANALOGUE
COMPARISON METHOD IN THE SOFTWARE “PARTS AND ASSEMBLY
UNITS CLASSIFIER”**

***Аннотация.** Выбран и программно реализован метод расчета трудоемкости ДСЕ типа «Лопатки» по трудоемкости деталей-аналогов. Методика расчета трудоемкости разработана на базе бальной оценки конструктивно-технологической сложности деталей нового двигателя в сочетании с методом аналогового сопоставления с деталями-аналогами серийного двигателя.*

***Abstract.** A method for calculating the labour intensity of the "Blades" type parts and assembly units according to the analogue workpieces labor intensity has been selected and implemented in the software. The method for calculating the labor intensity has been developed on the basis of the new engine parts structural and technological complexity point assessment in combination with the technique of the analogue comparison with the production-type engine analogue parts.*

***Ключевые слова:** метод аналогового сопоставления, лопатка, программный продукт, расчет трудоемкости.*

***Keywords:** analogue comparison method, blade, program product, labour intensity calculation.*

В данной статье рассматривается задача по определению трудоёмкости изготовления новых (расчетных) деталей двигателя с целью установления технико-экономических требований к их серийной трудоемкости изготовления, включая простановку величины трудоемкости в рабочую конструкторскую документацию (РКД).

Работа выполнялась на основании данных анализа РКД ключевых деталей узлов КНД, КВД, ТВД и ТНД. Под ключевыми деталями понимается

перечень деталей, которые вносят наибольший вклад в трудоемкость изготовления деталей газотурбинного двигателя.

Разработан программный продукт, который предназначен для расчета приведенной трудоемкости новой (расчетной) детали на основе метода аналоговых сопоставлений и концептуальных схем их реализации.

Сущность метода определения трудоёмкости состоит в том, что сложность детали рассматривается, с одной стороны, как мера трудоёмкости изготовления детали, а с другой – как неотъемлемое свойство детали, определяемое совокупностью её геометрических и конструкторско-технологических признаков.

Метод аналоговых сопоставлений основывается на статистической информации о фактической трудоёмкости изготовления деталей-аналогов серийного двигателя-аналога, скорректированной с помощью корректирующих коэффициентов [1]:

$$T_H = T_a \cdot K_{пр}, \quad (1)$$

где T_H – расчетная трудоёмкость детали нового двигателя;

T_a – фактическая трудоёмкость серийного изготовления детали-аналога двигателя-аналога;

$K_{пр}$ – коэффициент приведения.

Коэффициент приведения $K_{пр}$ определяется с помощью корректирующих коэффициентов и является функцией $K_{пр} = f(K_{П}, K_{ТСЛ}, K_{КСЛ}, K_{Об})$, в которой $K_{П}$ – коэффициент, учитывающий пропорциональность площади обрабатываемых поверхностей детали нового двигателя и детали-аналога, $K_{ТСЛ}$ – коэффициент, учитывающий технологическую сложность изготовления детали, $K_{КСЛ}$ – коэффициент учитывающий конструкторскую сложность детали нового двигателя, $K_{Об}$ – коэффициент, учитывающий обрабатываемость материала детали нового двигателя.

Концептуальная схема реализации хода выполнения работы программы представлена на рис. 1.

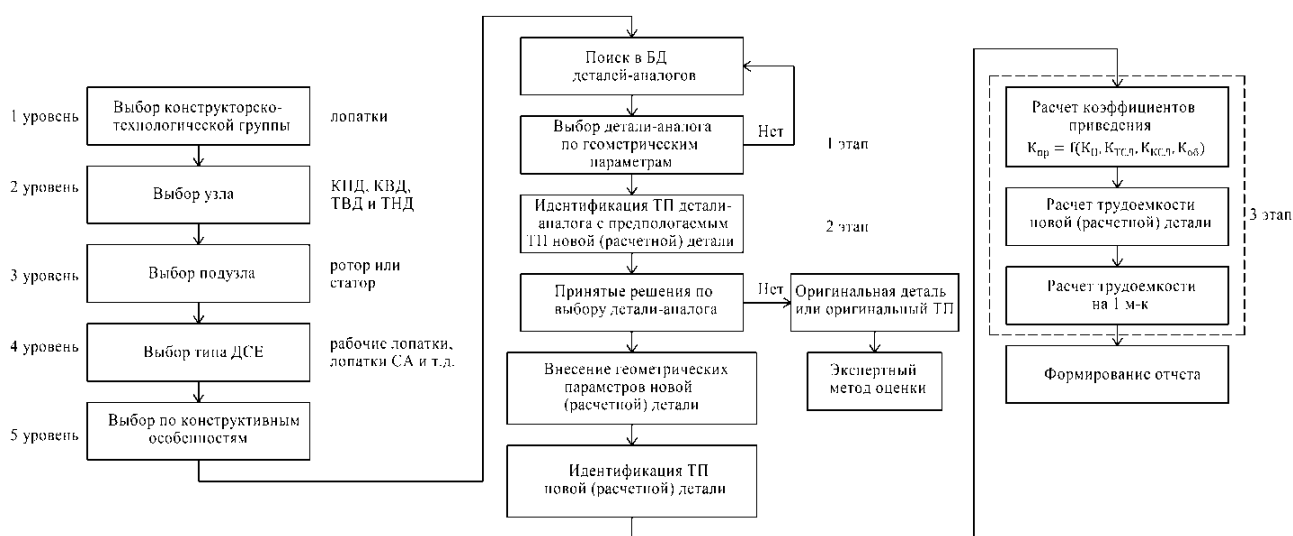


Рис. 1. Концептуальная схема расчета трудоемкости новой детали

Программа «Классификатор ДСЕ» выполняет следующие основные функции, согласно концептуальной схеме:

- взаимодействие (чтение, запись, удаление) с хранящимися в базе данных деталями-аналогами и расчетными деталями;
- ввод в программу параметров новой (расчетной) детали и детали-аналога (геометрических параметров, характеристик технологического процесса);
- расчет трудоемкости одной детали, а также трудоемкости деталей на 1 м-к двигателя;
- добавление вариантов расчета, учитывая изменения геометрических параметров расчетной детали, параметров шероховатости и точности обрабатываемых поверхностей новой (расчетной) детали или изменения погрешности профиля пера лопатки;
- сохранение результатов расчета трудоемкости новой (расчетной) детали в формате документа Excel.

На рис. 2 показана геометрическая интерпретация в виде трехмерной зависимости трудоемкости от погрешности и шероховатости профиля пера рабочей лопатки КВД.

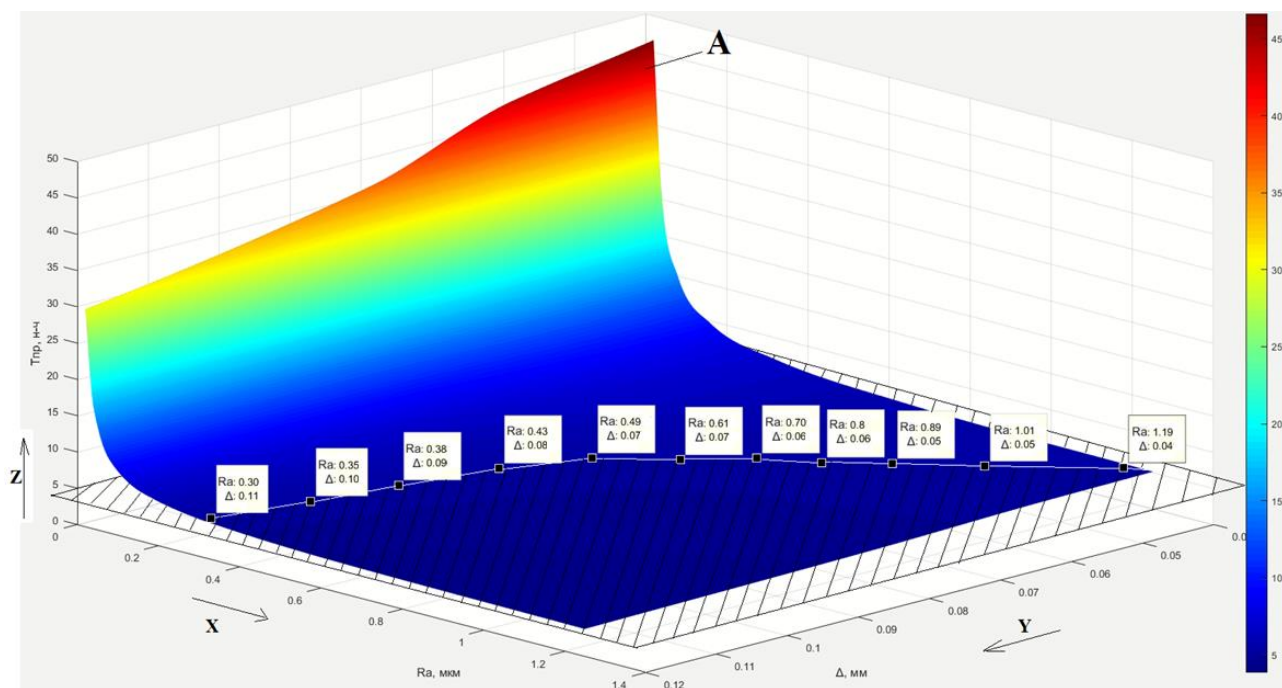


Рис. 2. Трехмерная модель зависимости трудоемкости от погрешности и шероховатости профиля пера лопатки рабочей КВД ($H_{\text{л}} = 20 \dots 80$ мм; $b = 20 \dots 60$ мм) с учетом синергетического эффекта

Работа пользователя в программном продукте осуществляется при запуске программы. Пользователь может добавлять, редактировать, удалять расчетные детали или детали-аналоги, корректировать параметры расчета, добавлять новые варианты расчета, сохранять и печатать результаты расчета.

Интерфейс программы «Классификатор ДСЕ» представлен на рис. 3 и 4.

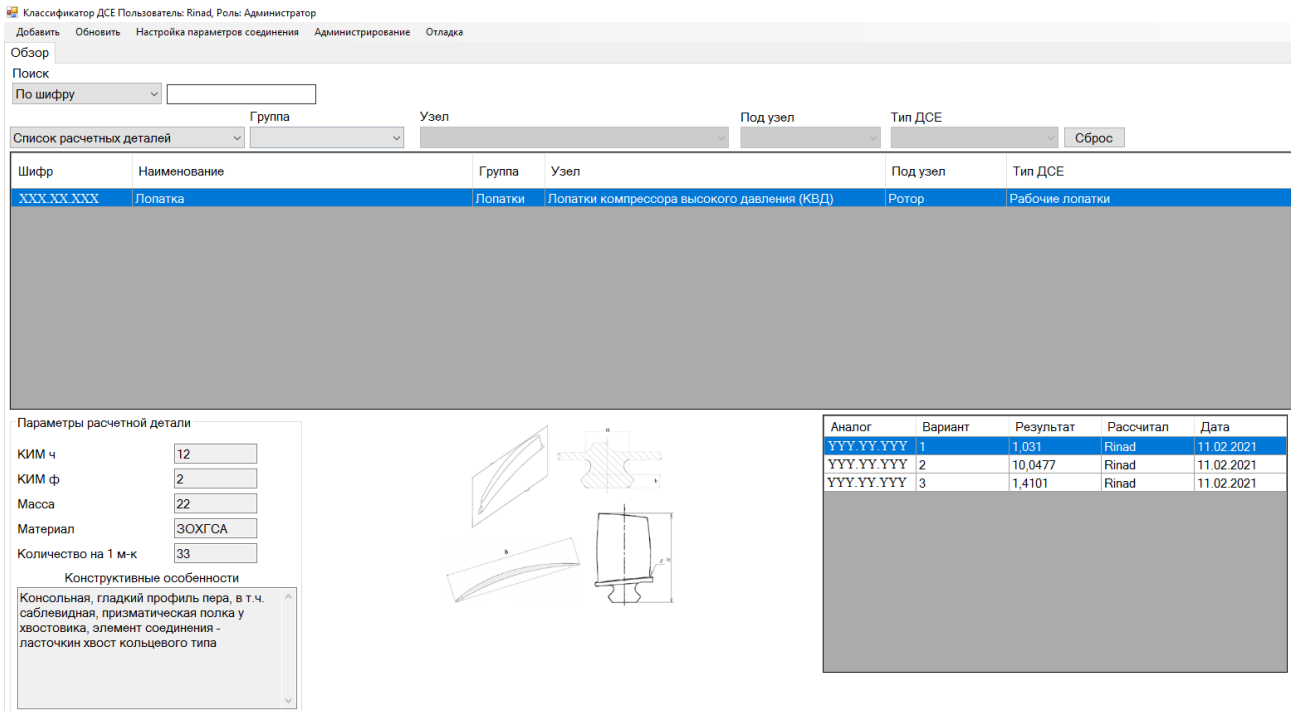


Рис. 3. Главная форма программы «Классификатор ДСЕ»

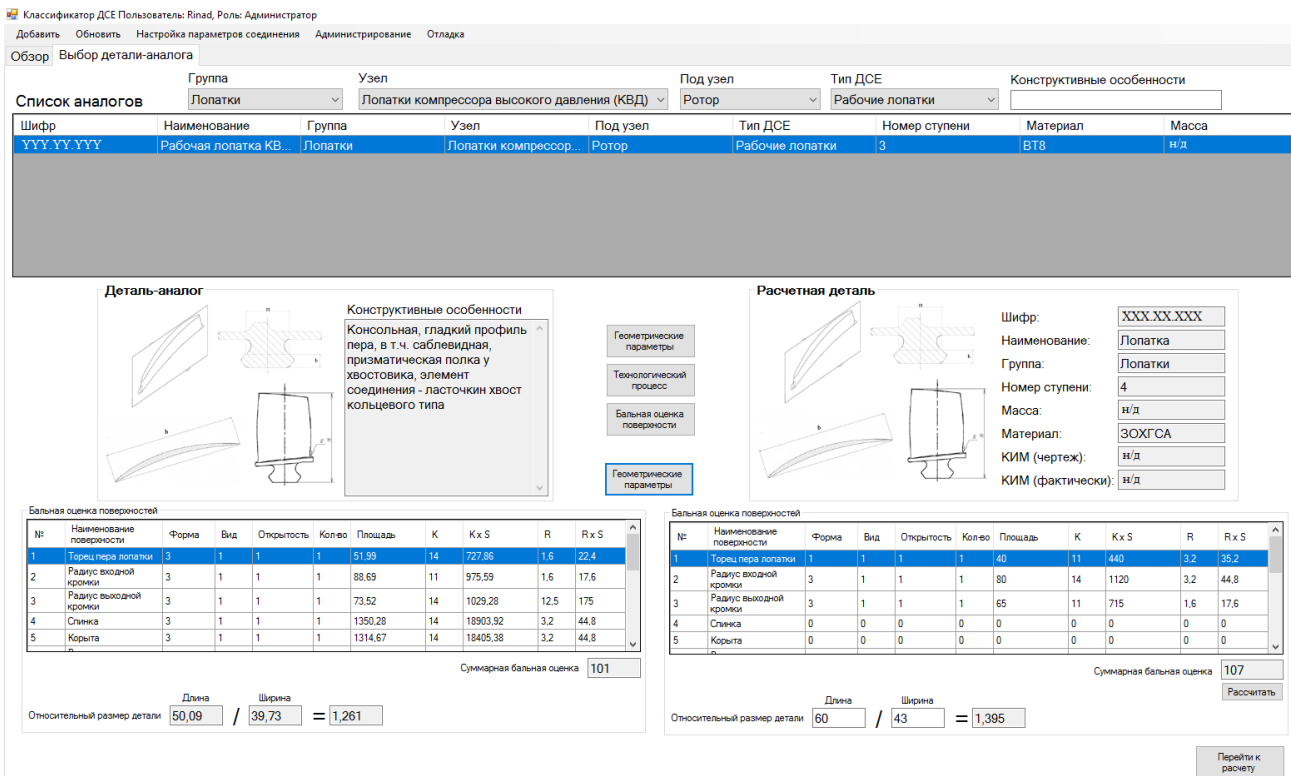


Рис. 4. Вкладка «Выбор детали-аналога», бальная оценка обрабатываемых поверхностей новой (расчетной) детали

Программа «Классификатор ДСЕ» позволяет сохранять полученные результаты расчета трудоемкости новой (расчетной) детали в формате документа Excel (рис. 5).

	A	B	C
1	Образец (расчетная и деталь-аналог)	ДЕТАЛЬ-АНАЛОГ	РАСЧЕТНАЯ ДЕТАЛЬ
2	Шифр ДСЕ (расчетная и деталь-аналог)	УУ.УУ.УУ	ХХХ.ХХ.ХХХ
3	Наименование ДСЕ (расчетная и деталь-аналог)	Рабочая лопатка КВД	Рабочая лопатка КВД
4	Производство		Серийное производство
5	Вариант		1
6	Фактическая трудоемкость детали-аналога (в т.ч. Тобщ., Тзаг., Тф.мех., Тф.ост.)	4,19 / 0,3 / 3,536 / 0,354	
7	Коэффициент обрабатываемости относительно Ст.45 Соб н и Соб а	2,9	2,9
8	Коэффициент обрабатываемости материала		1
9	Погрешность профиля пера лопатки	0,06	0,1
10	Коэффициент точности, Кт	1,25	0,96
11	Шероховатость детали, Ra	0,63	0,32
12	Коэффициент шероховатости, KRa	1	1
13	Коэффициент технологической сложности, Ктсл		0,817
14	Площадь изменяемых поверхностей расчетной детали Sizм, мм2		1025,52
15	Общая площадь обрабатываемых поверхностей детали (Sобщ н и Sобщ а), мм2	5522,31	3098,016
16	Доля изменяемой части элементов (Vизм)		0,185
17	Суммарная балльная оценка уровня конструкторской сложности в баллах расчетной детали и детали-аналога	101	107
18	Уровень конструкторской сложности, Уксл		1,06
19	Масса расчетной детали и детали-аналога	0,03	0,0125
20	Коэффициент пропорциональности площадей для расчетной детали, Кп		0,561
21	Коэффициент конструкторской сложности для расчетной детали, Кксл		0,9898
22	Расчетная трудоемкость ДСЕ (по данному варианту) на 1 шт.		2,009
23	Трудоемкость ДСЕ на 1 м-к		
24	Сотрудник	АО НИИТ	АО НИИТ

Рис. 5. Выходной документ результатов расчета трудоемкости новой (расчетной) детали в формате документа Excel

Выводы

Трудоемкость изготовления новой (расчетной) детали нового двигателя определялась с учетом коэффициента обрабатываемости материала новой детали, коэффициента технологической сложности изготовления новой детали с учетом точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей, а также коэффициента конструкторской сложности новой детали в отличие от конструкции детали-аналога, жесткости детали и коэффициента пропорциональности, учитывающего площади обрабатываемых поверхностей новой детали и детали-аналога.

Разработанная программа позволяет определять трудоемкость изготовления новой (расчетной) детали методом аналогового сопоставления с последующей простановкой величины трудоемкости в РКД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрьев В. Л., Старочкина С. В., Сухова Н. А. Управление технологичностью авиационных газотурбинных двигателей: монография. М.: Машиностроение, 2013, 226 с.

СЕКЦИЯ 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ

Загидуллин Р. Р.

Zagidullin R. R.

polysoft@list.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТЕЙ ПРОИЗВОДСТВА

MODEL OF THE PROBLEM OF DEFINITION PRODUCTION CAPACITY

***Аннотация.** Рассмотрен вопрос построения математической модели с помощью аппарата линейного программирования для определения технологических мощностей предприятия при производстве машиностроительной продукции*

***Abstract.** The issue of constructing a mathematical model in using a linear programming apparatus to determine the technological capacities of an enterprise in the production of machine-building products is considered.*

***Ключевые слова:** математическая модель, задача мощностей, математическое программирование, машиностроение*

***Keywords:** mathematical model, capacity problem, mathematical programming, mechanical engineering*

Введение. Задача определения мощностей возникает на предприятии тогда, когда необходимо на исходной номенклатуре изделий $M\{m\}$ и оборудования $N\{n\}$ определить возможность изготовления изделий в определенные сроки. Эту задачу, как правило, в РФ на машиностроительных предприятиях возложена на технологические службы (в состав отдела главного технолога часто входит подразделение под названием "Бюро мощностей").

Эта функция в виде программного модуля иногда присутствует в таких корпоративных системах, как ERP (Enterprise resource planning), APS (Advanced Planning & Scheduling Systems) и MES (Manufacturing Execution Systems). В то же время ни один из разработчиков данных систем не представляет пользователям ни математических моделей, ни алгоритмов, что иногда ставит под сомнение качество принимаемых решений.

Небольшие предприятия с мелкосерийным и единичным характером производства, как правило затрудняются в приобретении указанных выше корпоративных систем ввиду их высокой стоимости владения, тем более, что требуется только одна функция.

Кроме того, при решении задачи мощностей могут решаться задачи экономического плана – на какие рабочие центры (РЦ) необходимо

предварительно назначить те или иные единицы планирования (ЕП) e_{ijk} ($i \in M, j = 1, p_i, k \in N$), где p_i количество операций у i -ой ЕП в виде партий запусков a_i , чтобы минимизировать общую стоимость выполнения всего множества $M\{m\}$.

Поэтому в работе поставлена цель – представить математическую модель такой задачи с целью её самостоятельной реализации в виде программного кода, например, при создании системы управления предприятием на базе интеграции различных решений на базе известной платформы 1С-Предприятие.

Решение задачи. Итак, у нас имеется множество ЕП e_{ijk} , себестоимость обработки $c_{e_{ijk}}$ каждой ЕП на k -ом РЦ, время обработки ЕП на k -ом РЦ – $t_{Oe_{ijk}}$, длительность переналадки РЦ $t_{ПЕРe_{ijk}}$ – и фонды времени оборудования – Φ_k . Себестоимость переналадки оборудования при обработке ЕП e_{ijk} обозначим как $c_{ПЕРe_{ijk}}$.

Время транспортирования учитывать не будем, поскольку это задача не построения расписания, а определения мощностей.

Нам необходимо составить математическую модель задачи мощностей. Введем булеву переменную x_{ijk} . Её значение равно 1, если ЕП e_{ijk} может быть назначена на k -й РЦ и $x_{ijk} = 0$ в противном случае (то есть рассматриваем случай, когда предполагаем, что любая ЕП может быть изначально рекомендована к обработке на любом РЦ, который может её выполнить по технологическим возможностям).

Будем решать задачу в терминах задачи линейного программирования (ЗЛП).

Модель будет выглядеть следующим образом.

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{p_i} \sum_{k=1}^n x_{ijk} (a_i \cdot (c_{e_{ijk}} + c_{ПЕРe_{ijk}})) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{p_i} \sum_{k=1}^n x_{ijk} (a_i \cdot (t_{Oe_{ijk}} + t_{ПЕРe_{ijk}})) \leq \Phi_k, k \in N, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{p_i} \sum_{k=1}^n x_{ijk} \leq 1, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{p_i} \sum_{k=1}^n x_{ijk} \geq 0, \quad (4)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \quad (5)$$

$$F > 0, a_i > 0, t_{0e_{ijk}} > 0, t_{\text{ПЕР}} e_{ijk} > 0. \quad (6)$$

Выражение (1) – это наша целевая функция, которая минимизирует себестоимость общего запуска номенклатуры $M\{m\}$ на множество РЦ $N\{n\}$. Выражение (2) отражает ограничение по фонду времени для всего парка РЦ. Выражение (3) позволяет нам убрать дублирующие запуски ЕП, т.е. даже если её выполнение с помощью переменной x_{ijk} рекомендовано на нескольких РЦ, то выполняться какая-либо ЕП e_{ijk} будет только на одном РЦ (дробление запуска не предусматривается). Кроме того, как мы видим, её значение может приобретать и равное нулю, для случая, когда превышаются фонды времени РЦ. Поскольку отрицательных значений быть не может, то мы вводим ограничение в виде выражения (4) при том, что область существования переменной x_{ijk} описывается выражением (5). Это сделано из-за того, что в математических пакетах иногда приходится перестраховываться, чтобы область существования переменной не вышла за требуемые в модели границы. Из-за этого в выражении (3) мы никогда не получим отрицательного решения.

Выражение (6) описывает область существования переменных.

После расчёта становятся известными значения x_{ijk} . Если после решения все значения $x_{ijk} = 1$ и фонды времени Φ_k не нарушены, то задача решена. Если хотя бы одно значение $x_{ijk} = 0$ из всего множества ЕП, то необходимо провести проверку по следующему выражению

$$x_{ijk} (i \in M, j = 1, p_i, k \in N) = 0 \mid \exists x_{irq} (r = 1, p_r, k \in N) = 0. \quad (7)$$

Дело в том, что при отсутствии условия предшествования ЕП может получиться так, что хотя бы одна ЕП e_{ijk} на i -ой детали не вошла по причине нарушения либо фонда времени k -го РЦ, либо по причине нарушения длительности горизонта планирования, если он задан. Например, из десяти операций не вошла 6-я. Тогда нет смысла назначать операции с первой по пятую и с седьмой по десятую. При этом, если выражение (7) истинно, но данная деталь удаляется из общего множества M и расчёт по модели (1-6) проводится вновь. Либо увеличиваются фонды времени некоторых РЦ или длительность горизонта планирования. Расчёты по модели (1-6) с проверкой по условию (7) ведутся до тех пор, пока все значения x_{ijk} не приобретут значение «1». Если увеличить фонды времени РЦ не удаётся, тогда данные ЕП удаляются из множества M .

Данная модель может быть решена с помощью пакета символьной математики, например, с помощью пакета Maple. Но в таких пакетах графические возможности не позволяют представить комфортный вид диаграммы, поэтому в качестве иллюстрации решения данной задачи использовалась MES PolyPlan ((С) Загидуллин Р. Р.), где реализована данная модель (на заводских данных цеха зубчатых колёс).

На рис.1 представлена соответствующая диаграмма Гантта.



Рис.1. Диаграмма Гантта для задачи определения мощностей

Заштрихованные области на диаграмме означают переналадки. А то, что на некоторые РЦ попали ЕП с одинаковыми номерами, то это означает, что это разные операции одной и той же ДСЕ.

Особенности разработки алгоритма решения задачи. Алгоритм задачи целесообразно строить на базе метода ветвей и границ (МВГ). Несмотря на то, что данный алгоритм имеет достаточно высокую вычислительную сложность, при решении данной задачи она будет ниже регламентируемой, поскольку из-за отсутствия условия предшествования задача сводится к задаче построения расписаний для одностадийных систем [1].

В литературе, например, [2] часто приводятся основы МВГ, но при самостоятельной разработке программного обеспечения лучше использовать готовые алгоритмы или даже программный код. Лучше всего для этого подходят алгоритмы группы Numerical Algorithms Group (NAG) по той причине, что на сегодняшний день она является сильнейшей в области разработки математических алгоритмов. Например, математический пакет

Maple, который используется в большинстве случаев математиками, использует алгоритмы именно этой группы. На сайте этой компании (<https://www.nag.com>) можно найти условно-бесплатные библиотеки алгоритмов для различных языков - Fortran, C++ и др. Алгоритмы NAG отработаны в течении нескольких десятилетий (автор пользовался ими еще в 1987 г.) и имеют очень компактный и быстродействующий программный код. Этот программный код может быть встроен в любую систему, позволяющую дописывать функционал системы. Наиболее целесообразно это использовать в системе 1С-Предприятие, поскольку эта система наиболее чаще встречается в составе программного обеспечения российских предприятий.

Задача мощностей и расписание. Многие путают диаграмму Ганта для задачи определения мощностей и расписание. Поэтому приведем на рис. 2 расписание от того же состава номенклатуры, что и для задачи определения мощностей.

При этом мы видим, что момент окончания работ значительно увеличился. И именно этот момент окончания всегда принимается во внимание при планировании работ.

В отличие от плотного расположения ЕП в задаче мощностей, в расписании между ними появились простои оборудования, связанные с ожиданием обработки предыдущих операций и ожиданием высвобождения транспортного средства (в данном примере задействовано только одно транспортное средство и оно на диаграмме обозначено литерой «Т»). При этом расписание сместилось, как мы видим, на вторую смену.

Такая разница между образом задачи определения мощностей и расписанием обусловлена тем, что в задаче построения расписания, в отличие от задачи определения мощностей, учитывается условие предшествования операций. Кроме того, плотность расписания зависит от качества используемого алгоритма и глубины поиска на процедурах оптимизации. В данном примере для построения расписания был использован простой эвристический алгоритм с минимальной глубиной поиска.

Но если задачу определения мощностей мы можем решить с минимальными затратами, используя математические пакеты, то для расписания используются более сложные и дорогостоящие программные средства – MES и APS [3].

В принципе, для задачи построения расписания, можно построить математическую модель в терминах задач целочисленного линейного программирования (ЗЦЛП). Но модель при этом получается достаточно громоздкой и её крайне сложно реализовать в математическом пакете. Кроме того, условие предшествования уже не позволяет использовать МВГ ввиду большой глубины графа поиска. Поэтому для построения расписаний класса job-shop-planning в MES-системах используются эвристические алгоритмы.

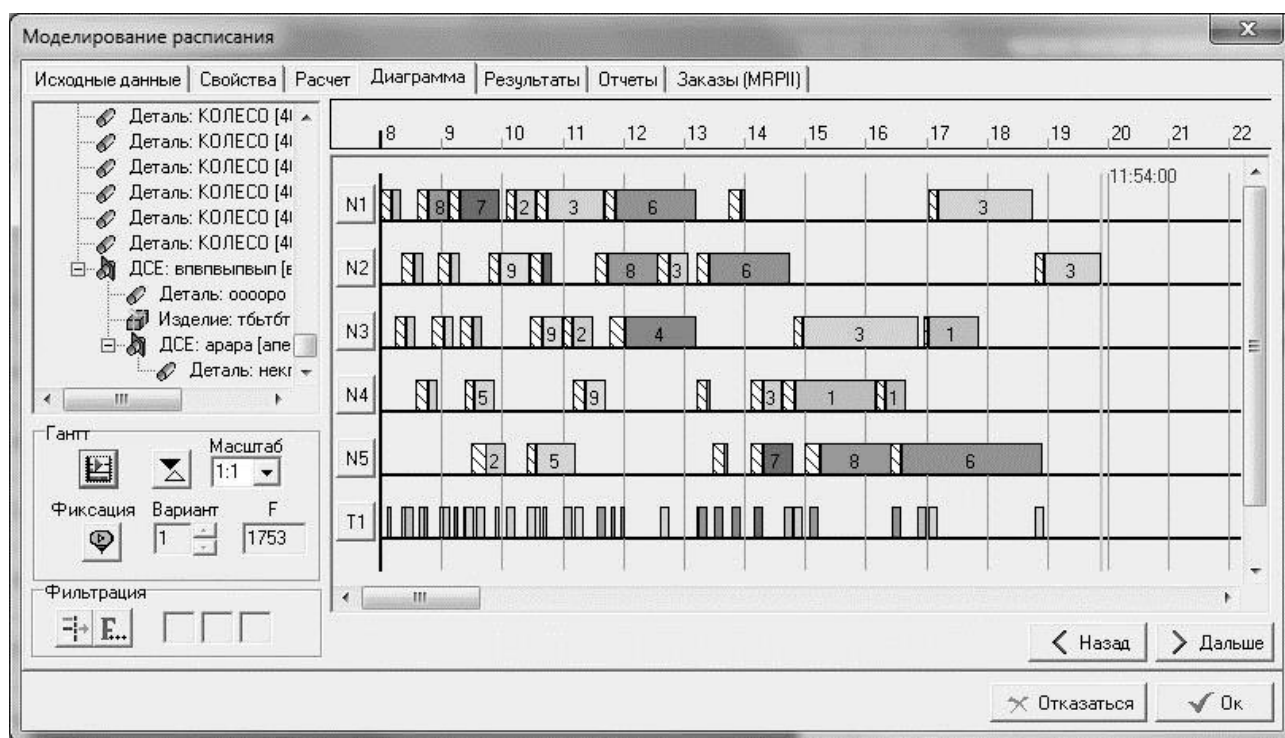


Рис. 2. Диаграмма Гантта, иллюстрирующая расписание

Выводы

Таким образом, в работе представлена математическая модель в терминах линейного программирования, с помощью которой можно самостоятельно, силами предприятия реализовать такой функционал системы управления, как определение мощностей предприятия при известных множествах номенклатуры выпуска и оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Танаев В. С., Гордон В. С., Шафранский Я. М. Теория расписаний. Одностадийные системы. – М.: Наука. – 1984. – 384 с.
2. Филлипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей: Пер.с англ. – М.: Мир, – 1984. – 496 с.
3. Загидуллин Р.Р. Управление машиностроительным производством с помощью систем MES, APS, ERP. Полная версия. - Старый Оскол: ТНТ. – 2019. – 416 с.

Загидуллин Р. Р.
Zagidullin R. R.
polysoft@list.ru
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический
университет», Уфа

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТОИМОСТИ ПРОЕКТОВ

DETERMINING THE COST OF PROJECTS

Аннотация. В статье рассматривается стоимостной подход к оценке выполнимости проектов. Предлагается сеть с альтернативными дугами по стоимости выполнения стадий проекта. При этом стоимость проекта определяется двумя оценками нелинейного характера.

Abstract. The article discusses the cost approach to assessing the feasibility of projects. A network with alternative arcs is proposed at the cost of project stages. In this case, the cost of the project is determined by two estimates of a non-linear nature.

Ключевые слова: управление проектами, стоимость проекта, сеть с альтернативными дугами, целевые функции, функционал.

Keywords: project management, project cost, network with alternative arcs, target functions, functionality.

Введение

В системах управления проектами (УП), которые основаны на известных алгоритмах МКП или PERT [1], основное внимание уделяется определению сроков выполнения проектов и резервов времени для отдельных стадий (работ). Часто учитываются риски. Например, в основополагающем руководстве по УП[2] даются довольно расплывчатые понятия, связывающие вероятность выполнения проекта с его оценками, например, в матрице вероятности в [2] присутствуют понятия, которые не свойственны классическим понятиям теории вероятностей, например, "угрозы", "благоприятные возможности" и т.п. При выполнении любого проекта нас, прежде всего интересуют не только сроки, но и стоимость выполнения проекта при определенных рисках, которые лучше выражать вероятностной величиной выполнения как для отдельных стадий проекта, так и его самого. Поэтому в данной работе предлагается несколько иной подход к решению данных вопросов.

Постановка задачи

Любой проект, если только он не состоит из двух-трёх стадий, как мы знаем, принято представлять в виде графа. На рис. 1 представлен пример небольшого проекта в общепринятой форме. Утолщенными линиями показан критический путь (КП).

Между вершинами, как всегда, указываются длительности выполнения работ – t_{i-j} между работами i и j .

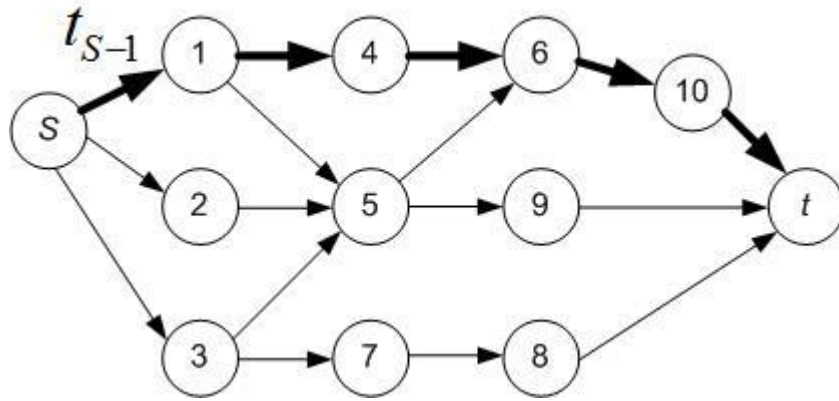


Рис. 1. Традиционная сеть с указанием критического пути

Каждая сеть, как известно состоит из множества путей. Например, для сети, представленной на рис. 1, множество путей, включая критический (S-1-4-6-10-t, обозначен на рис. 1 утолщенными линиями дуг):

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1 : S-1-4-6-10-t \\ S_2 : S-1-5-6-10-t \\ S_3 : S-1-5-9-t \\ \dots \\ S_k : S-3-7-8-t \end{array} \right. \quad (1)$$

Каждый путь в этом множестве обозначен как $S_i (i = k)$, где k - множество путей. Множество (1) является счётным и определение их количества не представляет сложности. В дальнейшем мы вернемся к этому множеству.

Вершины S и t олицетворяют источник и сток сети. При этом по традиции считаем, что если все работы достигли стока t в то или иное время, то проект является законченным. Количество вершин у нас является счётным и равно n .

Итак, у нас имеется матрица времен выполнения работ - $T[t_{i,j}]$. Введём также необходимую для таких сетей матрицу предшествования работ (матрицу инцидентий узлы-дуги) - $Z[z_{i,j}]$, где: $z_{i,j} = 1$ для случая, если вершина j следует за i , и $z_{i,j} = 0$ для всех остальных случаев. Значения условий предшествования позволит нам автоматизировать процесс генерации путей в сети и получить множество (1).

Также можно ввести вероятность выполнения любой i -й работы в срок $t_{i-1,i} - p_i (p_i > 0)$ и если в результате выполнения проекта не нарушены сроки КП, то им не стоит в итоге придавать значение. Можно также посчитать вероятность выполнения проекта в сроки, регламентируемые КП. При этом, как правило, мы имеем вариант со случаем независимых событий для последовательности работ.

Кроме того, введём стоимость всех работ как $c_i (c_i > 0)$. Таким образом можно на первом этапе оценить стоимость всего проекта C_{Π} для всего множества работ n

$$C_{\Pi} = \sum_{i=1}^n c_i. \quad (2)$$

При этом стоимость C_{Π} , определяемая по данной формуле, как мы увидим дальше, является лишь приблизительной оценкой.

Проблемы с проектом отсутствуют, если не нарушаются сроки КП и не увеличиваются значения c_i для отдельных работ. Но, как известно из практики, так бывает далеко не всегда. И нас, прежде всего интересует итоговая стоимость проекта с учётом возможных отклонений по параметрам. Для определения этого предложим следующий метод.

Решение проблемы оценки стоимости проекта

Представим на рис. 2 ещё раз тот же граф работ (см. рис. 1), что и ранее, но на основе дерева решений, как это принято делать при решении инвестиционных задач в условиях риска [3].

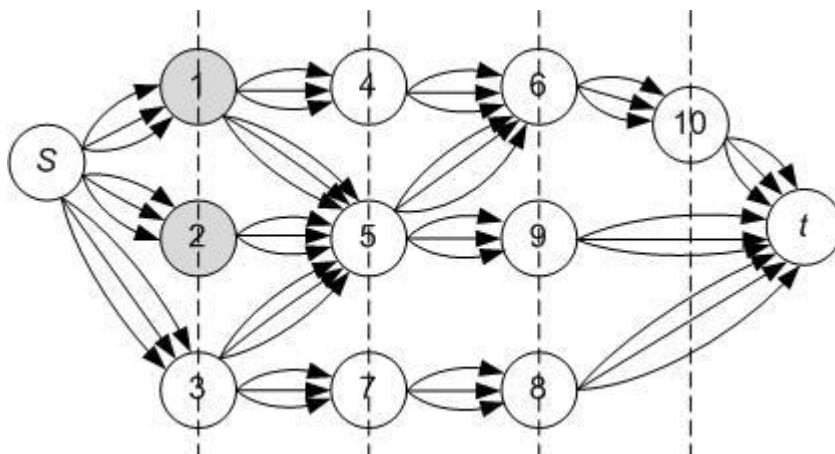


Рис.2. Граф, представленный деревом решений

От каждой вершины проведем не одну дугу, а три. При этом сеть лучше строить слоями, олицетворяющими этапы (вне зависимости от длительности работ), которые на рис. 2. разделены пунктирной линией. Для случаев пересчёта проекта для работ, которые уже сделаны вершины окрасим в серый цвет. Из трёх дуг одна будет повторять тот, который является традиционным с регламентированной вероятностью выполнения (рис.3) – p_i^{reg} (вероятность выполнения работы =1). Введем также две дуги, одна из которых будет

отражать оптимистичную оценку вероятности – p_i^{opt} , а вторая – пессимистичную оценку – p_i^{pes} .

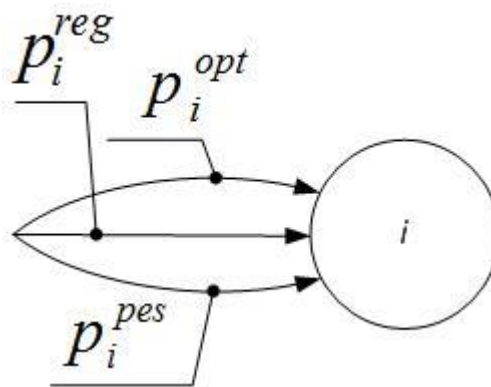


Рис.3. Фрагмент графа с несколькими дугами из вершины

При назначении работ должно выполняться неравенство $p_i^{opt} > p_i^{pes}$. Например, $p_i^{opt} = 0.8$, $p_i^{pes} = 0.5$. В ряде случаев, когда мы полностью уверены, что работа будет выполнена, можно записать, что $p_i^{opt} = p_i^{reg} = 1$. При назначении величин вероятностей для p_i^{opt} и p_i^{pes} лучше использовать апостериорные значения, т.е. по каждой работе необходима накопленная ранее статистическая информация.

Каждой дуге (*opt* и *pes*) припишем дополнительные инвестиции для завершения работы в соответствии со значениями *opt* и *pes* – Δc_i^{opt} и Δc_i^{pes} . При этом надо ответить, что функции вида $\Delta c_i^{opt} = f(c_i^{opt})$ и $\Delta c_i^{pes} = f(c_i^{pes})$ могут являться нелинейными, поэтому при назначении Δc_i^{opt} и Δc_i^{pes} также желательно использовать предыдущий опыт выполнения работ.

Введём значения максимальной стоимости проекта, на которую может рассчитывать предприятие – C_{Π}^{max} .

Введем значения затрат на выполнение всего проекта как стоимость. При этом стоимость проекта без учёта дополнительных инвестиций, которая определялась нами ранее по формуле (1), обозначим как C_{Π} .

Стоимость проекта с оценками *opt* и *pes* обозначим как C_{Π}^{opt} и C_{Π}^{pes} . Эти стоимости также легко определяются по следующим формулам

$$C_{\Pi}^{opt} = \sum_{i=1}^n (c_i + \Delta c_i^{opt}), \quad (3)$$

$$C_{\Pi}^{pes} = \sum_{i=1}^n (c_i + \Delta c_i^{pes}). \quad (4)$$

Проект считается выполнимым, если выдерживается система условий

$$\begin{cases} C_{\Pi}^{max} \geq C_{\Pi}^{pes}, \\ C_{\Pi}^{max} \geq C_{\Pi}^{opt}. \end{cases} \quad (5)$$

Поскольку C_{Π}^{opt} и C_{Π}^{pes} являются крайними решениями, то между ними, ввиду комбинаторного характера сети, которую даёт дополнительное ветвление дуг на дуги opt и pes , лежит большое количество промежуточных вариантов. В принципе, если нас интересуют только C_{Π}^{opt} и C_{Π}^{pes} для последующего сравнения с C_{Π}^{max} , то задача на этом считается решенной.

Другой вопрос, что на этом множестве можно в дальнейшем решать задачи оптимизации по самым различным критериям. При этом нельзя трансформировать сеть в граф, в котором, например, ищется некое минимальное решение, поскольку не каждый слой какого-либо пути (см. рис.1) содержит вершины. Кроме того, каждый путь в (1) представляет собою, как правило, отдельную задачу, зачастую с собственной целевой функцией, размерностью и ограничениями.

Вариантом является решение, когда все пути представлены своими функциями от номера пути – $F_i (i=1, k)$. И в этом случае мы получаем функционал вида

$$F(F_1, F_2, \dots, F_k) \rightarrow \{\max; \min\} \quad (6)$$

При этом для каждого пути, например $S_2 (S_2 : S-1-5-6-10-t)$, представленного для примера на рис.4, ищется своё решение при целевой функции F_2 и собственном множестве ограничений.

В дальнейшем, при отыскании значений всех функций F_i , можно выписать ограничения для некой общей задачи, в которой ищется \min или \max векторного критерия (функционала) F . При отыскании значений F_i лучше всего использовать метод ветвей и границ, поскольку, несмотря на его общую высокую вычислительную сложность количество вершин в графе поиска,

полученного на базе любого пути, описывающего проект, как показывает практика УП – не велико.

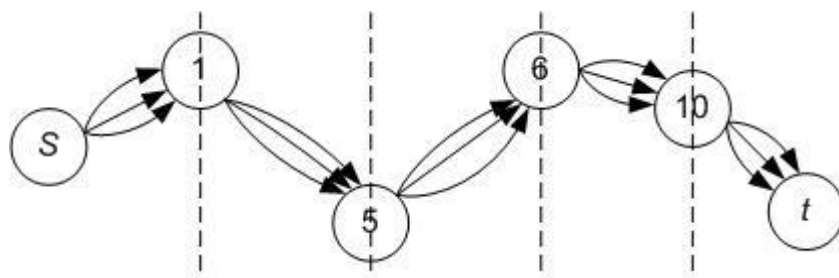


Рис.4. Пример одного из путей сети

Каждая из целевых функций F_i может иметь собственную размерность (время, ресурсы и пр.), но в дальнейшем их все можно привести к безразмерному виду и при решении задачи отыскания наиболее выгодного решения для F (max или min) использовать весовые коэффициенты α_i с попарным сравнением важности той или иной частной функции F_i относительно любой другой F_j , воспользовавшись методом, представленным автором в работе [4].

Выводы

В работе представлен метод оценки стоимости проектов, который базируется на множестве альтернатив, что позволяет определить максимальную и минимальную стоимость проекта. При этом результатом решения задачи может быть как сравнение минимальных и максимальных значений с критическим (C_{Π}^{\max}), так и последующий анализ сети проекта в плане оптимизации, где ветви проекта могут быть представлены в виде частных функций и общее решение найдено в рамках функционала F , включающего эти функции, какими бы разнородными по размерности они не были.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филлипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей: Пер. с англ. М.: Мир. 1984. 496 с.
2. Руководство к своду знаний по управлению проектом (РМВОК ®), М.: Олимп-Бизнес. 6-е изд., 2019, 974 с.
3. Таха Хэмди А., Исследование операций. 10-е изд.: Пер. с англ. СПб.: "Диалектика", 2019. 1056 с.
4. Загидуллин Р.Р. Планирование машиностроительного производства. изд. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 392 с.

Ишменева А. Н.

Ishmeneva A. N.

ishmeneva.alfya@yandex.ru

ПАО «ОДК – Уфимское моторостроительное производственное объединение»

Черников П. П.

Chernikov P. P.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

TECHNOLOGICAL PROCESSES AND COMPUTER-AIDED DESIGN IN MECHANICAL ENGINEERING

Аннотация. Задача автоматизации технологического проектирования для современного машиностроения является чрезвычайно важной и актуальной. Ее решение обеспечит сокращение сроков внедрения в производство новых проектно-конструкторских разработок и повышение его эффективности. При проектировании маршрутного ТП из возможных вариантов последовательности выполнения операций необходимо выбрать рациональную последовательность – маршрут обработки или план операций, а при проектировании операционного ТП из возможных вариантов последовательности выполнения переходов для каждой операции — выбрать рациональную (или оптимальную) последовательность. В представленной статье рассмотрен подход, позволяющий достоверно определять величины повышения точности/качества, которые можно рассматривать в качестве критериев формализованного проектирования технологических процессов.

Abstract. The task of automation of technological design for modern mechanical engineering is extremely important and relevant. Its solution will ensure a reduction in the time of introduction of new design developments into production and increase its efficiency. When designing a route TP, from the possible options for the sequence of operations, you must choose a rational sequence – the processing route or the plan of operations, and when designing an operational TP, from the possible options for the sequence of transitions for each operation, you must choose a rational (or optimal) sequence. In the present article, an approach is considered that allows us to reliably determine the values of increasing accuracy/quality, which can be considered as criteria for formalized design of technological processes.

Ключевые слова: разработка технологических процессов, автоматизация, маршрут обработки, технологические показатели.

Keywords: development of technological processes, automation, processing route, technological indicators.

1. Методы и основные принципы автоматизированного проектирования.

Под автоматизацией проектирования понимают систематическое использование ЭВМ в процессе проектирования при обоснованном распределении функций между человеком и ЭВМ и выборе методов автоматизированного решения технологических задач.

По степени углубленности разработок различают несколько уровней проектирования:

- разработку принципиальной схемы технологического процесса;
- проектирование технологического маршрута обработки детали;
- проектирование технологических операций;
- разработку управляющих программ для оборудования с числовым программным управлением.

Эти и многие другие задачи могут быть решены эффективно лишь путем синтеза творческих процессов человека и «способностей» машинных программ.

2. Методология разработки технологических процессов

Разработка технологических процессов (ТП) механической обработки является сложной, комплексной, вариантной задачей, требующей учета большого числа разнообразных факторов.

При проектировании маршрутного ТП из возможных вариантов последовательности выполнения операций необходимо выбрать рациональную последовательность – маршрут обработки или план операций, а при проектировании операционного ТП из возможных вариантов последовательности выполнения переходов для каждой операции — выбрать рациональную (или оптимальную) последовательность.

При маршрутном ТП в число задач завершающего этапа войдут: определение возможного состава оборудования и инструмента и выбор оптимального (рационального) состава; расчет межоперационных припусков, допусков и размеров; определение состава и квалификации исполнителей; нормирование операций; расчет технико-экономических показателей маршрутного ТП; формирование маршрутных карт.

Маршрут обработки отдельной поверхности проектируют, исходя из требований рабочего чертежа и характеристик принятой заготовки. По заданному качеству точности и шероховатости поверхности с учетом размера, массы и формы детали выбирают возможные методы окончательной обработки [1, 2]. Особенности выполнения отдельных операций не позволяют дать заключение о точности обработки по аналогии с другими операциями, так как между ними не бывает всестороннего сходства. В частности, отличаются размеры и форма обрабатываемых заготовок, состояние станков, режимы обработки и другие технологические факторы.

Кроме того, недостаточной следует признать также полноту справочной информации. Как правило, опыт инженера-технолога позволяет дополнить таблицы точности обработки сведениями о возможностях каждого метода обработки в части повышения качества обрабатываемой поверхности или точности выполняемых размеров. В настоящее время эти показатели методов обработки определяются, в зависимости от технологических традиций предприятия, эмпирически, с учетом рекомендаций справочной [1, 3, 4] литературы, либо, достаточно часто, при проектировании используется субъективный опыт технолога. И в одном и в другом случае вероятны ошибки

технологии, выявление и исправление которых становится возможным на самых последних стадиях технологической подготовки производства.

Для эффективного использования при проектировании математического аппарата необходимо дополнить справочную информацию значениями, определяющими достоверные величины изменения технологических показателей при каждом последующем переходе обработки.

Известно, что последовательность обработки проектируется таким образом [2], чтобы каждая последующая технологическая операция существенно улучшала показатели [5] качества и точности изделия. В то же время, в нормативно-справочной информации отсутствуют значения величин повышения качества. Общепринятые представления о технологических возможностях методов обработки, такие как: величина показателя повышения точности на смежных операциях технологического процесса, как правило, не превышает 3 номеров качества точности; величина показателя улучшения качества обработанной поверхности не превосходит 2..8 крат снижения высоты микронеровностей – представляют собой экспертные знания, носят только рекомендательный характер и, следовательно, не могут служить информационной базой для формализованного проектирования. Таким образом, возникает задача определения обоснованной величины повышения качества обработки на основе существующих экспертных знаний о возможностях технологических методов.

Для решения этой задачи необходимо:

- найти и обосновать критерий, позволяющий определять существенность отличий технологических показателей методов обработки;
- разработать методику расчета величин изменения показателей качества обработки.

Предположим, что два метода обработки существенно различаются по достижимым значениям показателя, если случайные величины, определяющие эти методы, принадлежат различным генеральным совокупностям. Если же случайные величины относятся к одной генеральной совокупности (являются сходными), то соответствующие методы обеспечивают одинаковые результаты обработки. Следовательно, использование такой пары методов обработки в одной технологической цепочке следует считать нерациональным.

Соответственно, возникает вопрос о многовариантности (рис. 1) решения задачи формирования планов обработки наружных цилиндрических поверхностей и о корректности результатов решения этой задачи. Следуя формальным правилам построения последовательности обработки, в рассматриваемом примере можно составить более 10 вариантов планов обработки, включающих рассматриваемые в настоящей работе технологические методы. Учитывая, что реальное количество методов обработки больше анализируемого нами перечня, количество возможных вариантов решения задачи также существенно возрастает. Для принятия окончательного решения необходимо включать в рассмотрение дополнительные условия, такие как, например, характер и предельные значения

напряжений, формируемых в поверхностном слое обрабатываемого изделия при обработке, погрешности взаимного расположения поверхностей и др. Уменьшить количество возможных вариантов можно, при условии, что расчет проводится с учетом величин изменения технологических параметров методов обработки.

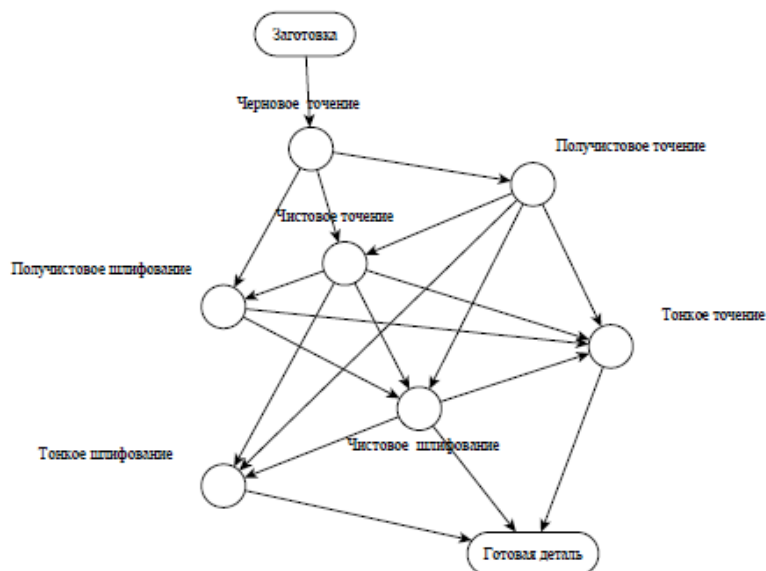


Рис. 1. Формальная схема плана обработки (наружный цилиндр)

Рассмотренный подход позволяет достоверно определять величины повышения точности/качества, которые можно рассматривать в качестве критериев формализованного проектирования технологических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев, А.С. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / А. С. Васильев, А.М. Дальский, Ю. М. Золотаревский, А. И. Кондаков / Под ред. д-ра техн. наук А. И. Кондакова. – М.: Машиностроение, 2005. – 352 с.
2. Волков, С. А. Разработка методики автоматизации проектирования технологических процессов / С. А. Волков // СТИН, 2008, № 5. – с. 22-26.
3. Дальский, А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А. М. Дальский. – М.: Машиностроение, 1975. – 223 с.
4. Обеспечение эксплуатационных свойств изделий при автоматизированном проектировании / О. И. Драчев, А. Н. Кравцов, Н. В. Кравцов; Под ред. Ю. М. Соломенцева; ЗАО «ОНИКС» (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур). – Ирбит : ОНИКС, 2011. – 257 с.
5. Суслов, А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.

Андреев П. А.
Andreev P.A.
Skvoren123@gmail.com

Тимофеев М. В.
Timofeev M. V.
technology@rsatu.ru

ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьёва», Рыбинск

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

ANALYSIS OF EXISTING SOLUTIONS IN THE FIELD OF INTELLIGENT POWER MEASURING SENSORS OF THE INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS

Аннотация. В статье проведён анализ перспектив промышленного интернета вещей и интеллектуальных силоизмерительных датчиков. Предложена концепция интеллектуального силоизмерительного датчика промышленного интернета вещей.

Abstract. The article analyzes the prospects for the industrial Internet of things and intelligent force-measuring sensors. The concept of an intelligent force-measuring sensor of the industrial Internet of things is proposed.

Ключевые слова: датчики, силы резания, механическая обработка.

Keywords: sensors, cutting forces, machining.

Как известно, интернет вещей представляет собой систему взаимосвязанных вычислительных устройств, объектов, животных или людей, которым предоставляются идентификаторы и возможность передавать данные по сети без необходимости прямого контакта.

Вещью в IoT может быть человек с имплантатом, отслеживающим состояние его здоровья, сельскохозяйственное животное с транспондером биочипа, автомобиль со встроенными датчиками, или любой другой объект, которому может быть назначен IP-адрес и который имеет возможность передавать данные по сети. Такие устройства уже стали неотъемлемой частью жизни современного человека. Цифровизация всех сфер, в том числе и сферы промышленного производства в ведущих странах мира является одним из главных направлений стратегического развития экономики. Мировая индустрия в настоящее время находится на пороге новой технологической революции. И в данной ситуации России очень важно принятие адекватных мер в развитии этого направления, чтобы окончательно не утратить конкурентоспособность на мировой арене и не оказаться в полной технологической изоляции.

Industrial Internet of Things (IIoT, Промышленный Интернет Вещей) применяет структуру Интернета Вещей к устройствам и интеллектуальным машинам на производственных мощностях. Решающим фактором в IIoT

является связь между машинами. Цель состоит в том, чтобы умные машины обменивались данными на достаточно высоком уровне, чтобы они могли работать эффективно и с высоким качеством, чего невозможно достичь одним человеческим взаимодействием. В наиболее прогрессивном сценарии реализации – это полная цифровая трансформация, которая подразумевает собой обновление бизнес-модели с целью включения новых цифровых технологий. В конкурентном мире производства необходимо адаптироваться. Недостаточно использовать цифровые технологии в качестве дополнения к обычному бизнесу. Внедрение решений ИИТ означает новые организационные решения, новый персонал, новую культуру и даже новые процессы.

В наши дни рассматриваемые технологии с успехом включаются в различные сферы жизни, например, производство, цепочки поставок, управление зданиями, розничная торговля, медицина. На начальном этапе внедрения ИИТ в промышленное оборудование встраивают датчики, контроллеры и человеко-машинные интерфейсы. Благодаря этим технологиям становится возможным сбор информации, позволяющей получать объективные и точные данные о состоянии производства. Доступ к обработанным данным получают все структуры предприятия. Это улучшает взаимодействие между работниками разных подразделений и позволяет своевременно принимать обоснованные управленческие решения.

Собранная информация может быть использована для предотвращения аварий, внеплановых простоев, поломок оборудования, своевременного проведения регламентных работ, сокращения внепланового техобслуживания и сбоя в управлении цепочками поставок, позволяя предприятию функционировать более эффективно: повысить рентабельность производства и производительность оборудования, снизить материальные и энергетические затраты, оптимизировать трудозатраты персонала, улучшить условия труда, повысить качество выпускаемой продукции, что в конечном итоге приведёт к росту конкурентоспособности на рынке.

Применение ИИТ даёт возможность не только организовывать экономичные и гибкие производства, но и эффективно решать более узкоспециализированные технологические задачи, к примеру, изготовление деталей газотурбинных двигателей (ГТД). Как известно, механическая обработка многих типов деталей ГТД сопряжена с особыми трудностями, поскольку такие детали характеризуются высокой анизотропией жёсткости, сложной топологией обрабатываемых поверхностей, низкой обрабатываемостью материала лезвийным инструментом. Как следствие из перечисленного, обеспечение требуемой точности при механической обработке, в том числе на станках с ЧПУ, представляет собой многовариантную задачу, имеющую сложные теоретические методы решения.

Вместе с тем, альтернативой теоретическому подходу могут служить регрессионные и нейросетевые модели, при создании и обучении которых задействуется инфраструктура ИИТ и генерируемые ей большие объёмы данных со интеллектуальных силоизмерительных датчиков, а также информация с

операций размерного контроля деталей, получаемая через SCADA с координатно-измерительных машин.

Согласно определению, интеллектуальные датчики – это адаптивный датчик с функцией метрологического самоконтроля, т. е. датчик, содержащий в себе изменяемые по внешним сигналам алгоритмы работы и параметры [1]. Отличительной особенностью интеллектуальных датчиков является способность самовосстановления и самообучения после единичного сбоя.

На сегодняшний день под интеллектуальным датчиком понимают датчик со встроенной электроникой, которая включает в себя: АЦП, микропроцессор, систему на кристалле и т. д., и цифровой интерфейс с поддержкой сетевых протоколов для коммуникации. Таким образом, с использованием возможности самоидентификации, интеллектуальный датчик может быть включен в проводную или беспроводную сеть датчиков. Сетевой интерфейс интеллектуального датчика наряду со способностью включения его в сеть может выполнить его настройку, конфигурирование, выбрать режим работы, а также осуществить диагностику датчика. Возможность дистанционного осуществления вышеуказанных операций выступает большим преимуществом интеллектуальных датчиков, они становятся проще в использовании и в техническом обслуживании.

Одним из существенных препятствий на пути использования интеллектуальных силоизмерительных и других типов датчиков IIoT в рабочей зоне металлообрабатывающего оборудования являются особенности современных высокопроизводительных станков с ЧПУ, связанные с наличием подвижных исполнительных органов, обработкой с поливом заготовки СОЖ под давлением или в атмосфере масляного тумана, присутствием стружки с острыми кромками и пр. Это обстоятельство препятствует в использовании существующих решений в области проводных сетей и требует поиска нового подхода к проектированию как первичных преобразователей (датчиков), так и средств беспроводной передачи потоков данных.

Другим препятствием является узкая номенклатура существующих решений в области измерения сил резания, поскольку это специализированные изделия, служащие в основном для решения задач НИОКР и не предназначенные для использования в условиях серийного производства. Из ограниченного числа многокомпонентных силоизмерительных датчиков и динамометров можно отметить лабораторный стенд STD.201-1 (Армения) [2], универсальный динамометр УДМ конструкции ВНИИ (Россия) [3, 4], тензометрический трехкомпонентный токарный динамометр С-3/20 конструкции В. Н. Сбоева и В. В. Брюхова (Россия) [6], динамометр модели 9257В Kistler (Швейцария) [5], динамометр трехкомпонентный М30-3-6к (Беларусь) [7], динамометр Дуна-Z (Россия) [8].

Из вышеперечисленных моделей выпуск универсального динамометра УДМ прекращён. Остальные изделия характеризуются рядом недостатком, в числе которых высокая цена и неготовность к применению в реальных условиях промышленного производства.

К примеру, существенным ограничением лабораторного стенда STD.201-1 (рис. 1) являются большие габариты и необходимость проводного подключения к стационарному интерфейсному блоку, содержащему в себе инструментальные усилители и АЦП. К недостатку трехкомпонентного токарного динамометра С-3/20 так же следует отнести большие габариты, не позволяющие устанавливать несколько динамометров в револьверные головки токарных и токарно-фрезерных станков с ЧПУ.

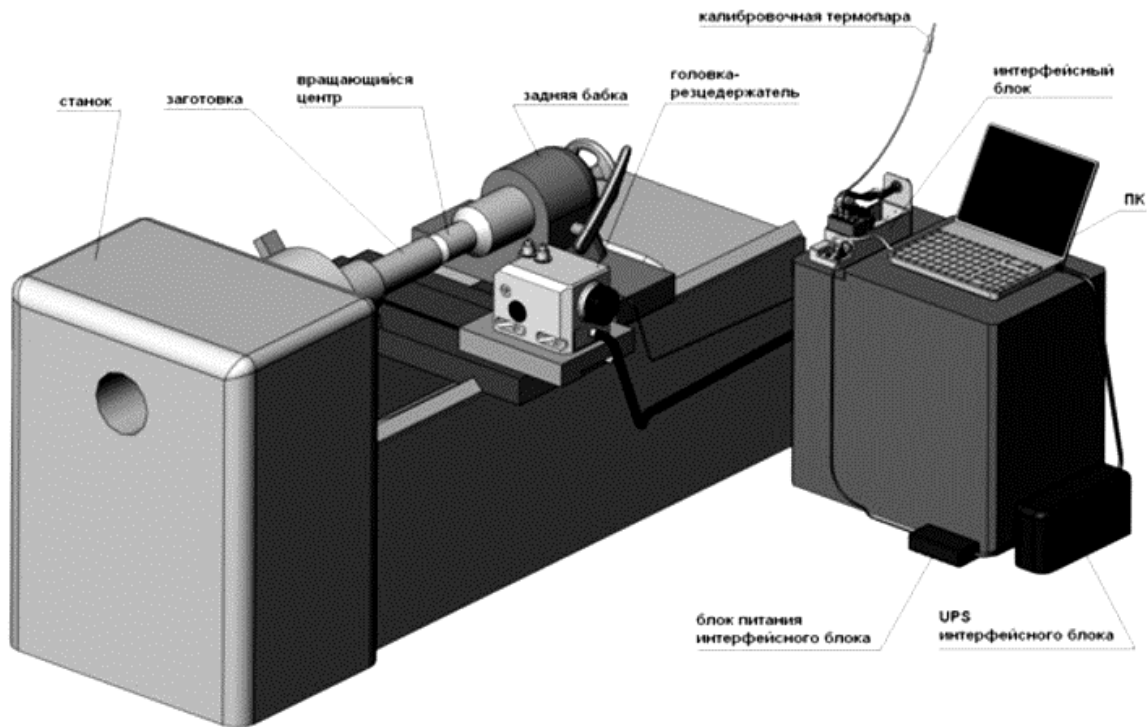


Рис. 1. Лабораторный стенд STD.201-1

Принципиальным ограничением динамометра Dyna-Z (рис. 2) является всего одна компонента силы резания (P_z) и необходимость внешнего источника питания первичного преобразователя.

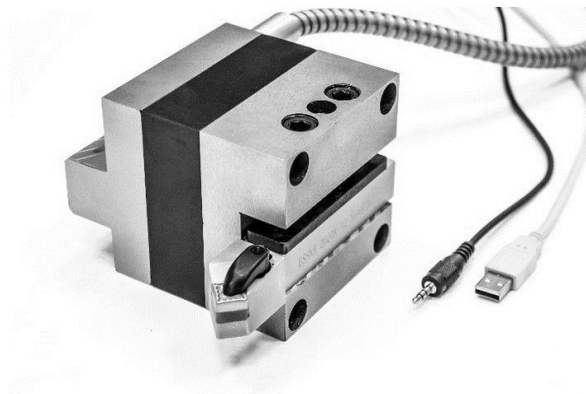


Рис. 2. Динамометр Dyna-Z

Существенными недостатками универсального динамометра является наличие внешней тензометрической станции и невозможность крепления к револьверному суппорту станков с ЧПУ.

Выводы

Проведённый анализ показал, что ни один из существующих динамометрических преобразователей и готовых изделий не может непосредственно использоваться в качестве основы для создания интеллектуального силоизмерительного датчика. Таким образом целесообразна разработка нового технического задания на проектирование, которое учитывало бы следующие критерии:

- пределы допускаемой погрешности измерений, чувствительность динамометра, его разрешающая способность, краткосрочная нестабильность показаний;
- диапазон измерений датчика, от которого напрямую зависит его цена: чем больше диапазон, тем выше цена;
- условия окружающей среды, включающие вибрацию, повышенную температуру, наличие СОТС;
- надёжность по параметрам среднего времени безотказной работы и межповерочного интервала;
- требования к габаритам, позволяющие устанавливать датчики в узлах оборудования с ограниченными размерами;
- общая цена владения системой, включающая не только стоимость датчика, но и расходы на установку, проектирование и поддержку разрабатываемой системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 8.825-2013 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы ускоренных испытаний.
2. Стенд лабораторный для исследования режимов резания при токарной обработке STD.201-1. Руководство по эксплуатации. – Ереван, 2010. – 66 с.
3. Руководство к универсальному динамометру УДМ конструкции ВНИИ. – М.: ВНИИ, 1983. – 26 с.
4. Шуляк Я. И., Васильев С. Г. Модернизация установки измерения сил резания на базе динамометра УДМ-600 // Машины и Установки: проектирование, разработка и эксплуатация. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. – № 1. – С. 1–12.
5. Утенков, В. М. Возможности использования динамометра Kistler для испытания металлорежущих станков / В. М. Утенков, П. А. Быков // Инженерный вестник (МГТУ им. Н. Э. Баумана) Электронный журнал, 2012. – № 10. – Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/492011.html>.
6. Филиппов А. В. Повышение точности обработки нежестких валов путем оптимизации параметров брешущего течения. Дисс. канд. техн. наук., 2015. – 194 с.
7. Тилком. Тензометрическая техника, тензодатчики, датчики [Электронный ресурс]. - Режим доступа: www.tilkom.com.
8. Динамометр Дуна-Z. Руководство по эксплуатации. – Рыбинск, 2013. – 14 с.

Позевалкин В.В.

Pozevalkin V.V.

pozevalkinvv@mail.ru

Поляков А.Н.

Polyakov A.N.

anp_temos@mail.ru

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», Оренбург

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ

APPLICATION OF NEURAL NETWORK MODELS TO IMPROVE THE ACCURACY OF PROCESSING PARTS ON CNC MACHINES

***Аннотация.** В статье представлены модели прогнозирования температуры ключевых источников тепла на основе искусственных нейронных сетей в рамках решения актуальной задачи, повышения точности обработки деталей на станках с числовым программным управлением. Предложен метод формирования обучающего множества для построения модели ретроспективного прогноза значений температуры. Результаты показывают, что построенные модели обеспечивают высокую точность и надёжность прогноза и подтверждают эффективность метода моделирования.*

***Abstract.** The article presents models for predicting the temperature of key heat sources using artificial neural networks in the framework of solving the actual problem improving the accuracy of processing parts on machines with numerical control. A method of forming a training set for constructing a model of retrospective prediction of temperature values is proposed. The results show that the constructed models provide high accuracy and reliability of the prediction and confirm the effectiveness of the modeling method.*

***Ключевые слова:** станок с ЧПУ, тепловая погрешность, моделирование, нейронная сеть, точность прогноза.*

***Keywords:** CNC machine, thermal error, modeling, neural network, prediction accuracy.*

В связи с постоянным увеличением спроса на обрабатываемые детали сложной геометрии и высокой размерной точности, существенно возрастают требования к качеству современных станков, которые является важной составляющей большинства предприятий прецизионного и сверхточного производства. Однако температурные градиенты, вызывают прохождение тепла через конструкцию станка и приводят к нелинейной структурной погрешности, независимо от того, работает станок или находится в статичном режиме [1]. Установлено, что тепловая погрешность составляет 40–75% от суммарной величины отклонений точности обработки детали [2]. Поэтому уменьшение степени влияния температуры на станок становится общепризнанной инженерной проблемой в ответ на растущие требования к качеству продукции.

Повышение точности обработки деталей часто достигается за счёт совершенствования конструкции станка, а также различных стратегий «предотвращения погрешности» [3]. Однако подобные меры не всегда технически или экономически целесообразны. Поэтому программный метод

коррекции отклонений точности позиционирования (компенсация) более приемлем для производителей современных станков. В результате уменьшение тепловой погрешности становится весьма выгодно для высокоточного производства. Кроме того, смещение координат можно установить в программе ЧПУ станка в соответствии со значением отклонения, так что тепловая погрешность может быть существенно уменьшена [4].

Производительность системы компенсации в значительной степени зависит от точности и надёжности математической модели прогнозирования тепловой погрешности. Что касается методов моделирования, примечательно то, что построение большинства моделей осуществляется путём нахождения взаимосвязи между тепловыми перемещениями и некоторыми ключевыми значениями температуры, связанными с расположением источника тепла.

В последнее время, перспективным направлением в данной предметной области, является применение нейронных сетей, которые представляют собой достаточно гибкий и универсальный инструмент моделирования и выявления взаимосвязи между входами и выходами с несколькими переменными [5]. Это, в свою очередь, позволяет разрабатывать точные и надёжные модели тепловых погрешностей. Однако абсолютно надёжных методов, способных с предельно высокой точностью прогнозировать тепловые погрешности в настоящее время не существует. Поэтому построена нейросетевая модель прогнозирования значений температуры с применением метода скользящего окна.

Применительно к нейронным сетям, метод скользящего окна представляет собой алгоритм трансформации, позволяющий из экспериментальных данных сформировать обучающее множество для построения модели прогнозирования. Под окном понимается ограниченный набор значений в последовательности данных необходимый для формирования обучающего примера. В процессе работы алгоритма, окно смещается по исходной последовательности на один шаг вперёд, и каждое положение окна образует один обучающий пример.

Исходными данными $X(i)$ является множество значений некоторой величины $x(i)$ в последовательности:

$$X(i) = \{x(i - m\delta), \dots, x(i - \delta), x(i), x(i + \delta), \dots, x(i + k\delta)\}, \quad (1)$$

где i – текущее значение;

δ – интервал прогнозирования;

m – глубина погружения;

k – горизонт прогнозирования.

Задача прогнозирования для исходного ряда (1) на отрезке $i = \overline{1, n}$ заключается в том, чтобы найти его продолжение на неизвестном интервале. Следовательно, необходимо определить $x(n+1), x(n+2), x(n+3) \dots x(n+k)$. Известные значения исходного ряда, образуют обучающую выборку, которая характеризуется объёмом обучающих данных n , горизонтом прогнозирования

k и шириной скользящего окна размерностью m , равной числу элементов, одновременно подаваемых на вход нейронной сети.

Для построения скользящего окна выбирается некоторый набор данных, а из него несколько значений, которые являются входным вектором (Inputs) нейронной сети. Значением желаемого выхода (Targets) в обучающем примере будет следующее по порядку значение. Кроме того, метод скользящего окна предполагает наличие двух окон W_i и W_o , которые перемещаются по исходной последовательности с некоторым шагом скольжения δ :

$$W_i = \begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \dots & x(n-m) \\ x(2) & x(3) & \dots & x(n-m+1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(m) & x(m+1) & \dots & x(n-1) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$W_o = [x(m+1), x(m+2), \dots, x(n)]$$

где W_i – матрица входных данных;
 W_o – вектор целевых значений;
 m – ширина скользящего окна;
 n – объём обучающей выборки.

Долгосрочный прогноз (экстраполяция) осуществляется с помощью многошагового прогнозирования, при котором полученные значения (выходные данные сети) применяются для прогнозирования последующих значений. Для реализации принципа экстраполяции, окно сдвигается на одну позицию вперёд, и процесс формирования следующей пары обучающей выборки повторяется. На следующем шаге, полученное прогнозное значение добавляется к исходной последовательности и формируется новая матрица входных данных в соответствии с уравнением (2).

Реализация предложенной модели выполнялась в системе MATLAB. Функции MATLAB были разработаны для анализа и прогнозирования значений температуры вблизи передней опоры шпинделя. Прогнозирование осуществлялось с помощью двух типов нейронных сетей нелинейной авторегрессивной нейронной сетью (Nonlinear Autoregressive Neural Network, NAR) и каскадной нейронной сетью (Cascade-forward neural network, CFN) с реализованным алгоритмом экстраполяции по методу скользящего окна. Архитектура сети NAR позволяет получить прогнозные значения температуры. Однако разработанный алгоритм применим к различным архитектурам нейронных сетей.

Оценку точности моделей предлагается выполнить с помощью ретроспективного прогноза некоторого отрезка данных, для которого уже известны фактические значения. Для этого исходные данные делятся на две части. Первая, содержит более ранние данные (300 значений), с их помощью

формируется обучающая выборка. На основе более поздних данных (106 значений) формируется тестовая выборка для проверки работы сети.

На рис. 1 представлены результаты прогнозирования с помощью NAR сети и CFN сети с разработанным алгоритмом на основе метода скользящего окна.

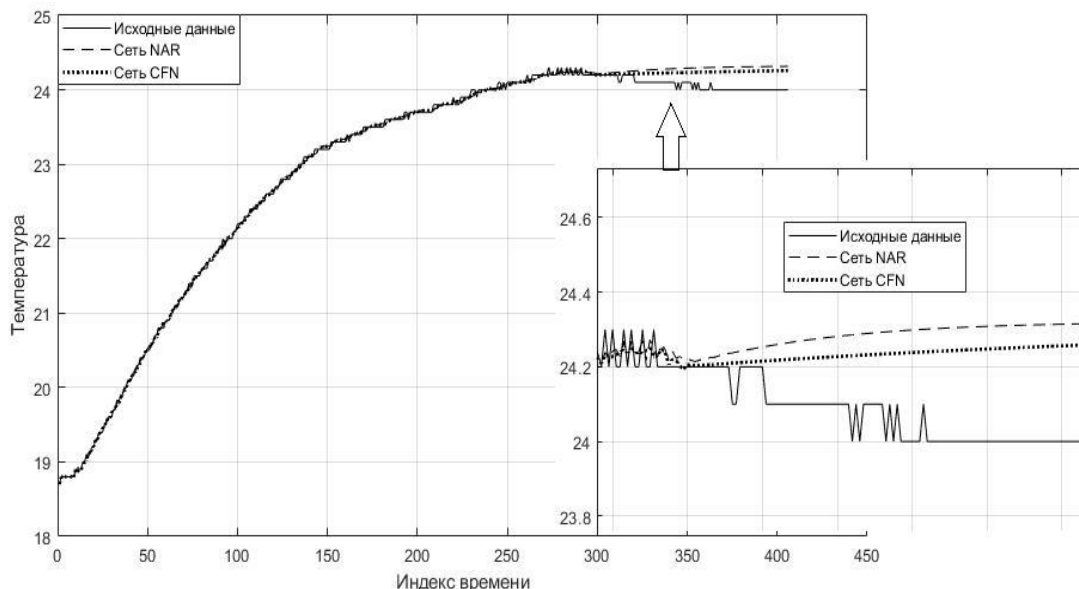


Рис. 1. Результаты прогнозирования значений температуры

На графиках (рис. 1) сплошной линией обозначены исходные экспериментальные данные, пунктирной модельные значения температуры.

Для всех нейронных сетей были установлены одни и те же параметры: объём данных для обучения $n=300$, горизонт прогнозирования $k=106$, ширина скользящего окна $m=10$ для CFN сети, вектор обратных задержек $(1:m)$ для NAR сети. Число нейронов в скрытом слое было установлено равным 15 нейронам. Сети обучались с помощью стандартного алгоритма обучения («trainlm»).

Критериями оценки эффективности моделей являются $PERF$ (производительность сети), $RMSE$ (среднеквадратичная ошибка), R^2 (коэффициент детерминации) и η (точность прогноза), которые считаются стандартами для оценки моделей прогнозирования.

В табл. 1 представлены результаты оценки эффективности моделей. Точность прогноза рассчитывается по следующей формуле:

$$\eta = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N |x_i - \tilde{y}_i|}{\sum_{i=1}^N |x_i|} \right) \times 100\% , \quad (3)$$

где N – объём исходных данных;
 x_i – исходные значения;
 \tilde{y}_i – прогнозные значения.

Результаты оценки эффективности моделей

Сеть	PERF	RMSE	R ²	η
NAR	0,0014	0,1275	0,9935	99,66%
CFN	0,0014	0,1371	0,9925	99,64%

Результаты показывают (табл. 1), что точность прогноза, рассчитанная по формуле (3) для NAR сети составляет 99,66%, а для CFN сети 99,64%. Что подтверждает эффективность предложенной модели прогнозирования значений температуры.

Выводы

Повышение точности обработки деталей на станках с числовым программным управлением является одной из важнейших производственных задач для предприятий обрабатывающей промышленности.

В последнее время перспективным направлением в области моделирования является применение искусственных нейронных сетей, которые позволяют разрабатывать точные и надёжные модели прогнозирования тепловых погрешностей станка.

Разработанный алгоритм формирования обучающей выборки для нейронных сетей на основе метода скользящего окна позволяет предсказывать изменение значений температуры ключевых источников тепла, что, в целом, повышает точность и надёжность моделей прогнозирования тепловых погрешностей станков.

Результаты показывают, что построенная модель демонстрирует высокие показатели точности прогноза, что позволяет применить её в технологии создания «Цифровых двойников» станков и других подобных машин.

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-38-90045.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов, А.П. Структурная точность металлорежущих станков / А.П. Кузнецов, М.Г. Косов // МГТУ «Станкин». – 2012. – №2. – С.4–11.
2. Горбунов, В.П. Диагностирование тепловых деформаций многоцелевого станка с ЧПУ / В.П. Горбунов, В.Ф. Григорьев, А.Н. Рудюк // Вест. Брест. гос. техн. ун-та. – Брест: Машиностроение. – 2008. – №4(52). – С. 34–37.
3. Додонов, В.В. Повышение точности обработки на станках с числовым программным управлением // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2016. – №6(54).
4. Кольцов, А.Г. Методы компенсации погрешностей станков с ЧПУ / А.Г. Кольцов, В.С. Самойлов // ОНВ. – 2014. – №1(127). – С.100–102.
5. Хоанг, В.Ч. Моделирование температуры резания в условиях неопределенности с применением искусственной нейронной сети / В.Ч. Хоанг, В.С. Сальников // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – №11-2. – С.386–395.

Ануфриев И. В.

Anufriev I. V.

lexs1997@yandex.ru

ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва

АНАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МНОГОСВЯЗНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЛОЖЕНИЯ СИСТЕМ

ANALYTICAL SYNTHESIS OF A MULTIPLY CONNECTED ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEM BASED ON THE TECHNOLOGY OF NESTING SYSTEMS

***Аннотация.** В статье рассмотрен аналитический синтез многосвязной системы управления электроприводом с использованием технологии вложения систем. При этом для многосвязной модели электропривода в пространстве состояний определена проблемная матрица и реверсивно проблемная матрица объекта управления, построена эталонная модель системы управления, найдена проблемная матрица многосвязной системы управления, а также с помощью применения методов канонизации матриц и технологии вложения выявлена искомая матрица регулятора в обратной связи системы. Произведено численное моделирование синтезированной многосвязной системы управления.*

***Abstract.** The article discusses the solution to the algorithm of a multiply connected control system. At the same time, for a multiply connected model were found a problem matrix and a reversible problem matrix of a control object. A reference model of a control system was built, a problem matrix of a multiply connected control system was found. And also, using the methods of canonization of matrices and technology, the desired controller matrix was declared in the feedback system. Numerical modeling of the synthesized multiply connected control system was carried out.*

***Ключевые слова:** многосвязные системы управления, проблемная матрица, технология вложения систем, канонизация матриц, электропривод, аналитический синтез многосвязной системы управления.*

***Keywords:** multiply connected control systems, problem matrix, system nesting technology, matrix canonization, electric drive, synthesis of a multiply connected control system.*

Вычислительным методам анализа и синтеза присущи ряд недостатков, в число которых, прежде всего невозможности: обобщения полученных результатов, построения множеств эквивалентных решений, а также доказательства отрицательного исхода проблемы. В какой-то мере эти недостатки традиционно преодолеваются путем увеличения количества численных экспериментов и использования мнения экспертов. Очевидно, что с повышением сложности решаемой проблемы возможности каждого из этих приемов быстро иссякают.

Альтернативой численным методам, не исключаяющей их широкое использование, является получение и использование аналитических необходимых и/или достаточных условий разрешимости проблемы. Одним из таких направлений является технология вложения систем [1].

Модель ОУ в пространстве состояний, в качестве которого выступает электродвигатель постоянного тока с независимым возбуждением имеет вид (1, 2):

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_B} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K'_\varphi}{T_{BT}} & -\frac{1}{T_{BT}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{k_1}{R_\alpha T_\alpha} & -\frac{1}{T_\alpha} & -\frac{k_3}{R_\alpha T_\alpha} & 0 \\ 0 & \frac{k_2}{J} & \frac{k_3}{J} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{R_B T_B} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_\alpha T_\alpha} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_B \\ U_\alpha \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \omega \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_4 \\ y_5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_B \\ U_\alpha \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 – это переменные состояния; T_B, T_α – постоянная времени возбуждения/якоря; K'_φ – коэффициент по кривой намагничивания; T_{BT} – постоянная времени вихревых токов; R_B, R_α – сопротивление возбуждения/якоря; k_1, k_2, k_3 – конструктивный коэффициент двигателя 1, 2, 3; J – момент инерции; U_B, U_α – напряжение возбуждения/якоря; ω – угловая скорость вращения; θ – угол поворота вала.

Необходимо найти управление данным многосвязным объектом, обеспечивающее заданное качество в системе управления (далее по тексту – САУ) с регулятором в обратной связи.

Построение математической модели ОУ в форме проматрицы:

Представим (3, 4) в операторной форме (преобразование Лапласа) (3, 4):

$$px(p) = Ax(p) + Bu(p) + x_0(p); y(p) = Cx(p) + Du(p), \quad (3, 4)$$

где $x(p)$ – изображение вектора состояний, $y(p)$ – изображение входного вектора, $u(p)$ – изображение выходного вектора, x_0 – вектор начальных условий, $A_{5 \times 5}, B_{5 \times 2}, C_{2 \times 5}, D_{2 \times 2}$ – матрицы характеризующие динамические свойства системы (матрица системы, матрица управления, матрица выхода, матрица прямой связи соответственно).

Для составления проблемной матрицы (далее по тексту – проматрицы) дополним систему уравнений уравнением регуляризирующим тождеством, пополнением. Запишем полученную систему уравнений (5) [2]:

$$(pI_n - A)x(p) = Bu(p) + x_0(p); y(p) = Cx(p) + Du(p); u(p) = u(p). \quad (5)$$

Запишем систему уравнений (5) в блочном виде: $\Omega(p)Y(p) = U(p)$, где $\Omega(p)$ – искомая проматрица моделирования для ОУ, заданного в пространстве состояний; $Y(p)$ – матрица-столбец, составленная из субвекторов,

представляющих собой вектор входных воздействий $u(p)$, вектор выходных реакций $y(p)$ и вектор внутренних переменных $x(p)$; $U(p)$ – матрица-столбец, составленная из субвекторов, представляющих собой вектор начальных условий $x_0(p)$, нулевой вектор $0_{5 \times 1}$ и вектор входных воздействий $u(p)$. Такие матрицы также можно назвать – обобщенный вход системы и обобщенный выход системы [4].

Окончательная реверсивная проблемная матрица $\Omega^{-1}(p)$ (далее по тексту репроматрица) многосвязного ОУ принимает вид (6) [2]:

$$\Omega^{-1}(p) = \begin{pmatrix} (pI_{5 \times 5} - A_{5 \times 5})^{-1} & 0_{5 \times 2} & (pI_{5 \times 5} - A_{5 \times 5})^{-1}B_{5 \times 2} \\ C_{2 \times 5}(pI_{5 \times 5} - A_{5 \times 5})^{-1} & I_{2 \times 2} & C_{2 \times 5}(pI_{5 \times 5} - A_{5 \times 5})^{-1}B_{5 \times 2} \\ 0_{2 \times 5} & 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \end{pmatrix}_{9 \times 9} \quad (6)$$

Построение математической модели многосвязной САУ в форме проматрицы:

$$\begin{aligned} (pI_n - A)x(p) &= Bu(p) + x_0(p); y(p) = Cx(p); \\ u(p) &= -Kv(p); v(p) = v(p); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} pI_{5 \times 5} - A_{5 \times 5} & 0_{5 \times 2} & -B_{5 \times 2} & 0_{5 \times 2} \\ -C_{2 \times 5} & I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ K_{2 \times 5} & 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 5} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(p) \\ y(p) \\ u(p) \\ v(p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \\ 0 \\ v \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $v(p)$ – формально дописанное (регуляризирующее) уравнение для независимого вектора на входе системы и K – матрица регулятора.

Проматрица многосвязной САУ (9):

$$\Omega(p) = \begin{pmatrix} pI_{5 \times 5} - A_{5 \times 5} & 0_{5 \times 2} & -B_{5 \times 2} & 0_{5 \times 2} \\ -C_{2 \times 5} & I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ K_{2 \times 5} & 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 5} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \end{pmatrix}_{11 \times 11}. \quad (9)$$

Построение математической модели эталонной динамической системы:

Обозначим требование к качеству управления эталонной модели: время регулирования по основным каналам управления не менее чем в 3 раза меньше, чем у исходной системы – ОУ.

В задачах анализа, эталонный образ аккумулирует все свойства исследуемой системы, относимые к ее «основным» с точки зрения заказчика или разработчика свойствам. В задачах синтеза образ создаваемой системы можно связать с понятием прототипа системы, т.е. упрощенной САУ с желаемыми свойствами [1].

Зададим наш эталонный образ (эталонную систему) $\omega(p) = (E_y^v(p))$, где образ E_y^v содержит желаемые динамические свойства системы посредством передаточных матриц формулой вида $E_y^v = C_{ж}(pI_{n_{ж}} - A_{ж})^{-1}B_{ж}$.

Обозначим наши желаемые матрицы эталонной САУ (10):

$$A_{ж} = \begin{pmatrix} -29.6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 9399 & -5026 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -111 & -136 & -435 & 0 \\ 0 & 3.175 & 3.175 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}; B = B_{ж}; C = C_{ж}. \quad (10)$$

Проведем численное моделирование и сравнение результатов эталонной САУ с нашим ОУ. Графики переходных характеристик представлены на рис. 1.

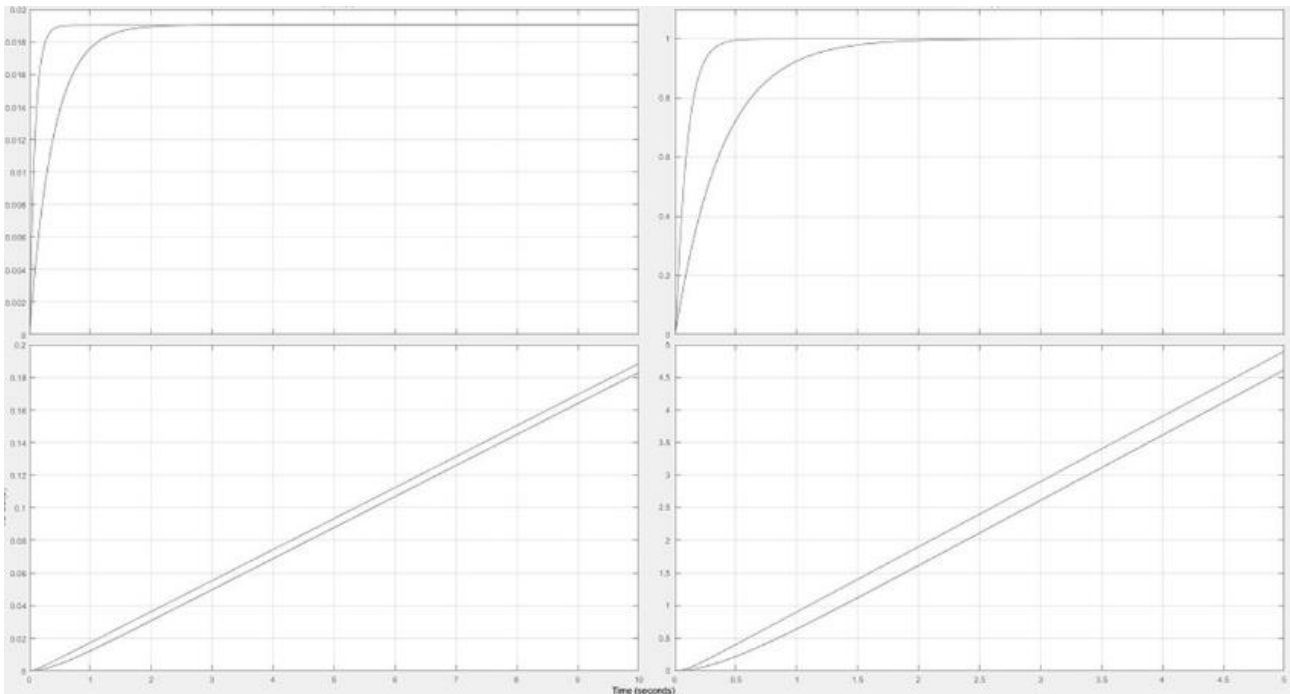


Рис. 1. Графики переходных характеристик.

Как можем наблюдать, время регулирования у эталонной САУ по сравнению с исходным ОУ изменилось в более чем 3 раза (время регулирования ОУ – 3.5 сек., время регулирования эталонной САУ – 0,75 сек.).

Аналитический синтез алгоритма управления динамическим объектом:

Воспользуемся решением через тождество вложения (11):

$$\beta(p)\Omega^{-1}(p)\alpha(p) = \omega(p). \quad (11)$$

Матрицы вложения α и β (правая и левая соответственно) предназначены выделить строку и столбец репроматрицы на пересечении которых находится передаточная функция, которой мы хотим придать эталонный вид [2].

$$\beta \Omega^{-1} \alpha = (0_{2 \times 5} \ I_{2 \times 2} \ 0_{2 \times 2} \ 0_{2 \times 2}) \begin{pmatrix} F_x^{x_0} & 0_{5 \times 2} & F_x^u & F_x^v \\ F_y^{x_0} & I_{2 \times 2} & F_y^u & F_y^v \\ F_u^{x_0} & 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} & F_u^v \\ 0_{2 \times 5} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0_{5 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} \\ I_{2 \times 2} \end{pmatrix} = F_y^v$$

Перед нами стоят следующие подзадачи: факторизация проматрицы; матричное уравнение для нахождения матрицы δ ; матричное уравнение для нахождения матрицы π ; матричное уравнение для непосредственно вложения.

Произведем факторизацию матрицы $\Omega = \Sigma \Xi$ (12):

$$\Omega(p) = \Sigma \Xi \begin{pmatrix} I_{5 \times 5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{2 \times 2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{2 \times 2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{2 \times 2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} pI_{5 \times 5} - A_{5 \times 5} & 0_{5 \times 2} & -B_{5 \times 2} & 0_{5 \times 2} \\ -C_{2 \times 5} & I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ K_{2 \times 5} & 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 5} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \end{pmatrix} \quad (12)$$

Следующим шагом найдем $\alpha = \Sigma \delta$ для нахождения матрицы δ (13):

$$\begin{pmatrix} 0_{5 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} \\ I_{2 \times 2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{5 \times 5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{2 \times 2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{2 \times 2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{2 \times 2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_u \\ \delta_v \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где $\delta_x = 0$, $\delta_y = 0$, $\delta_u = 0$, $\delta_v = I_{2 \times 2}$.

Далее найдем $\beta = \pi \Xi$ для нахождения матрицы π (14):

$$(0 \ I_{2 \times 2} \ 0 \ 0) = (\pi_x \ \pi_y \ \pi_u \ \pi_v) \begin{pmatrix} pI_{5 \times 5} - A_{5 \times 5} & 0_{5 \times 2} & -B_{5 \times 2} & 0_{5 \times 2} \\ -C_{2 \times 5} & I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ K_{2 \times 5} & 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 5} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \end{pmatrix} \quad (14)$$

Результат решения: $C_{2 \times 5} (pI_{5 \times 5} - A_{5 \times 5} + B_{5 \times 2} K_{2 \times 5})^{-1} B_{5 \times 2} = F_y^v$.

Таким образом, для нахождения искомой матрицы регулятора K в обратной связи необходимо разрешить матричное уравнение (15):

$$C(pI_{n_{жк}} - A_{жк})^{-1} B = C(pI_n - A + BK)^{-1} B \quad (15)$$

Преобразовав, получим следующие матричное уравнение (16):

$$A - BK = A_{ж}; BK = A - A_{ж} \quad (16)$$

Перейдем в численный вид:

$$\begin{pmatrix} 5.236 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 434.8 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} K = \begin{pmatrix} 473 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.1 & 399.7 & -0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = Z$$

Поскольку обратную матрицу можно взять только от квадратной матрицы, воспользуемся методом канонизации матриц [3].

Условие разрешимости уравнения можно выразить через теорему равносильную теореме Кронекера-Капели [3], а именно $\overline{Q^L} \times S = 0$.

Проканонизировав матрицу B через программные модули, получаем левый и правый делитель матрицы B (17):

$$\overline{B^L} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \overline{B^R} = 0 \quad (17)$$

Проверяем условие разрешимости: $\overline{B^L} \times Z = 0$. Условия разрешимости выполняются. Делаем вывод, что уравнение разрешимо. $K = \tilde{B} \times Z$

В инструментальной системе получаем сводный канонизатор \tilde{B} .

$$\tilde{B} = \begin{pmatrix} 0.191 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0023 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Находим искомую матрицу регулятора K (18):

$$K = \begin{pmatrix} 90.343 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0002 & 0.9193 & -0.0002 & 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

Численное моделирование синтезированной многосвязной САУ:
Построим две схемы (рис. 2) – ОУ и САУ с регулятором.

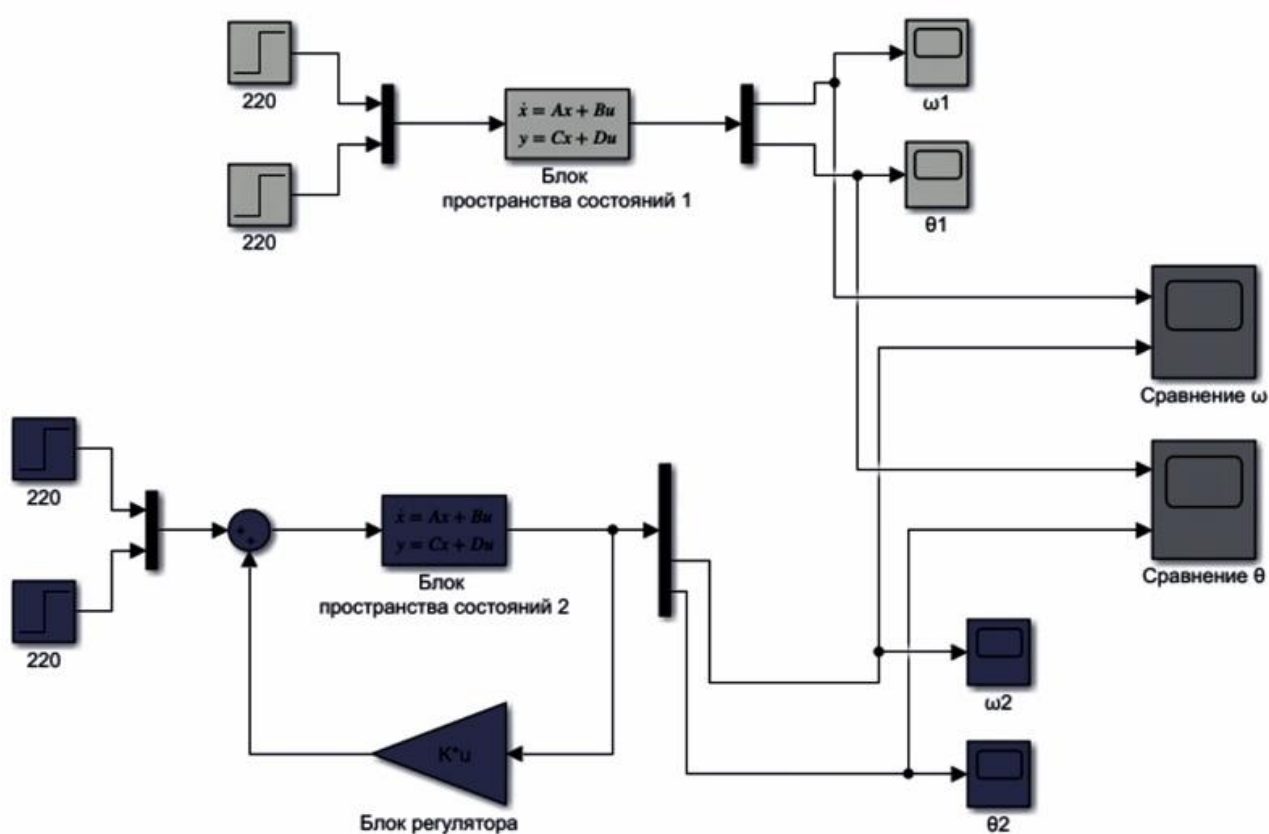


Рис. 2. Модель многосвязного объекта управления и модель многосвязной системы управления в пространстве состояний.

При численном моделировании многосвязных систем проведем сравнение угловой скорости вращения и графика угла поворота – рис. 3.

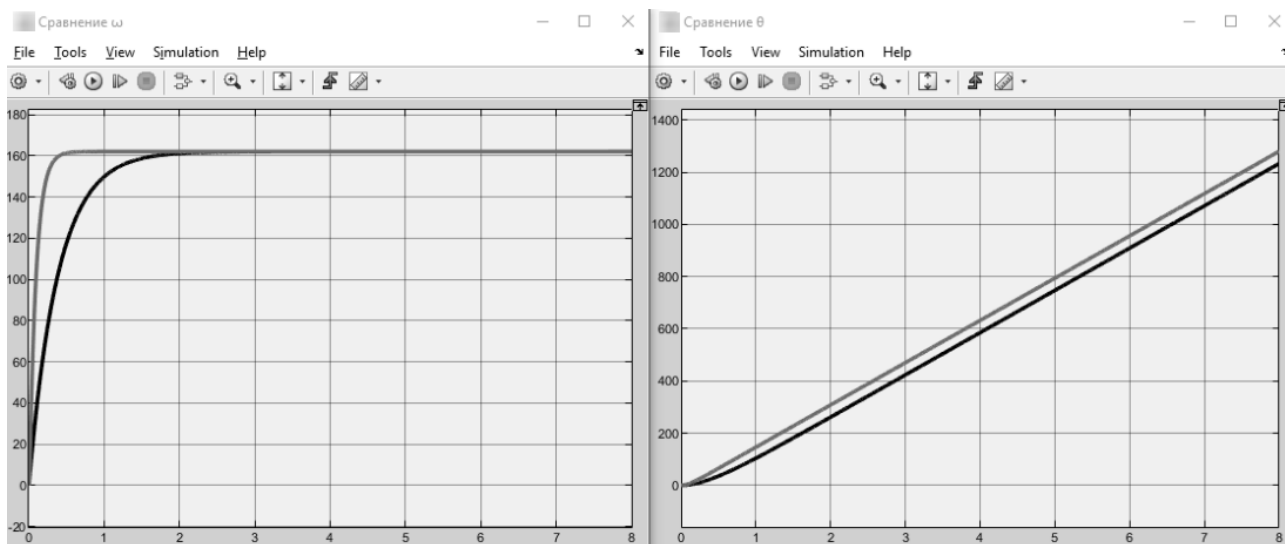


Рис. 3. Графики сравнения ω , θ .

Выводы

Рассмотрен аналитический синтез многосвязной системы управления электроприводом с использованием технологии вложения систем. Определена проблемная матрица и реверсивно проблемная матрица объекта управления; построена эталонная модель системы управления; найдена проблемная матрица многосвязной системы управления, а также с помощью применения методов канонизации матриц и технологии вложения была выявлена искомая матрица регулятора в обратной связи системы. Многосвязная система соответствует заявленным требованиям к качеству управления и об этом свидетельствует то, что время регулирования по основным каналам управления уменьшилось более чем в 3 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буков В. Н. Аналитический подход к анализу и синтезу систем на основе технологии вложения. – Минск: Труды Международной конференции "Проблемы управления и приложения (техника)" 2005г. – 135-147с.
2. Асанов А. З. Технология вложения систем и ее приложения. – Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. 2007г. – 227с.
3. Асанов А. З. Технология вложения систем и ее приложения к задачам анализа и синтеза систем: учебное пособие. – М.: МИРЭА - Российский технологический университет, 2019г. – 128с.
4. Махмудов. Т. Ф., Аллаев К. Р. Технология вложения систем как метод исследования динамических режимов электрических систем. – Ташкент: Ташкентский государственный технический университет. Изд. – Самарский государственный технический университет. 2017г. – 233-236с.
5. Аксенов М. И. Техника. Моделирование электропривода: учеб. пособие. М.: ИНФРА-М. 2018г. – 135с.

Зарипов А. Р.

Zaripov A. R.

arzar7@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

АНАЛИЗ ОПЫТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ

ANALYSIS OF EXPERIENCE IN THE USE AND IMPLEMENTATION OF KNOWLEDGE MANAGEMENT TECHNOLOGIES

***Аннотация.** Изложен анализ применения технологии управления знаниями на предприятиях, различных отраслей, для повышения эффективности компаний и работоспособности участников рабочего процесса.*

***Abstract.** The article presents an analysis of the application of knowledge management technology in enterprises, various industries, to improve the efficiency of companies and the efficiency of participants in the workflow.*

***Ключевые слова:** система управления знаниями, система управления, компетенции, эффективность.*

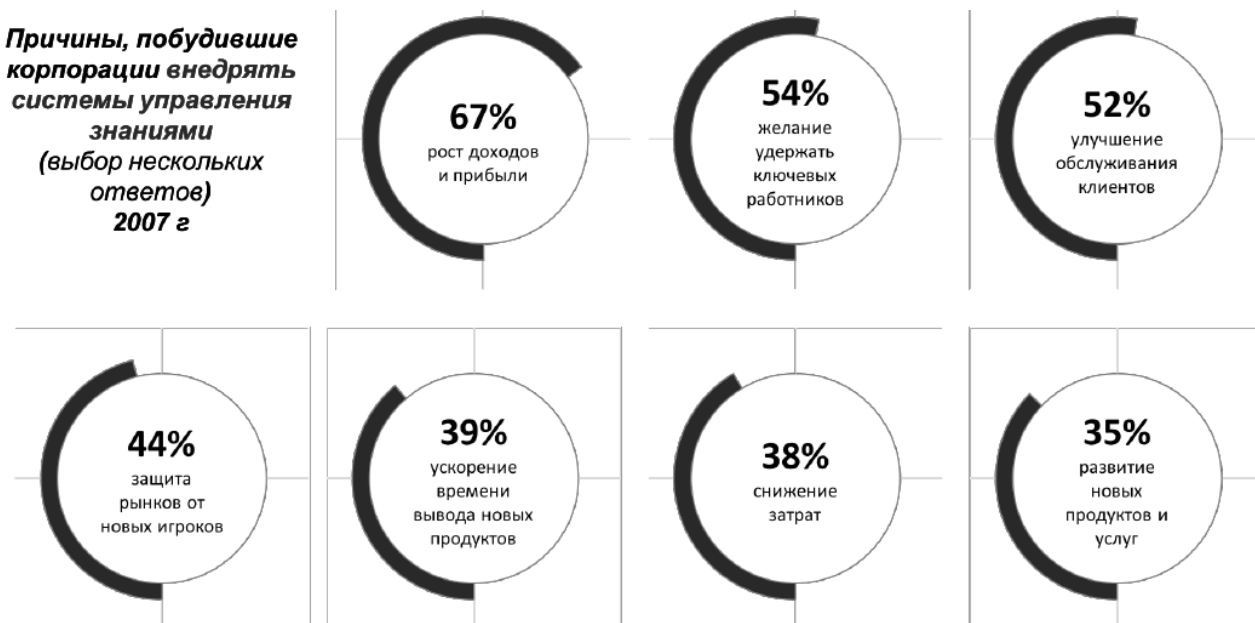
***Keywords:** knowledge management system, control system, competencies, efficiency.*

По результатам анализа современных зарубежных и российских компаний, различных отраслей промышленности, одним из наиболее актуальных направлений методического сопровождения на предприятии, стала оценка мировой практики создания и внедрения системы управления знаниями. Действительно, мировой опыт создания и развития систем управления знаниями (СУЗ) является одной из самых интересных и востребованных тем для тех, кто практически занимается управлением знаниями (Knowledge Management, в дальнейшем – КМ) [1]. В то же время, следует признать, что теоретические вопросы КМ, которые рассматриваются в десятках периодических изданий, множестве национальных, региональных и международных конференциях, различных сетевых ресурсах и фундаментальных исследованиях, не представляют серьезного практического интереса для практиков КМ. Практиков интересуют конкретные ответы на конкретные вопросы. Как правило, люди, впервые вовлеченные в КМ, задают несколько вопросов: «а зачем это нужно?», «кто должен этим заниматься?», «какие практические результаты достигаются с помощью КМ?».

Очевидно, что эти вопросы не только справедливы и оправданны, но и, несмотря на свою кажущуюся простоту, предполагают ответы, которые не так просты. Дело в том, что ни одна компания или организация никогда не раскрывает деталей и подробностей своей внутренней жизни. Внутренние процессы, инструменты и механизмы КМ в подавляющем большинстве случаев не раскрываются. Это вызвано несколькими причинами, но главной из них, несомненно, является все возрастающее понимание того, что рыночный успех в

первую очередь зависит от того, что знает и что умеет компания, как она использует свои компетенции. Сегодня уже является общепринятым фактом, что те, кто владеет лучшими компетенциями и лучше умеет использовать их, побеждают в конкурентной борьбе. Технологии, оборудование, информация, ресурсы и компетенции сегодня доступны глобально, для любой компании или организации. Побеждает сегодня в конкурентной борьбе тот, кто умеет лучше использовать информацию, технологии, ресурсы и оборудование. То есть побеждает тот, кто не просто владеет, а умеет лучше использовать компетенции.

А зачем это (управление знаниями) нужно? Это первый и самый сложный вопрос. Поэтому для практиков в первую очередь важны цели, то есть ответ на вопрос «зачем?». Ответ на этот вопрос и сложен и прост одновременно. С одной стороны, все понимают, что каждый человек уникален, что каждый работник может приносить гораздо больше пользы, что реальный уровень знаний работников шире того, что от него требуется работодателем, что у любого сотрудника есть масса идей как работать лучше и т.д. С другой стороны, для практиков нужны ответы – во что, в какой практический результат принесет КМ. Конкретные цифры экономического эффекта от КМ на примере отдельных корпораций, анализируются на совещаниях и вебинарах. Сегодня же, для формулирования ответов, в данной статье используются результаты опросов, проводившихся в разное время на мировых ежегодных конференциях по управлению знаниями. В опросах принимало участие несколько тысяч руководителей [2]. Первая диаграмма (рис. 1) дает ответ на вопрос, зачем корпорации занялись вопросом создания и внедрения системы управления знаниями.



Источник: Knowledge Management Magazine, March, 2008

Рис. 1. Диаграмма анализа причин создания и внедрения СУЗ

Цели, которые преследовали корпорации, создававшие и внедрявшие СУЗ, характеризуют абсолютно рыночный подход руководителей, ставящих на первое место доходность и прибыльность организаций.

И особенно любопытной является оценка того, как корпорации оценили эффективность СУЗ в достижении прибыльности и доходности через 10 лет. То есть где и в чем они увидели рост и развитие корпораций после десятилетия использования управления знаниями. Оценить это позволяет следующая диаграмма (рис. 2), показывающая, с какими целями корпорации инвестируют в развитие СУЗ. Очевидно, что инвестиции в рыночной экономике не производятся просто так. Всегда, в любом случае, деньги вкладываются, когда есть четкий и точный ответ «зачем мы вкладываем деньги?».



Источник: Inside Knowledge Bulletin. May, 2018

Рис. 2. Диаграмма опроса корпорации, инвестирующих в развитие СУЗ

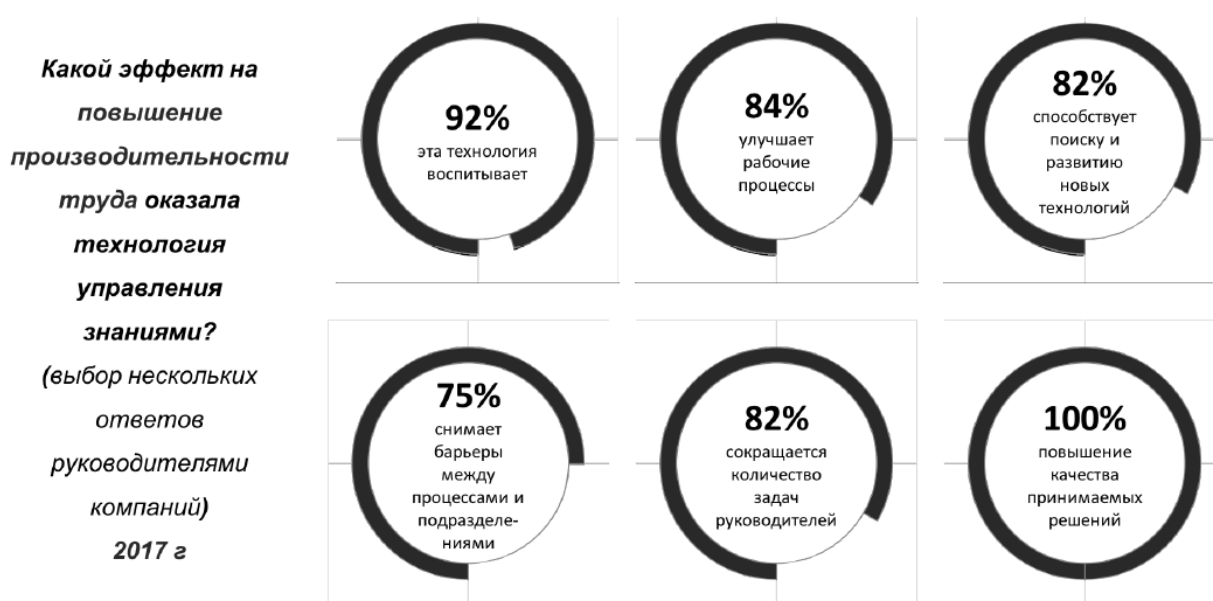
Сравнение диаграмм (рис. 1 и рис. 2) показывает, что если в 2007 году респонденты «размазали» ответы, что характеризует их неуверенность в «правильном» ответе, то, по прошествии 10 лет, был дан очень четкий и дружный ответ:

- КМ существенно влияет на развитие новых продуктов и услуг;
- КМ существенно влияет на доходность и прибыльность корпораций;
- КМ позволяет защитить рынки от новых конкурентов, сохраняя лидерство в области использовании компетенций организации;
- КМ способствует удержанию ключевых компетенций и работников;
- КМ оказывает серьезное влияние на взаимоотношения с потребителем.

Интересным для анализа и размышлений является то, что если 10 лет назад инвестиции в СУЗ оправдывались в том числе снижением затрат и ускорением вывода на рынок новых продуктов и услуг (38% и 39%

соответственно, рис. 1), то, по результатам эксплуатации СУЗ, эти факторы потеряли свое значение по сравнению с другими вопросами, отмеченными участниками опросов.

Какие практические результаты достигаются с помощью КМ? Очевидный и очень важный вопрос для тех, кто вовлечен в работу СУЗ и управляет внедрением инструментов КМ в операционную деятельность [3]. Как уже было упомянуто выше, конкретные примеры экономических эффектов отдельных корпораций мирового уровня мы рассматривали на основе единичных кейсов. Практиков, несомненно, интересует иная статистика, отражающая не единичные, а статистически значимые эффекты, которые может дать применение инструментов КМ. Диаграмма (рис. 3) отражает результаты опроса более чем трех тысяч руководителей компаний и организаций, которые внедряют и развивают СУЗ.



Источник: KMWorld, 2018

Рис. 3. Диаграмма опроса руководителей компаний, внедряющих СУЗ

Очевидно, что ключевым параметром эффективности организации является производительность труда. При этом важно подчеркнуть, что производительность труда в понимании респондентов, ответивших на вопросы (рис. 3) – это не просто выработка на одного работника, а тот доход, та прибыль, которую создает работник. То есть, де-факто, это рыночная оценка эффективности работы корпораций:

– 100% респондентов указали, что КМ влияет на качество принимаемых руководителями и сотрудниками решений. Это важнейший фактор, влияющий на эффективность работы организации в целом;

– 92% руководителей отметили, что технологии КМ дисциплинируют персонал;

- 84% респондентов считают, что внедрение технологий КМ и СУЗ приводит к улучшению рабочих процессов (business processes);
- 82% опрошенных руководителей уверены, что внедрение инструментов КМ и приводит к сокращению операционных вопросов (текучки) у руководителей и ускоряет процессы поиска, внедрения и развития новых технологий;
- 75% респондентов указывают на разрушение межфункциональных барьеров и повышение эффективности коллегиальной деятельности.

Выводы

Таким образом, руководители нескольких тысяч компаний, корпораций, общественных и государственных организаций, принявшие участие в опросе, дали четкий и однозначный ответ на вопрос о том, какие практические результаты дает использование технологии и инструментов Управления знаниями КМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вебер А. В., Данилов А. Д., Шифрин С. И. Knowledge-технологии в консалтинге и управлении предприятием. – М.: Наука и техника, 2002. – 176 с.
2. Румизен М. К. Управление знаниями: Как изменить вашу корпоративную культуру, чтобы люди не скрывали свои знания, а делились ими: Пер. с англ. (The Complete Idiots Guide to Knowledge Management Серия). – М.: АСТ, Астрель, 2004. – 318 с.
3. Тузовский А. Ф., Чириков С. В., Ямпольский В. З. Системы Т 817 управления знаниями (методы и технологии) / Под общ. ред. В. З. Ямпольского. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 260 с.

Юрасова Н. В.

Yurasova N. V.

nnnnnnn140979@mail.ru

Хуснутдинов Д. З.

Khusnutdinov D. Z.

dz_khusnutdinov@mail.ru

Филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Ишимбай

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ ДВУХЗВЕННЫМ ГУСЕНИЧНЫМ ТРАНСПОРТЕРОМ «ВИТЯЗЬ»

INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS OF THE TWO-LINK TRACKED CONVEYOR «VITYAZ»

***Аннотация.** Представлены варианты структурных схем информационно-управляющей системы для двухзвенного гусеничного транспортера «Витязь».*

***Abstract.** The variants of the structural schemes of the information and control system for a two-link crawler conveyor are presented «Vityaz».*

***Ключевые слова:** информационно-управляющие системы; информационно-измерительные системы; программно-аппаратные средства.*

***Keywords:** information and control systems; information and measurement systems; software and hardware.*

Создание и совершенствование транспортных средств на сегодняшний день является одной из важнейших задач современной науки. Особенно это касается специальной военной техники. Перечисленные виды транспортных средств эксплуатируются, как правило, в тяжелых климатических условиях. Кроме того, к их числу можно отнести двухзвенные гусеничные машины, эксплуатируемые в условиях Крайнего Севера и тундры. Гусеничные транспортные машины предназначены для работы в суровых погодных условиях на грунтах с низкой несущей способностью (болото, снежная целина, бездорожье, пересеченная лесистая местность и т. д.) при температуре окружающей среды от плюс 40°С до минус 50°С. К таким машинам и относится двухзвенный гусеничный транспортер (ДГТ) «Витязь». ДГТ «Витязь» является принципиально новым типом быстроходных транспортных машин, сочетающих большую грузоподъемность и грузместимость, а также демонстрирующих высокие показатели проходимости и маневренности в особо тяжелых дорожно-климатических условиях.

Повышение путевой устойчивости и управляемости является одной из главных задач совершенствования ДГТ. В настоящее время на ОА «МК «Витязь» ведутся работы в этом направлении.

В настоящее время появились новые возможности контролировать и планировать работу двухзвенного гусеничного транспортера на расстоянии.

Автоматизированные системы мониторинга автотранспорта способны обеспечить выполнение самых различных задач управления.

Создание сложных беспилотных транспортных средств связано с решением ряда задач, одной из которых является применение информационно-управляющих систем для управления транспортом в режиме реального времени онлайн. Это даст возможность иметь точную и достоверную информацию о реальном местоположении и маршрутах движения транспорта. Задача дистанционного управления предполагает установку на машину комплекса программно-аппаратных средств.

Необходимо управлять как отдельными ДГТ, которые в настоящее время, представляют собой сложные комплексы, так и из единого центра одновременно несколькими вездеходами, расположенными на значительном расстоянии друг от друга [1, 2].

Объектами контроля и управления самого ДГТ «Витязь» являются:

- силовая установка, двигатель (обороты двигателя, температура масла и др.);
- энергосистема:

 - топливная система (уровень и расход топлива, влажность, плотность и др.);
 - система электроснабжения (напряжение аккумулятора, температура батарей, прозвон цепей и др.);
 - система теплоснабжения и вентиляции (температура в разных местах, расход воздуха и др.);
 - оптика, освещение (освещенность, сигнализации)
 - ходовая часть, шасси;
 - подвеска, параметры устойчивости (тряска, опрокидывающие моменты вибрация);
 - положение в пространстве (крен, тангаж, координаты, скорость);
 - система климат контроля (салон, кабина, груз);
 - система связи и коммуникации;
 - окружающие метеоусловия (температура, влажность, ветер и др.).

Работа этих объектов характеризуется большим числом параметров, которые необходимо контролировать и, информация о которых, позволяет управлять этими объектами и ДГТ в целом. В настоящее время такая информация в лучшем случае просто выносится на приборную панель вездехода. При этом она не сохраняется и, соответственно, не может быть в дальнейшем использована, включающий в себя, прежде всего, центральный вычислительный блок (мейнфрейм), обрабатывающий все сигналы с датчиков комплекса, поддерживающий связь с удалённым оператором посредством устройства радиуправления и вырабатывающий управляющие сигналы для контроллера комплекса [3].

Решение задач информационного обеспечения контроля и управления обеспечивается с помощью соответствующих информационно-измерительных систем (ИИС) и информационно-управляющих систем (ИУС). Разработанные структурные схемы ИИС и ИУС интегрированные в иерархическую бортовую

информационно-управляющую систему (БИУС) ДГТ «Витязь» (рис. 1-3). Под структурой ИУС вездехода понимается совокупность частей и систем ДГТ, на которые он может быть разделен по определенному признаку, а также пути передачи воздействий между ними. Структурные схемы ИУС ДГТ включают основные функциональные части вездехода и их взаимосвязи. На структурной схеме информационно-управляющей системы указывается, из каких подсистем состоит данная система, как направлены потоки информации между подсистемами. Вид структуры управления ДГТ в целом и его отдельными агрегатами и системами может оказать существенное влияние на эффективность работы БИУС, снижение относительной стоимости системы управления, ее надежность, ремонтоспособность и т.д.

Если управление такого сложного комплексного объекта, каким является ДГТ, построить по одноуровневой системе, то это намного усложнится коммуникации системы управления, резко возрастут затраты на ее проектирование, изготовление и эксплуатацию. Поэтому БИУС ДГТ целесообразно выполнить многоуровневой.

На рис. 1 представлена структурная схема ИУС шасси (вариант 1) с применением промышленного одноплатного компьютера – мейнфрейма и контроллеров с протоколами обмена RS 232/422/485. На рис. 2 представлена структурная схема ИУС шасси (вариант 2) с применением CAN-шины и на рис. 3 структурная схема ИУС шасси (вариант 3) с применением нескольких (недорогих) промышленных контроллеров – децентрализованная ИУС.

Выводы

Система управления ДГТ «Витязь», в зависимости от важности регулируемых параметров, круга работников эксплуатационного персонала, которым необходимо знать их значения для осуществления оптимального управления вездеходом, в общем случае должна обеспечивать разные уровни управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дистанционное управление двухзвенным гусеничным транспортером «Витязь» // материалы Всероссийской научно-технической конференция «Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста». Уфа: УГАТУ, 2020. С. 74-77.
2. Позднер Л. Д. Теория систем управления. М: Издательство Московского государственного горного университета, 2002. 472с.
3. Отчет по научно-исследовательской работе «Подвижность». Ишимбай, 2014. 249 с.

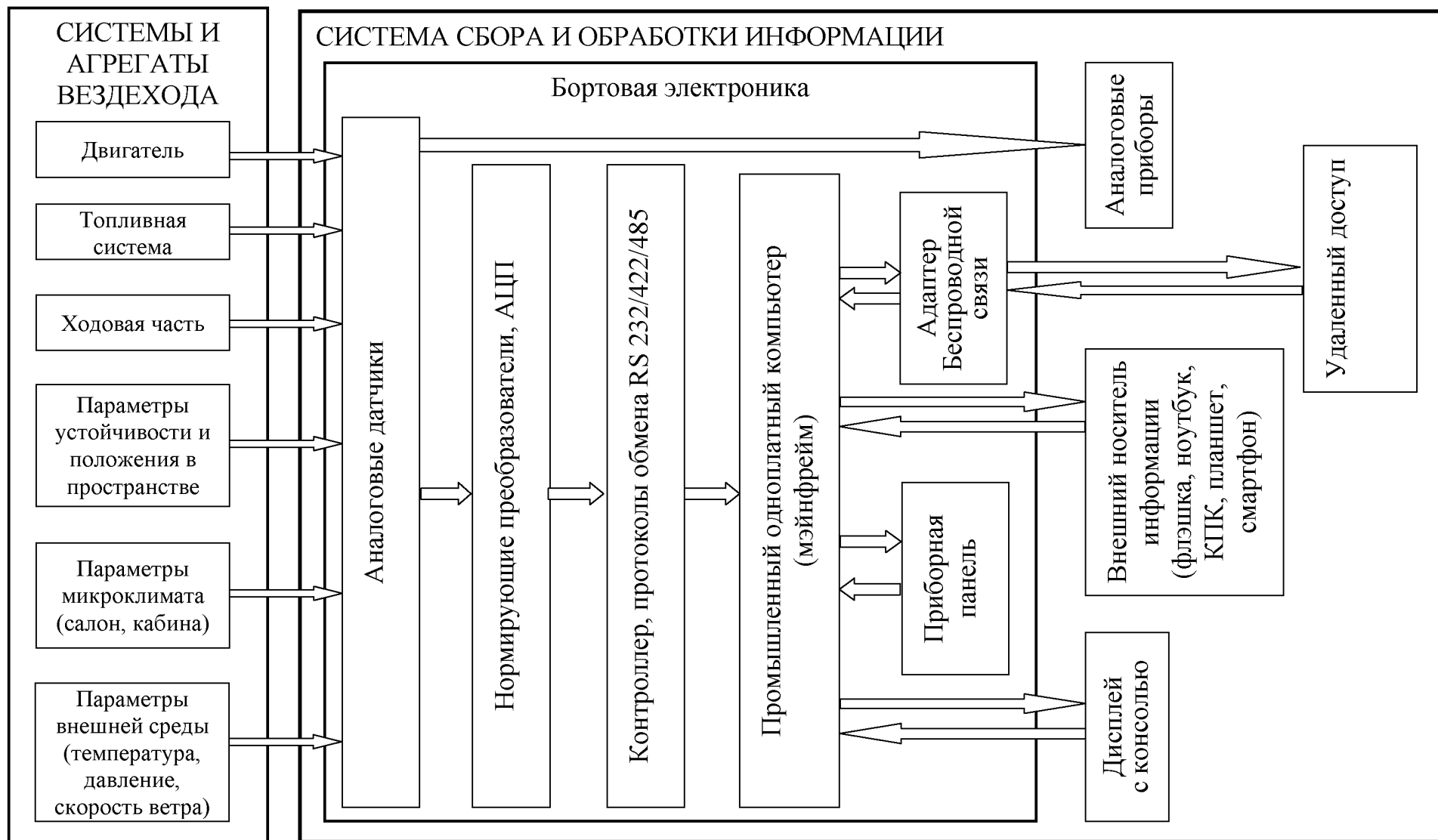


Рис. 1. Структурная схема ИУС шасси ДГТ «Витязь» (вариант 1)

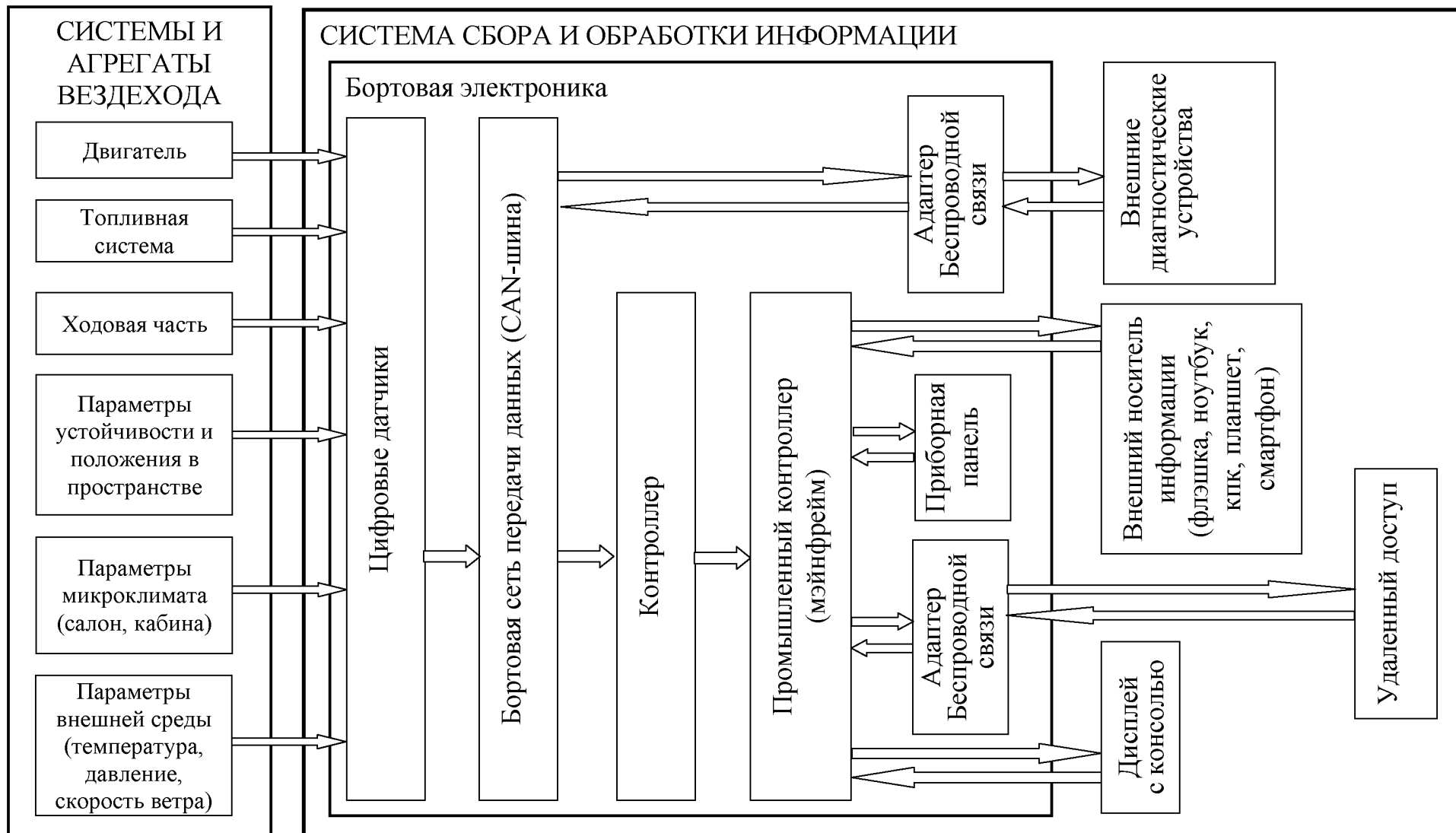


Рис. 2. Структурная схема ИУС шасси ДГТ «Витязь» (вариант 2)

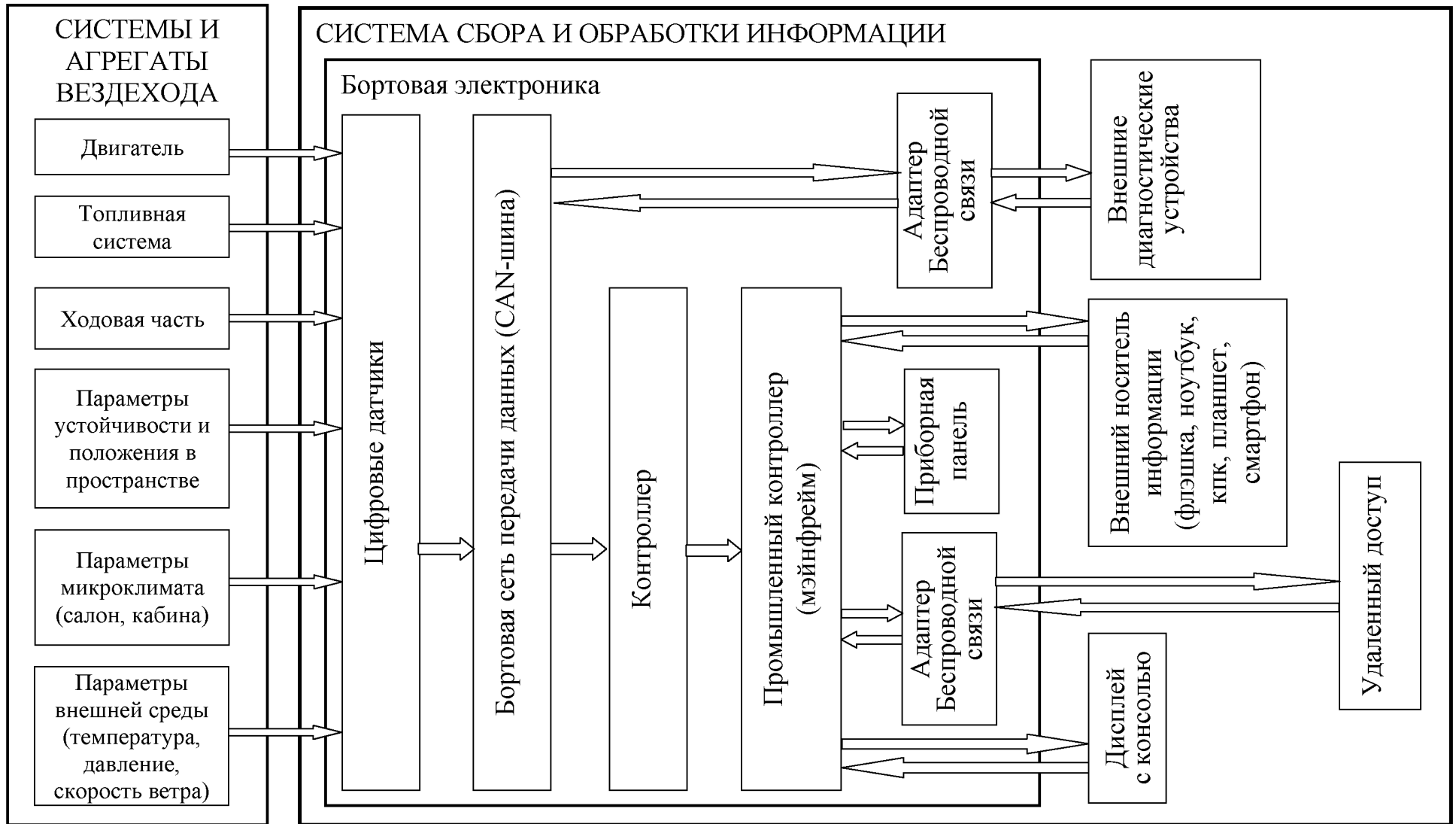


Рис. 3. Структурная схема ИУС шасси ДГТ «Витязь» (вариант 3)

Давлетшин Л. И.

Davletshin L. I.

linar-dav@mail.ru

Мунасыпов Р. А.

Munasipov R. A.

rust40@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО СТАНКА С ЧПУ

ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR CNC METAL CUTTING MACHINE

***Аннотация.** В работе представлен анализ основных методов построения адаптивных систем управления для металлорежущих станков с ЧПУ. Планируемые исследования, направленные на повышение эффективности управления металлорежущими станками с ЧПУ и показателей качества технологического процесса обработки, включают анализ факторов неопределенности и принципов построения адаптивных алгоритмов управления металлорежущими станками с ЧПУ с целью выявления наиболее эффективных структур и алгоритмов управления.*

***Abstract.** The paper presents an analysis of basic methods of adaptive control system for CNC metal cutting machines. The planned research aimed at improving the efficiency of CNC metal cutting machines and the quality indicators of the blade processing process includes the analysis of uncertainty factors and the principles of building adaptive control algorithms for CNC metal cutting machines in order to identify the most effective control structures and algorithms.*

***Ключевые слова:** Адаптивная система, станок с ЧПУ, металлорежущий станок, мотор-шпиндель.*

***Keywords:** Adaptive system, CNC machine, metal cutting machine, motor-spindle.*

Тенденции развития технологических и производственных процессов предъявляют повышенные требования к качеству обрабатываемых поверхностей детали, реализация которых требует применения повышенных режимов обработки деталей машин, что не всегда возможно из-за отсутствия информации о точностных и силовых характеристиках используемого оборудования. При обработке заготовок на металлорежущих станках с ЧПУ уровень оптимальности принятых режимов резания зависит от того, насколько точно начальная информация характеризует действительные условия протекания обработки и насколько изменяются исходные параметры, принятые при расчете и составлении управляющей программы (припуск, твердость обрабатываемого материала, жесткость технологической системы и др.).

В действительности условия процесса обработки изменяются во времени случайным образом по следующим причинам:

а) непрерывно изменяются режущие свойства инструментов, которые невозможно точно определить в данный момент времени;

б) неопределенны свойства всей технологической системы (упругие и температурные деформации, вибрации);

в) для каждой заготовки из обрабатываемой партии имеется разброс припусков, твердости, структуры металла и др.

Таким образом, процесс обработки осуществляется в условиях неопределенности, что существенно затрудняет автоматизацию процедур выбора оптимальных значений регулируемых координат в зависимости от текущего состояния процесса. Соответствующее изменение характера организации процесса управления возможно лишь при построении системы управления металлорежущим станком с ЧПУ в классе адаптивных систем.

К адаптивным системам относятся системы управления, обеспечивающие высокую эффективность управления при большой априорной неопределенности за счет использования текущей информации, получаемой в ходе самого процесса управления.

При работе на единичных металлорежущих станках с ЧПУ задача достижения требуемой точности может быть решена при составлении управляющих программ за счет соответствующего построения цикла обработки, выбора оптимальных режимов резания, предварительного искажения траектории и т.д. Перечисленные мероприятия образуют так называемую систему **пассивного адаптивного управления**.

При автоматизации мелкосерийного производства, для которого характерен весьма широкий диапазон изменения режимов резания, параметров обрабатываемых деталей, припуска и твердости заготовок, система пассивного адаптивного управления не может обеспечить оптимальные показатели процесса обработки. Это стало возможным лишь при использовании так называемых **активных адаптивных систем (АС)**.

В настоящее время под адаптивной системой автоматического управления (САУ) металлорежущего станка с ЧПУ понимают комплекс технических и программных средств, обеспечивающих автоматическое управление процессом обработки в соответствии с поставленной целью. В зависимости от того, что является предметом управления (регулирования) САУ в станкостроении принято подразделять на **геометрические** и **технологические**. Геометрические САУ управляют точностью обработки, технологические – технологическими параметрами, в основном, – режимами резания. Кроме того, выделяют комбинированные САУ, управляющие как технологическими, так и геометрическими параметрами.

Экономической предпосылкой создания первых АС явилось требование производить обработку с экономически эффективными режимами резания на дорогостоящем оборудовании. Технической предпосылкой создания АС явилось требование повысить точность обработки за счет компенсации колебаний размера динамической настройки A_d , обусловленных действием таких случайных факторов как изменение припуска и твердости материала заготовки, затупление режущего инструмента и т. д. Как известно [1], размер динамической настройки A_d в совокупности с размерами установки. A_y и

статической настройки A_c определяет замыкающий размер A_Δ , выдерживаемый при обработке, то есть: $A_\Delta = A_y + A_c + A_d$.

Вибрация и резонансные явления в машинах и механизмах играют исключительно важную роль. Вибрация нарушает заданные конструктором параметры движения машин, механизмов и систем управления, порождает неустойчивость процессов обработки деталей и работы станка, что может вызвать отказы, в том числе полную расстройку всей системы. Вибрация приводит к увеличению динамических нагрузок в элементах конструкций станков и сопряжениях, при этом снижается несущая способность деталей, возникают усталостные разрушения. Для прецизионных, высокоскоростных станков вибрация пагубно влияет на точность обрабатываемых изделий и может приводить к их неравномерному нагреву, растрескиванию и браку.

Одной из причин вибрации являются силовые кинематические возмущения, связанные с погрешностями вращающихся элементов, которые вызывают вынужденные колебания инструмента и обрабатываемой детали. Вследствие относительных колебаний инструмента и детали возникают «волны», которые являются причиной возникновения погрешностей обрабатываемой поверхности детали. В связи с этим, особое значение приобретают методы управления, снижающие уровень вибрации в процессе функционирования станка.

Одним из наиболее важных узлов металлорежущего станка является шпиндельный узел (ШУ). Точность вращения шпиндельного узла воздействует на главные характеристики качества изготавливаемых деталей, а именно точность формы и расположения поверхностей относительно друг друга, шероховатость и волнистость.

Все большее применение в главных приводах станков имеют мотор-шпиндели. Использование мотор-шпинделей объясняется их соответствием всем требованиям к шпинделям технологических машин: точности оборотов (1-2% от номинальных); биению шпинделя (менее 1 мкм); высокой жесткости шпинделя. Преимуществами мотор-шпинделей являются их малые габариты и вес, достигаемые специфической компоновкой двигателя и шпиндельного узла. При конструировании достигается бесступенчатость регулирования частоты вращения, а также уменьшение размеров и веса шпиндельного узла за счет отсутствия коробки передач и других механизмов.

Основными узлами мотор-шпинделей являются высокоскоростные прецизионные подшипники, обеспечивающие высокую частоту вращения (до 80000 мин⁻¹ – у синхронного электродвигателя и до 24000 мин⁻¹ – у асинхронного) и динамическую грузоподъемность (до 20000 Н при d=50мм). При этом следует учитывать, что они очень чувствительны к перегрузкам, следствием которых может стать преждевременный износ шпиндельных опор, приводящий к повышенному уровню вибрации инструмента.

Для управления асинхронным двигателем мотора-шпинделя в данной работе используется пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор), преобразователь частоты и автономный инвертор напряжения

ПЧ-АДКЗ с АИН [2]. Реализация разработанной математической модели, так же, как и модель мотора-шпинделя, осуществлена с помощью пакета программ MatLab (приложения Simulink и SimPowerSystems).

Как известно, регулирование скорости асинхронного двигателя возможно изменением напряжения и частоты источника питания, который может работать в режиме источника напряжения или источника тока [3]. Следовательно, регулирование скорости и момента на валу электродвигателя возможно изменением напряжения источника питания при $f = \text{const}$, изменением частоты и напряжения источника питания (скалярное частотное управление), изменением частоты и тока статорной обмотки (скалярное частотно-токовое управление), изменением частоты и текущих значений переменных асинхронного двигателя и взаимной ориентацией их векторов в полярной или декартовой системе координат (векторное управление).

Принцип скалярного управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода базируется на изменении частоты и текущих значений модулей переменных асинхронного двигателя (напряжений, магнитных потоков, потокосцеплений и токов цепей двигателя). Выбор способа и принципа управления определяется совокупностью статических, динамических и энергетических требований к асинхронному электроприводу. Наибольшее применение нашли системы с обратной связью по току статора и скорости.

Общий вид математической модели системы преобразователя частоты – асинхронного двигателя с автономным инвертором напряжения показан на рис. 1.

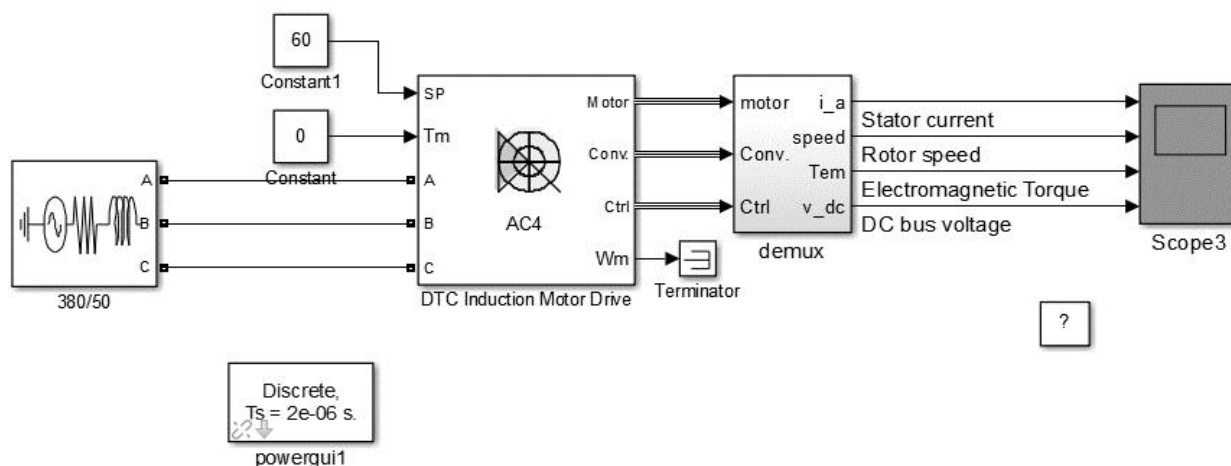


Рис. 1. Структура модели асинхронного двигателя с преобразователем частоты и автономным инвертором напряжения

Структура самой системы электропривода показана на рис. 2. Система состоит из контроллера скорости (Speed Controller), из блоков выпрямителя (Three-phase diode rectifier), преобразователя (Braking chopper), инвертора

напряжения (Inverter_3ph) и измерителя параметров (Measures), контроллера тока (DCT) и самого асинхронного двигателя (Induction machine).

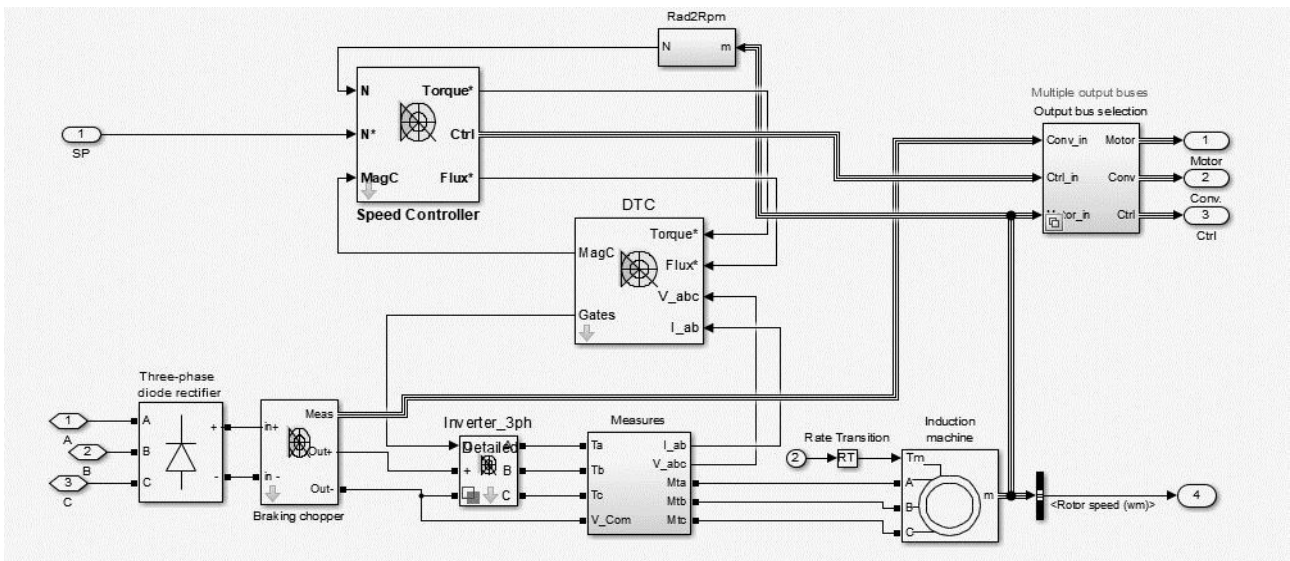


Рис. 2. Структура блока системы электропривода ПЧ-АДКЗ с АИН

Далее проведен синтез адаптивных регуляторов каналов потокосцепления и момента при наличии в системе датчика скорости вращения асинхронного двигателя. Синтезируемая структура содержит пропорционально-интегрирующие (ПИ) регуляторы потокосцепления и скорости в основных контурах и нечеткие ПИД-регуляторы в контурах адаптации.

Результаты моделирования процесса пуска и установившийся режим (изменение тока статора, скорости и момента электродвигателя, управляющего напряжения) представлены на рис. 3.



Рис. 3. Графики переходных процессов в основном контуре синтезированной системы

Анализируя график скорости двигателя, можно сделать следующие выводы: через 0,5 с после пуска двигателя скорость вращения мотор-шпинделя достигает установившегося значения, что соответствует заданным требованиям канала регулирования момента асинхронного двигателя.

Выводы

1. Технологический процесс обработки на металлорежущих станках с ЧПУ осуществляется в условиях неопределенности, что существенно затрудняет автоматизацию процедур выбора оптимальных значений регулируемых координат в зависимости от текущего состояния процесса. Соответствующее изменение характера организации процесса управления возможно лишь при построении системы управления в классе адаптивных систем. Анализ принципов построения адаптивных алгоритмов управления металлорежущими станками с ЧПУ показывает, что с точки зрения простоты реализации и ограничений по быстродействию наиболее целесообразным является использование адаптивных алгоритмов, построенных в классе беспойсковых самонастраивающихся систем с эталонной моделью.

2. Вибрация и резонансные явления в машинах и механизмах играют исключительно важную роль. Вибрация нарушает заданные конструктором параметры движения машин, механизмов и систем управления, порождает неустойчивость процессов обработки деталей и работы станка, что может вызвать отказы, в том числе полную расстройку всей системы. Одной из причин вибрации являются силовые кинематические возмущения, связанные с погрешностями вращающихся элементов, которые вызывают вынужденные колебания инструмента и обрабатываемой детали. В связи с этим особое значение приобретают методы управления, компенсирующие уровень вибрации в процессе функционирования станка.

3. Проведено синтез адаптивных регуляторов каналов потокосцепления и момента при наличии в системе датчика скорости вращения асинхронного двигателя. Синтезируемая структура содержит пропорционально-интегрирующие (ПИ) регуляторы потокосцепления и скорости в основных контурах и нечеткие ПИД-регуляторы в контурах адаптации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проничев, Н.Д. Многоосевые обрабатывающие центры [Электронный ресурс]: инновац. курс лекций / Н.Д. Проничев, В. Г. Смелов; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. и граф. дан. (4,6 Мбайт). Самара, 2013.1 эл. опт. диск (CD-ROM).
2. Семёнов А.С. Моделирование режимов работы асинхронного двигателя в пакете программ MatLab // ВЕСТНИК СВФУ, 2014, том 11, № 1, С. 51-59.
3. Системы управления автоматизированным электроприводом переменного тока: учеб. пособие / А.М. Макаров, А.С. Сергеев, Е.Г. Крылов, Ю.П. Сердобинцев ; ВолгГТУ. Волгоград, 2016. 192 с.

Полякова Т. В.

Polyakova T. V.

tatyana_polyakova2017@mail.ru

ГАПОУ «Ишимбайский нефтяной колледж», Ишимбай

Юрасова Н. В.

Yurasova N. V.

elan_ugatu@mail.ru

Хуснутдинов Д. З.

Khusnutdinov D. Z.

dz_khusnutdinov@mail.ru

Филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Ишимбай

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

INTELLIGENT DECISION-MAKING SYSTEMS FOR THERMAL PROCESSES BASED ON FUZZY LOGIC

Аннотация. Представлены результаты исследований интеллектуальных систем принятия решений для тепловых процессов на основе нечеткой логики.

Abstract. The results of research of intelligent decision-making systems for thermal processes based on fuzzy logic are presented.

Ключевые слова: интеллектуальные алгоритмы управления на основе нечеткой логики; адекватная модель.

Keywords: intelligent control algorithms based on fuzzy logic; adequate model.

В настоящее время в связи с развитием науки и техники актуальны исследования в области нечеткой логики применительно к управлению техническими объектами. Интеллектуальная система – это техническая или программная система, способная решать задачи, традиционно считающиеся творческими, принадлежащие конкретной предметной области, знания о которой хранятся в памяти такой системы. Технологии, использующие нечеткую логику, в своей основе широко применимы, как в управлении техническими системами, так и для управления технологическими процессами.

Управление на основе нечеткой логики использует предложения в форме правил для того, чтобы управлять тем или иным процессом. Регулятор на основе нечеткой логики может иметь неограниченное число входных сигналов и строится на основе знаний «эксперта», а также, в отличие от традиционных систем управления (например, ПИД-регуляторов), может синтезироваться без использования специфических знаний об объекте управления. Данный тип регуляторов хорошо зарекомендовал себя в управлении сложными нелинейными системами, а также системами с нелинейными внешними возмущениями [1, 2].

Целью настоящей работы является разработка интеллектуальной системы принятия решений для тепловых процессов на основе нечеткой логики и ее исследование с применением ЭВМ. В работе были изучены особенности технологического процесса сушки, энергосбережения ресурсов и построен нечеткий алгоритм компенсации падения температуры на оборудовании при сушке.

В ООО «КызылТаш» установлено технологическое оборудование YV 32/7, изготовленное фирмой IPA GROUP S.p.A., для производства технологического процесса сушки (рис. 1). Система управления оборудованием организована на базе современных контроллеров Siemens S7-300.



Рис. 1. Оборудование для IPA сушки

Высокотехнологичные системы сушки используют эффект Марангони. Каждую подложку устанавливают на носитель, опускают в ванну отмывки с ДИ водой до полного погружения подложки, затем медленно поднимают из воды в камеру сушки, а в момент выхода подложки из воды подают пары органического растворителя (IPA, изопропанол) на границу раздела ванны и воздушной среды камеры и сушат. Эффект Марангони определяет свойства жидкости на поверхности пластины в зависимости от перепада поверхностного натяжения на границе раздела газ/жидкость. Благодаря этому при подъеме пластин из жидкости, она (жидкость, ДИ вода) затягивается обратно с поверхности пластины в ванну. Поскольку поверхностное натяжение

изопропанола гораздо ниже, чем у воды, то при растворении изопропанола из пара в воде на поверхности раздела газа/жидкости создается перепад поверхностного натяжения. Эта реакционная область (граница раздела фаз паров изопропанола и ДИ воды) обладает высокой очищающей способностью.

По сравнению с отмывкой и сушкой центрифугированием, эффект отмывки и сушки с использованием эффекта Марангони лучше удаляет с поверхности пластин частицы. Кроме того, однородность поверхности пластины, обработанной по этому методу значительно превосходит однородность, получаемую при обработке центрифугированием как при индивидуальной обработке пластины, так и при групповом центрифугировании пластин в кассете.

Особенности IPA сушки:

- ополаскивание и сушка гидрофильных и гидрофобных пластин и подложек;
- подходит для 1×8" кассеты или 2×6" кассет;
- ненапряженная сушка без возникновения пятен;
- минимизированное IPA потребление;
- малые габариты;
- высокий стандарт безопасности;
- корпус из полипропилена (PP);
- ванна изготовлена из PVDF, автоматическая крышка из нержавеющей стали с N₂-нагревом.

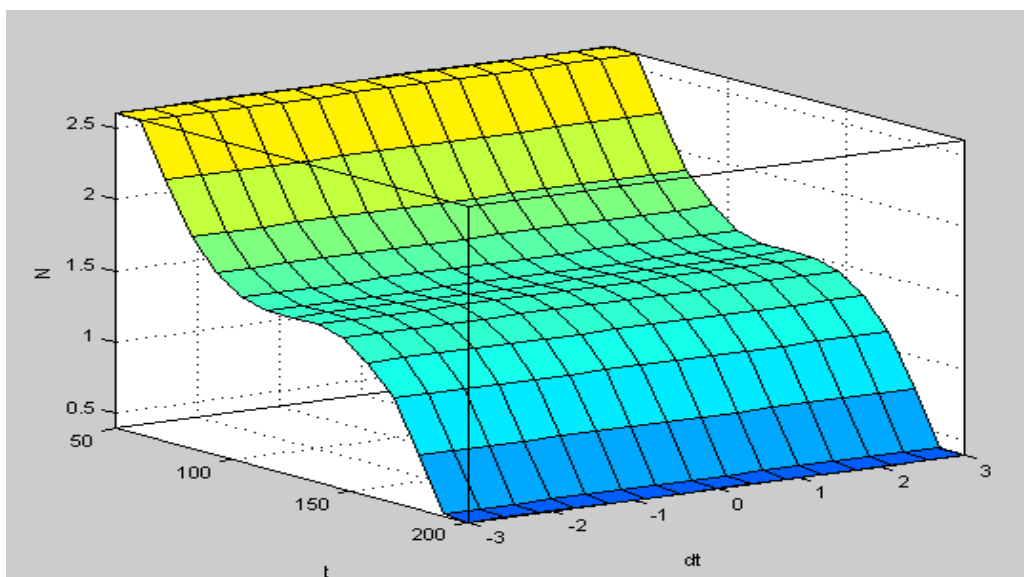
Разработка интеллектуальной системы принятия решений для тепловых процессов на основе нечеткой логики с применением ЭВМ позволит автоматически управлять этим процессом [3, 4].

Нечеткая система принимает два сигнала температуру печи и скорость ее изменения, несущую в себе информацию о тепловых потерях. С помощью классического нечеткого алгоритма создается управляющий сигнал в виде значения тепловой мощности и скорости вращения вентилятора. Результаты внедрения интеллектуальных алгоритмов управления на основе нечеткой логики представлены на рис. 2.

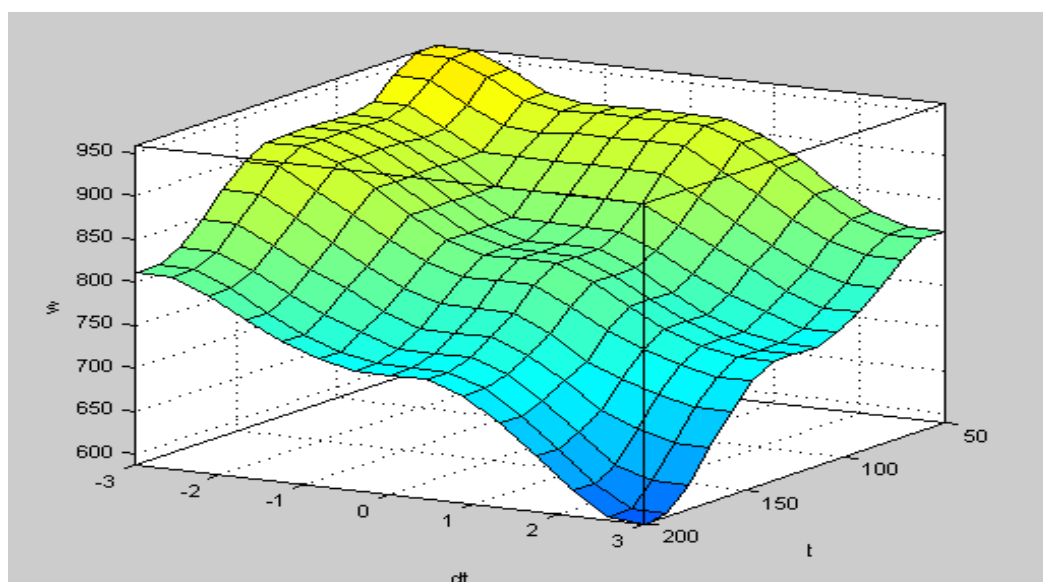
Работу нечеткой системы управления можно оценить по поверхностям нечеткого вывода. На рис. 2 можно увидеть, что мощность нагревательных элементов зависит от температуры в нагреваемой зоне. При уменьшении температуры, мощность увеличивается. Точность управления при поддержании температуры обеспечивается реакцией системы управление в виде увеличения скорости вращения вентиляторов на изменение производной температуры.

Выводы

Результаты внедрения интеллектуальных алгоритмов управления на основе системы нечеткой логики удовлетворительны, полученная модель адекватна.



a



б

Рис. 2. Поверхности вывода нечеткой системы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидова Г.Л., Лукичев Д.В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 81 с.
2. Ермолаева В. В. Автоматизированные интеллектуальные системы и нечеткая логика / В. В. Ермолаева, Р. В. Батаев. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 10 (114). – С. 54-56.
3. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование. – Издательство: БХВ-Петербург, 2005. – 225 с.
4. Системы поддержки принятия решений: учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры / под ред. В. Г. Халина, Г. В. Черновой. – М : Издательство Юрайт, 2016. – 494 с.

Никитин Ю. А.

Nikitin Yu. A.

nikyu@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА ПРИ РЕЗАНИИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

OPERATIONAL CONTROL OF TOOL WEAR WHEN CUTTING HARD-TO-WORK MATERIALS

***Аннотация.** Приведены результаты разработки и исследования устройства измерения износа режущего инструмента для систем оперативного контроля и диагностики процесса резания труднообрабатываемых материалов в мехатронных станочных модулях. Разработана методика измерения износа режущего инструмента, использующая информацию об электропроводимости контакта «инструмент-деталь» на переменном токе.*

***Abstract.** The results of the development and research of a device for measuring the wear of a cutting tool for systems of operational control and diagnostics of the cutting process of difficult-to-machine materials in mechatronic machine-tool modules are presented. A technique has been developed for measuring the wear of a cutting tool, using information on the electrical conductivity of the contact "tool-part" on alternating current.*

***Ключевые слова:** системы оперативной диагностики, износ, алгоритмы диагностирования, электропроводимость, переменный ток.*

***Keywords:** the on-line diagnostic system, wear, diagnostic algorithms, electrical conductivity, alternating current.*

Повышение качества и эффективности механической обработки труднообрабатываемых материалов, таких как жаропрочные стали и сплавы, остается по-прежнему актуальной задачей [1]. Режущий инструмент (РИ) при резании труднообрабатываемых материалов подвергается интенсивному износу, который определяет выходные параметры процесса механообработки. Таким образом, интенсифицировать процесс обработки резанием с одновременным формированием требуемых характеристик поверхностного слоя обрабатываемых деталей становится возможным только при наличии информации о текущем износе инструмента [2]. Оперативный контроль и диагностика износа РИ, а также управление интенсивностью его изнашивания, является важным условием эффективной работы оборудования современного автоматизированного производства при выпуске качественной продукции. При этом следует отметить, что разработка и исследование устройств измерения износа РИ, определение момента наступления критического износа инструмента требуют создания надежно работающих в условиях производства чувствительных преобразователей (датчиков) информации об износе инструмента [3, 4].

Изнашивание рабочих поверхностей инструмента существенно влияет как на свойства обрабатываемой поверхности изделия, так и на параметры самого процесса: температуру и силу резания, колебания инструмента, что определяет возможность косвенной оценки износа РИ, основанной на использовании корреляционных связей между характеристиками состояния РИ (величина износа, интенсивность изнашивания) и сигналами, возникающими в зоне резания вследствие явлений, сопровождающих процесс резания (механические, тепловые, электрические, акустические и др.). Существующие в настоящее время преобразователи (датчики) износа инструмента, построенные на базе корреляционной взаимосвязи между износом и вибрацией инструмента, силой и температурой резания, потребляемой мощностью и током электродвигателя привода главного движения станка, не удовлетворяют требованиям по точности и быстродействию измерения, чувствительности, помехозащищенности и надежности технологического оборудования [5].

В настоящей работе на основе выявленной взаимосвязи таких диагностических параметров как термо-ЭДС контакта «инструмент-деталь» (КИД) и электропроводимости (ЭП) КИД [6, 7] с износом инструмента и параметрами процесса резания разработано устройство измерения износа РИ и показана эффективность его использования для оперативного контроля и диагностики в мехатронных станочных модулях. Исследования физических аспектов формирования ЭП КИД позволили обосновать новые способы измерения износа РИ, удовлетворяющие требованиям точности и быстродействия измерения [8]. Разработаны алгоритмы определения текущей информации об износе режущего инструмента (РИ) с использованием математических моделей процесса изнашивания РИ [9]. При разработке системы контроля износа РИ были использованы теория резания и автоматического управления, методы математического моделирования, идентификации объектов управления и теории распознавания образов.

Устройство для измерения сопротивления контакта "инструмент-деталь" (рис. 1) содержит силовую цепь, которая замыкается по цепи источник переменного тока ИТ – силовой токосъем 1, установленный на шпинделе, деталь 4 – резец 6 – источник переменного тока ИТ. Измерительная цепь системы контроля ЭП КИД состоит из усилителя постоянного тока, вход которого соединен через измерительный токосъем 5 непосредственно с деталью 3 и с резцом 6 (вблизи режущей кромки), и системы сбора и обработки информации на ПЭВМ.

Значительную информационную составляющую при определении износа инструмента по сигналу ЭП КИД несет характер пропускаемого через КИД тока [10]. При этом следует отметить, что контроль износа инструмента по ЭП КИД возможен только при использовании в устройстве измерения ЭП КИД именно источника стабильного тока, а не напряжения, что позволяет исключить погрешности, связанные с переменными паразитными сопротивлениями (сопротивления токосъемов, резцедержавки, детали и т.д.) в цепи КИД [6]. Однако в случае применения источника непрерывного постоянного тока

контролируемое контактное падение напряжения является интегральной характеристикой проводимости тока через КИД (по передней поверхности инструмента и стружки, по задней поверхности инструмента и детали) [7], что приводит к значительным трудностям при разработке алгоритмов диагностики и управления процессом механообработки по информации об ЭП КИД.

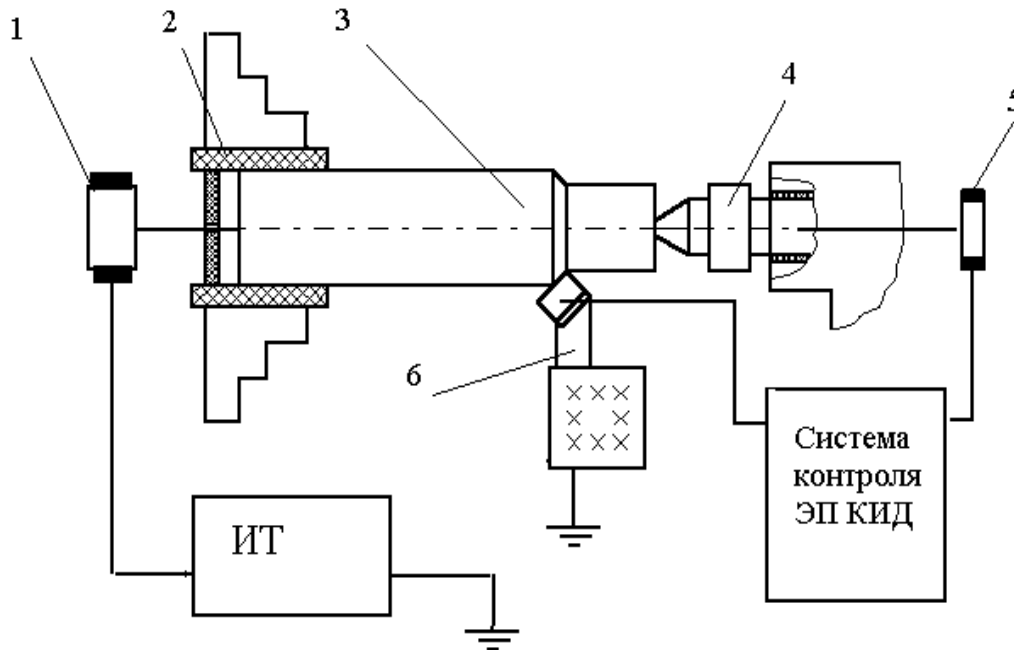


Рис. 1. Схема установки для измерения ЭП КИД:

1 – силовой токосъем, 2 – изоляция, 3 – заготовка, 4 – задний центр, 5 – измерительный токосъем, 6 – режущий инструмент, ИТ – источник импульсного тока

В процессе проведенных исследований было установлено, что использование переменного тока стабильной амплитуды, пропускаемого через КИД, приводит к значительному снижению влияния передней поверхности режущего инструмента (РИ) на долю протекающего через КИД тока. При определенной частоте пропускаемого тока ($f > f_{кр}$), переменный ток начинает протекать в основном через заднюю поверхность режущего инструмента, т.е. исключается влияние контакта инструмента и стружки на контролируемое системой диагностики контактное падение напряжения в зоне КИД [8, 9].

При разработке системы измерения ЭП КИД необходимо было создать источник тока, имеющий стабильные выходные характеристики, совместимость с вычислительной техникой, используемой в системе диагностирования, возможность синхронизации с ПЭВМ, а также не оказывающего влияния на процесс резания. В качестве такого источника тока был выбран преобразователь, в основе которого содержится резонансный LC-контур (рис. 2) [11]. При коммутации силового ключа S1 в LC-контуре возникает колебательный процесс, при котором ток, пропускаемый через контакт инструмент-деталь, является переменным и носит синусоидальный

характер. Амплитуда тока через $R_{\text{кид}}$ поддерживается на заданном уровне системой стабилизации (на рис. 2 не показано).

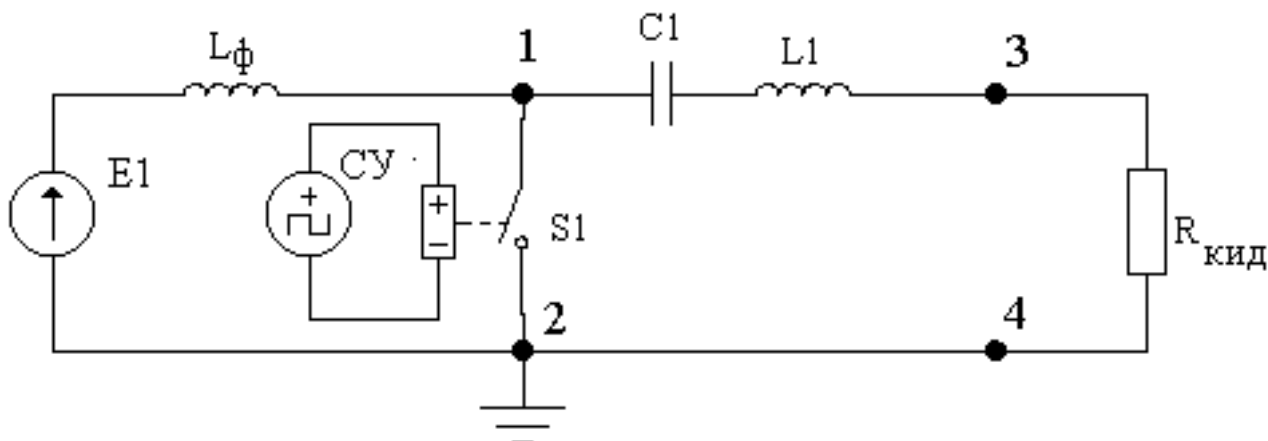


Рис. 2. Функциональная схема силовой части источника импульсного тока

На рис. 3 и рис. 4 приведены осциллограммы сигналов контактного падения напряжения на КИД при пропускании через КИД импульсного переменного тока, полученные при точении труднообрабатываемого материала ХН77ТЮР резцом ВК6М в режиме с постоянной скоростью точения ($V=28$ м/мин, $S=0,1$ мм/об, $t=0,5$ мм). Сигналы контактного напряжения КИД в достаточной мере отражают протекание процесса резания и могут быть применены для разработки эффективных алгоритмов диагностики и управления данным процессом.

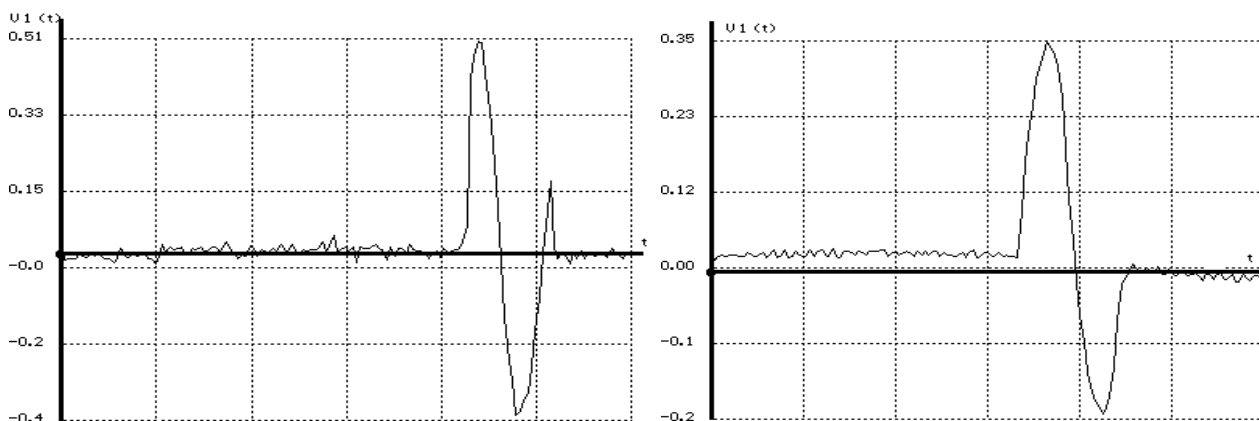


Рис. 3. Сигнал, соответствующий разрыву контакта “инструмент – деталь” (слева) и сигнал, соответствующий моменту касания острого резца (справа)

Из осциллограмм (рис. 3, рис. 4) видно, как изменяется амплитуда и форма сигналов в зависимости от состояния режущего инструмента. Так, в процессе нормального изнашивания по мере износа задней поверхности инструмента уменьшается амплитуда падения напряжения на КИД. При этом форма сигнала практически не изменяется, что говорит о чисто активном

сопротивлении КИД. В случае критического износа амплитуда сигнала резко снижается, а при выкрашивании режущего клина появляется сдвиг фаз между током и напряжением, свидетельствующий о появлении индуктивного характера ЭП КИД.

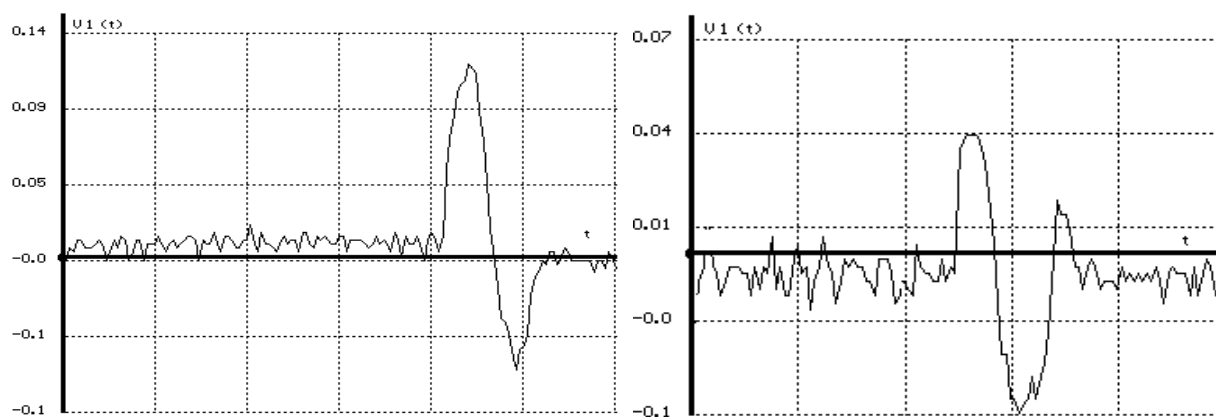


Рис. 4. Сигнал, соответствующий износу резца 0,2 мм (слева) и сигнал критического состояния при возможной поломке или выкрашивании (справа)

Достоинство разработанного устройства измерения износа режущего инструмента для систем оперативного контроля и диагностики процесса резания труднообрабатываемых материалов в мехатронных станочных модулях по сравнению с рассмотренным в [6, 7] устройством, заключается в возможности получения большого амплитудного значения тока через КИД при малой длительности импульса тока и отсутствии паразитных высокочастотных колебаний. В разработанной системе измерения ЭП КИД время между коммутациями силового ключа значительно превышает длительность импульса тока, следовательно, средний ток через КИД является незначительным, что приводит к существенному снижению влияния данного тока на тепловые процессы в КИД и, следовательно, этим влиянием можно пренебречь.

Выводы

На основе разработанных алгоритмов оперативной диагностики состояния режущего инструмента, основанных на взаимосвязи параметров износа инструмента с электрическими параметрами процесса резания, предлагается структура диагностических модулей, включающих разработанные средства измерения износа режущего инструмента. Выявлено, что информация о формах контактного падения напряжения на КИД при пропускании через него переменного тока, коррелируется с информацией об износе РИ вплоть до критического износа. При использовании соответствующих методов (например, теории распознавания образов или Вельвет анализа [12, 13]) данные об ЭП КИД на переменном токе позволят разрабатывать эффективные системы

оперативной диагностики состояния режущего инструмента при механообработке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зориктуев В. Ц., Загидуллин Р. Р., Лютов А. Г., Никитин Ю. А., Схиртладзе А. Г. Управление технологическими процессами в машиностроении. Учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» / Под общ. ред. В. Ц. Зориктуева. – Старый Оскол: Издательство «ГНТ», 2011. – 512 с.
2. Зориктуев В. Ц., Лютов А. Г., Никитин Ю. А. Интегрированное интеллектуальное управление и диагностика мехатронных станочных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 8. С. 26-30.
3. Никитин В. А., Хузин И. С. Диагностика станочных систем механообработки // Проблемы механики и управления: Сб. научных трудов УНЦ РАН. Уфа. 1994. С. 117-123
4. Зориктуев В. Ц., Никитин Ю. А. Разработка средств диагностики и оперативного контроля режущего инструмента в процессе механообработки // Инструмент, № 10. – С.Петербург, 1998. С. 11-12.
5. Зориктуев В. Ц., Никитин Ю. А., Хузин И. С. Моделирование текущего износа инструмента при обработке жаропрочных сплавов. // Автоматизированные технологические и мехатронные системы. Сборник научных трудов - Часть 1. Уфа. 1997. С.53-56
6. Зориктуев В. Ц., Исаев Ш. Г. Устройство для измерения электрической проводимости контакта «Инструмент-деталь» в системах управления процессом резания // Измерительная техника, № 4. 1984. С. 16-17.
7. Зориктуев В. Ц., Хузин И. С. Электропроводимость контакта «инструмент-деталь» - физический и информационный параметр в станочных системах. – М.: Машиностроение, 1998. – 176 с.
8. Асылбаева А. Г., Никитин Ю. А. Система оперативного контроля износа режущего инструмента /Научные технологии в машиностроении. Всероссийская научно-практическая конференция/ Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: РИК УГАТУ, 2020. С. 7-10.
9. Никитин Ю. А., Хузин И. С., Ильин А. Н. Комплексная оценка состояния режущего инструмента // Автоматизированные технологические и мехатронные системы. Сборник научных трудов – Часть 1. Уфа. 1997. С. 132-133
10. Никитин Ю. А. Использование информации об электрической проводимости переменного тока через контакт «инструмент-деталь» в системах оперативной диагностики состояния режущего инструмента при механообработке /Научные технологии в машиностроении. Всероссийская научно-практическая конференция/ Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: РИК УГАТУ, 2020. С. 7-10.
11. Никитин Ю. А. Транзисторные преобразователи постоянного напряжения класса E. // Канд. диссертация. – МАИ, 1990. – 225 с.
12. Zoriktuev V. T., Nikitin Y. A., Sidorov A. S. Monitoring and prediction of cutting-tool wear // Russian Engineering Research. 2008. T. 28. С. 88-91.
13. Зориктуев В. Ц., Никитин Ю. А., Сидоров А. С. Мониторинг и прогнозирование износа режущего инструмента // СТИН. 2007. № 10. С. 31-34.

Никитин Ю. А.

Nikitin Yu. A.

nikyu@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИБКОГО ИНДУКТОРА ДЛЯ НАГРЕВА СВАРОЧНОГО СТЫКА ТРУБОПРОВОДОВ

MODELING AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF A FLEXIBLE INDUCTOR FOR HEATING THE WELDING JOINT OF PIPELINES

***Аннотация.** Рассмотрены различные аспекты разработки гибкого индуктора, применяемого для нагрева сварного соединения труб с возможностью быстрой и удобной установки на трубопроводы, применяемые в нефтегазовой промышленности. Показано, что разработанный индуктор обеспечивает необходимое качество нагрева, безопасность и автоматизацию процесса нагрева.*

***Abstract.** Various aspects of the development of a flexible inductor used for heating a welded joint of pipes with the possibility of quick and convenient installation on pipelines used in the oil and gas industry are considered. It is shown that the developed inductor provides the required heating quality, safety and automation of the heating process.*

***Ключевые слова:** индукционный нагрев, сварочный стык, моделирование тепловых процессов.*

***Keywords:** induction heating, welded joint, modeling of thermal processes.*

В настоящее время для противокоррозионной защиты сварных соединений внутри трубопроводов используют многослойный композиционный материал с низковязким эпоксидным связующим, устанавливаемый внутри трубопровода в месте сварного стыка [1]. При использовании технологии приклеивания подобных бандажных лент особенно важно обеспечить нагрев строго заданной области возле сварного стыка, выдерживая температурные режимы нагрева и скорость нагрева в течение определенного времени в соответствии с заданным технологическим режимом. Известные методы электронагрева [2] не обеспечивают эффективную работу данной технологии в полевых условиях. Поэтому потребовались разработка и исследование установок индукционного нагрева сварного стыка трубопроводов именно для работы в полевых условиях с быстросъемным гибким индуктором [3] – [6].

Требования, предъявляемые к разработке гибкого индуктора:

- 1) температура окружающей среды при эксплуатации индуктора от -40 до +50°C;
- 2) питание – трехфазная сеть 380 В. Максимальная потребляемая мощность не более 15 кВт;
- 3) конструкция индуктора должна быть разъемной;

4) датчики температуры управляющего устройства индукционного нагревателя (терморегулятора дискретного действия или ПИД-регулятора) должны находиться на наружной поверхности трубы;

5) индукционный нагреватель должен прогреть участок трубы длиной 250 мм (по 125 мм в обе стороны от сварного шва) в две стадии:

– прогрев до $100\pm 5^\circ\text{C}$ не более 3 минут и выдержка при этой температуре 3 минуты;

– после $100\pm 5^\circ\text{C}$ прогрев до $145\pm 5^\circ\text{C}$ не более чем за 5 минут.

6) разница показаний температур на внутренней поверхности трубы в точках Т1, Т2, Т3, Т4, Т5 и Т6 (как показано на рис.1) не должна превышать 5°C при средней температуре 145°C в течение 20 минут после выхода на режим;

7) максимальная температура на наружной поверхности труб на расстоянии 200 мм от сварного шва в обе стороны не должна превышать 100°C .

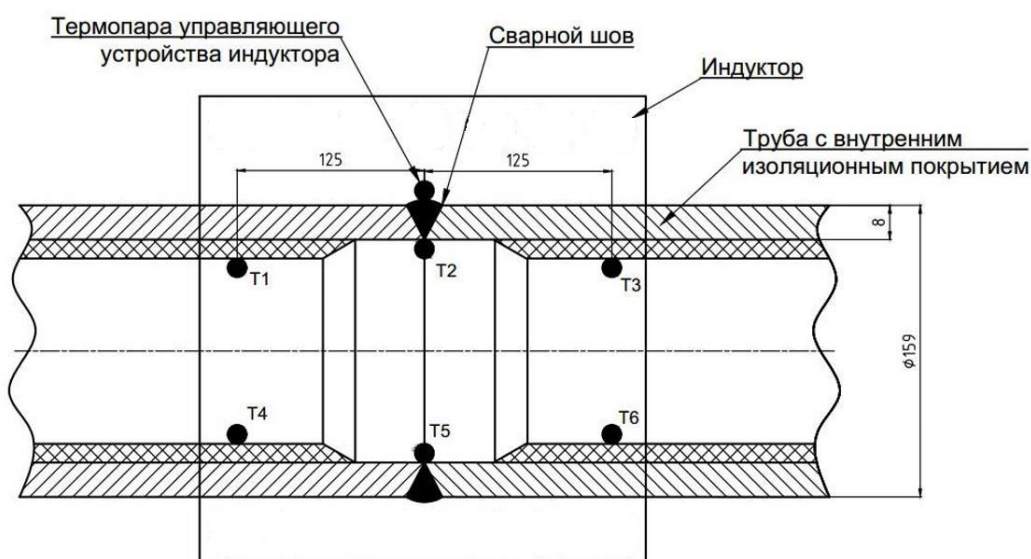


Рис. 1. Конструктивная схема расположения индуктора и точек контроля температуры

Предварительно для определения возможности обеспечения заданных температурных режимов было проведено моделирование тепловых процессов и исследовано распределение температуры вдоль состыкованных трубопроводов с использованием пакета COMSOL Multiphysics [7] – [9]. В мастере создания моделей поэтапно была определена расчетная область модели, введены геометрические параметры модели, выбраны материалы для каждого объекта геометрии, выбрана физика Heat Transfer, а также необходимый вид исследования (Temperature).

Исходные данные для моделирования и расчета тепловых процессов следующие: коэффициент теплопередачи в окружающую среду $25 \text{ Вт/м}^2\text{C}$, что соответствует установке нагревателя на открытом воздухе. Мощность нагревателя с гибким индуктором – 3000 Вт. Размеры компонентов, составляющих модель, соответствуют техническому заданию.

В результате моделирования тепловых процессов в теплоизолированном участке стыка двух трубопроводов с использованием пакета COMSOL Multiphysics получены следующие результаты (рис. 2, рис. 3).

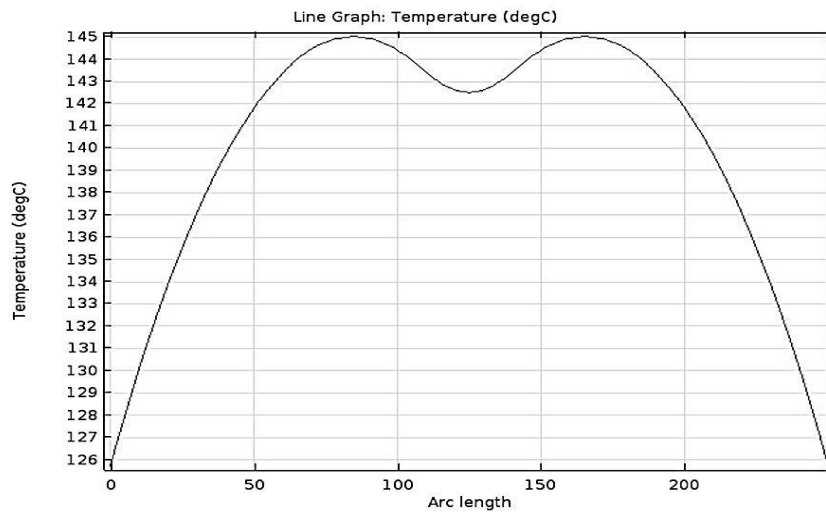


Рис. 2. Распределение температуры вдоль участка 250 мм, мощность стабилизирована, время нагрева 28мин

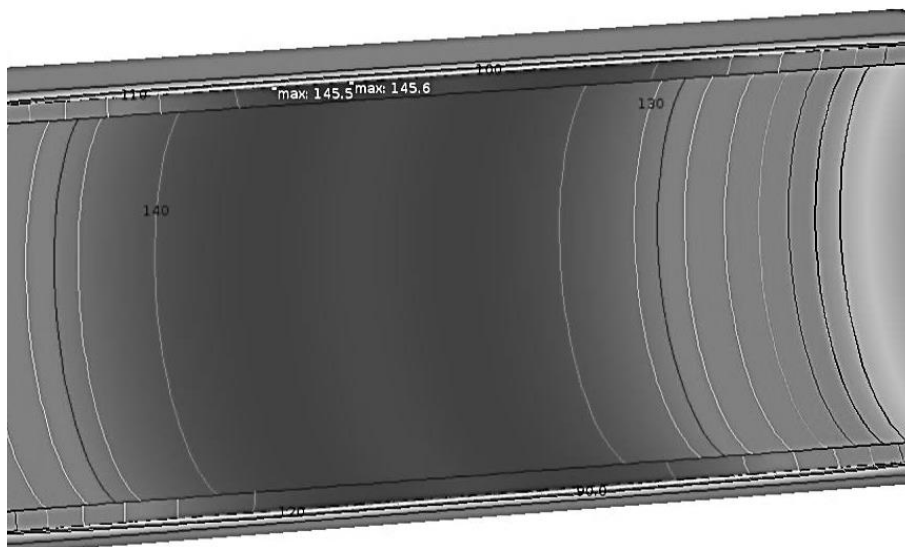


Рис. 3. Термограмма по окончанию нагрева

По результатам моделирования можно сделать следующий вывод – разница температур по окончанию первого периода нагрева достигает 14°C, во время второго 19°C.

Поскольку моделирование показало возможность обеспечения заданных условий нагрева, были разработаны требования [10, 11] и техническое задание на проектирование индуктора и индукционного нагревателя для нагрева сварного стыка.



Рис. 4. Индукционный нагреватель с гибким индуктором

Разработанный индукционный нагреватель для нагрева сварных стыков (рис. 4) применяется для предварительного индукционного нагрева и термообработки сварочного стыка трубопроводов различного диаметра (от 273 мм, представленного на фото, до 1420 мм), сварочных стыков объектов любой формы, изоляции термоусаживающимися манжетами и индукционного нагрева металлов различного технологического назначения. Состоит из корпуса и плоского гибкого индуктора с теплоизоляционной съемной защитой, который устанавливается на объект при помощи быстромонтируемого встроенного крепежа [12]. Схемотехника индукционного нагревателя обеспечивает минимальные потери в полупроводниковых ключах силового преобразователя, выполненного на основе квазирезонансных схем [13], что позволило значительно снизить массогабаритные показатели устройства. Важной отличительной особенностью нагревателей является обеспечение равномерного нагрева стыков и манжет, встроенный автоматический контроль температуры, наличие индикации окончания нагрева, возможность нагрева поверх теплоизоляции, высокая степень защиты, позволяющая работать в любых атмосферных условиях. В процессе эксплуатации износу подвержена только легко заменяемая теплоизоляционная защита, что определяет низкие эксплуатационные затраты.

При проведении экспериментальных исследований были использованы термопары типа ТХК (L) [14], закрепленные в заданных точках (в соответствии с рис. 1) с помощью импульсной сварки. Для исключения перерегулирования температуры и более плавного выхода на заданный режим нагрева стыка трубопроводов был применен ПИД регулятор (настройки постоянных времени регулятора были подобраны экспериментальным путем для получения наиболее приемлемых графиков температуры при выходе на заданный режим нагрева с заданными показателями качества регулирования).

На рис. 7 представлен полученный график температуры нагрева внутренней поверхности трубы в средней плоскости и на расстоянии 120 мм от нее в обе стороны по верхней и нижней образующим при следующих

температурах нагрева наружной поверхности патрубка в средней плоскости, равной 155°C. Наружный диаметр патрубка 159 мм, толщина стенки 8 мм.



Рис. 5. Экспериментальная зависимость изменения температуры в местах расположения датчиков (см. рис.1) от времени нагрева при выходе на режим нагрева

Как видно из рис. 5, при температуре нагрева наружной поверхности в средней плоскости 155°C температура нагрева внутренней поверхности в средней плоскости и на расстояниях 120 мм от нее в обе стороны по верхней и нижней образующим и между образующими в одной и той же плоскости отличается не более 4°C, что соответствует допустимому отклонению от нормы 5°C, приведенной в требованиях к разработке.

Выводы

Проведенные исследования показали, что разработанный гибкий индуктор обеспечил требуемые значение температур внутри и на поверхности трубопровода на заданном расстоянии от сварочного стыка, что полностью соответствует технологии нанесения внутренней антикоррозионной защиты сварного стыка трубопроводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Протасов В. Н., Штырев О. О. Способ Протасова В.Н. противокоррозионной защиты сварного раструбного соединения. - Патент на изобретение RU № 2584016. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации. – Бюл. № 14. Опубликовано: 20.05.2016 г.

2. Фонарев З. И. Электроподогрев трубопроводов, резервуаров и технологического оборудования в нефтяной промышленности. – Л.: Недра, 1984. – 148 с.
3. Yu. A. Nikitin Technology and automation of low-temperature distributed induction heating in the oil and gas industry. Published under licence by IOP Publishing Ltd. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 950 012030, Advanced Problems of Electrotechnology October 1-2, 2020, Yekaterinburg, Russian Federation. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/950/1/012030>
4. Nikitin, Y. A. The Systems Induction Distributed Low Temperature Heating and Their Application in the Oil and Gas Industry. Proceedings - ICOECS 2020: 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, 2020, 9278518. <https://doi.org/10.1109/icoecs50468.2020.9278518>
5. Никитин Ю. А. Применение индукционного подогрева обратного клапана устьевого фонтанной арматуры нефтегазовых скважин /Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов V Международной научно-технической конференции. – Уфа: Изд-во: ООО «Научно-инженерный центр «Энергодиагностика», 2020. – С.211-219.
6. Макулов И. А., Никитин Ю. А. Оборудование и особенности применения индукционного нагрева в нефтегазовой промышленности. – М.: Промышленный электрообогрев и электроотопление. 2014, № 3. С. 50-53.
7. Прахт В. А., Дмитриевский В. А., Сарапулов Ф. Н. Моделирование тепловых и электромагнитных процессов в электротехнических установках. Программа Comsol: Учебное пособие / Под общ. ред. Ф.Н. Сарапулова – М.: Издательство «Спутник +», 2011. – 158 с.
8. Никитин Ю. А. Моделирование и расчет системы индуктор – насосно-компрессорная труба. – В сборнике: Станкостроение и инновационное машиностроение. проблемы и точки роста: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Уфа, 2018. С. 170-175.
9. Nikitin, Y.A., Osipov, V. V. Research of the Temperature in the Check Valve Zone during Local Induction Heating of Pipeline Valves in the Comsol Multiphysics Application Package. Proceedings - ICOECS 2020: 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, 2020, 9278427.. <https://doi.org/10.1109/icoecs50468.2020.9278427>
10. Nikitin, Y. A., Osipov, V. V. Induction Heaters for of the Check Valve of the Wellhead Fountain Fittings of Oil and Gas Wells. Proceedings - ICOECS 2020: 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, 2020, 9278421. <https://doi.org/10.1109/icoecs50468.2020.9278421>
11. Никитин Ю. А., Осипов В. В., Никитин А. Ю. Обогреватель трубопроводной арматуры, трубопроводов и емкостей. – Патент на полезную модель RU № 165070. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации. – Бюл. №28. Опубликовано: 10.10.2016 г.
12. Никитин Ю. А., Осипов В. В., Никитин А. Ю. Обогреватель трубопроводной арматуры. – Патент на полезную модель RU № 158219. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации. – Бюл. №36. Опубликовано: 27.12.2015 г.
13. Никитин Ю. А. Транзисторные преобразователи постоянного напряжения класса Е.//Канд. диссертация. – МАИ, 1990. – 225 с.
14. Никитин Ю. А. Технические средства систем автоматизации и управления качеством: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Автоматизированные технологии и производства" / Ю. А. Никитин; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования Уфимский гос. авиационный технический ун-т. Уфа, 2008. – 223 с.

Гайнуллин И. И.

Gainullin I. I.

gainullin17@mail.ru

Фецак С. И.

Fetsak S. I.

format_invest@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MATLAB

SIMULATION IN THE MATLAB SOFTWARE ENVIRONMENT

***Аннотация:** В данной статье подробно расписан пример имитационного исследования шпиндель-мотора в программе MATLAB.*

***Abstract:** This article describes in detail an example of a simulation study of a spindle motor in the MATLAB program.*

***Ключевые слова:** Имитационные исследования, шпиндель-мотор, станочное оборудование, переходный процесс.*

***Keywords:** Simulation studies, motor spindle, machine tool equipment, transition process.*

Современное машиностроение требует от специалистов знание во всех областях машиностроения для комплексного подхода при разработке и исследовании различных современных станочных комплексов и приспособлений. Основной целью при разработке и исследовании являться главным образом доказательство превосходства нового технологического оборудования над старым, вследствие оптимизации или использования, новых материалов и новых методов при проектировании. Кроме того, современное машиностроение развивается довольно быстро. Например, высокоскоростная обработка заставляет анализировать на этапе проектировании работу всех компонентов технологической системы [1]. Так же стоит учитывать, что современная технологическая система комплектуется цифровым двойником, который «живет» с ней, от начала проектирования до утилизации оборудования. Это облегчает решение задачи по поиску неисправностей, но в свою очередь затрудняет исследование нового оборудования. Однако в данном случае можно использовать различные методы моделирования, благодаря чему получим не только сокращение времени разработки станочной системы, но и повышение её точности. Кроме того, любое производство нацелено на повышение экономических показателей.

С помощью имитационного моделирования можно решить несколько практических задач, а именно нахождение возмущающих воздействий, установка регулирующих параметров и уточнения решений, полученных ранее. В основе имитационного моделирования лежит математическое описание физической модели, благодаря взаимосвязи физических процессов, что в свою

очередь дает нам возможность проведения анализа свойств модели при действии различного рода возмущений и воздействий управляющих команд [2].

Имитационное моделирование можно условно разделить на 2 части: математический расчет и компьютерный анализ. Для начала математического расчета выбираются исходные данные физической модели (мотор-шпиндель, коробка передач, ременная передача), подходящие под заданные условия работы станочного оборудования. После проверки и удостоверения в том, что заданные параметры обеспечиваются, необходимо определить передаточные функции звеньев. На данном этапе математический расчет заканчивается и начинается компьютерный анализ. После этого в программной среде проводится сборка схемы с имеющимися передаточными функциями и определяется устойчивость функции.

Рассмотрим пример моделирования шпиндель-мотора. В нашем случае математическая часть уже была выполнена и передаточные звенья найдены, благодаря чему в программной среде Matlab мы собираем схему со всеми исходными показателями (рис. 1).

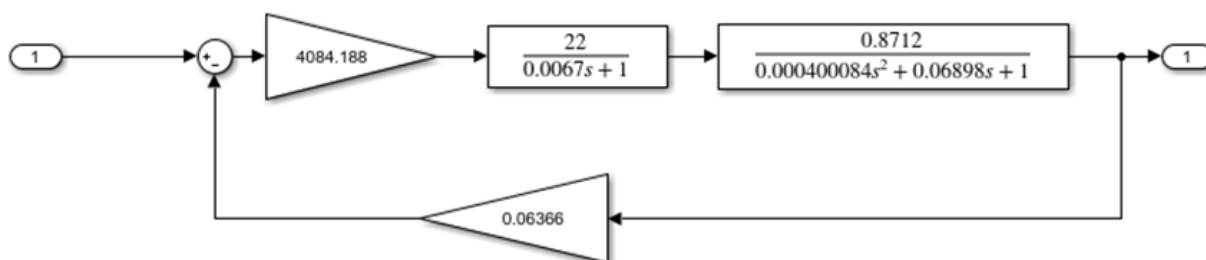


Рис. 1. Исходная схема

Использование исходной системы невозможно, так как после запуска переходный процесс оказался неустойчивым вследствие чего такая система признается неработоспособной. Для работоспособности системы необходимо добавить ПИД-регулятор [3]. Кроме того, система должна быть не только устойчивой, но и иметь требуемые показатели качества систем, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Требуемые показатели качества

Показатели качества	Значения
Перерегулирование	не более 10%
Время нарастания	не более 0,1-0,3 с
Длительность переходного процесса	не более 0,5-0,7 с.

Для соответствия этим требованиям на схему кроме ПИД-регулятора добавляется блок *Check Step Response Characteristics*, в котором будут заданы требуемые показатели. Подбор коэффициентов будет происходить при помощи использования встроенной библиотеки *Simulink Design Optimization*.

Нахождение ориентировочных коэффициентов в ПИД-регуляторе происходит благодаря оптимизации блока с помощью встроенной функции *tune* (рис. 2).

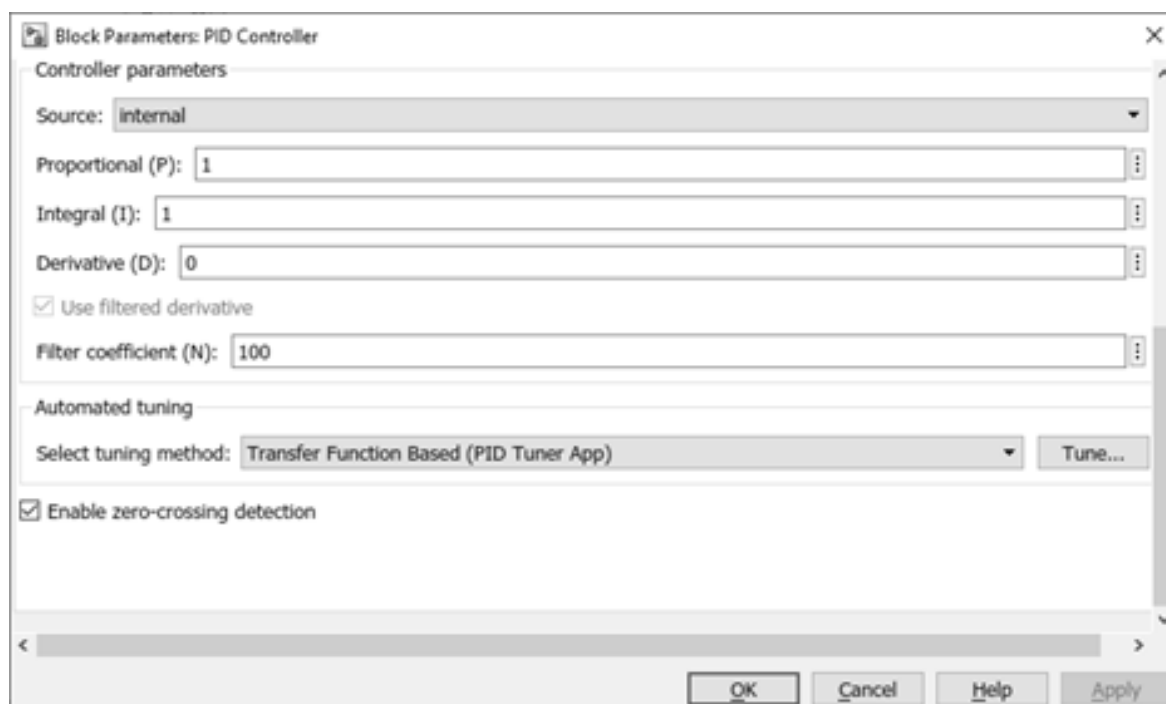


Рис. 2. Окно ввода данных блока ПИД-регулятора

Полученные после оптимизации коэффициенты, приведенные в табл. 2, вписываются в диалоговое окно MATLAB.

Таблица 2

Оптимизированные ориентировочные коэффициенты

P	0,000371
I	22,133038
D	0,007394
N	304,347662

Эти же коэффициенты вписаны в блок ПИД-регулятора. Необходимость записи в диалоговое окно обосновывается тем, что далее функция *Response Optimization* блока *Check Step Response Characteristics* будет напрямую обращаться к имеющимся значениям для возможности оптимизации системы под требуемые параметры. Для запуска алгоритма подбора необходимых коэффициентов, в требуемых границах, необходимо воспользоваться меню *Design Variables Set* расположенным в диалоговом окне *Response Optimization* (рис. 3).

На выходе получаем новые коэффициенты, которые автоматически меняются в блоке ПИД-регулятора (рис. 4).

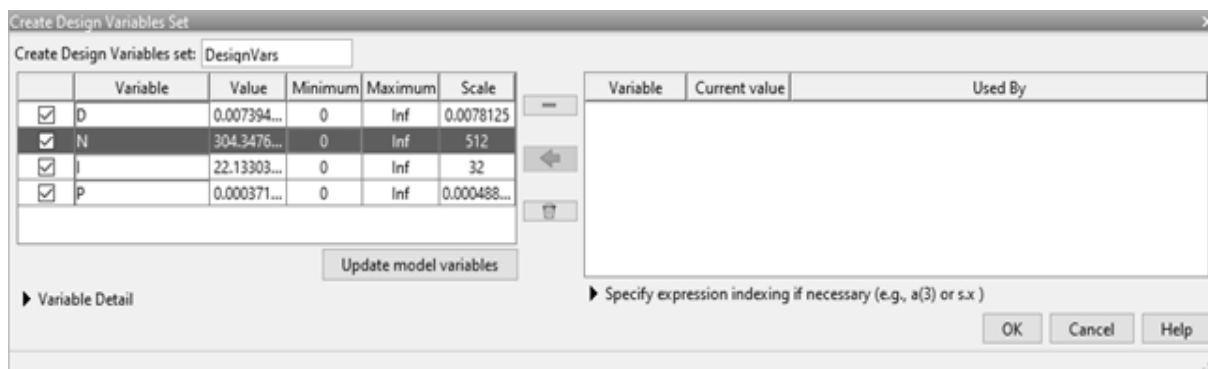


Рис. 3. Меню выбора оптимизируемых коэффициентов

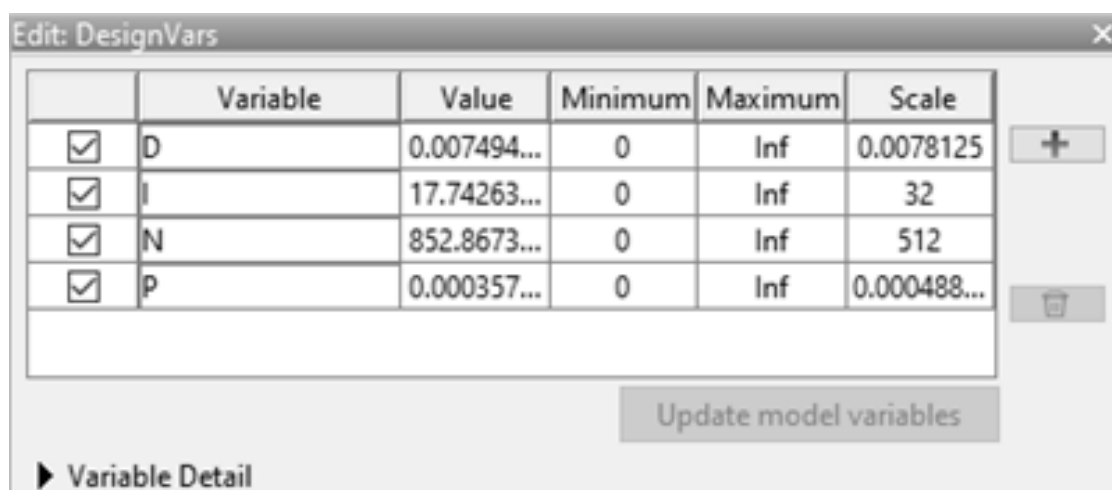


Рис. 4. Полученные после оптимизации значения

Данные коэффициенты обеспечивают получение необходимых показателей качества, что в свою очередь позволяют получить устойчивый и подходящий под заданные граничные условия график переходного процесса (рис. 5).

Как видно из рис. 5, переходный процесс после оптимизации имеет необходимые показатели качества, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Значения полученные после оптимизации

Показатели качества	Граничные условия	Получение значения
Перерегулирование	не более 10 %.	2,51 %.
Время нарастания	не более 0,1-0,3 с	0,062 с.
Длительность переходного процесса	не более 0,5-0,7 с.	0,183 с.

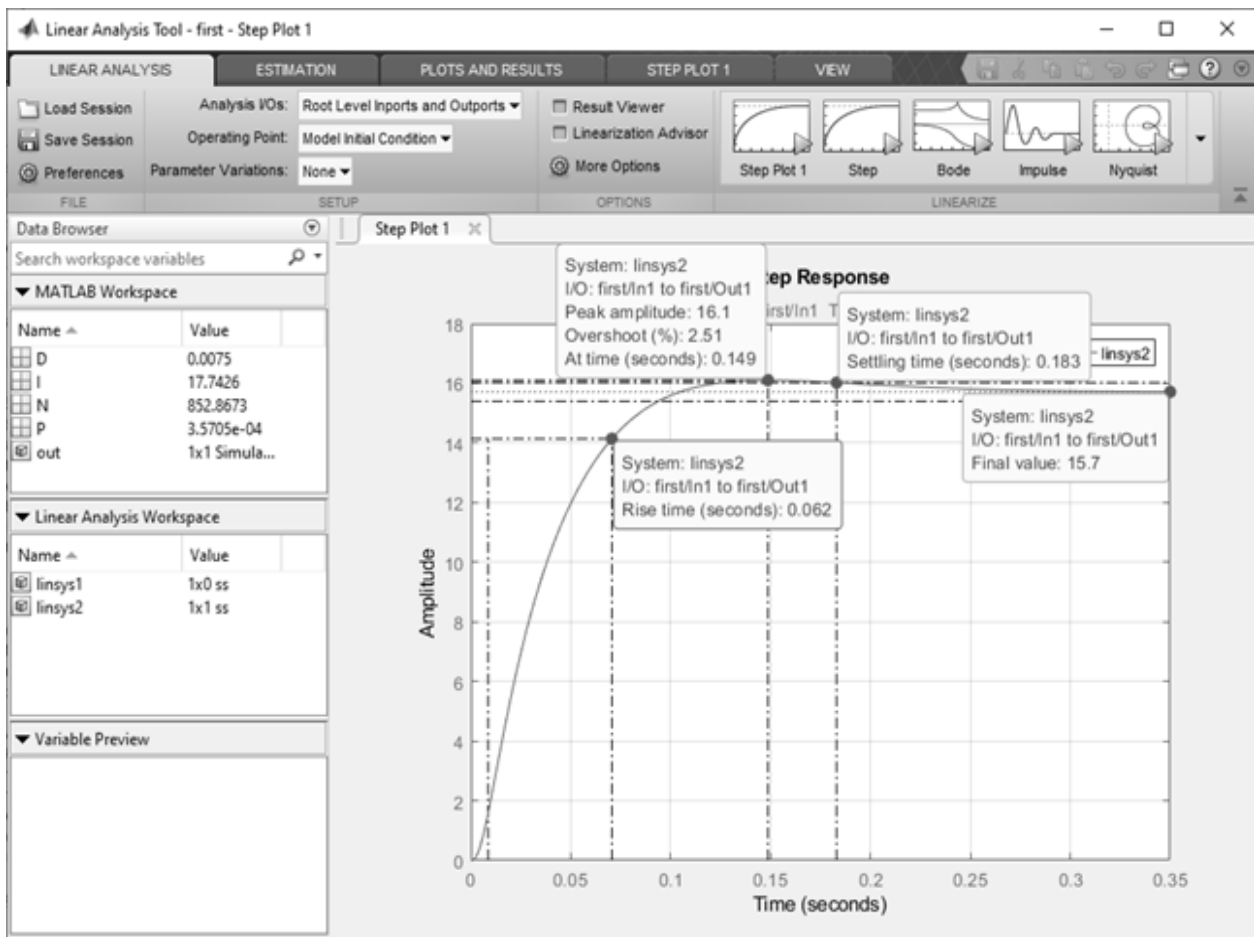


Рис. 5. Переходный процесс моделирования работы шпиндель-мотора

Выводы

Данное моделирование было приведено лишь как пример имитационного моделирования в среде MATLAB. Однако оно дает понять, что сегодня цифровая модель позволяет сократить время и себестоимость изделия за счет исключения этапа макетирования или постройки реальных (физических) моделей до вывода станочной системы на уровень опытного образца. Ведь исправить ошибки в математических расчётах, благодаря имитационному моделированию, гораздо проще и дешевле, чем выпускать не только сырую, но и не безопасную систему на рынок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушуев В. В., Кузнецов А. П., Молодцов В. В. Инновации в проектировании технологического оборудования [Текст]; Инновации №8, 2015, – 6 с.
2. Решмин Б. И. Имитационное моделирование и системы управления. Учебно-практическое пособие – Инфра-Инженерия, 2016 – 74 с.
3. Дьяконов В. П. Matlab R2006/2007/2008. Simulink 5/6/7. Основы применения. СОЛОН-Пресс, 2010. – 810 с.

Мунасыпов Р. А.

Munasypov R. A.

rust40@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

Юрасова Н. В.

Yurasova N.V.

elan_ugatu@mail.ru

Некрасова М. Ю.

Nekrasova M. Y.

Titm.NM@mail.ru

Филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Ишимбай

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ ОГРАНИЧЕНИЯ ХОДА ШТОКА ЦИЛИНДРА НА ДИНАМИКУ ПОВОРОТОВ ДВУХЗВЕННОГО ГУСЕНИЧНОГО ТРАНСПОРТЕРА «ВИТЯЗЬ»

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF NON-LINEARITIES OF THE CYLINDER ROD STROKE RESTRICTION ON THE DYNAMICS OF TURNS OF THE TWO-LINK TRACKED CONVEYOR «VITYAZ»

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния нелинейных параметров ограничения хода аксиально-поршневого насоса на динамику двухзвенного гусеничного транспортера «Витязь».

Abstract. The results of the study of the influence of nonlinear parameters of the axial-piston pump stroke limitation on the dynamics of the two-link tracked conveyor "Vityaz" are presented.

Ключевые слова: Динамика поворотов, нелинейности системы, уравнения движения, аксиально-поршневой насос; ограничение хода.

Keywords: Dynamics of turns, the nonlinearity of the system, the equations of motion, an axial piston pump; travel limitation.

Двухзвенный гусеничный транспортер «Витязь», как сложная динамическая система, имеющая нелинейности вполне может входить в состояние автоколебаний. Поэтому важным является исследование процессов, которые связаны с наличием нелинейностей в объекте управления и исследования. Данная работа посвящена исследованию влияния нелинейностей модели поворотно-сцепного устройства двухзвенного гусеничного транспортера «Витязь». Разработана модель устройства с учетом нелинейности «ограничения хода» штока аксиально-поршневого насоса [1].

Ранее авторы уже рассматривали подобные нелинейности в рулевых приводах. Однако влияние нелинейностей на рулевой привод с электромеханической обратной связью не были исследованы [3].

Данная нелинейность представляет собой ограничение хода по положению хода шайбы в виду конструктивных особенностей. Особенность заключается в

том, что координата положения шайбы может иметь значения только в диапазоне от $-l_{\text{пр}}$ до $l_{\text{пр}}$, где $l_{\text{пр}}$ – полудлина хода штока.

Данную нелинейность можно учесть с помощью алгоритмического определения скорости движения штока и некоторого коэффициента «с» в уравнении, рассмотренного в предыдущих работах [2].

$$m_y \frac{dx_y^2}{dt^2} + \kappa_{\text{тпу}} \frac{dx_y}{dt} = F_y (p_{y1} - p_{y2}) \cdot c, \quad (1)$$

$$\text{где } v_y = \begin{cases} v_y, & \text{если } (-l_{\text{пр}} \leq x_y \leq l_{\text{пр}}); \\ v_y, & \text{если } (x_y \geq l_{\text{пр}}) \text{ и } (v_y < 0); \\ v_y, & \text{если } (x_y \leq -l_{\text{пр}}) \text{ и } (v_y > 0); \\ 0, & \text{в иных случаях.} \end{cases}$$

$$c = \begin{cases} 1, & \text{если } (-l_{\text{пр}} \leq x_y \leq l_{\text{пр}}); \\ 1, & \text{если } (x_y \geq l_{\text{пр}}) \text{ и } (p_{y1} < p_{y2}); \\ 1, & \text{если } (x_y \leq -l_{\text{пр}}) \text{ и } (p_{y1} > p_{y2}); \\ 0, & \text{в иных случаях.} \end{cases}$$

Данные условные переходы ограничивают координату штока шайбы насоса в предельном значении $l_{\text{пр}}$, и скорость штока «обнуляется» при достижении штоком значения $l_{\text{пр}}$ за счет коэффициента «с». При изменении знака разности давлений в полостях цилиндра, увеличение значения скорости начинается с нуля.

На рис. 1-4 представлены результаты вычислительного эксперимента. Для анализа сравниваются линейная модель объекта (кривая 1) с моделью, в которой учтены нелинейности «ограничение хода» (кривая 2). Учет нелинейности типа «ограничение хода» привносит уменьшение коэффициента передачи относительно линейной системы.

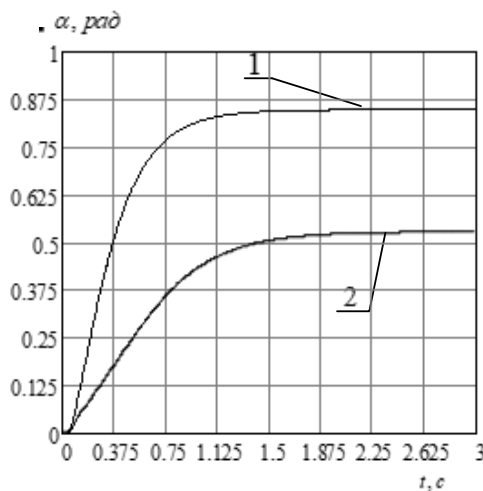


Рис. 1. Угловое положение руля

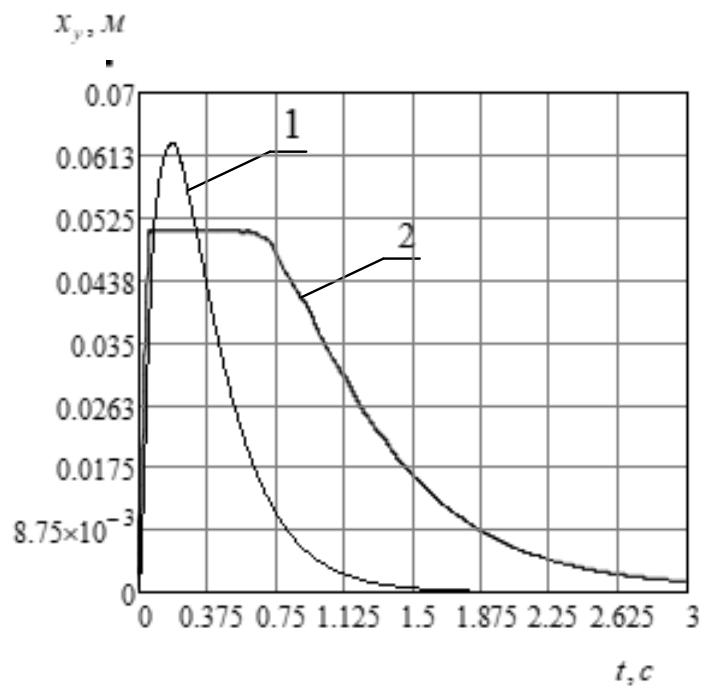


Рис. 2. Положение штока аксиально-поршневого насоса

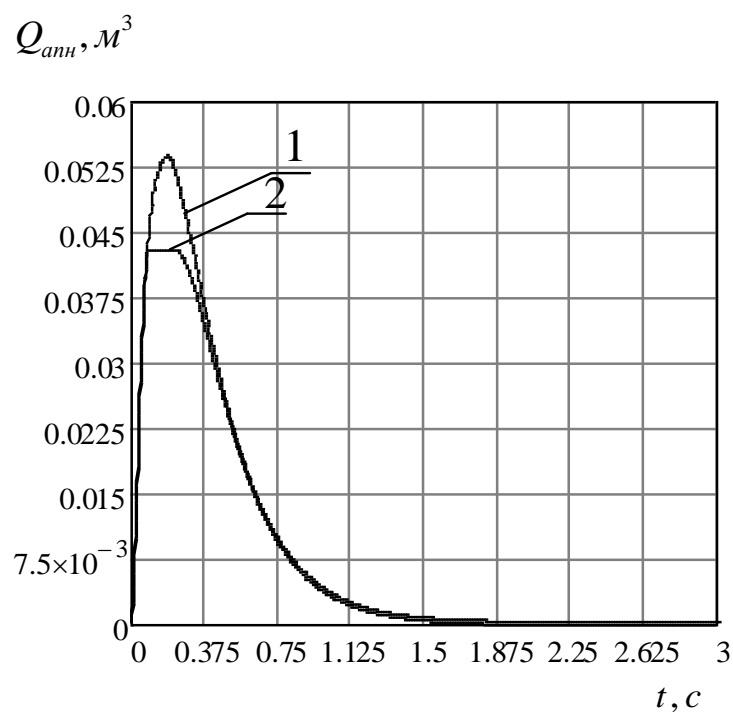


Рис. 3. Подача силового насоса

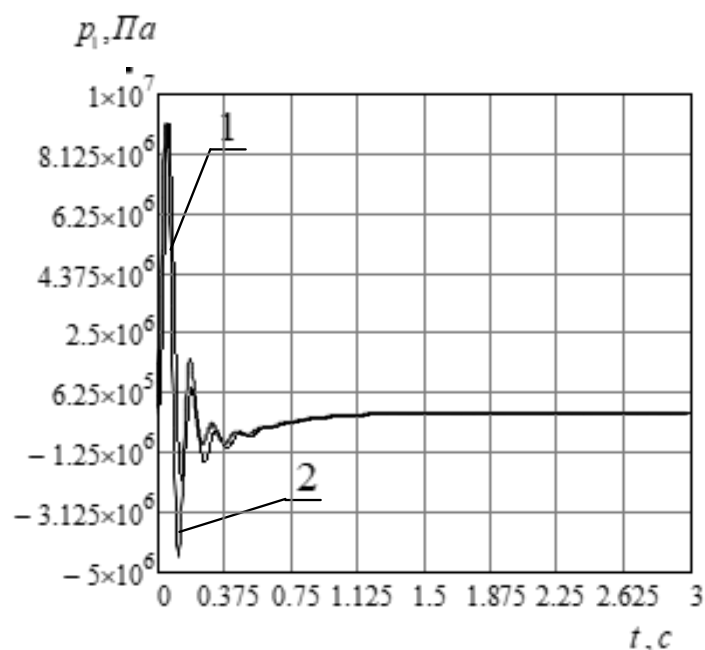


Рис. 4. Давление в нагнетающей полости

Учет нелинейной подачи АПН на 40 % уменьшает общий коэффициент передачи и увеличивает колебательность параметра давления в гидравлической нагнетательной полости.

Выводы

При учете всех нелинейностей, модель выдает кривые изменения переменных системы, характерные для работы рулевого механизма с электрической обратной связью. Это позволяет предположить, что разработанные модели могут служить основой для создания инженерной методики расчета автоматического рулевого механизма ДГТ «Витязь» с учетом нелинейностей системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дистанционное управление двухзвенным гусеничным транспортером «Витязь» // материалы Всероссийской научно-технической конференция «Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста». – Уфа: УГАТУ, 2020. – С. 74-77.
2. Ильин А. И., Сайфеев Т. Р., Целищев В. А., Хуснутдинов Д. З., Яруллин Ч. А. Математическое моделирование рулевого механизма двухзвенного транспортера «Витязь» с гидравлической обратной связью. Вестник УГАТУ. 2013Т. 17, №1 (54). С. 73–78.
3. Хуснутдинов Д. З., Яруллин, Ч. А., Сравнительный анализ гидрофицированных рулевых приводов с гидравлической и электрической обратной связью применительно к двухзвенным гусеничным транспортерам «Витязь»// Научные технологии в машиностроении: материалы научно-практической конференции. – Уфа: УГАТУ, 2014. – С. 120.

Мунасыпов Р. А.

Munasypov R. A.

rust40@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

Юрасова Н. В.

Yurasova N. V.

elan_ugatu@mail.ru

Некрасова М. Ю.

Nekrasova M. Y.

Titm.NM@mail.ru

Филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Ишимбай

МОДЕЛИРОВАНИЕ РУЛЕВОГО МЕХАНИЗМА ДВУХЗВЕННОГО ГУСЕНИЧНОГО ТРАНСПОРТЕРА «ВИТЯЗЬ», КАК НЕЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

SIMULATION OF THE STEERING MECHANISM OF THE TWO-LINK TRACKED «VITYAZ» TRANSPORTER AS A NONLINEAR CONTROL OBJECT

Аннотация. Представлены результаты моделирования рулевого механизма двухзвенного гусеничного транспортера «Витязь».

Abstract. The results of the study of the influence of nonlinear parameters of the axial-piston pump on the dynamics of the two-link tracked conveyor are presented «Vityaz».

Ключевые слова: динамика поворотов, нелинейности системы, уравнения движения, аксиально-поршневой насос; поворотнo-сцепное устройство.

Keywords: dynamics of turns, nonlinearity of the system, equations of motion, axial piston pump; swivel hitch.

Вездеходы «Витязь» отлично зарекомендовавшие себя в качестве единственного транспортного средства в условиях сплошного бездорожья, а также проявили себя в условиях российского Севера, Сибири, Арктики и Антарктики, в пустынях Средней Азии и Аравии, при высокой влажности тропиков и в разреженном воздухе высокогорий.

Особенностью управления двухзвенного гусеничного транспортера (ДГТ) «Витязь» является то, что поворот гусеничного вездехода осуществляется изменением углового положения переднего и заднего звеньев относительно друг друга с помощью силовых гидроцилиндров. Руль управления транспортером механически связан с золотником, питающим жидкостью рабочие силовые цилиндры, под действием которых совершается поворот звеньев относительно друг друга. При этом изменением степени открытия золотника управляющего гидрораспределителя можно управлять только скоростью изменения углового положения. При любой степени открытия золотника движение поршней

силовых цилиндров будет продолжаться до «упора». Для фиксации угла поворота руль машины необходимо вернуть в начальное положение. [1, 2, 3].

В описанных работах рассматриваются линейные модели объекта исследования или нелинейные модели для рулевого устройства с гидравлической обратной связью. Нелинейные модели для гидросистем рулевых устройств для двухзвенных машин в науке и технике на данный момент не известны. Описание поворотного-сцепного устройства (ПСУ) (рис. 1) нелинейными уравнениями может быть оправдано при несоответствии линейной модели реальному объекту. Нелинейная модель позволяет учесть геометрические особенности ПСУ и исследовать динамику поворотов при вариации постоянных параметров ПСУ. В связи с геометрическими особенностями ПСУ динамика поворотов системы описывается нестационарными уравнениями. Расчетная схема для получения системы уравнений представлена на рис. 2.



Рис. 1. Поворотное-сцепное устройство

Вращательное движение заднего звена транспортера относительно шарнира происходит под действием силовых цилиндров, которые питаются реверсивным аксиально-поршневым насосом. Напор и направление жидкости АПН управляется электродвигателем постоянного тока через редуктор. Электродвигатель питается от усиливающего устройства. Обратная связь организовывается посредством преобразователя перемещения механически связанного с поворотным-сцепным устройством [4].

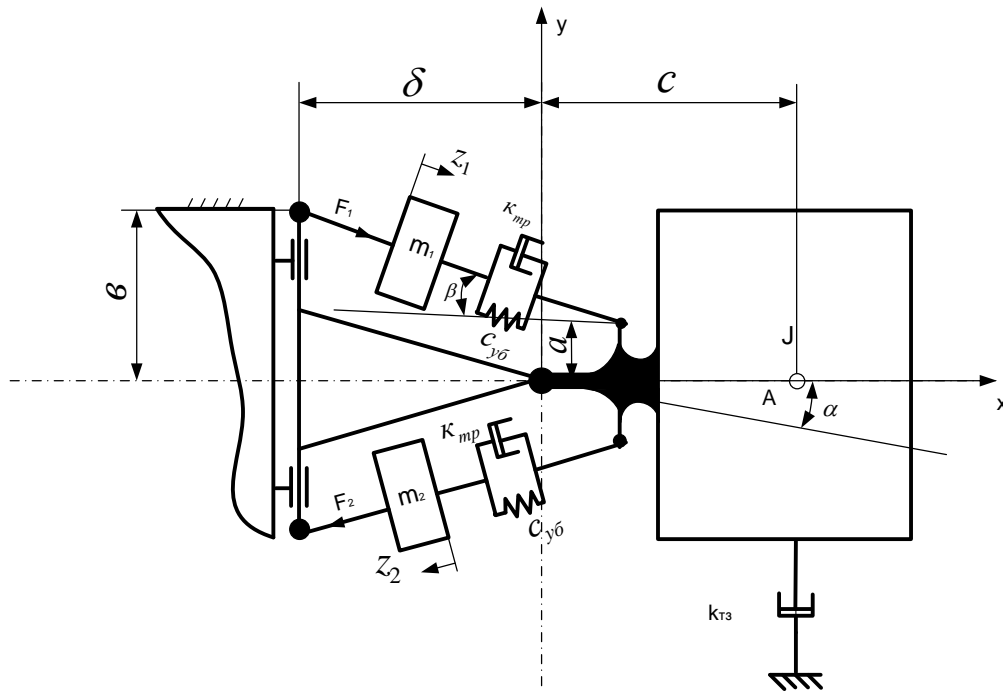


Рис. 2. Расчетная схема ПСУ

Аксиально-поршневой насос подает жидкость через гидравлическую полость, данная жидкость заполняет полости гидравлических цилиндров, соответственно выполняя перемещение штоков в прямом и обратном направлениях, тем самым, выполняя поворот двухзвенного транспортера «Витязь» [2]. Расчетная схема аксиально-поршневого насоса для учета нелинейностей представлена на рис. 3.

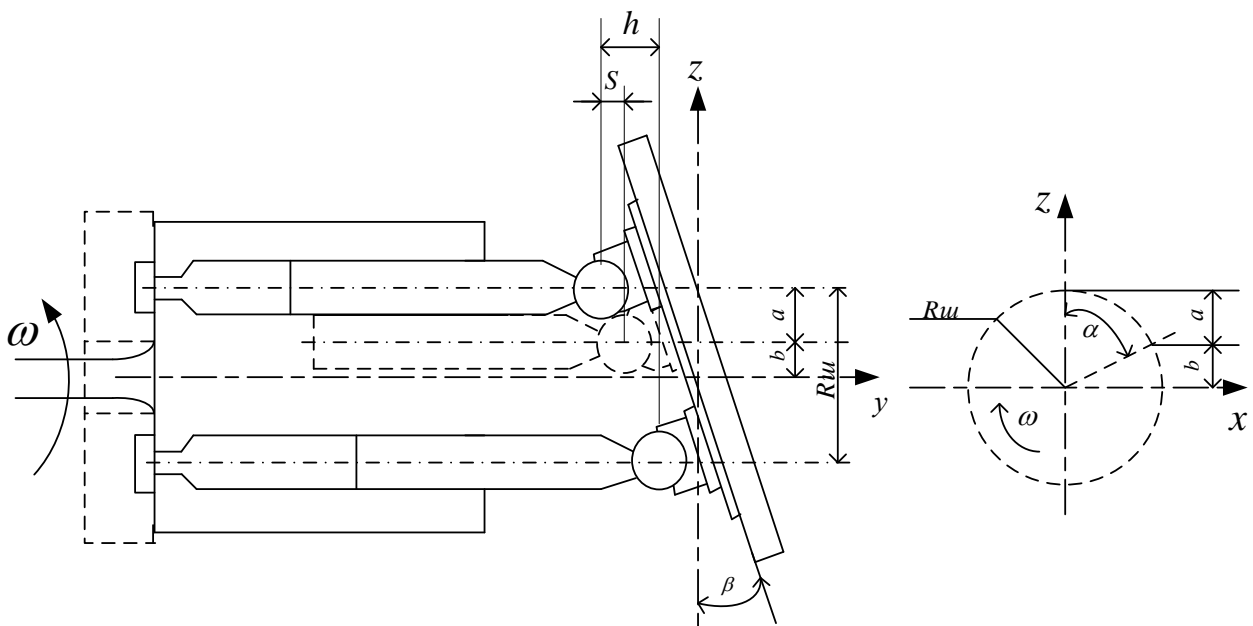


Рис. 3. Расчетная схема аксиально-поршневого насоса

Для получения нелинейной модели уравнения, представленные в работе [3], описывающей движение объекта, добавляются изменения в описание поворотного-сцепного устройства:

– уравнение движения поршней силового цилиндра

$$m \frac{dx_i^2}{dt^2} \cdot l \cos(\beta_0 \pm \alpha) + \kappa_{\text{тр}} \left(l \cdot \frac{dx_i}{dt} - \frac{d\alpha}{dt} \right) \cdot l \cos(\beta_0 \pm \alpha) + c_{\text{y6}} (l \cdot x_i - \alpha) \cdot l \cos(\beta_0 \pm \alpha) = S_{\text{сн}} (p_1 - p_2) \cdot l \cos(\beta_0 \pm \alpha); \quad (1)$$

– уравнение динамики заднего звена транспортера

$$J \frac{d\alpha^2}{dt^2} + \kappa_{\text{тз}} \frac{d\alpha}{dt} = \kappa_{\text{тр}} (l \cos(\beta_0 \pm \alpha) \cdot \frac{dx_1}{dt} - \frac{d\alpha}{dt}) + c_{\text{y6}} (l \cos(\beta_0 \pm \alpha) \cdot x_1 - \alpha) + \kappa_{\text{тр}} (l \cos(\beta_0 \pm \alpha) \cdot \frac{dx_2}{dt} - \frac{d\alpha}{dt}) + c_{\text{y6}} (l \cos(\beta_0 \pm \alpha) \cdot x_2 - \alpha), \quad (2)$$

где m – масса поршня;

c_{y6} – коэффициент упругости поворотного-сцепного устройства;

$\kappa_{\text{тр}}$ – коэффициент трения;

x_i – перемещение штоков цилиндров управления, $i=1, 2$;

J – момент инерции звена транспортера;

$\kappa_{\text{тз}}$ – коэффициент трения между транспортером и грунтом.

Общую подачу АПН получаем, суммируя подачи элементарных расходов

$$Q_k = \omega \cdot \frac{\pi d^2 R_p}{4} \text{tg} \beta \sum_{k=1}^{z-1} \sin(\omega t - k\alpha) \quad (3)$$

где Q_k – общая подача насоса;

ω – угловая скорость вала насоса;

d – диаметр поршня;

β – угол наклона шайбы;

m – номер поршня;

α – сдвиг по фазе.

Результаты численных экспериментов представлены на рис. 4-6.

Обозначения на графиках:

1 – для линейной системы;

2 – для модели с учетом нелинейности, связанной с конструкцией ПСУ;

3 – для модели с учетом нелинейного распределения подач плунжерных пар АПН.

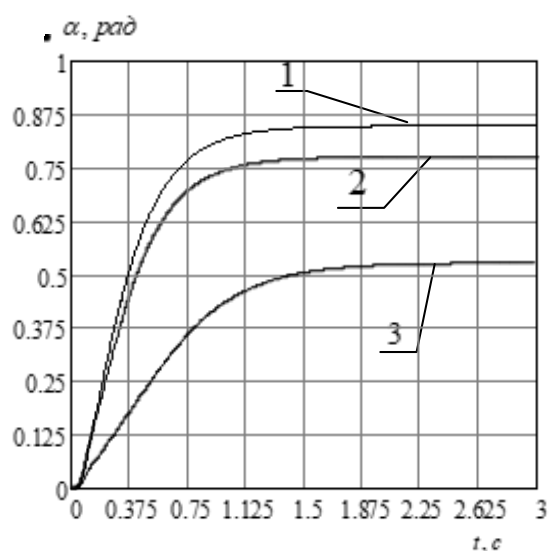


Рис. 4. Угловое положение звеньев друг относительно друга

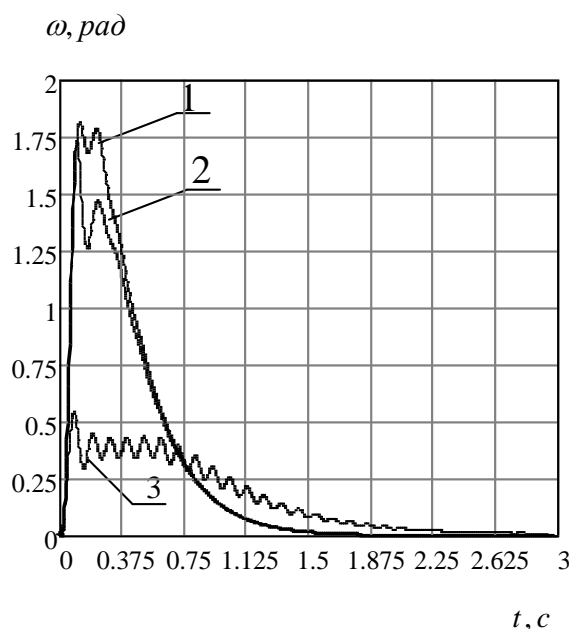


Рис. 5. Угловая скорость движения звеньев друг относительно друга

В результате исследования выявлены влияния нелинейностей на динамику и на возникновение особых режимов работы рулевого механизма транспортера. Учет геометрических особенностей поворотного сцепного устройства уменьшает коэффициент передачи привода (рис. 4, 5). Учет конструкции АПН позволяет воспроизводить колебательные процессы в гидравлической подсистеме привода (рис. 6). При этом эти колебания демпфируются массой звеньев транспортера, что видно из рис. 4.

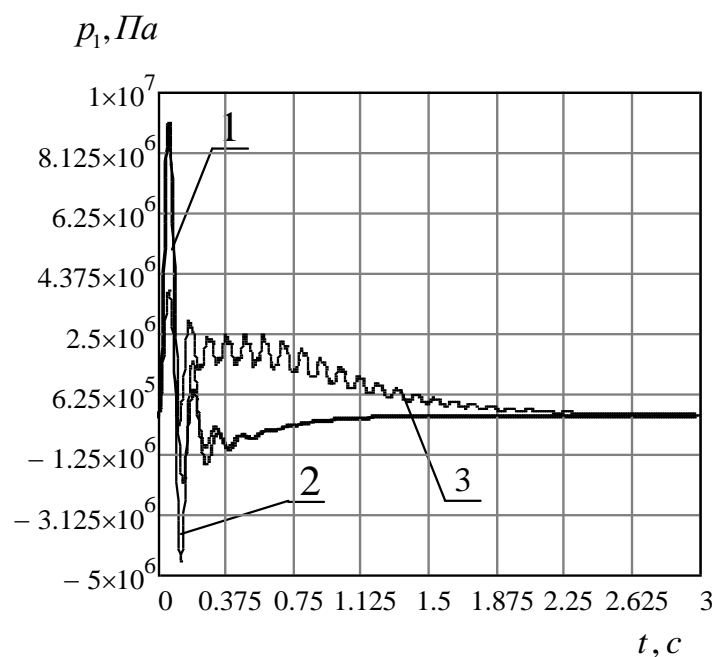


Рис. 6. Давление в нагнетающей полости

Выводы

Таким образом, в данной работе получена нелинейная модель привода рулевого устройства, как объекта управления. Результатам работы показали, что процессы, происходящие в гидравлическом приводе, могут быть улучшены. Разработанная модель является эффективным инструментом для исследований объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дистанционное управление двухзвенным гусеничным транспортером «Витязь» // материалы Всероссийской научно-технической конференция «Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста». – Уфа: УГАТУ, 2020. – С. 74-77.
2. Ильин А.И., Целищев В.А., Пугин А.М., Яруллин Ч.А., Сайфеев Т.Р., Хуснутдинов Д.З. Сравнительный анализ нелинейностей математической модели рулевого механизма двухзвенного транспортера «Витязь» с гидравлической обратной связью / Ильин А.И., Целищев В.А., Пугин А.М., Яруллин Ч.А., Сайфеев Т.Р., Хуснутдинов Д.З. // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 4 (56). С. 167–176.
3. Отчет по научно-исследовательской работе «Подвижность». – Ишимбай, 2014. – 249 с.
4. Хуснутдинов Д. З., Яруллин Ч. А. Сравнительный анализ гидрофицированных рулевых приводов с гидравлической и электрической обратной связью применительно к двухзвенным гусеничным транспортерам «Витязь»// Научные технологии в машиностроении: материалы научно-практической конференции (г. Ишимбай, 28-30 мая 2014 г.). Уфа: УГАТУ, 2014. – С. 120.

Коуров Г. Н.
Kourov G. N.
kourov_gn@mail.ru
Река Н. Г.
Reka N. G.
kourova.89@mail.ru
Бикмухаметова Н. П.
Bikmukhametova N. P.
mbikmukhametov@yandex.ru
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический
университет», Уфа
Озеров М. Ю.
Ozerov M. Yu.
9014403649@mail.ru
ЗАО УП «Росводоканал», Уфа

МОДЕЛЬ РЕГУЛЯТОРА, ПОСТРОЕННОГО НА ПРИНЦИПЕ ДРОССЕЛИРОВАНИЯ

MODEL OF THE REGULATOR CONSTRUCTED ON THE PRINCIPLE OF THROTTLEMENT

***Аннотация.** В статье предлагается применение быстродействующих регулируемых запорных устройств для управления расходом жидких и газообразных сред на предприятиях машиностроения. Предложена конструктивная схема регулируемого запорного устройства. Разработана математическая модель, составлена структурная схема, позволяющая использовать регулируемое запорное устройство, основанное на принципе дросселирования, в системах автоматического регулирования расхода жидких или газообразных сред.*

***Annotation.** The article proposes the use of high-speed adjustable shut-off devices for controlling the flow of liquid and gaseous media at mechanical engineering enterprises. A constructive diagram of an adjustable shut-off device is proposed. A mathematical model has been developed, a block diagram has been drawn up that allows the use of an adjustable shut-off device based on the principle of throttling in systems for automatic regulation of the flow of liquid or gaseous media.*

***Ключевые слова:** математическая модель регулятора, принцип дросселирования, структурная схема, динамические свойства звеньев, регулирование расхода жидкости и газа*

***Keywords:** mathematical model of the regulator, principle of throttling, block diagram, dynamic properties of links, regulation of liquid and gas consumption*

В настоящее время на производственных предприятиях машиностроения изготавливаются и используются для регулирования расхода жидких и газообразных сред задвижки с электроприводом.

Главным преимуществом использования задвижки с электроприводом является возможность дистанционного управления её работой и автоматизации

технологического процесса, в котором применяется данное оборудование. По мнению авторов на полностью автоматизированных объектах и производствах с быстродействующим протеканием процессов целесообразнее использование регулирующих устройств и запорной арматуры с электромагнитным приводом, так как запорная аппаратура с электроприводом обладает сравнительно большой инерционностью.

При построении системы автоматического регулирования необходимо знать динамические свойства всех элементов, входящих в систему. Представленная работа посвящена исследованию динамических свойств регулируемого запорного устройства с электромагнитным приводом. На взгляд авторов такое устройство является наиболее быстродействующим и более безопасным, так как обладает свойством самозапираания.

Конструктивная схема такого устройства представлена на рис. 1.

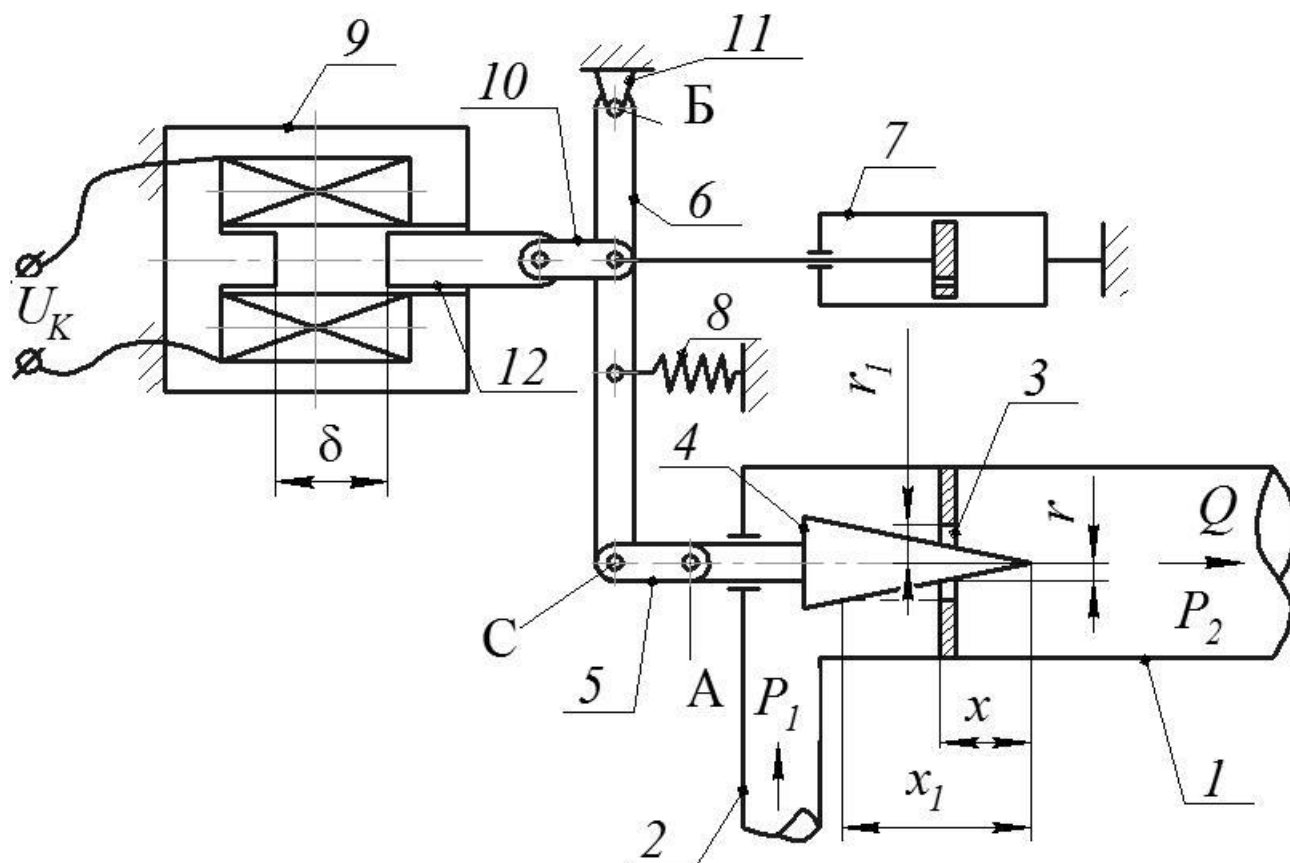


Рис. 1. Конструктивная схема регулируемого запорного устройства

Принцип действия устройства

Регулируемая жидкая или газообразная среда поступает в патрубок 2, проходит через калиброванное отверстие 3 и выходит через патрубок 1. Конус 4 может перемещаться, изменяя площадь сечения калиброванного отверстия. Конус соединён с рычагом 6 через промежуточный элемент 5, компенсирующий отклонение точки С относительно оси перемещения конуса, при перемещении рычага 6. При отсутствии напряжения на электромагните 9 конус становится в запорное положение возвратной пружиной 8. При подаче

управляющего напряжения U_K на катушку электромагнита 9 рычаг 6 устанавливается в заданное положение, при этом действие электромагнита 9 уравнивается пружиной 8. Демпфер 7 устраняет возможность колебательности рычага 6 при взаимодействии электромагнита и пружины. Точка Б рычага 6 с помощью шарнира закреплена на неподвижной опоре 11. Электромагнит соединён с рычагом 6 с помощью элемента 10 при помощи шарнирных соединений, позволяющих компенсировать нелинейность движения точки С относительно оси перемещения якоря электромагнита 12.

δ – текущее значение длины хода электромагнита,

x – текущее значение положения острия конуса,

x_1 – длина полного хода острия конуса,

r_1 – радиус дросселирующего отверстия,

r – радиус сечения конуса в плоскости дросселирующего отверстия,

P_1 – давление на входе,

P_2 – давление на выходе.

Математическое описание элементов системы.

Взаимодействие элементов данного устройства можно представить в виде функциональной схемы. Гипотеза функциональной схемы регулируемого запорного устройства с электромагнитным приводом (дросселирующего устройства с электромагнитным приводом) представлена на рис. 2.

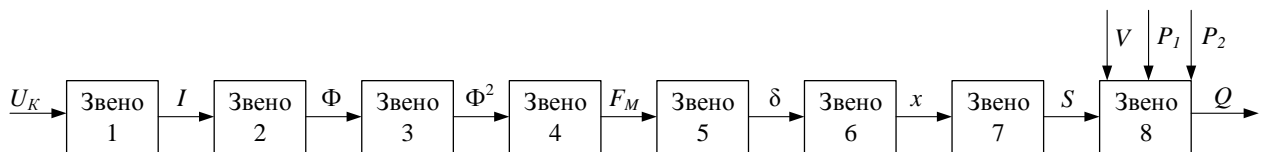


Рис. 2. Гипотеза функциональной схемы регулируемого дросселирующего устройства с электромагнитным приводом

Математическое описание выполняется поэтапно. Рассматриваются динамические свойства отдельных звеньев схемы рис. 2, после чего звенья объединяются в единую систему.

В качестве примера рассматривается процесс регулирования жидкости.

Звено 8

Взаимосвязь между координатами Q , S , V , P представлена звеном 8 (рис. 2).

Математическое выражение связи S и Q может быть представлено уравнениями (1) или (2).

$$Q = S \cdot V, \quad (1)$$

$$Q = (P_1 - P_2) \cdot K_{жс} \cdot S. \quad (2)$$

В операторной форме с использованием оператора Лапласа (p) уравнения (1) и (2) принимают вид (3), (4).

$$Q(p) = S(p) \cdot V(p), \quad (3)$$

$$Q(p) = (P_1 - P_2)(p) \cdot K_{жс} \cdot S(p), \quad (4)$$

где Q – производительность выходного патрубка дросселирующего устройства;
 P_1 и P_2 – давление на входе и выходе дросселирующего устройства;
 $K_{\text{ж}}$ – коэффициент вязкости прокачиваемого продукта;
 S – текущее значение пропускной площади дросселирующего отверстия;
 V – скорость прохождения жидкости по дросселирующему отверстию.

Звено 7

Звено 7 устанавливает связь между параметрами S и x (рис 2).

Математическое выражение связи S и x может быть представлено уравнением (5):

$$S = \pi r_1^2 - \pi \left(\frac{r_1}{x_1} x \right)^2 \quad (5)$$

Обозначим $\frac{r_1}{x_1} = k_1$ – коэффициент, характеризующий параметры конуса.

С учетом этого

$$S = \pi r_1^2 - \pi k_1^2 x^2. \quad (6)$$

Уравнение (6) в операторной форме имеет вид:

$$S(p) = \pi r_1^2 - \pi k_1^2 x^2(p). \quad (7)$$

Звено 6

Зазор δ якоря электромагнита и линейного перемещения конуса связаны звеном 6. Перемещение якоря электромагнита передается через промежуточный элемент 10 на рычаг 6, промежуточный элемент 5 на конус 4 (рис. 1). Коэффициент передачи этой системы определяется:

$$\frac{\Delta x}{\Delta \delta} = K_6. \quad (8)$$

Звено 6 можно считать безынерционным.

Звено 5

Сила магнита F_M уравновешивается силой действия пружины $F_{\text{ПР}}$, силой трения подвижных частей $F_{\text{ТР}}$ и динамической составляющей перемещающихся частей F_D :

$$F_M = F_{\text{ПР}} + F_{\text{ТР}} + F_D; \quad (9)$$

$$F_{\text{ПР}} = C_{\text{ПР}} \cdot K_{\text{РП}} \cdot \delta, \quad (10)$$

где $C_{\text{ПР}}$ – жесткость пружины,

$K_{\text{РП}}$ – коэффициент передачи рычага пружины.

$$F_D = m \frac{d^2 \delta}{dt^2}, \quad (11)$$

где m – масса всех перемещающихся частей, приведенная к якорю электромагнита.

Таким образом:

$$F_M = F_{\text{ТР}} + C_{\text{ПР}} \cdot K_{\text{РП}} \cdot \delta + m \frac{d^2 \delta}{dt^2}. \quad (12)$$

В операторной форме

$$F_M(p) = F_{ТР} + C_{ПР} \cdot K_{РП} \cdot \delta(p) + m \cdot p^2 \delta(p). \quad (13)$$

Звено 5 представляет собой консервативное звено второго порядка, так как в нем нет демпфирования. Поэтому для устранения колебаний в конструкции (рис. 1) установлен демпфер 7.

В случае применения демпфера уравнение (9) принимает вид 14:

$$F_M = F_{ПР} + F_{ТР} + F_D + F_{ДМ} \quad (14)$$

где $F_{ДМ} = K_{РД} K_V \frac{d\delta}{dt}$,

$F_{ДМ}$ – сила действия демпфера,

K_V – коэффициент вязкости жидкости демпфера,

$K_{РД}$ – коэффициент рычага демпфера.

В операторной форме:

$$F_M(p) = F_{ТР} + C_{ПР} \cdot K_{РП} \cdot \delta(p) + K_{РД} K_V p \delta(p) + m \cdot p^2 \delta(p) \quad (15)$$

В этом случае передаточная функция звена 5

$$W_5(p) = \frac{\delta(p)}{F_M(p) - F_{ТР}} = \frac{K_6}{T_6^2 p^2 + 2\xi T_6 p + 1}, \quad (16)$$

где $K_6 = \frac{1}{C_{ПР} K_{РП}}$, $T_6^2 = \frac{m}{C_{ПР} K_{РП}}$, $\xi = \frac{K_V K_{РД}}{\sqrt{\frac{m}{C_{ПР} K_{РП}}}}$.

Звенья 2, 3, 4

Звенья 2,3,4 описываются уравнением Максвелла [1]:

$$F_M = \frac{1}{4} \cdot w^2 \cdot I^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{S_M}{\delta^2}, \quad (17)$$

где w – число витков катушки электромагнита,

I – ток катушки электромагнита,

μ_0 – магнитная проницаемость воздушного зазора,

S_M – площадь сечения якоря электромагнита.

В операторной форме:

$$F_M(p) = \frac{1}{4} \cdot w^2 \cdot I^2(p) \cdot \mu_0 \cdot \frac{S_M}{\delta^2(p)}. \quad (18)$$

Звено 1

Звено 1 связывает напряжение и ток катушки электромагнита. Учитывая, что зазор электромагнита есть величина переменная, ток электромагнита определяется по уравнению электрического равновесия.

$$U = IR + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (19)$$

где $\Psi = LI$,

Ψ – потокосцепление катушки электромагнита,
 L – индуктивность катушки электромагнита (величина переменная),
 I – ток катушки электромагнита (величина переменная).

В связи с переменностью величин L и I уравнение электрического равновесия принимает вид:

$$U = IR + L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt}, \quad (20)$$

Величина L определяется по выражению: $l = w^2 \mu_0 S \frac{1}{\delta} = K_2 \frac{1}{\delta}$, где $K_2 = w^2 \mu_0 S$.

Представим уравнение (20) в операторной форме:

$$U(p) = RI(p) + K_2 \frac{1}{\delta(p)} pI(p) + K_2 \frac{1}{\delta(p)} pI(p). \quad (21)$$

Для катушки переменного тока:

$$I(p) = \frac{U(p)}{X_L(p)}; \quad (22)$$

$$X_L(p) = \omega \cdot L(p) = 2\pi \cdot f \cdot w^2 \cdot \mu_0 \cdot S \cdot \frac{1}{\delta}(p); \quad (23)$$

$$I(p) = U(p) \cdot \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot w^2 \cdot \mu_0 \cdot S} \cdot \delta(p). \quad (24)$$

Выводы

С учетом математического описания звеньев функциональной схемы регулируемого дросселирующего устройства с электромагнитным приводом, структурная схема может быть представлена в виде:

– рис. 3 – для электромагнитного запорного устройства с электромагнитом постоянного тока;

– рис. 4 – для электромагнитного запорного устройства с электромагнитом переменного тока.

Разработанные структурные схемы могут быть использованы инженерами, осуществляющими проектирование систем автоматического регулирования подачи жидкости или газа на предприятиях машиностроительного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов О. П., Стоколов В. Е. Электрические аппараты и средства автоматизации. Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1982. 183 с.

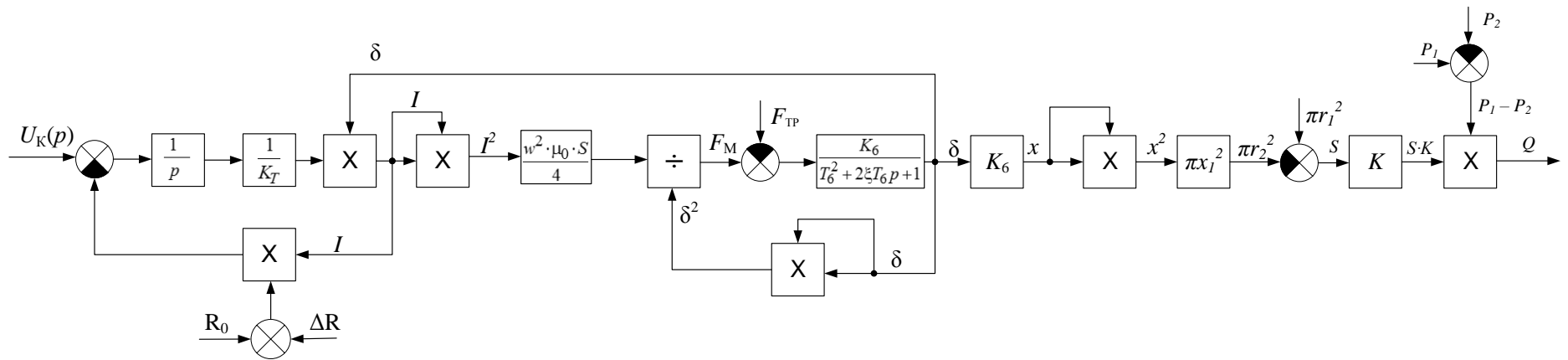


Рис. 3. Структурная схема дроселирующего устройства с электромагнитным приводом постоянного тока

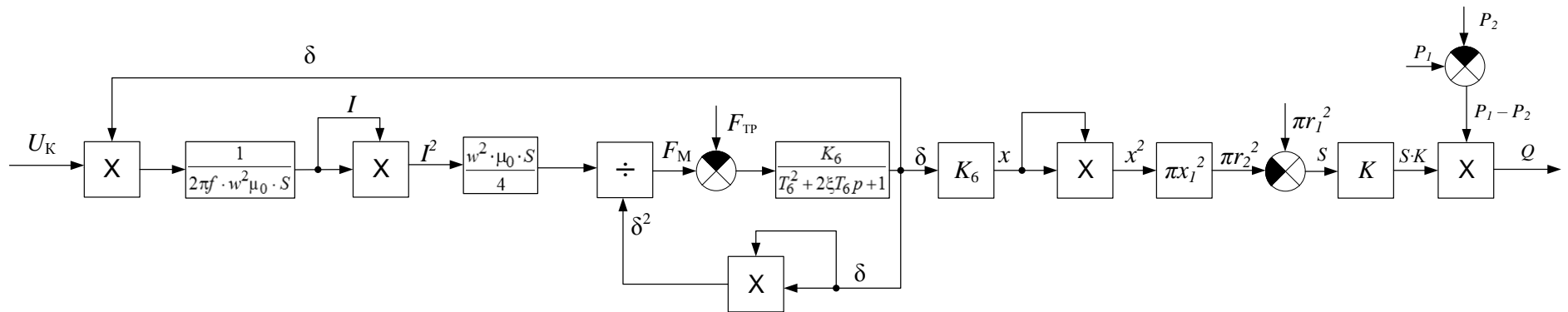


Рис. 4. Структурная схема дроселирующего устройства с электромагнитным приводом переменного тока

Новоженин М. Б.
Novozhenin M. B.
novozhenin.maxim@yandex.ru

Новоженин И. Б.
Novozhenin I. B.
ilja.novozhenin@yandex.ru

Филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Ишимбай

Лютков А. Г.

Lutov A. G.
lutov1@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

ВЛИЯНИЕ КЛАСТЕРИЗАЦИИ НА СТРУКТУРУ НЕЙРОННОЙ СЕТИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ О РЕЖИМАХ РАБОТЫ НАСОСНОГО КОМПЛЕКСА

INFLUENCE OF CLUSTERIZATION ON THE STRUCTURE OF THE NEURAL NETWORK UNDER UNCERTAINTY OF INFORMATION ON THE OPERATING MODES OF THE PUMPING COMPLEX

***Аннотация.** В статье представлены результаты моделирования различных структур нейронных сетей для определения состояния объекта на примере режима работы насосного комплекса. Вектор данных для оценки класса применялся как входной, так и как выходной параметр. Представлены выводы по результатам работы и рекомендации для дальнейшего исследования.*

***Abstract.** The article presents the results of modeling various structures of neural networks to determine the state of the object of the pumping mode. The data vector for evaluation is used as an input as well as an output parameter. Conclusions on the results of the work and recommendations for further research are presented.*

***Ключевые слова:** нейронная сеть, неопределенность, кластеризация.*

***Keywords:** neural network, uncertainty, clustering.*

Введение. Определение режима работы насосного комплекса (НК) при условиях возникновения кавитации является сложной задачей. Это связано со сложностью контроля параметров, часть из которых не поддается измерению, и управления режимами работы НК.

В работах [1-4] рассмотрено моделирование режимов работы НК с целью определения величины кавитации h_v (объема кавитации), которая характеризует степень развития кавитации. Определение объема кавитации выполнялось по результатам моделирования в среде Turbomachinery CFD с последующим обучением нейронной сети (НС), входными параметрами которой являются параметры перекачиваемой среды, такие как давление на выходе, точечный расход на выходе, температура перекачиваемой жидкости,

скорость вращения рабочего колеса, и угол открытия задвижки на перепускном канале, а выходным – объем кавитации (рис. 1).

Сложность постоянного определения объема кавитации для различных совокупностей данных для области предполагаемых значений привела к применению нейросетевого инструментария для решения поставленной задачи.

Также выяснилось, что в процессе определения объема кавитации разные части исходных данных приводят к одинаковым результатам. В этих обстоятельствах классификация режима работы НК является трудноразрешимой задачей при отсутствии классификатора данных.

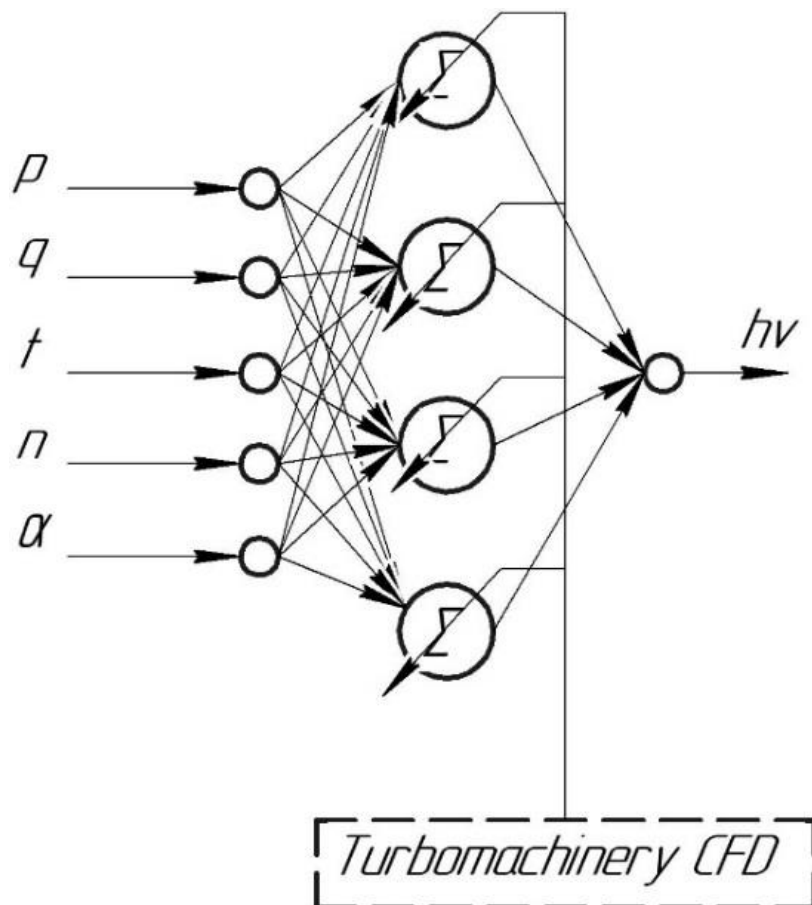


Рис. 1. Структура нейронной сети

Можно выделить несколько подходов к решению задачи классификации, связанной с неопределенностью:

1 – выделение в отдельные кластеры данных, которые используются для обучения НС с данной структурой и типом, при этом сама структура каждой из сетей сохраняется в базе прецедентов как вектор параметров;

2 – использование линейного (или n-порядка) фильтра для классификации информативных параметров для обучения НС и присвоения индекса класса каждому из векторов;

3 – использование сложной структуры нейронной сети, одним из входов которой является индекс класса входных параметров, и/или этот же вход зависит от предыдущего состояния НС в сетях с обратной связью.

Предлагаемый подход. Для классификации данных, полученных по результатам моделирования течения жидкости в программе Turbomachinery CFD, предложены два набора данных. Первый заключается в присвоении номера класса целочисленным значением из вектора *class*, второй – в классификации с помощью *M*-го количества векторов, где *M* – количество классов.

Моделирование НС было выполнено в прикладном пакете программ SPSS, который в отличие от других программ (Matlab, Statistica) позволяет моделировать многослойные НС. Программа позволяет моделировать многомерный перцептрон (МП) и сети с радиально-базисными функциями (РБФ) [5].

При этом входные данные могут быть квалифицированы как коварианты, так и как факторы. В указанном случае входные данных квалифицируются как коварианты, что позволяет рассматривать их как совокупность различных значений одной из входных переменных. В отличие от ковариантов, использование факторов рассматривается зависимости от каждого из значений для входной переменной.

Были рассмотрены следующие совокупности ковариантов:

– 6 шт. – Point, FreqRot, kP, T, ν , ρ ;

– 7 шт. – Point, FreqRot, kP, T, ν , ρ , class;

– 12 шт. – Point, FreqRot, kP, T, ν , ρ , class1...class6,

где Point – точечный расход; FreqRot – частота вращения центробежного насоса; kP – давление на выходе НК; T – температура; ν – вязкость; ρ – плотность; class – идентификатор класса; class*M* – бинарный идентификатор *M*-го класса.

Выходные слои НС имеют следующие разновидности:

– 1 шт. – cavitation;

– 7 шт. – cavitation, class1...class6;

– 13 шт. – cavitation, class1 = 0, class1 = 1...class6 = 1,

где cavitation – объем кавитации в НК.

В качестве функций активации были использованы: гиперболический тангенс (Гип. Танг.), сигмоид, нормализованная радиальная базисная функция (Softmax) и обычная радиальная базисная функция (Экспон.). Функции активации выходного слоя - гиперболический тангенс, сигмоид и единичная матрица.

Результаты моделирования НС представлены в табл. 1. Наименьшие ошибки суммы квадратов в обучающей/проверочной выборках и средние общие относительные ошибки в этих же выборках имеют наименьшее значение в выборке 18. Принимая во внимание, что данная сети имеет 2 скрытых слоя, дальнейшее изучение влияние большего количества скрытых слоев на точность НС при использовании программы SPSS является невозможным.

Результаты моделирования НС в SPSS

№	Кол-во нейронов в слоях	Тип НС	Функция активации и скрытого слоя	Функция активации выходного слоя	Ошибка суммы кв.		Ср. общая относит. ошибка	
					обуч. выбор.	повер. выборке	обуч. выбор.	повер. выборке
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	6-6-13	МП	Сигмоид	Единич. матрица	6,161	3,652	0,031	0,044
2	6-6-13	МП	Гип. Танг.	Единич. матрица	3,157	2,923	0,016	0,035
3	6-6-5-13	МП	Гип. Танг.	Единич. матрица	11,105	6,181	0,056	0,074
4	6-6-5-13	МП	Сигмоид	Единич. матрица	10,108	5,832	0,051	0,07
5	6-6-5-13	МП	Гип. Танг.	Гип. Танг.	6,081	3,804	0,036	0,053
6	6-7-7	МП	Сигмоид	Единич. матрица	5,576	3,439	0,041	0,059
7	6-7-5-7	МП	Гип. Танг.	Единич. матрица	5,524	4,441	0,04	0,076
8	6-7-5-7	МП	Сигмоид	Единич. матрица	6,44	4,706	0,047	0,081
9	6-9-7	МП	Гип. Танг.	Единич. матрица	2,531	2,889	0,018	0,05
10	6-9-7	РБФ	Экспон.	Единич. матрица	62,114	36,214	0,454	0,624
11	6-9-13	РБФ	Экспон.	Единич. матрица	88,535	52,017	0,446	0,621
12	6-11-13	РБФ	Softmax	Единич. матрица	9,763	1,944	0,046	0,03
13	6-16-13	РБФ	Softmax	Единич. матрица	5,402	11,954	0,027	0,143
14	6-16-13	РБФ	Экспон.	Единич. матрица	78,988	55,757	0,398	0,665
15	7-3-1	МП	Гип. Танг.	Единич. матрица	3,54	2,442	0,047	0,076
16	7-4-3-1	МП	Гип. Танг.	Единич. матрица	1,689	2,299	0,022	0,071
17	7-4-3-1	МП	Сигмоид	Единич. матрица	0,772	1,75	0,01	0,054
18	7-4-3-1	МП	Сигмоид	Сигмоид	0,13	0,319	0,011	0,063
19	7-10-1	РБФ	Softmax	Единич. матрица	6,546	7,096	0,088	0,286
20	7-16-1	РБФ	Softmax	Единич. матрица	7,511	7,462	0,102	0,345
21	7-10-1	РБФ	Экспон.	Единич. матрица	34,979	18,319	0,463	0,567
22	7-16-1	РБФ	Экспон.	Единич. матрица	33,223	22,876	0,440	0,707
23	12-8-6-1	МП	Гип. Танг.	Единич. матрица	1,73	1,946	0,023	0,06
24	12-8-6-1	МП	Сигмоид	Единич. матрица	2,275	2,359	0,03	0,073
25	12-8-6-1	МП	Сигмоид	Сигмоид	0,335	0,484	0,028	0,095
26	12-8-6-1	МП	Сигмоид	Гип. Танг.	2,179	1,475	0,046	0,072
27	12-9-1	МП	Гип. Танг.	Единич. матрица	4,462	3,051	0,059	0,094
28	12-9-1	РБФ	Softmax	Единич. матрица	14,058	7,660	0,186	0,237
29	12-9-1	РБФ	Экспон.	Единич. матрица	47,81	11,339	0,594	0,55
30	12-16-1	РБФ	Softmax	Единич. матрица	4,539	11,709	0,06	0,362
31	12-16-1	РБФ	Экспон.	Единич. матрица	41,078	25,553	0,544	0,79

Серия экспериментов моделирования с изменением вязкости показала слабую связь с объемом кавитации, но исключение данных экспериментов из рассмотрения также исключает вязкость из входных значений ввиду ее постоянства.

Результаты моделирования представлены в табл. 2.

Моделирования НС при отсутствии 3 класса

№	Кол-во нейронов в слоях	Тип НС	Функция активации скрытого слоя	Функция активации выходного слоя	Ошибка суммы кв.		Ср. общая относит. ошибка	
					обуч. выбор	повер. выборке	обуч. выбор.	повер. выборке
1	6-4-3-1	МП	Сигмоид	Сигмоид	0,166	0,480	0,014	0,093
2	5-5-6	МП	Гип. Танг.	Единич.матрица	2,478	3,241	0,019	0,057

Исключение вязкости из рассмотрения привели к увеличению ошибки суммы квадратов и средней общей относительной ошибки.

Выводы

По результатам моделирования было определено, что многомерный персептрон с сигмоидной функцией активации и двумя скрытыми слоями определяет величину объема кавитации с ошибкой суммы квадратов не более 0,3 hv.

Использование вектора данных, классифицирующего входные параметры, как входного параметра НС, позволяет достичь лучших показателей, чем в случае использования его как выходного параметра НС.

При этом нейронные сети, которые имеют два скрытых слоя, в половине случаев имеют высокий результат предсказания, что свидетельствует о том, что необходимо дополнительное исследование различных типов двухслойных и других многослойных сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новоженин М.Б., Лютов А.Г. Создание экспертных средств для диагностики и управления режимами работы насосного комплекса при нестационарных процессах // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста. 2018. С.135-140.
2. Новоженин М.Б., Лютов А.Г., Озеров М.Ю. Экспериментальное исследование режимов работы автоматизированного насосного комплекса при нестационарных процессах // Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2018. Т. 18. № 1. С. 110-116.
3. Лютов А.Г., Новоженин М.Б. Автоматизированная система диагностики и управления режимами работы насосного комплекса при нестационарных процессах // Вестник Уфимского Государственного Авиационного Технического Университета. 2018. Т. 22. № 3(81). С. 114-123.
4. Лютов А.Г., Новоженин М.Б. Моделирование и диагностика нестационарных режимов автоматизированных насосных комплексов // Вестник Уфимского Государственного Авиационного Технического Университета. 2018. Т. 22. № 1(79). С. 113-120.
5. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей: Пер. с нем. / Ахим Бююль, Петер Цёфель – СПб. : ООО «ДиаСофтЮП», 2005. 608 с.

Макаров М. Н.
Makarov M. N.
max99050@gmail.com

Мунасыпов Р. А.
Munasypov R. A.
rust40@mail.ru

Шарипов М. И.
Sharipov M. I.
sharipovm@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

АВТОМАТИЗАЦИЯ СПУСКОПОДЪЕМНЫХ ОПЕРАЦИЙ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РЕМОНТА СКВАЖИН

AUTOMATION OF LIFTING OPERATIONS PUMP AND COMPRESSOR PIPES FOR REPAIR OF WELLS

***Аннотация.** Рассмотрена возможность использования мобильных ремонтно-технических комплексов для автоматизации спускоподъемных операций насосно-компрессорных труб.*

***Abstract.** The possibility of using mobile repair and technical complexes for the automation of tubing tripping operations is considered.*

***Ключевые слова:** ремонт скважин, мобильные робототехнические комплексы, спускоподъемные операции.*

***Keywords:** well workover, mobile robotic systems, tripping operations.*

На сегодняшний день в России наиболее важным является добыча и транспортировка углеводородного сырья. При длительной работе скважинного оборудования возникает её износ. И для её обслуживания и ремонта проводят спускоподъемные операции (СПО) насосно-компрессорных труб (НКТ). Были выявлены случаи обрыва талевого каната из-за небольших рывков, вызванных некорректной обработкой сигнала с пульта оператора, при спуске и подъеме колонны труб. Для решения данной проблемы необходимо обеспечить плавность хода СПО на основе автоматизации всех выполняемых операций. Автоматизация СПО также позволит увеличить производительность спускоподъемных операций и снизить вероятность возникновения ошибки со стороны оператора.

Различают несколько видов ремонтных работ на скважинах:

- а) ремонтно-профилактические мероприятия;
- б) текущий ремонт;
- в) капитальный ремонт.

Следует отметить, что от качества и своевременного проведения профилактических мероприятий и текущего ремонта во многом зависит продолжительность эксплуатации скважин на запланированном

технологическом режиме и межремонтного периода работы, что значительно снижает вероятность выхода из строя и последующего бездействия скважины.

Ремонтно-профилактические мероприятия заключаются в устранении различных нарушений в режиме эксплуатации скважин и подземного оборудования, очистке от песка, гидратных отложений и продуктов коррозии, восстановлении и повышении добывных возможностей скважин.

Текущий ремонт скважин - комплекс работ по проверке, частичной или полной замене подземного оборудования, очистке его, стенок скважины и забоя от различных отложений, а также по осуществлению в скважинах геолого-технических мероприятий по восстановлению и повышению их добывных возможностей.

Капитальный ремонт скважин – это комплекс работ по восстановлению работоспособности призабойной зоны, промывка ее растворителями, растворами ПАВ, гидropескоструйной перфорации и химической обработки, дополнительного вскрытия пласта для приобщения к разработке газонасыщенных горизонтов.

При ремонте скважинного оборудования наиболее продолжительным и дорогостоящим этапом является подъём и последующее опускания НКТ в шахту скважины. НКТ применяются в процессе эксплуатации нефтяных, газовых, нагнетательных и водозаборных скважин для транспортировки жидкостей и газов внутри обсадных колонн, а также для ремонтных и спускоподъемных работ.

Для автоматизации СПО предлагается использование мобильных робототехнических комплексов (РТК). Робототехнический комплекс включает в себя две подсистемы: первая отвечает за автоматизацию спускоподъемных операции, а вторая за очистку насосно-компрессорных труб от сернисто-парафиновых отложений изнутри и снаружи.

При ремонте данного оборудования наиболее продолжительным и дорогостоящим этапом является подъём и последующее опускания насосно-компрессорных труб (НКТ) в шахту скважины. Данный процесс связан с продолжительным монотонным, тяжёлым и травмоопасным трудом по укладке труб, их подаче и свинчиванию-развинчиванию. Статистические данные указывают что интенсивность работы бригады при выполнении спускоподъемных операций (СПО) к концу дня падает до 38% (с 39 до 24 труб/час). Поэтому важной задачей является обеспечение полной или частичной механизации и автоматизации СПО на основе постоянного контроля параметров спуско-подъемного оборудования.

Все подземные и капитальные ремонты скважин, а также операции по обработке призабойных зон сопровождаются спуском в скважину и подъемом из нее труб, штанг, различных инструментов. Поэтому над устьем скважины на время проведения ремонтных работ должны быть установлены подъемное сооружение (вышки или мачты) соответствующей высоты и подъемный механизм (механизированные лебедки, смонтированные на тракторах или автомобилях).

На нефтяных и газовых промыслах широко распространены подъемные агрегаты для подземного ремонта скважин, в которых вышка и лебедка размещены на одной транспортной базе – тракторе или автомобиле.

Схема оснащения вышки или мачты для проведения СПО с трубами, штангами и различными инструментами приведена на рис. 1. Аналогично оснащаются и передвижные агрегаты, имеющие собственную мачту или вышку.

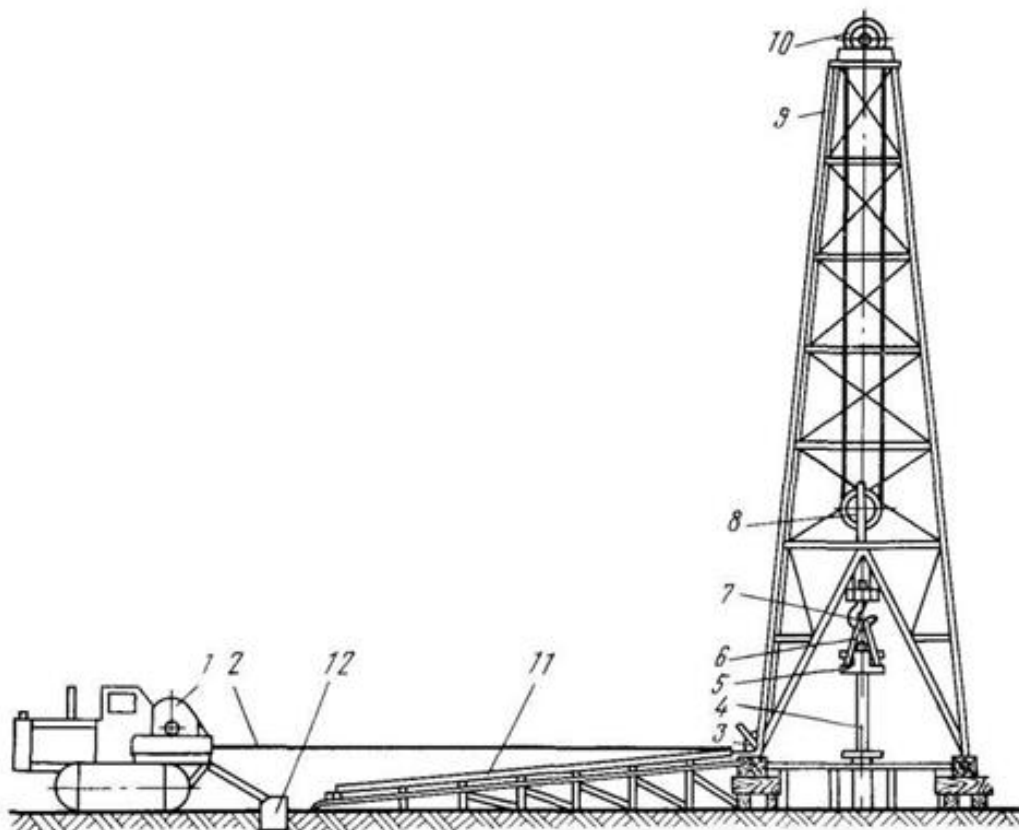


Рис. 1. Схема оснащения вышки для проведения СПО

1 – тракторный подъемник; 2 – стальной канат; 3 – оттяжной ролик;
4 – насосно-компрессорные трубы; 5 – элеватор; 6 – штропы; 7 – крюк; 8 – талевый блок;
9 – вышка; 10 – кронблок; 11 – мостики; 12 – упор для трактора

Для спуска в скважину труб и штанг и подъема их из скважины применяется комплект инструмента, состоящий из трубных и штанговых элеваторов и ключей, а также различные приспособления, ускоряющие проведение работ и обеспечивающие их безопасность.

Трубные элеваторы служат для захвата трубы под муфту и удержания колонны труб навесу при спуске и подъеме их. Трубный элеватор представляет собой массивный литой или кованый хомут с отверстием посередине под трубу и с боковыми проушинами под штропы. Диаметр отверстия в элеваторе соответствует наружному диаметру поднимаемых или спускаемых труб. Часть одной стенки элеватора раскрывается для ввода в него трубы. После того как труба будет заведена в элеватор, стенка при помощи рычага закрывается.

При подъеме труба опирается заплечиками муфты на торцовую поверхность элеватора. На боковые проушины элеватора надеваются массивные стальные штропы, подвешиваемые к подъемному крюку.

Спуск и подъем насосных штанг также производится с помощью легких стальных хомутов, называемых штанговыми элеваторами.

Для свинчивания и развинчивания труб применяют цепные и шарнирные ключи, а для этих же операций со штангами — штанговые ключи.

Разрабатываемая система комплекса направлена на максимальную автоматизацию СПО при срочном и капитальном ремонте скважин. С этой целью необходима модернизация существующего оборудования и использование устройств (или их модификаций), представленных ниже.

Автоматический элеватор необходим для избавления от необходимости ручной сцепки-расцепки НКТ при СПО (рис. 2). Заменяет стандартный элеватор.

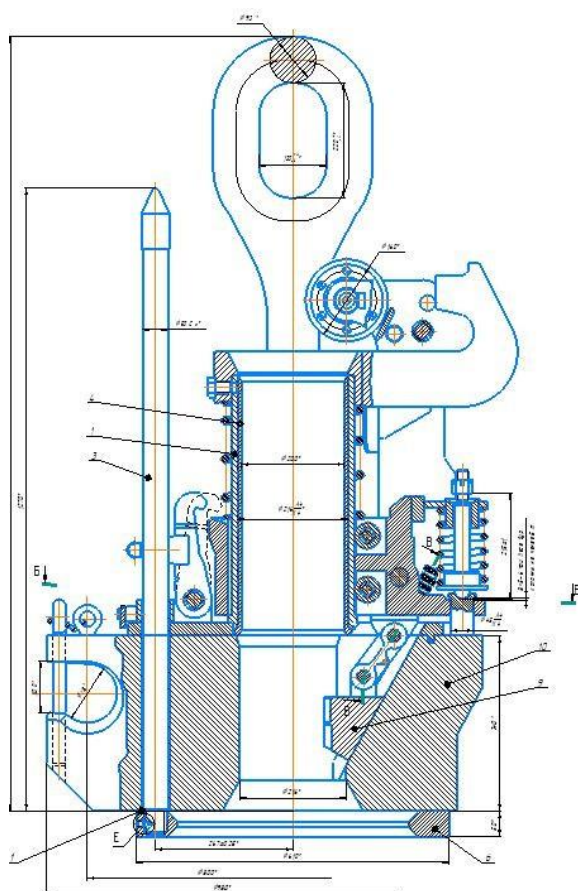


Рис. 2. Автоматический элеватор ЭА-250

Портальный гидравлический ключ необходим для автоматического выполнения операций по свинчиванию-развинчиванию НКТ. Устанавливается на платформу автоматизированного комплекса и представляет собой автоматический гидроключ ГКШ-1800, установленный на платформу портального типа, что позволяет ему перемещаться в 2х плоскостях и точно центрироваться в месте соединения НКТ (рис. 3).

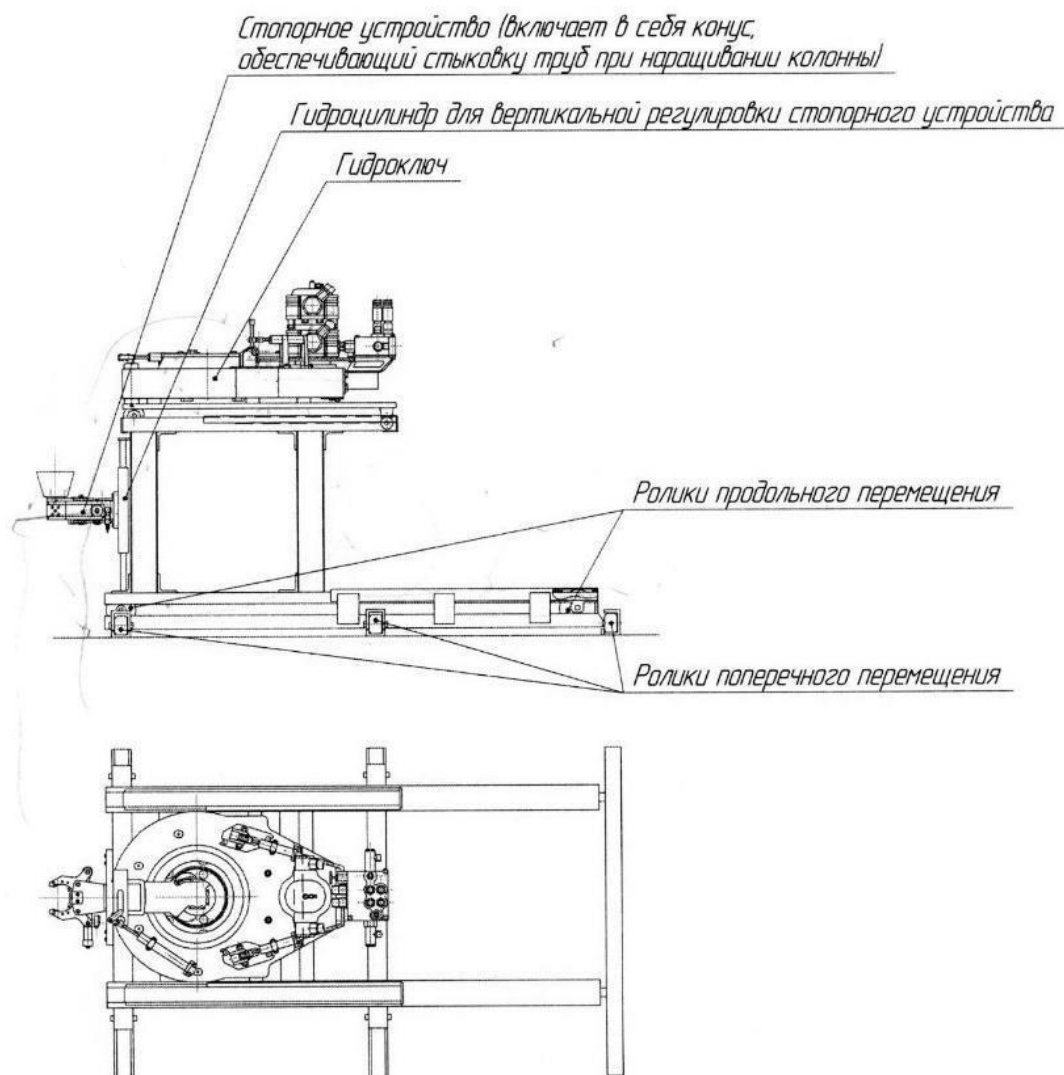


Рис. 3. Портальный гидроключ ГКШ-1800

Автоматизированный модуль подачи труб НКТ предназначен для работы с НКТ (перемещение, укладка на мостки, ориентация НКТ при СПО). Предлагается выполнить на основе имеющихся аналогов. Данная установка для внедрения в состав комплекса СПО требует её модернизации. В частности, обеспечения возможности синхронизации действий между гидроэлеватором и модулем подачи НКТ. Для этого необходимо дооснастить кинематическую схему имеющегося оборудования толкателем и направляющим желобом с установленным заранее градусом подачи трубы гидроэлеватору. Кроме того, необходимо применение специализированного захвата. Так же можно использовать уже заработанную установку Тритон М2 (рис. 4).

Основным аналогом разрабатываемого комплекса является универсальный подъёмный агрегат УПА 60/80 ОАО «ПО ЕЛАЗ» на шасси КрАЗ-65053 (рис. 5), широко использующийся в настоящее время при срочном и капитальном ремонте скважин.



Рис. 4. Тритон М2



Рис. 5. Универсальный подъёмный агрегат УПА 60/80 ОАО «ПО ЕлаЗ»

Разработанная компоновка РТК для СПО может быть представлена в виде, показанным на рис. 6.

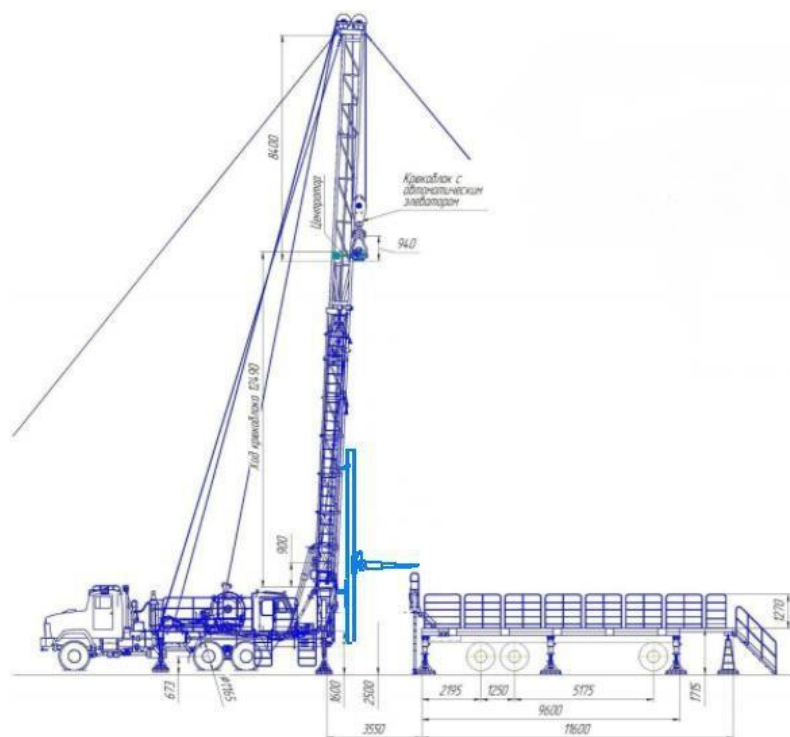


Рис. 6. Схема расположения компоновки РТК для СПО

Выводы

Автоматизация спускоподъемных операций насосно-компрессорных труб снизит риск возникновения аварийных ситуаций, способных повлечь травмы и экономические убытки. Экономический эффект складывается за счет следующих составляющих:

- сокращение времени на спускоподъемные операции;
- уменьшение времени простоя скважины;
- сокращение численности бригады капитального ремонта скважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мунасыпов Р. А., Мустаев Т. И., Шарипов М. И. Автоматизация технологического процесса очистки насосно компрессорных труб при ремонте скважинного оборудования с использованием мобильного робототехнического комплекса // Робототехника и искусственный интеллект – 2019: материалы XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием РИИ-19, Железногорск Красноярского края, 14 декабря 2019г. – Железногорск: Институт космических и информационных технологий СФУ. С. 13-19.
2. Мустаев Т. И. Мобильный комплекс для очистки нефтяных труб при ремонте скважин // Инновационная наука. 2019. № 7-8. С. 26-27.
3. Мунасыпов Р. А., Слетнев П. В., Шахмаметьев Т. Р. Универсальная мобильная платформа для автоматизации технологических операций на ферромагнитных поверхностях технических объектов // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста: материалы всероссийской научно-технической конференции. – Уфа: РИК УГАТУ, 2019. – С. 101-107.

Гончарова С. Г.

Goncharova S. G.

Месягутов И. Ф.

Mesyagutov I. F.

kats_ugatu@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический

университет», Уфа

АДАПТИВНО-РОБАСТНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ С МИНИМИЗАЦИЕЙ НЕЧЕТКОСТИ ИНФОРМАЦИИ О ПРОЦЕССЕ МЕХАНООБРАБОТКИ

ADAPTIVE-ROBUST CONTROL ALGORITHM WITH MINIMIZATION OF INFORMATION FUZZINESS ABOUT THE MACHINING PROCESS

***Аннотация.** Приведена методика математического описания недетерминированных технологических процессов как объектов управления в виде пространства состояния с нечеткими элементами, дающая количественную оценку неопределенностей. На ее основе построена нечеткая динамическая модель процесса точения, используемая для синтеза адаптивно-робастного алгоритма управления процессом. Приведенный алгоритм позволяет в оперативном режиме корректировать режимы механообработки с целью повышения его эффективности.*

***Abstract.** The article is dedicated to the method of mathematical description of nondeterministic technological processes as control objects in the form of a state space with fuzzy elements, which gives a quantitative estimation of uncertainties. On its basis, a fuzzy dynamic model of the turning process is constructed, which is used to synthesize an adaptive-robust algorithm for controlling the process. The given algorithm allows to adjust the modes of mechanical processing in the operational mode to increase its efficiency.*

***Ключевые слова:** пространство состояний, нечеткие множества, адаптивно-робастный алгоритм управления, процесс точения, стабилизация главной составляющей силы резания.*

***Keywords:** state space, fuzzy sets, adaptive-robust control algorithm, turning process, stabilization of the main component of the cutting force.*

Один из путей повышения эффективности авиационных и машиностроительных производств состоит во внедрении средств автоматизации и управления технологическими процессами, в т. ч. процессами резания (ПР), трудоемкость которой составляет 50–60% от трудоемкости изготовления всего изделия. Системы управления (СУ) ПР позволяют повысить надежность работы оборудования, поднять производительность и снизить себестоимость деталей, улучшить эксплуатационные характеристики изделий в условиях, когда резервы усовершенствования конструкций металлорежущих станков и технологий исчерпаны. Однако СУ ПР не получили столь широкого распространения в производстве, как СУ исполнительными органами технологического оборудования на базе систем ЧПУ. Это объясняется тем, что управление ПР имеет ряд проблем, связанных с неопределенностями при

управлении, то есть с дефицитом и недостоверностью априорной и апостериорной информации. Указанная неопределенность обусловлена погрешностями измерения выходных переменных объекта управления (ОУ), дефицитом средств измерения и контроля многих физических величин ПР, свойствами моделей процесса, характеризующихся дефицитом информации о возможных колебаниях припуска заготовки, об изменениях физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, о величине износа режущей кромки инструмента и его геометрии.

Поэтому наиболее актуальными проблемами управления ПР являются адаптация СУ к производственным условиям и обеспечение робастности систем (слабой чувствительности к возмущениям).

В настоящей работе предложены методика количественной оценки неопределенностей моделей ПР и алгоритм коррекции режимов механообработки во время технологической операции путем формирования компромиссного управляющего сигнала в условиях неснятой неопределенности.

Нечеткая динамическая математическая модель ПР

Математическая модель поведения ПР представляет собой описание в пространстве состояния (1), (2) с нечеткими элементами.

Такая модель позволяет представить случайные величины и случайные процессы инвариантно к их закону распределения, а также формализовать эмпирические и эвристические (экспертные) знания о ПР.

Уравнения состояния:

$$\dot{\bar{x}} = \bar{F}(\bar{x}, u, \bar{\theta}), (\mu_{\bar{s}}(x)). \quad (1)$$

Уравнения наблюдения:

$$\bar{y} = \bar{G}(\bar{x}, u, \bar{\theta}). \quad (2)$$

Начальные условия: $\bar{x}(0) = \bar{D}$,

где \bar{x} – нечеткие переменные вектора состояния; u – управляющие переменные, принимающие четкие значения; $\bar{\theta}$ – нечеткие параметры модели; \bar{y} – нечеткие выходные переменные; \bar{F} , \bar{G} – нечеткие функции; $\mu_{\bar{s}}(x)$ – показатели структурных неопределенностей модели.

Функция принадлежности (ФП) задана аналитической зависимостью (3)

$$\mu_{\bar{x}}(x) = \frac{1}{(b_{1\bar{x}}(a_{\bar{x}} - x))^{v_{1\bar{x}} \frac{\text{sign}(b_{1\bar{x}}(a_{\bar{x}} - x)) + 1}{2}} + (b_{2\bar{x}}(x - a_{\bar{x}}))^{v_{2\bar{x}} \frac{\text{sign}(b_{2\bar{x}}(x - a_{\bar{x}})) + 1}{2}} + 1}. \quad (3)$$

В формуле (3) коэффициент $a_{\bar{x}}$ представляет моду ФП, коэффициенты $b_{1\bar{x}}$ и $b_{2\bar{x}}$ задают ширину ФП, $v_{1\bar{x}}$, $v_{2\bar{x}}$ – наклон ФП к оси x , т.е. контрастность.

Например, для обрабатываемого материала ХН77ТЮР, инструментального материала Т15К6, геометрии резца: $\gamma=5^\circ$, $\alpha=\alpha_1=10^\circ$, $\lambda=0^\circ$, $\varphi=\varphi_1=45^\circ$, $r=0,5$ мм при полустойковой обработке построена нечеткая модель

точения, предназначенная для синтеза закона управления главной составляющей силы резания с помощью минутной подачи.

Параметры нечеткого множества (НМ) модели определены путем применения методов идентификации и кластерного анализа на основе экспериментальных данных [3, 4, 5]. В итоге получен нечеткий переходной процесс, приведенный на рис. 1.

Из расчетов по модели и графика (рис. 1) видно, что вариации изменения силы резания в пределах одного технологического перехода в обычных технологических условиях могут составлять 40% и более. Причем, показатели качества и точности СУ определяются не только наиболее возможными временными характеристиками $a_{\bar{x}}(t), a_{\bar{y}}(t)$, но и параметрами нечеткости $b_{1\bar{x}}(t), b_{2\bar{x}}(t), b_{1\bar{y}}(t), b_{2\bar{y}}(t)$, полученными при решении дифференциальных уравнений. Снизить нечеткость знаний об объекте и соответственно улучшить показатели качества управления можно путем максимизации значений $b_{1\bar{x}}(t), b_{2\bar{x}}(t), b_{1\bar{y}}(t), b_{2\bar{y}}(t)$. Эта идея заложена в основу приведенного ниже алгоритма управления режимами ПР.

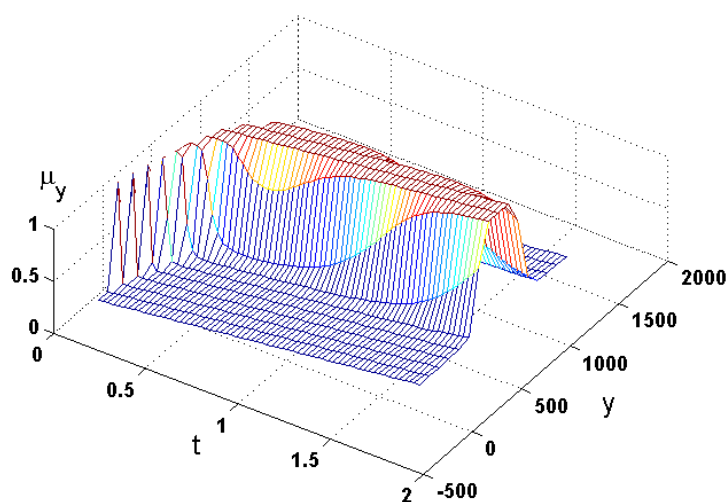


Рис. 1. Нечеткий переходной процесс

Адаптивно-робастный (АР) алгоритм управления ПР

Синтез закона управления выполнен для линеаризованной модели ПР. Исходной информацией при этом является модель обобщенного настраиваемого объекта (ОНО) в форме (1), (2) значения коэффициентов в НМ, отражающих уровень апостериорной неопределенности, т.е. частично снятой неопределенности с помощью АР СУ, а также эталонная модель (ЭМ): $\dot{x}_m = A_m x_m + B_m u_m$, сформированная на основе заданных показателей качества управления, где u_m – задающее воздействие системы.

ОНО представляет собой замкнутую подсистему, в состав которой входят технологическое оборудование (станок), автоматизированный электропривод,

датчики, ПР, ПИ или И регуляторы ПР. Например, при управлении главной составляющей силы резания P_z структурная схема ОНО представлена на рис. 2.

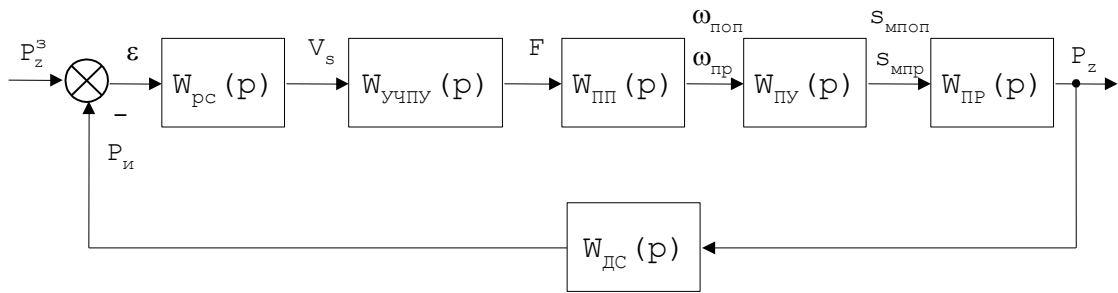


Рис. 2. Структурная схема ОНО:

РС – регулятор силы, ПП – приводы подачи, ПУ – передаточное устройство, ДС – датчик силы, P_z , Н – главная составляющая силы резания, V_s , мм/мин – контурная скорость, F – код подачи, $\omega_{пп}$, $\omega_{поп}$, рад/с – частоты вращения приводов подач, $S_{мпп}$, $S_{мпоп}$, мм/мин – продольная и поперечная минутные подачи.

Входным сигналом для ОНО $u = P_z^3$ является управляющий сигнал с контура адаптации.

Контур адаптации построен на основе сочетания алгоритма скоростного градиента (АСГ) [2] и алгоритма принятия решений в условиях нечеткой информации с моделью типа (1), (2). В качестве критерия управления выбрана минимизация среднего отклонения переменных вектора состояния реального поведения ОНО от эталона.

Закон управления имеет вид [1]:

$$u = k_u(t) \cdot u_m(t) + \sum_{i=1}^n k_{xi}^{\Sigma}(t) \cdot x_i^{\Sigma}(t) \quad (4)$$

$$k_{xi}^{\Sigma}[t+1] = k_{xi}^{\Sigma}[t](1 - \omega\gamma_3) + \omega(\gamma_5 - \gamma_4)\delta * [t]x_i^{\Sigma}[t] - \omega\gamma_5\delta * [t+1]x_i^{\Sigma}[t+1] \quad (5)$$

$$k_u[t+1] = k_u[t](1 - \omega\gamma_1) + \omega(\gamma_6 - \gamma_2)\delta * [t]u_m[t] - \omega\gamma_6\delta * [t+1]u_m[t+1], \quad (6)$$

где $t = m\omega, \omega > 0$ – шаг дискретизации, $m = 0, 1, 2, \dots, m_t$;
 $\gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6\}$ – параметры адаптивного регулятора;
 $e_i^{\Sigma} = \int_{X_i} (x_i - x_{im}) \cdot \mu_{\bar{e}_i}(e_i) dx_i$ – рассогласование между переменными вектора состояния и эталонными переменными состояния,
 $\mu_{\bar{e}_i}(e_i) = \phi_1(e_i, a_{\bar{e}_i}, b_{1\bar{e}_i}, b_{2\bar{e}_i}, v_{1\bar{e}_i}, v_{2\bar{e}_i})$ – ФП ошибки; ϕ_1 – аналитический вид ФП в форме (3); $a_{\bar{e}_i} = a_{\bar{x}_i} - x_{im}, v_{1\bar{e}_i} = v_{1\bar{x}_i}, v_{2\bar{e}_i} = v_{2\bar{x}_i}, b_{1\bar{e}_i} = b_{1\bar{x}_i}, b_{2\bar{e}_i} = b_{2\bar{x}_i}$;
 $x_i^{\Sigma} = \int_{X_i} x_i dx_i$ – интегрированная переменная вектора состояния;

$\delta * [t] = \sum_{i=1}^n h_i \cdot e_i \Sigma$; h_i – коэффициенты, полученные из коэффициентов матрицы в решении уравнения Ляпунова и матрицы эталонной модели B_M .

На рис. 3 приведены переходные процессы в разработанной АР СУ главной составляющей силы резания.

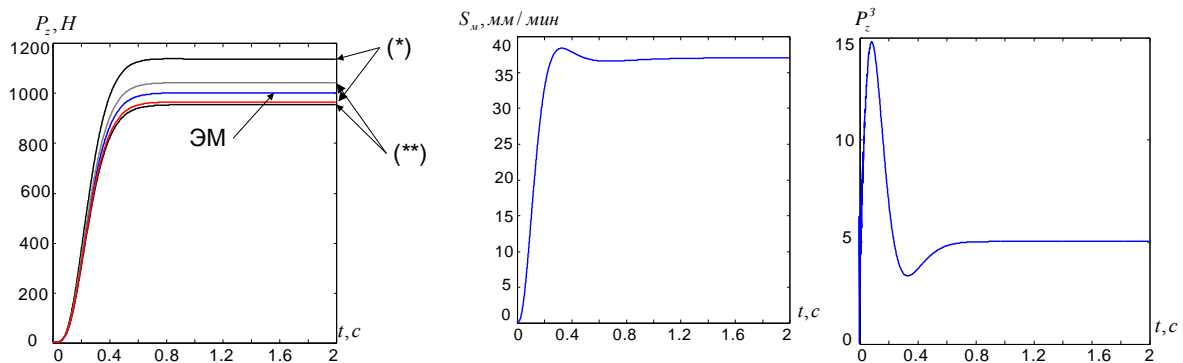


Рис. 3. Результаты имитационного моделирования АР СУ силой резания
 (*) – наихудшие случаи переходных процессов в СУ силой резания, синтезированной на основе классического АСГ; (**) – наихудшие случаи переходных процессов в СУ силой резания, синтезированной на основе модифицированного АСГ

Рассматривался самый неблагоприятный режим с точки зрения нагрузок на режущий инструмент – процесс врезания. При этом изменение коэффициента передачи модели достигало 10 раз и более.

Выводы

Использование алгоритма формирования квазиоптимальных режимов механообработки в СУ ПР позволяет повысить гибкость СУ, точность СУ в среднем на 15%, обеспечить перерегулирование не выше 3%, снизить время механообработки деталей на 20% по сравнению с существующими адаптивными и оптимальными СУ ПР, сократить время на технологическую подготовку производства на 20–30 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончарова С. Г., Месягутов И. Ф. Адаптивно-нечеткий алгоритм управления процессом механообработки // Вестник УГАТУ. 2011. Т.15, № 2(42). С. 153–157
2. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб.: Наука, 2000. 549 с.
3. Волков Д. И. Динамика металлорежущих станков. Учебное пособие / РГАТУ им. П. А. Соловьева. – Рыбинск, 2015. – 49 с.
4. Устойчивость токарных станков при нелинейной характеристике процесса резания / Ю. Н. Санкин, Н. Ю. Санкин; под общ. ред. Ю. Н. Санкина. Ульяновск: УлГТУ, 2008. 137 с.
5. Постнов В. В. Термодинамические принципы обеспечения управляемости процесса резания / В. В. Постнов // Вестник УГАТУ. Уфа, 2005. № 6 (12). С. 98–106.

Мунасыпов Р. А.

Munasipov R. A.

rust40@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

Хуснутдинов Д. З.

Khusnutdinov D. Z.

dz_khusnutdinov@mail.ru

Устимова Е. И.

Ystimova E. I.

empire1411@bk.ru

Филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Ишимбай

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПУТЕМ ВЫВЕДЕНИЯ ЧАСТИ ПРОЦЕССОВ ДВИЖЕНИЯ ИЗ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА

INVESTIGATION OF TRANSPORT MECHANISMS BY DEDUCING PART OF THE MOTION PROCESSES FROM THE INERTIAL REFERENCE FRAME

***Аннотация.** Предложен и описан метод исследования динамики транспортных средств, основанный на выводе части процессов движения из инерциальной системы отсчета. Метод описывает штатное движение автомобиля и позволяет воспроизводить все параметры, определяющие состояние объекта.*

***Abstract.** A method for studying the dynamics of vehicles based on the derivation of part of the motion processes from the inertial reference frame is proposed and described. The method describes the normal movement of the car and allows you to reproduce all the parameters that determine the state of the object.*

***Ключевые слова:** анализ; имитационное моделирование; транспортное средство; система отсчета; декомпозиция процессов движения.*

***Keywords:** analysis; simulation; vehicle; reference system; decomposition of motion processes.*

Теория движения транспортных средств достаточно хорошо разработана и известна на сегодняшний день. Имеются работы Баженова Е. Е. Портновой А. А. [1, 2] в которых используется методы исследования, основанные на классической механике, и транспортные средства рассмотрены как частные случаи плоского параллельного движения. Так же в работе Смирнова И. А. и др. рассмотрена имитация голономных связей колеса с поверхностью дорожного покрытия, как некоторого явления псевдоскольжения колеса посредством выражений, описывающих контактные силы [3].

Так или иначе теория движения автомобилей и соответствующие методы предполагают проекцию сил на оси системы отсчета и соответственное нахождение уравнений, как сумму проекций сил движения объекта по каждой

оси. При этом движение объекта рассматривается как многомерное движение. Это обстоятельство присуще большинству многомерных объектов механической природы в современной науке. В качестве входа, параметра объекта рассматривается не реальный физический параметра, а некая фазовая переменная, образованная в результате «разложения движения» по осям системы отсчета. Данное обстоятельство усложняет исследование и разработку в области динамических объектов и информационных систем.

В современной технике и науке имеются задачи, в которых рассмотрение уравнений, полученных описанным методом, не удобно в виду их громоздкости и особенностей структур. Например, в информационных системах сбора и управления объектом, транспортно-логистических информационных системах, учитывающих динамику участников движения основанных на технологии цифровых копий. Нужно сказать, что подобных систем не существует сейчас. И предлагаемые разработки могут быть хорошим инструментом в создании таких систем.

В работах [4, 5] рассмотрены методы упрощения уравнений, описывающих движение двухзвенных гусеничных машин. Несмотря на то, что явно в работах об этом не указано, там применен прием вывода движения одного из звеньев из инерциальной системы отсчета. Эффект присутствия второго звена учитывается в уравнениях движения первого звена как некоторая не стационарность. При этом рулевое устройство рассматривается совместно с моделью первого звена.

Также имеется работа [6] в котором рассмотрен метод имитационного моделирования робота манипулятора. В данной работе также применяется прием вывода части процессов движения манипулятора из инерциальной системы отсчета. В результате такого рассмотрения удается получать адекватные реальному объекту имитационные модели для анализа объекта и системы их управления.

Учитывая опыт вышеописанных теоретических разработок авторами предлагается применение данных принципов получения уравнений, описывающих движение применительно к однозвенным транспортным средствам. На рис. 1б. представлена схема декомпозиции центра масс транспортного средства. В отличии от принципа, который применяется в вышеописанных работах для автомобиля предлагается несколько иной подход.

Предлагается рассмотреть движение автомобиля как составное, состоящее из компонент прямого и вращательного движения. При этом одну из компонент оставить в инерциальной системе отсчета, а вторую вывести из нее. При этом параметры, которые характеризуют движение объекта во второй компоненте – домене определяются посредством статической подмодели. Например, возвратно поступательную компоненту описать посредством уравнения второго порядка, полученного известными методами Эйлера – Лагранжа. А компоненту вращательного движения описать такими параметрами как: переменный радиус поворота, центробежные силы, действующие на транспортный механизм. Здесь нужно отметить, что

параметры такой модели некоторым образом соответствует параметрам, которые контролируются сейчас в реальных объектах. Например, мгновенная скорость и пройденный путь автомобиля сниматься посредством спидометра.

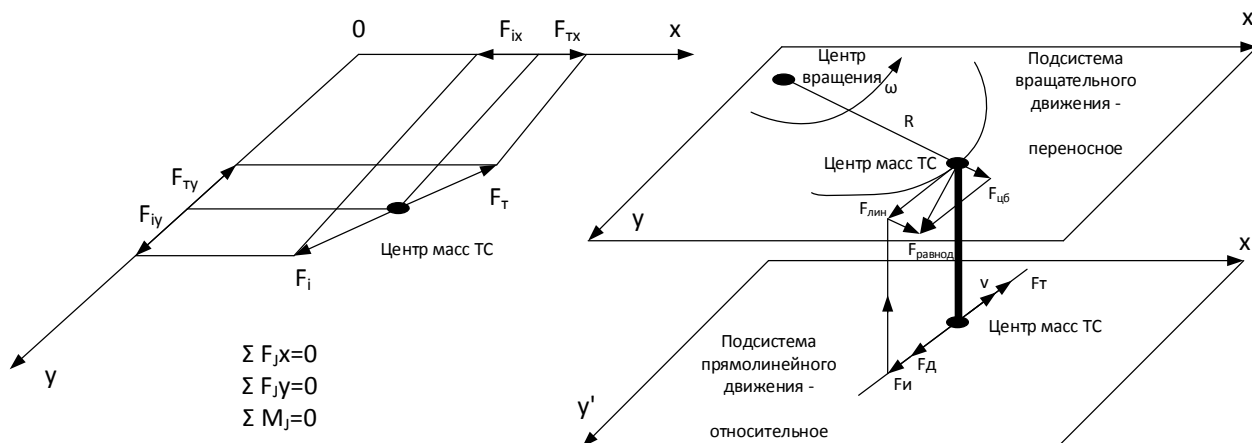


Рис.1. Принцип декомпозиции движения автомобиля посредством вывода части процессов движения из инерциальной системы отсчета

Такое рассмотрение аналогично ситуации, при котором тело движется по подвижной плоскости, совершая относительное движение. А плоскость в свою очередь совершает переносное вращательное движение с переменной осью вращения. Радиус вращения является переменным и зависит от положения рулящих колес. В связи с этим подобный подход к имитационному моделированию транспортных средств подтверждается имеющимися принципами сложного движения тела.

Предлагаемый метод позволяет формализовать величину и направление некоторой равнодействующей силы, которая определяет поведение автомобиля в нештатных ситуациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов Е. Е. Модульный принцип синтеза транспортных и технологических систем./ Е. Е. Баженов // Известия ВУЗов. Поволжский регион. Технические науки, №2 – Пенза. 2012 – С76 – 89.
2. Портнова, А.А., Щербаков В.С., Котыкин С.В., Результаты теоретических исследований математической модели автогрейдера с шарнирно-сочлененной рамой/ А.А. Портнова, В.С. Щербаков, С.В. Котыкин//Омский научный вестник. – Омск: ОмГТУ, 2014. – Вып. 2(130). – С.118 – 121.
3. Влахова А.В., Новожилов И.В., Смирнов И.А., Математическое моделирование заноса автомобиля.// Вестник московского университета, Сер. 1, Математика. Механика, №6, 2007. С 44 – 50.
4. Ильясов Б.Г. Хуснутдинов Д. З., Яруллин Ч.А., Синтез интеллектуальной системы управления движением двухзвенного гусеничного транспортера «Витязь» на основе имитационного моделирования// Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 10 (52) Часть 2, С. 46–53.
5. Ильясов Б. Г. Хуснутдинов Д. З., Яруллин Ч. А., Метод получения имитационных моделей движения двухзвенных гусеничных транспортеров «Витязь»// Вестник УГАТУ. 2016Т. 20, №1 (71). С. 20–25.а

Мунасыпов Р. А.

Munasipov R. A.

rust40@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

Устимова Е. И.

Ystimova E. I.

empire1411@bk.ru

Хуснутдинов Д. З.

Khusnutdinov D. Z.

dz_khusnutdinov@mail.ru

Филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Ишимбай

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОБОТОВ МАНИПУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ ВЫВЕДЕНИЯ ЧАСТИ ПРОЦЕССОВ ДВИЖЕНИЯ ИЗ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА

SIMULATION OF ROBOT MANIPULATORS BASED ON THE DERIVATION OF PART OF THE MOTION PROCESSES FROM THE INERTIAL FRAME OF REFERENCE

***Аннотация.** Представлен метод исследования роботов манипуляторов, основанный на выведении части процессов движения робота манипулятора из инерциальной системы отсчета. Проведены численные расчеты по модели и обоснована эффективность метода.*

***Abstract.** A method for studying manipulator robots is presented, based on deducing part of the processes of movement of the manipulator robot from the inertial frame of reference. Numerical calculations based on the model are carried out and the effectiveness of the method is justified.*

***Ключевые слова:** исследование, робот манипулятор, многозвенные объекты движения, система управления, синтез систем, сложное движение, системный анализ, вывод из инерциальной системы отсчета.*

***Keywords:** research, robot manipulator, multi-link motion objects, control system, system synthesis, complex motion, system analysis, inference from the inertial reference frame*

Введение

Моделирование роботов и нахождение новых методов исследования является актуальной задачей. Так как применение разработанных устройств требует создания новых адаптивных алгоритмов управления, которые не только управляют технологическими перемещениями, но и компенсируют возникающие при этом упругие перемещения, обусловленные возникающими силами. [1]

Движение звеньев роботов манипуляторов принято рассматривать как составное, состоящее из вращательного и поступательного движений при построении методов исследования в соответствии с принципами Ньютона –

Эйлера. Все силы каждого звена манипулятора проецируются на оси. В итоге необходимо получение 4 уравнений второго порядка для каждого звена.

При этом можно заметить, что каждое звено манипулятора совершает простое одномерное вращательное движение относительно предыдущего звена. Идея выведения части процессов движения манипулятора из инерциальной системы отсчета связана с подобным рассмотрением. Каждое звено рассматривается как движущаяся относительно подвижной, переносной, выведенной из СТО, одномерной системы отсчета. Другими словами, количество подобных систем отсчета будет равно количеству звеньев.

В работе [2] уже рассматривалась имитационная модель для двухзвенного робота, движущегося в пространстве с использованием теории сложного движения. Однако в данной работе имеются ряд неточностей и допущений. В данной работе представленная модель является полной и исчерпывающе представляющей предлагаемый метод моделирования для двухзвенного манипулятора, совершающего движение в пространстве.

Метод исследований

Первое звено манипулятора совершает вращательное движение относительно оси расположенной вертикально и в инерциальной системе отсчета. Движение второго звена может быть рассмотрено как движение тела, совершающее одномерное вращательное движение (рис. 1) в системе отсчета, которое связано жестко с первым звеном и является переносным.

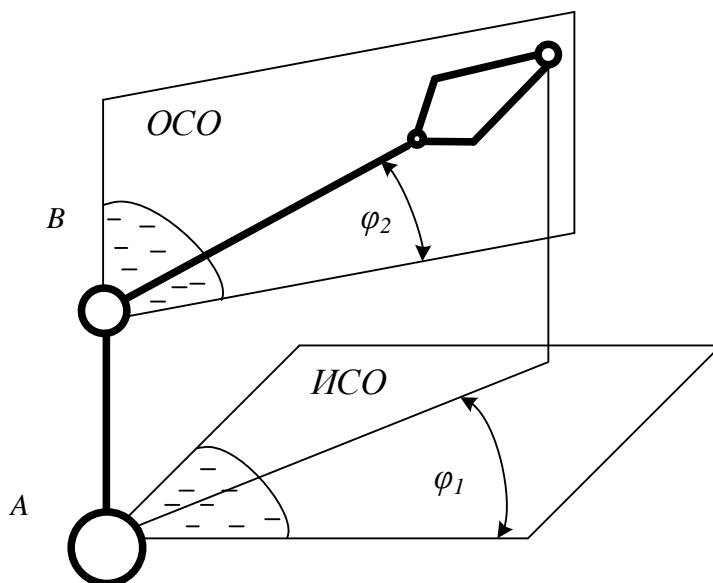


Рис. 1. К моделированию манипулятора с выведением второго звена из ИСО

Если принять описанные положения, то каждое звено может быть описано уравнением второго порядка для вращательного движения соответствующего звена. При этом эти уравнения должны быть нестационарными и представляют собой сепаратные подсистемы. Описываемая систем уравнений будет справедлива, если учесть перекрестные связи между

уравнениями звеньев, которые определяют влияние движение одного звена на другие.

Так нестационарный момент инерции, который действует против направления движения привода горизонтального вращения может быть рассмотрен, как момент инерции балки переменной длины. Длина в свою очередь зависит от углового положения второго звена φ_2 . (рис. 2).

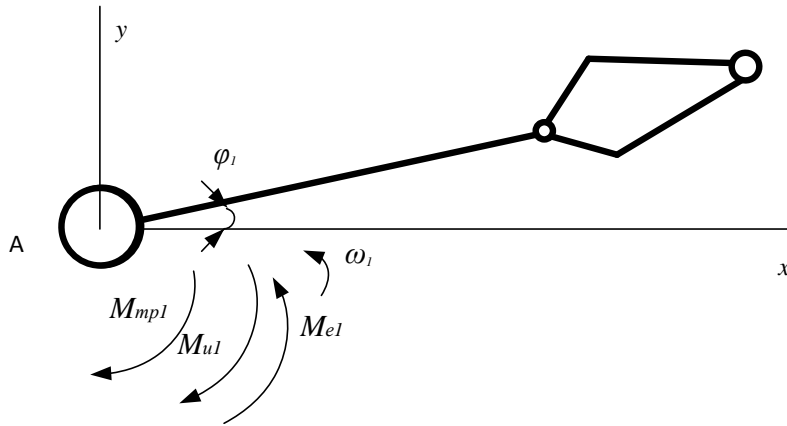


Рис. 2. Движение манипулятора на плоскости xy относительно привода горизонтального вращения

Уравнение движения горизонтального вращения опишется уравнением равновесия моментов:

$$M_{e1}(t) - M_{u1}(t) - M_{mp1}(t) = 0, \quad (1)$$

Инерционный момент сопротивления $M_{u1}(t)$ определяется по выражению (2) и рассматривается как сумма моментов первого звена как цилиндра и изменяющейся в длине балки:

$$\begin{aligned} M_{u1}(t) &= J_1 \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} = \left(\frac{1}{3} m_2 l_{1xy}^2 + \frac{1}{2} m_1 R^2 \right) \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} = \\ &= \left(\frac{1}{3} m_2 \left(\frac{l_2}{2} \cos(\varphi_2) \right)^2 + \frac{1}{2} m_1 R^2 \right) \frac{d^2\varphi_2}{dt^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где m_1 – масса второго звена, l_{2xy} – проекция второго звена на горизонтальную плоскость, R – радиус первого звена как цилиндра, φ_1 – угловое положение первого звена.

Момент силы трения $M_{mp1}(t)$ в шарнирах определяется уравнением (3):

$$M_{mp1}(t) = k_{mp1} \frac{d\varphi_1}{dt}, \quad (3)$$

где k_{mp1} – коэффициент трения второго звена.

Подставив выражения (2 и 3) в выражение (1) получим уравнение движения первого звена:

$$M_{e1}(t) - \left(\frac{1}{3} m_2 \left(\frac{l_2}{2} \cos(\varphi_2) \right)^2 + \frac{1}{2} m_1 R^2 \right) \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} - k_{mp1} \frac{d\varphi_1}{dt} = 0, \quad (4)$$

Второе звено манипулятора (рисунок 3) совершает вращательное движение относительно первого звена на плоскости $x'z'$, и одновременно совершает вращательное движение относительно оси z . В случае, когда вращательного движения относительно оси z нет, то уравнение движения будет следующим (5):

$$M_{e2}(t) - M_{u2}(t) - M_{mp2}(t) - M_{mg2}(t) = 0, \quad (5)$$

На звено действуют: момент электрического привода $M_{e2}(t)$, инерционный момент сопротивления $M_{u2}(t)$, момент трения $M_{mp2}(t)$ и момент силы гравитации $M_{mg2}(t)$. Величина силы гравитации зависит от углового положения рассматриваемого звена.

Выражение (6) учитывает влияние силы гравитации на второе звено, которое зависит от угла его положения:

$$M_{mg2}(t) = \frac{l_2}{2} \cos(\varphi_2) m_2 g, \quad (6)$$

где m_2 – масса второго звена, g – гравитационная постоянная, l_2 – длина второго звена, φ_2 – угловое положение второго звена.

Инерционный момент сопротивления $M_{u2}(t)$ для балки определяется по выражению (7):

$$M_{u2}(t) = J_2 \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} = \frac{1}{3} m_2 l_2^2 \frac{d^2\varphi_2}{dt^2}, \quad (7)$$

где J_2 – момент инерции второго звена.

Момент трения $M_{mp2}(t)$ в шарнирах определяется уравнением (8):

$$M_{mp2}(t) = k_{mp2} \frac{d\varphi_2}{dt}, \quad (8)$$

где K_{mp2} – коэффициент трения второго звена.

Подставив выражения (6, 7, 8) в выражение (5) получим уравнение движения:

$$M_{e2}(t) - \frac{1}{3} m_2 l_2^2 \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} - k_{mp2} \frac{d\varphi_2}{dt} - \frac{l_2}{2} \cos(\varphi_2) m_2 g = 0. \quad (9)$$

В случае, когда происходит движение звена по оси z , возникает центробежная сила $F_{цб}$, которая совместно с силой гравитации образуют некоторую равнодействующую силу, момент которой необходимо учесть в качестве момента сопротивления, образованного действием силы гравитации и движением первого звена.

Таким образом, момент гравитации M_{mg2} , описанное в уравнении (6) необходимо заменить на момент равнодействующей силы $M_p = h F_p$:

$$M_p = h F_c = h \sqrt{(m_2 g)^2 + F_{цб}^2}, \quad (10)$$

где $F_{цб} = m_2 \omega_1^2 R$; R – радиус поворота центра масс звена относительно оси; ω_1 – скорость вращения первого звена относительно горизонтальной оси.

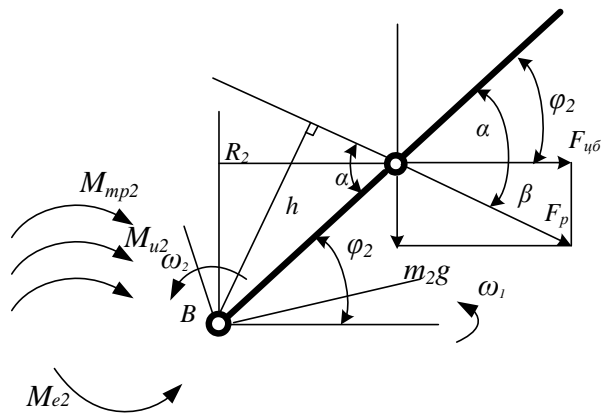


Рис. 3. Расчетная схема второго звена манипулятора

Плече силы определится по рисунку 3 выражением:

$$h = \frac{1}{2} l_2 \sin(\varphi_2 + \arctg(\frac{m_2 g}{m_2 \omega_1^2 (l_2 \cos \varphi_1)})). \quad (11)$$

Результаты численных расчетов

На рис. 4-7 представлены численные расчеты по модели двухзвенного робота с учетом приводов с электродвигателями постоянного тока, описанных в работе [1] и единичными обратными связями по угловым положениям звеньев.

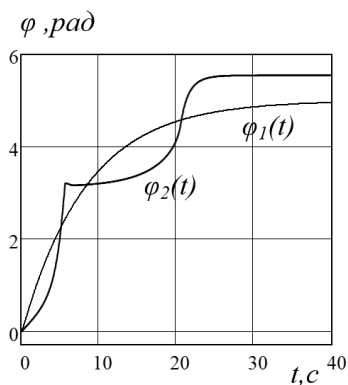


Рис. 4. Угловое положение первого $\varphi_1(t)$ и второго $\varphi_2(t)$ звеньев

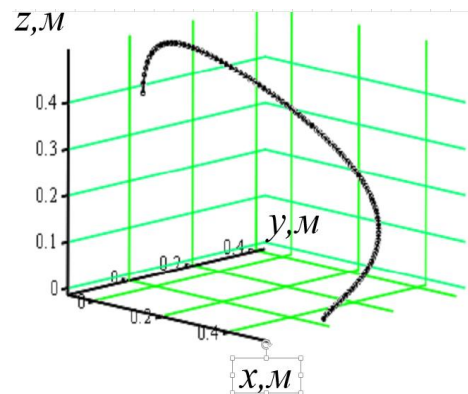


Рис. 5. Траектория движения конца второго звена

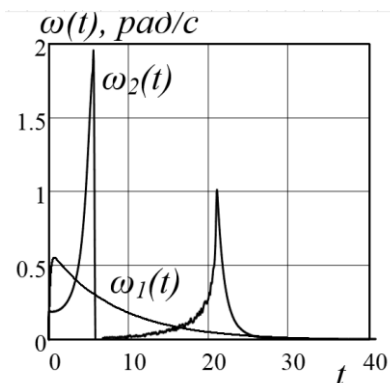


Рис. 6. Угловое положение первого $\omega_1(t)$ и второго $\omega_2(t)$ звеньев

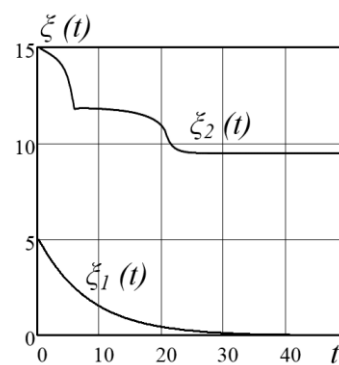


Рис. 7. Ошибки управления первого $\zeta_1(t)$ и второго $\zeta_2(t)$ звеньев

По рисункам видно, что модель адекватно воспроизводит процессы движения звеньев манипулятора. Второе звено после достижения 180 градусов «проваливается» в связи с изменением направления момента гравитационной силы. В связи с наличием гравитационной постоянной силы, действующей на второе звено при установившемся угловом значении, возникает постоянная ошибка управления, так как система управления вторым звеном является статическим. Траектория движения конца второго вектора рассчитываются безынерционными выражениями по значениям угловых положений и габаритных параметров звеньев вне модели.

Выводы

Таким образом получен метод имитационного моделирования и исследования роботов манипуляторов. Метод позволяет существенно сократить количество уравнений за счет выведения части процессов из инерциальной системы отсчета. Уравнения, полученные посредством метода, описывают движение звена, а не прямолинейную компоненту движения звена по какой-либо оси или вращательное движение звена относительно одной из осей. Соответственно алгоритмы управления представляют собой формализованный в соответствии с реальным приводом вид.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Munasypov, R. A. Automation of the Technological Process of Cleaning Tubing during the Repair of Downhole Equipment Using a Mobile Robotic Complex / R. A. Munasypov, T. I. Mustaev, M. I. Sharipov // Proceedings - 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019, Lipetsk, 20–22 ноября 2019 года. – Lipetsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 294-296
2. Хуснутдинов, Д. З. Использование элементов теории сложного движения при анализе и синтезе систем управления многозвенными объектами / Д. З. Хуснутдинов // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста: Материалы Всероссийской научно-технической конференции, Уфа, 26–28 февраля 2019 года. – Уфа: ГОУ ВПО "Уфимский государственный авиационный технический университет", 2019. – С. 208-214.
3. Ильясов Б.Г. Хуснутдинов Д. З., Яруллин Ч.А., Синтез интеллектуальной системы управления движением двухзвенного гусеничного транспортера «Витязь» на основе имитационного моделирования// Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 10 (52) Часть 2, С. 46–53.
4. Ильясов Б. Г. Хуснутдинов Д. З., Яруллин Ч. А., Метод получения имитационных моделей движения двухзвенных гусеничных транспортеров «Витязь»// Вестник УГАТУ. 2016Т. 20, №1 (71). С. 20–25.

Искаков С. А.

Iskakov S. A.

nice.romantic@mail.ru

ПАО «ОДК – Уфимское моторостроительное производственное объединение»

Мунасыпов Р. А.

Munasyrov R. A.

rust40@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

THE PROBLEM OF IMPLEMENTING AUTOMATION IN MACHINE BUILDING

***Аннотация.** В статье исследованы актуальные вопросы автоматизации в современном мире, рассмотрены плюсы и минусы автоматизации производственного процесса, описаны принципы, которые необходимо соблюдать при проектировании автоматизированного производства, обозначены требования, которые должны соблюдаться при разработке автоматизированных систем производственного процесса, выделены положительные составляющие от внедрения автоматизированного производственного процесса, а также ряд проблем, с которыми сталкиваются современные предприятия при внедрении автоматизации производственного процесса.*

***Abstract.** The article explores topical issues of automation in the modern world, discusses the pros and cons of automation of the production process, describes the principles that must be followed when designing automated production, outlines the requirements that must be met when developing automated systems of the production process, highlighted the positive components of the introduction of automated production processes, as well as a number of problems faced by modern enterprises and the introduction of automation of the production process.*

***Ключевые слова:** автоматизация, производство, принципы автоматизации производства, производственный процесс, механизм производственного процесса, технологическая безработица.*

***Keywords:** automation, production, principles of production automation, production process, production process mechanism, technological unemployment.*

Производственный процесс представляет собой целенаправленное превращение исходного сырья и материалов в готовый продукт заданного свойства и пригодного для дальнейшего использования или обработки. Основная цель производства заключается в удовлетворении потребностей конечного потребителя и общества в целом [1].

Постоянно развивающийся технический прогресс толкает производство к постоянному и непрерывному изменению, путем обновления способов изготовления продукта, появлением новых автоматизированных линий, позволяющих процессу производства становиться более емким и технологичным. Современные машины и оборудование позволяют до

минимума сократить сроки изготовления продукции, а также улучшить ее качество.

В условиях автоматизированного производства наиболее актуальной задачей является комплекс мероприятий по разработке технологических процессов и созданию на их основе высокопроизводительных машин. Сегодня, автоматизация производства представляет собой одно из перспективных направлений в развитии промышленности.

Однако, несмотря на очевидную прогрессивность автоматизации и повышенное внимание к ней, её внедрение осуществляется замедленными темпами на современных предприятиях.

Цель настоящего исследования заключается в изучении и анализе автоматизации производства на современном этапе, возникающих проблем, а также предложений рекомендаций по их решению.

Автоматизация производственного процесса, ее плюсы и минусы

Автоматизация производства представляет собой совокупность методов и средств, которые предназначены для реализации системы или систем, позволяющих осуществлять управление процессом производства без вмешательства человека, либо оставления за последним права принятия решений в наиболее ответственные моменты. Внедрение автоматизации требует четкости и бесперебойности работы от всех звеньев механизма производственного процесса предприятия. Это достаточно трудоемкий процесс, требующий длительных временных издержек и больших финансовых вложений.

Автоматизация производственного процесса обычно создается при помощи автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП), представляющей собой комплекс программных и технических средств, которые предназначены для автоматизации управления технологическим оборудованием на предприятиях [2].

АСУТП является комплексным решением, которое обеспечивает автоматизацию основных производственных операций. Составными частями АСУТП могут быть:

- отдельные системы автоматического управления (САУ);
- автоматизированные устройства, представляющие собой единый комплекс.

АСУТП имеет централизованную систему операторского управления производственным процессом в виде одного или нескольких пультов управления, средств обработки и хранения информации о ходе процесса производства, а также стандартные элементы автоматики: датчики, контроллеры и т.п. Информационная связь подсистем устанавливается промышленными сетями.

Проектируя автоматизированное производство, необходимо соблюдать следующие принципы:

- принцип завершенности, т.е. стремление к выполнению всех операций в пределах одной автоматизированной системы;

- принцип малооперационной технологии, т. е. количество промежуточных операций, сведено к минимуму;
- принцип малолюдной технологии, т. е. обеспечение автоматической работы на всем протяжении производственного цикла;
- принцип оптимальности, т. е. объекты и службы производства подчинены единому оптимальному критерию [3].

Серийное и мелкосерийное производство характеризуется созданием автоматизированных систем из универсального и агрегатного оборудования с межоперационными емкостями, которое имеет возможность переналаживания.

Автоматизация на крупносерийных и массовых производствах характеризуется созданием систем из универсального и агрегатного оборудования, объединенного жесткой связью.

По видам компоновки оборудования различают:

- однопоточные автоматизированные производства;
- многопоточные автоматизированные производства;
- производства параллельного агрегатирования.

При однопоточном автоматизированном производстве оборудование расположено по ходу выполнения операций. При многопоточном производстве все потоки выполняют аналогичные функции, но работают независимо друг от друга.

Внедрение автоматизированного производства представляет собой сложный процесс, требующий длительных временных издержек и больших финансовых вложений, поэтому хозяйствующий субъект, не обладающий необходимыми финансовыми возможностями, может автоматизировать свое предприятие частично.

Разработка автоматизированных систем производственного процесса должна осуществляться в соответствии со следующими требованиями:

- открытая и гибкая архитектура изменяемой системы;
- взаимодействие и интеграция между различными уровнями системы;
- поэтапный ввод системы в эксплуатацию, ее наращивание и

развитие.

Эффективно внедренная автоматизация производства обеспечивает:

- повышение качества продукции;
- положительная динамика роста производительности труда;
- повышение эффективности деятельности хозяйствующего субъекта;
- рост уровня безопасности [4].

Положительными составляющими внедрения исследуемого процесса будут также являться увеличение прибыли организации, снижение брака производимой продукции; уменьшение стоимости продукта, повышение контроля качества производимой продукции.

В тоже время, автоматизация производства имеет и отрицательные стороны, среди которых можно выделить усложнение производственной системы, перекавалификацию действующего персонала, появление уязвимостей в работе системы, рост уровня безработицы [5].

Одной из самых существенных проблем, связанных с автоматизацией производства, является «технологическая безработица», представляющая собой потерю рабочих мест, вызванную технологическими изменениями. Данная проблема обуславливает негативные взгляды относительно введения автоматизации. Также большой проблемой является недостаток квалифицированных кадров, поскольку специалисты, работающие на предприятиях, не знают современных стандартов работы. Тем не менее, положительных сторон автоматизации гораздо больше, чем отрицательных, поэтому большинство хозяйствующих субъектов стремятся перейти автоматизированный труд. Воздействие недостатков можно минимизировать, создав эффективную систему контроля над производством.

Выводы

Таким образом, в данной работе было рассмотрено понятие «автоматизация производственного процесса», выявлены ее основные принципы и особенности. Ускорение научно-технического прогресса открывает большие возможности для развития производственных сил, совершенствования оборудования и появления новых способов производства, что является решением многих проблем. Автоматизация производства позволяет сократить сроки выпуска продукции, улучшить ее качество, а также повысить конкурентоспособность предприятия и расширить рынок сбыта товара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипова Г.И., Миронова Г.В. Экономика и организация производства. МГУП, 2003. 322 с.
2. Селевцов Л.И. Автоматизация технологических процессов. Издательский центр «Академия», 2014. 352 с.
3. Цветаев С.С., Логачев К.И. Актуальные проблемы автоматизации промышленных предприятий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, 2012. № 1. С. 87–89.
4. Шестаков Н.В., Мишин С.П. Повышение эффективности промышленных предприятий России за счёт передовых решений в автоматизации // Автоматизация в промышленности, 2016. № 3. С. 3–5.
5. Картамышева Е.С., Иванченко Д.С. Промышленная автоматизация в России: проблемы и их решения // Молодой ученый, 2016. № 28. С. 93-95.

Мунасыпов Р. А.

Munasipov R. A.

rust40@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

Некрасова М. Ю.

Nekrasova M. Y.

titm.nm@mail.ru

Юрасова Н. В.

Yurasova N. V.

elan_ugatu@yandex.ru

Филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Ишимбай

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ КАК МНОГОМЕРНОГО ОБЪЕКТА

SIMULATION OF THE HYDRAULIC TRANSMISSION OF A TRACKED VEHICLE AS A MULTIDIMENSIONAL OBJECT

***Аннотация.** Выполнены исследования по управлению движением двухзвенного гусеничного транспортера «Витязь» на основе имитационного моделирования трансмиссии гусеничной машины как многомерного объекта.*

***Abstract.** The research on the movement control of the two-link "Vityaz" crawler tractor was carried out on the basis of simulation modeling of the transmission of a tracked vehicle as a multidimensional object.*

***Ключевые слова:** анализ; гидравлическая трансмиссия; двухзвенный транспортер; имитационная модель; синтез; система управления.*

***Keywords:** analysis; hydraulic transmission; two-link conveyor; simulation model; synthesis; control system.*

В работе [1, 2] выполнены исследования по управлению движением двухзвенной гусеничной машины. В данных статьях не учтена динамика сложных приводов гусениц двухзвенных машин. В соответствии с техническим заданием на разработку нового изделия АО «МК «Витязь» рассматривает гидравлический привод в качестве трансмиссии. В работе [3] уже рассмотрена методика исследования рассматриваемого объекта. Однако данная методика и алгоритмы управления не подходят для данного объекта как для многомерного.

В связи с вышесказанным, в работе поставлена цель разработки методики исследования гидравлического привода гусеничной машины как многомерного объекта управления.

На сегодняшний день известны разработки в области управления многомерными объектами. Но в качестве объектов управления приняты устройства, описываемые уравнениями не выше третьего порядка.

Рассматриваемый трансмиссионный привод, как объект исследования представляет собой сложное изделие с двумя упругими элементами и двумя сконцентрированными массами. При этом в состав устройств представляет собой гидромеханическое устройство. Таким образом, рассматриваемый объект является сложным и методы, основанные на получении уравнений в пространстве состояний, не подходят для рассматриваемого класса объекта.

Многомерная система управления приводом гусениц будет определяться тем, что угол наклона шайбы аксиально-поршневого гидравлического мотора будет изменяться и рассматриваться как входной сигнал. Управление по двум каналам могло бы сделать динамику машины более маневренной. Возможность входного воздействия по двум каналам могло бы сделать динамику машины более плавным и улучшить динамические свойства.

Управление гидравлического привода является объемным и управляется за счет объемов и насоса, и мотора. Но при этом насос является нагнетающим устройством, а мотор принимающим. При увеличении объема принимающего устройства, привод приобретает мощность, при уменьшении объема, привод приобретает скорость. В приводе можно предусмотреть режимы преодоления больших нагрузок, при этом нужно увеличить объемы, а также можно уменьшать объемы после разгона. Такую двухканальную систему можно использовать как гидравлическую «коробку» передач. Нужно сказать, что для механических коробок передач методы расчета существуют. А для разработки гидравлической системы передач с переменным, плавным изменением коэффициента передачи пока не известны.

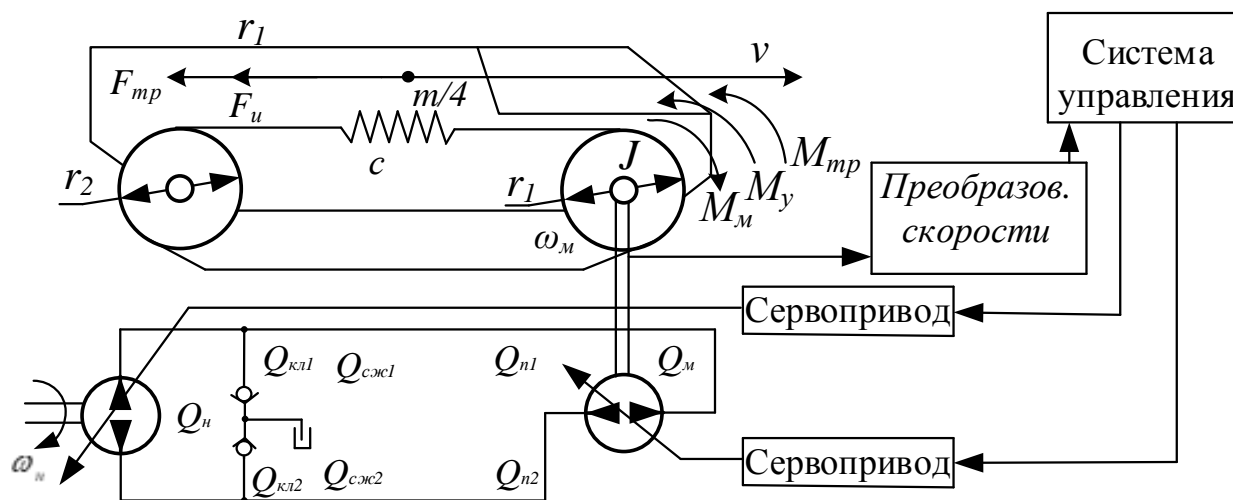


Рис. 1. Расчетная схема многомерной системы управления скоростью

Привод развивает большие силы. В связи с этим в модели учтены упругие свойства жидкости. Упругий элемент схемы находится между нагнетающей и принимающей устройствами.

Для того, чтобы получить двумерную модель необходимо в описанной модели провести некоторые изменения. В уравнении, описывающей движение

трансмиссии, которая приведена в работе [3], необходимо параметр углового положения гидравлического мотора β_m рассмотреть, как входной сигнал изменяющаяся от времени.

Тогда момент на валу гидромотора определится выражением:

$$M_m = \Delta p \frac{F_m}{8} z_m D_m \Omega_m \operatorname{tg}(\beta_m(t)), \quad (9)$$

Науке в данный момент не известны методы, позволяющие управлять объектом такой топологии. В связи с этим требуются дополнительные исследования объекта управления, базовой системы с обратной связью и разработка системы управления объектом.

Ниже приведены примеры различного входного воздействия по двум каналам, рис. 2-5.

На рис. 2 представлены сигналы входного воздействия в виде значений углов наклона шайбы насоса и мотора по времени. На рис. 3. представлены угол наклона шайбы насоса $\gamma_n(t)$ и линейной скорости нагруженной ленты гусеницы $V(t)$ при входных сигналах, совпадающих по профилю с кривой для шайбы насоса в рис. 2. Соответственно объем мотора малый в начале времени и мощности не хватает для развития достаточной скорости.

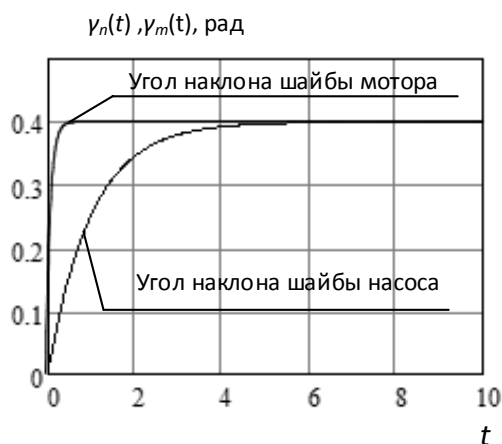


Рис. 2. Изменение значений углов наклона шайбы насоса и мотора по времени

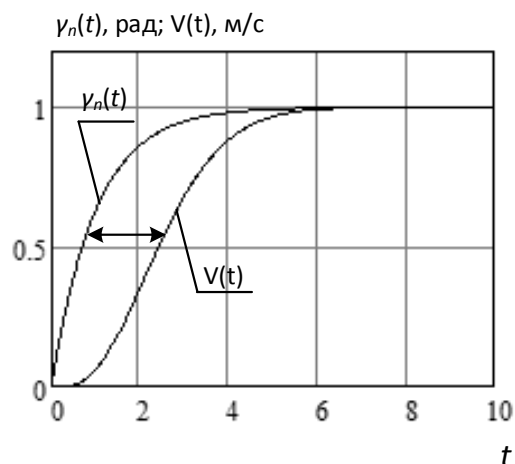


Рис. 3. Изменение угол наклона шайбы насоса $\gamma_n(t)$ и линейной скорости нагруженной ленты гусеницы по времени

На рис. 4. представлены угол наклона шайбы насоса $\gamma_n(t)$ и линейной скорости нагруженной ленты гусеницы $V(t)$ при входных сигналах, имеющих профили в соответствии с рис. 1. И как видно из рисунков запаздывание реакции в виде скорости ленты гусеницы при больших объемах принимающего потенциал устройства больше чем, когда этот объем увеличивается вначале подачи потенциала насосом.

При больших объемах принимающего устройства привод работает как гидроусилитель потенциала, и, соответственно, давление гидропривода также

снижается, как это показывают результаты численного расчета по модели на рис. 4 (1 и 2).

Нужно отметить, что установившиеся значения давления не равны нулю и при движении нагрузка потребляет энергию (рис. 4).

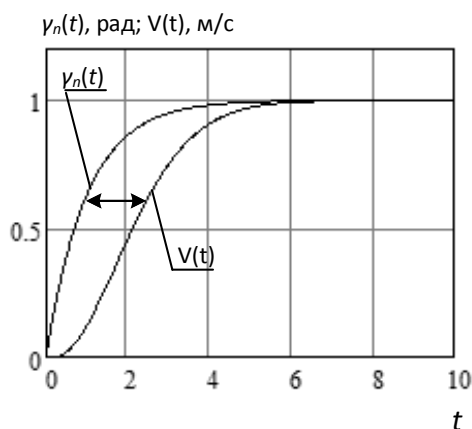


Рис. 4. Результаты численного расчета по модели

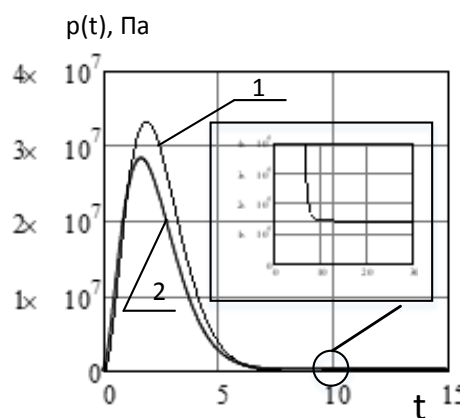


Рис. 5. Результаты численного расчета по модели

Таким образом, методика расчета и компьютерные модели подходят для исследования объекта и многомерного объекта. Также видно, что объекту требуется коррекция быстродействия.

Выводы

Разработана методика исследования объекта на основе имитационной модели, эффективную для выполнения анализа и синтеза системы автоматического управления гидравлической трансмиссией двухзвенного гусеничного транспортера «Витязь» на основе имитационного моделирования. Предложена новая схема привода с двумя сервоприводами, преобразователем скорости. За счет такой схемы привода можно выбрать насос, мотор и объемы привода более малого типоразмера, создать систему управления, которая будет двигаться оптимально на малых давлениях при сложных дорожных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильясов Б. Г. Хуснутдинов Д. З., Яруллин Ч.А., Синтез интеллектуальной системы управления движением двухзвенного гусеничного транспортера «Витязь» на основе имитационного моделирования// Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 10 (52) Часть 2, С. 46–53.
2. Ильясов Б. Г. Хуснутдинов Д. З., Яруллин Ч. А., Метод получения имитационных моделей движения двухзвенных гусеничных транспортеров «Витязь»// Вестник УГАТУ. 2016Т. 20, №1 (71). С. 20–25.
3. Хуснутдинов Д. З., Некрасова М.Ю., Чариков П.Н., Яруллин Ч. А., Поликарпов Ю.В. Анализ и синтез системы управления гидравлической трансмиссией двухзвенного гусеничного снегоболотохода на основе имитационного моделирования// Вестник УГАТУ. 2020Т. 20, №4 (90). С. 133–139.

Мунасыпов Р. А.

Munasipov R. A.

rust40@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

Некрасова М. Ю.

Nekrasova M. Y.

titm.nm@mail.ru

Юрасова Н. В.

Yurasova N. V.

elan_ugatu@yandex.ru

Филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Ишимбай

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН С УЧЁТОМ УПРУГИХ СВОЙСТВ ГУСЕНИЦЫ И РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ

SIMULATION MODEL OF HYDRAULIC TRANSMISSION OF TRACKED VEHICLES TAKING INTO ACCOUNT THE ELASTIC PROPERTIES OF THE TRACK AND THE WORKING FLUID

***Аннотация.** Разработана имитационная модель объекта управления с одним входным воздействием для выполнения анализа и синтеза системы автоматического управления гидравлической трансмиссией двухзвенного гусеничного трактора «Витязь» на основе имитационного моделирования.*

***Abstract.** A simulation model of the control object with a single input action is developed to perform the analysis and synthesis of the automatic control system of the hydraulic transmission of the two-link tracked tractor "Vityaz" on the basis of simulation modeling.*

***Ключевые слова:** анализ; гидравлическая трансмиссия; двухзвенный трактор; имитационная модель; синтез; система управления.*

***Keywords:** analysis; hydraulic transmission; two-link conveyor; simulation model; synthesis; control system.*

Трансмиссия – это комплекс передаточных устройств, обеспечивающих передачу крутящего момента от двигателя рабочим органам машин, используя в одном или нескольких устройствах рабочую жидкость, получаем гидравлический или гидромеханический привод.

Применение в транспортных средствах гидравлического или гидромеханического привода позволяет обрести плавность управления быстрое и легкое изменение направления движения и переключения передач на ходу, исключая педаль сцепления, при работе в тяжелых условиях движения и неравномерностях дорожного покрытия, особенно при резком подъеме или спуске.

В связи с вышеизложенным разработка систем автоматического управления очень актуальна, так как возникает необходимость управлять вращающим моментом, передаваемого к ведущим колесам с целью компенсации постоянно меняющегося сопротивления из-за несовершенства дорожного покрытия.

Кроме того, в зависимости от условий возникает необходимость в остановке транспортного средства или изменении направления их движения.

Использование гидравлических систем управления так же дает возможность автоматического гашения колебаний, контроля и регулировки крутящего момента и угловой скорости, практически без разрыва потока мощности и при применении достаточно простых механизмов и устройств.

Поэтому необходимо создание системы управления трансмиссией с хорошим быстродействием и качеством.

Рассмотрим расчетную схему гидравлической трансмиссии двухзвенного гусеничного транспортера – рис. 1, состоящую из регулируемых реверсивных аксиально-поршневого насоса (АПН) и аксиально-поршневого гидромотора (АПМ), механически соединенного с ведущим колесом гусеницы.

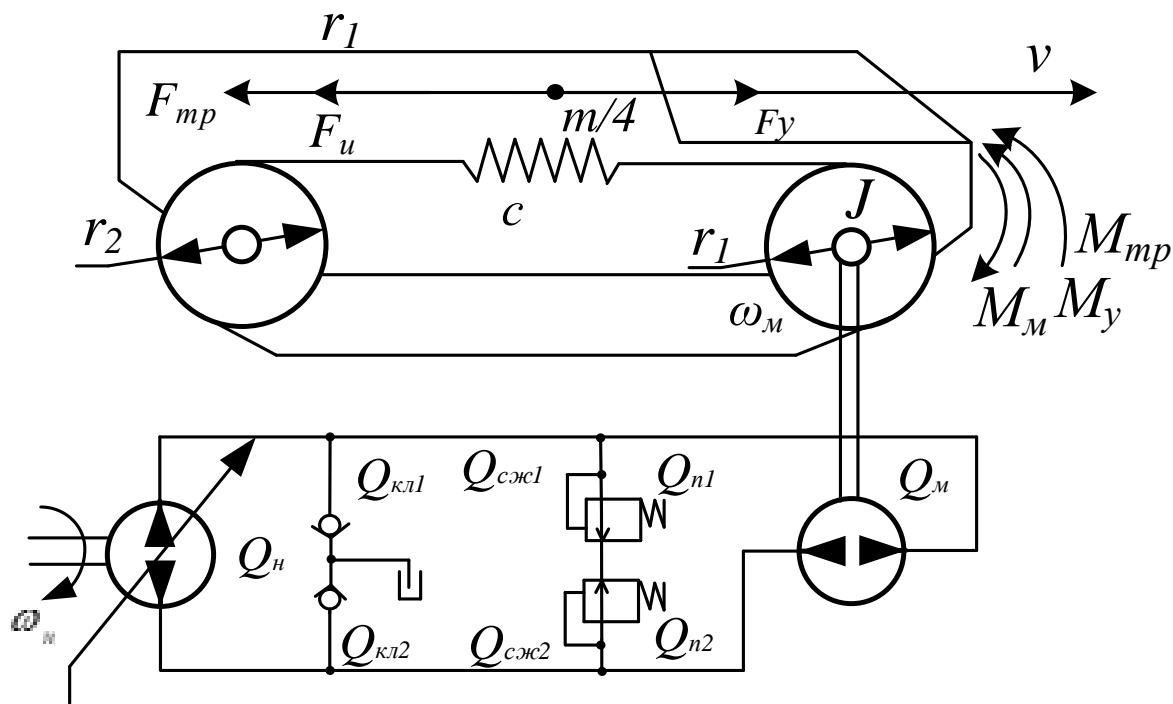


Рис. 1. Расчетная схема системы управления скоростью

Производительность гидравлического привода управляется посредством сервомотора насоса. Привод оснащен подпиточными и предохранительными клапанами. Упругие свойства гусеницы учтены в виде упругого элемента.

Для анализа и синтеза системы автоматического управления гидравлической трансмиссией двухзвенного гусеничного транспортера

«Витязь» на основе имитационного моделирования создадим имитационную модель объекта управления с одним входным воздействием.

Уравнения расходов для соответствующих полостей гидравлической части привода имеют вид:

$$\begin{aligned} Q_n &= Q_m + \Delta Q_{сж1} + Q_{кл1} - Q_{n1}, \\ Q_n &= Q_m - \Delta Q_{сж2} - Q_{кл2} + Q_{n2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где Q_n – подача насоса; Q_m – расход жидкости через гидромотор; $\Delta Q_{сж1}$; $\Delta Q_{сж2}$ – расход жидкости на сжатие в первой и во второй полостях привода; $Q_{кл1}$, $\Delta Q_{кл2}$ – расход жидкости через клапан в первой и во второй полостях привода; Q_{n1} , ΔQ_{n2} – расход жидкости через подпиточный клапан в первой и во второй полостях привода.

Подача насоса Q_n определяется уравнением (2):

$$Q_n = \frac{F_n z_n D_n \Omega_n}{2\pi} \cdot \operatorname{tg}(\beta_n) = K_n \operatorname{tg}(\beta_n), \quad (2)$$

где z_n – количество поршней АПН; D_n – диаметр окружности, на которой расположены оси поршней насоса; Ω_n – угловая скорость вала АПН; F_n – площадь поршня цилиндров АПН; β_n – угол наклона шайбы насоса.

Расход жидкости через предохранительные клапаны $Q_{кли}$ равен:

$$Q_{кли} = k_{кли} p_i, \quad (3)$$

где $i = 2$, $k_{кли}$ – коэффициент пропорциональности между давлением и расходом жидкости через клапан; p_i – давление жидкости в соответствующей полости привода.

Расход жидкости через подпиточный клапаны Q_{ni} равен:

$$Q_{ni} = k_{ni} p_i, \quad (4)$$

где k_{ni} – коэффициент пропорциональности между давлением и расходом жидкости через клапан.

Расход жидкости на сжатие в первой и во второй полостях привода $\Delta Q_{сж1}$; $\Delta Q_{сж2}$ определяются выражениями:

$$\Delta Q_{сжi} = \frac{V_n}{B_{жс}} \cdot \frac{dp_i}{dt}, \quad (5)$$

где V_n – объем жидкости в одной полости гидравлического привода; $B_{жс}$ – модуль упругости жидкости.

Расход жидкости через гидромотор определяется выражением:

$$Q_M = \frac{F_M z_M D_M \Omega_M}{2\pi} \cdot \operatorname{tg}(\beta_M) = K_M \operatorname{tg}(\beta_M), \quad (6)$$

где z_M – количество поршней АПМ; D_M – диаметр окружности, на которой расположены оси поршней мотора; Ω_M – угловая скорость вала АПМ; F_M – площадь поршня цилиндров АПМ; β_M – угол наклона шайбы мотора.

Подставив выражения (2-6) в систему уравнений 1, получим систему уравнений, описывающую динамику гидравлической части привода:

$$\begin{aligned} K_H \operatorname{tg}(\beta_H) &= K_M \operatorname{tg}(\beta_M) + \frac{V_{\Pi}}{B_{\text{жс}}} \cdot \frac{dp_1}{dt} + k_{\text{кл}1} p_1 - k_{\text{н}1} p_1, \\ K_H \operatorname{tg}(\beta_H) &= K_M \operatorname{tg}(\beta_M) - \frac{V_{\Pi}}{B_{\text{жс}}} \cdot \frac{dp_2}{dt} - k_{\text{кл}2} p_2 + k_{\text{н}1} p_2. \end{aligned} \quad (7)$$

Масса ведущего колеса гусеницы много меньше массы двухзвенного транспортёра, поэтому движение в виде вращения колеса было бы разумно привести к уравнению движения всего транспортера. Но для четкой формализации упругих процессов гусеницы необходимо учесть движение ведущего колеса гусеницы совместно с валом АПМ в отдельном уравнении. Уравнение вращения ведущего колеса гусениц найдем из уравнения равновесия моментов действующей на нее:

$$M_M - M_u - M_{\text{тр}} - M_y = 0, \quad (8)$$

где M_M – момент на валу гидромотора; $M_{\text{тр}}$ – момент сопротивления сил трения; M_y – момент упругой силы, действующей на ведущее колесо со стороны гусеницы.

Момент на валу гидромотора определится выражением:

$$M_M = \Delta p \frac{F_M}{8} z_M D_M \Omega_M \operatorname{tg}(\beta_M), \quad (9)$$

где $\Delta p = p_1 - p_2$.

Момент инерционного сопротивления определится по второму закону Ньютона:

$$M_u = J \varepsilon_1, \quad (10)$$

где ε_1 – угловое ускорение при вращении ведущего колеса; J – момент инерции ведущего колеса.

Момент сил трения определится по известному выражению:

$$M_{mp} = k_{mp} \omega_1, \quad (11)$$

где ω_1 – угловая скорость вращения ведущего колеса; k_{mp} – коэффициент трения ведущего колеса при вращении.

Упругие силы определяются коэффициентом упругости и разностью углового положения ведущего и ведомого колеса и в виде закона Гука запишутся:

$$M_y = c(\varphi_1 - r_1 x), \quad (12)$$

где φ_1 – угловое положение ведущего колеса; c – коэффициент упругости гусеницы; r_1 – радиус ведущего колеса; x – координата положения звена, при условии, что оно движется по прямой.

Подставив выражения (9-12) в выражение 8 получим дифференциальное уравнение, описывающее вращение ведущего колеса гусеницы:

$$J \varepsilon_1 - k_{mp} \omega_1 - c(\varphi_1 - r_1 x) = \Delta p \frac{F_M}{8} z_M D_M \Omega_M \operatorname{tg}(\beta_M). \quad (13)$$

Вращение ведомого колеса гусеницы приведем к уравнению движения транспортера, при этом примем допущение, что транспортер движется прямолинейно. Уравнение равновесия движения транспортера будет выглядеть:

$$F_y - F_u - F_{mp} = 0, \quad (14)$$

Упругая компонента, выступающая в предыдущем домене как момент сопротивления, в домене движения транспортёра является ведущим потенциалом и направлена против всех сил сопротивления. Учитывая радиусы ведущего и ведомого колес, момент упругости преобразуется в силу упругости и выглядит следующим образом:

$$F_y = c \left(\frac{\varphi_1}{r} - x \right), \quad (15)$$

где $r = r_1/r_2$ – коэффициент преобразования углового перемещения ведущего колеса в прямо поступательное перемещение транспортера; r_2 – радиус ведомого колеса.

Момент инерционного сопротивления движения транспортера определится по второму закону Ньютона из допущения, что на одну опору-гусеницу приходится одна четвертая часть всей массы транспортера:

$$M_u = (m/4)a_1, \quad (16)$$

где a_1 – угловое ускорение при вращении ведущего колеса; m – масса всего транспортного механизма.

Момент сопротивления трения определяется по известному выражению:

$$M_{mp} = k_{mp}v, \quad (17)$$

где v_1 – скорость движения транспортера; k_{mp} – коэффициент трения при движении транспортера.

Подставив выражения (15-17) в выражение 14 получим дифференциальное уравнение, описывающее движение транспортёра:

$$\frac{m}{4}a - k_{mp}v = c \left(\frac{\varphi_1}{r} - x \right). \quad (18)$$

Полученные уравнения 7, 13 и 18 представляют собой систему дифференциальных уравнений, описывающих движение гидравлической трансмиссии.

Выводы

Разработана имитационная модель объекта управления с одним входным воздействием для выполнения анализа и синтеза системы автоматического управления гидравлической трансмиссией двухзвенного гусеничного транспортера «Витязь» на основе имитационного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильясов Б.Г. Хуснутдинов Д. З., Яруллин Ч.А., Синтез интеллектуальной системы управления движением двухзвенного гусеничного транспортера «Витязь» на основе имитационного моделирования// Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 10 (52) Часть 2, С. 46–53.
2. Ильясов Б. Г. Хуснутдинов Д. З., Яруллин Ч. А., Метод получения имитационных моделей движения двухзвенных гусеничных транспортеров «Витязь»// Вестник УГАТУ. 2016Т. 20, №1 (71). С. 20–25.
3. Хуснутдинов Д. З., Некрасова М.Ю., Чариков П.Н., Яруллин Ч. А., Поликарпов Ю.В. Анализ и синтез системы управления гидравлической трансмиссией двухзвенного гусеничного снегоболотохода на основе имитационного моделирования// Вестник УГАТУ. 2020Т. 20, №4 (90). С. 133–139.

Ахметов Р. Р.

Akhmetov R. R.

Rabotapr22@gmail.com

Идрисова Ю. В.

Idrisova Yu. V.

yu.v.idrisova@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

Перевертайло Д. А.

Perevertaylo D. A.

dddperevert@mail.ru

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО ПРИВОДА В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MATLAB

SIMULATION OF A LINEAR ACTUATOR IN MATLAB SOFTWARE

***Аннотация.** Новейшие станкостроительные разработки в значительной степени определяют технологические возможности и технический уровень развития страны. Использование линейного двигателя в приводе подачи значительно улучшает динамические характеристики станков. Поэтому при проектировании приводов с линейным двигателем с учетом сложного характера механической нагрузки необходимо провести моделирование электромеханических переходных процессов. В работе описан подход к моделированию линейного синхронного двигателя с постоянными магнитами, с использованием стандартного пакета программ Matlab/Simulink. А так наглядно продемонстрирована модернизация привода станка 500VT.*

***Annotation.** The latest machine tool developments largely determine the technological capabilities and technical level of the country's development. The use of a linear motor in the feed drive significantly improves the dynamic characteristics of the machine tools. Therefore, when designing drives with a linear motor, taking into account the complex nature of the mechanical load, it is necessary to simulate electromechanical transients. The paper describes an approach to modeling a linear permanent magnet synchronous motor using the standard Matlab / Simulink software package. And this is how the modernization of the drive of the 500VT machine tool was clearly demonstrated.*

***Ключевые слова:** привод, линейный привод, модель, моделирование, двигатель.*

***Keywords:** drive, linear drive, model, simulation, motor.*

Современное станкостроение уникально, потому что оно предопределяет прогресс машиностроения и приборостроения в целом. Процесс создания любых изделий – от миниатюрных электронных приборов до космических аппаратов – не обходится без механической обработки.

Новейшие станкостроительные разработки в значительной степени определяют технологические возможности и технический уровень развития страны. Можно утверждать, что развитие современной техники идет под девизом «скорость и точность». И для обеспечения скорости и точности в

современных станках все более широкое применение стали находить электрические линейные приводы. Цель статьи — это моделирование линейного двигателя с использованием библиотеки Simulink/SimPowerSystem для модернизации привода подачи станка 500VT.

На этапе проектирования линейного электропривода с учетом сложного характера механической нагрузки, необходимо решить задачу моделирования электромеханических переходных процессов при использовании в общем случае полупроводникового преобразователя, например, инвертора с ШИМ в качестве источника электропитания. Для случая электроприводов вращательного движения при решении таких задач в последнее время все более широко используется пакет программ Matlab/Simulink/SimPowerSystems. Однако в случае линейных электроприводов этот вопрос слабо освещен в литературе и требует специального рассмотрения.

Ранее был разработан проект станочного мехатронного комплекса для обработки детали типа «фланец». Был спроектирован двух шпиндельный токарный станок. В ходе разработки проведена модернизация привода главного движения правого шпинделя, а также спроектировано зажимное устройство. Однако в ходе разработки не было уделено должного внимания приводу подачи, модернизация которого могла бы значительно сократить вспомогательное время обработки и в целом повысить производительность оборудования. В следствии этого была поставлена следующая цель.

Целью данной работы является моделирование линейного привода инструментами SimPowerSystems, для модернизации привода подачи проектируемого станка.

Линейный привод – совокупность устройств, предназначенных для приведения в действие исполнительного органа машин по линейному поступательному движению. Состоит из двигателя, трансмиссии и системы управления.

Электрический линейный двигатель можно рассматривать как обычный роторный только развернутый в плоскость. При этом он имеет ряд значительных преимуществ таких как:

- высокая скорость,
- отсутствие трущихся элементов между статором и ротором,
- удивительная простота конструкции и применения,
- почти мгновенная остановка и мгновенный реверс,
- возможность передачи больших усилий.

При моделировании линейного привода в программном продукте Matlab стоит учесть, что в библиотеке simpowersistem отсутствует такой элемент как «линейный двигатель». Поэтому для построения модели привода с линейным двигателем будет использоваться блок синхронной машины с постоянными магнитами.

Линейный двигатель можно представить, как развернутый двигатель вращательного движения. Следовательно, зная параметры линейной машины,

можно их привести к параметрам вращательной машины используя следующие равенства:

$$\begin{aligned}v &= \omega \cdot R \\ F &= M \cdot \frac{\omega}{v} = \frac{M}{R} \\ J &= m \cdot R^2\end{aligned}\quad (1)$$

где ω , M , J , R – соответственно угловая частота вращения якоря, электромагнитный момент, момент инерции и радиус якоря двигателя вращательного движения;

v , F , m – соответственно линейная скорость движения якоря, электромагнитная сила и масса якоря линейного двигателя.

В нашем случае линейный привод будет заменять стандартный привод проектируемого станка (см. рис. 1). Поэтому условия применения линейного привода будут определены с учетом характеристик привода станка, которые приведены в табл. 1.

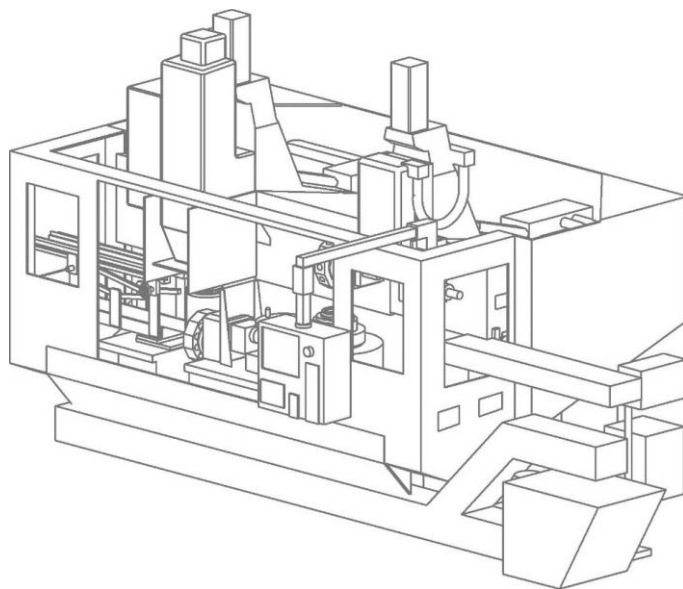


Рис.1. Общий вид станка 500VT

С учетом выше изложенного в табл. 2 приведены технические характеристики линейных двигателей серии LMFA компании HIWIN. Синхронные низкопрофильные линейные двигатели LMFA представляют модуль, снабженный силовым линейным приводом с циклическим водяным охлаждением.

Преимущества:

- 3-фазы;
- водяное охлаждение;
- низкие зубчатые гармонические помехи поля;
- неограниченный ход.

Характеристики привода станка 500VT

Диапазон рабочих подач по координате (X, Z), мм/мин	1...5000
Точность позиционирования, мм	±0,01
Число ступеней рабочих подач	регулирование бесступенчатое
Скорость быстрого перемещения по координате (X, Z), м/мин	(12...15)*
Наибольшее усилие подачи, Н – по координате X – по координате Z	9800 13000
Номинальная частота вращения по координате X, Z, мин ⁻¹ SIEMENS	3000
Номинальная мощность, кВт SIEMENS – по координате X – по координате Z	8,5 11,3
Наибольшие программируемые перемещения шпиндельной бабки, мм, не менее: – продольное перемещение (ось X) – левая шпиндельная бабка (ось X1) – правая шпиндельная бабка с рев. головкой (ось X2) – вертикальное перемещение (ось Z) – левая шпиндельная бабка (ось Z1) – правая шпиндельная бабка с рев. головкой (ось Z2)	1980 940 400 400

Технические характеристики линейных двигателей серии LMFA

Координата перемещения	F, Н	Fmax, Н	v, м/мин	v при Fmax, м/мин	m, кг	L, мГн	R, Ом
X	4266	10388	100	15	32,3	14,6	1,6
Z	5688	13850	100	15	40,8	23,9	2,6

Схема электропривода продемонстрирована на рис. 2.

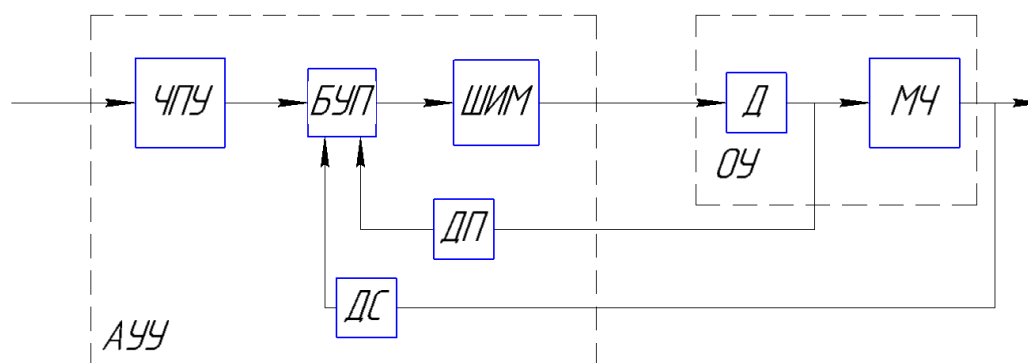


Рис. 2. Схема электропривода

В основной прямой части системы имеем: ЧПУ – числовое программное управление; БУП – блок управления приводом (может включать электронный блок, в котором идёт обработка и преобразование обратных связей); ШИМ – широтно-импульсный модулятор; Д – двигатель; МЧ – механическая часть; ДС – датчик скорости, который выполняет роль главной обратной связи (ОС); ДП – датчик положения угла ротора – вспомогательная ОС; ОУ – объект управления; АУУ – автоматическое устройство управления.

Механическая часть линейного привода

Учитывая конструкторские особенности линейного двигателя отпадает необходимость в применении вспомогательных и переходных звеньев между двигателем и рабочим органом станка. То есть кинематика привода исключает из себя переходные звенья, и имеется лишь жесткая связь между двигателем и механической частью. Поэтому, как и в случае с вращательными двигателями, механическую часть привода будем рассматривать как колебательную систему из двух масс.

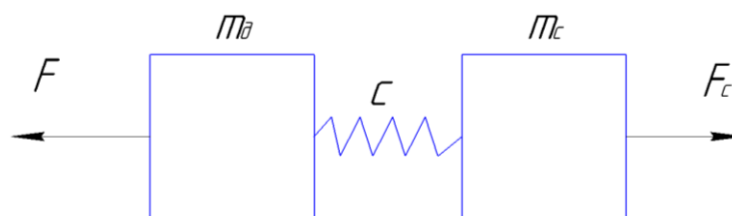


Рис. 3. Схема соединения двигателя с нагрузкой линейного привода

Рассмотрим левую часть схемы. Выведем уравнение баланса.

$$F - F_u - F_y = 0;$$

$$F_u = m_d \cdot x_p'';$$

$$F_y = c \cdot (x_d - x_n),$$

где m_d – масса двигателя,

x_p – линейное перемещение,

x_n – линейное перемещение нагрузки.

Теперь рассмотрим правую часть схемы рис. 3. Уравнение баланса примет следующий вид:

$$F_y - F_{un} = 0;$$

$$F_{un} = m_n \cdot x_n'',$$

где m_n – масса нагрузки.

Следовательно:

$$F_y = m_n \cdot x_n''.$$

При этом учтем, что сила сопротивления нагрузки будет равна максимальному усилию привода станка аналога $F_{на}$.

$$F - m_{\text{д}} \cdot x_{\text{д}}'' - F_{\text{на}} = 0;$$

$$x_{\text{д}}'' = \frac{F - F_{\text{на}}}{m_{\text{д}}}.$$

Проинтегрировав получившееся выражение мы получим выходное значение скорости v . На основании расчетов была построена структурная схема механической части привода, приведенная на рис. 4.

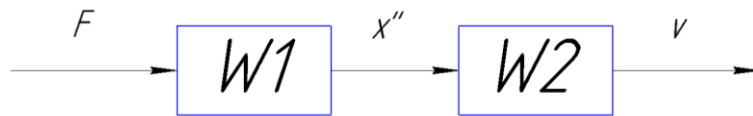


Рис. 4. Структурная схема механической части привода

Где:

$$W_1 = \frac{F - F_{\text{на}}}{m_{\text{д}}};$$

$$W_2 = \frac{1}{p}.$$

Моделирование линейного привода

Воспользовавшись формулами перехода (1) и табл. 2, рассчитаем характеристики переходного роторного двигателя. Полученные данные внесем в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики переходного роторного двигателя

Координата перемещения	R, м	J, кгм ²	M, Нм	ω , рад/с
X	0.315	3.21	1344	5.3
Z	0.064	0.167	364	6.4

Блок управления приводом реализованный в модели представлен на рис. 5.

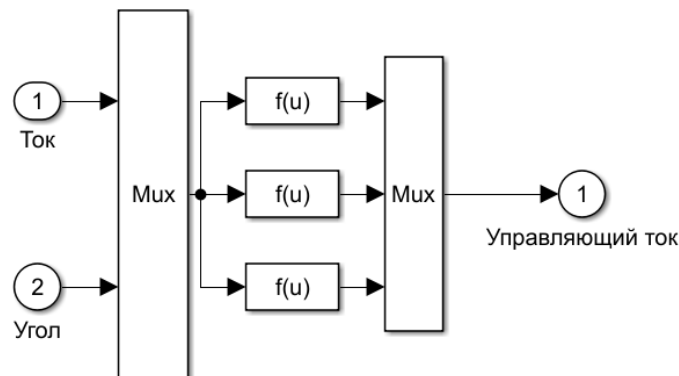


Рис. 5. Блок управления приводом

Структура ШИМ реализованная в модели представлена на рис. 6.

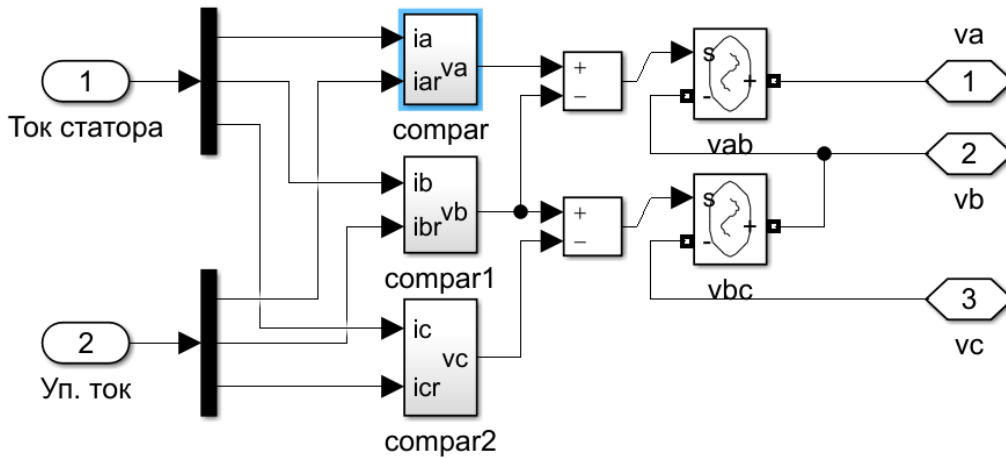


Рис. 6. Широтно-импульсный модулятор

Модель линейного привода представлена на рис. 7.

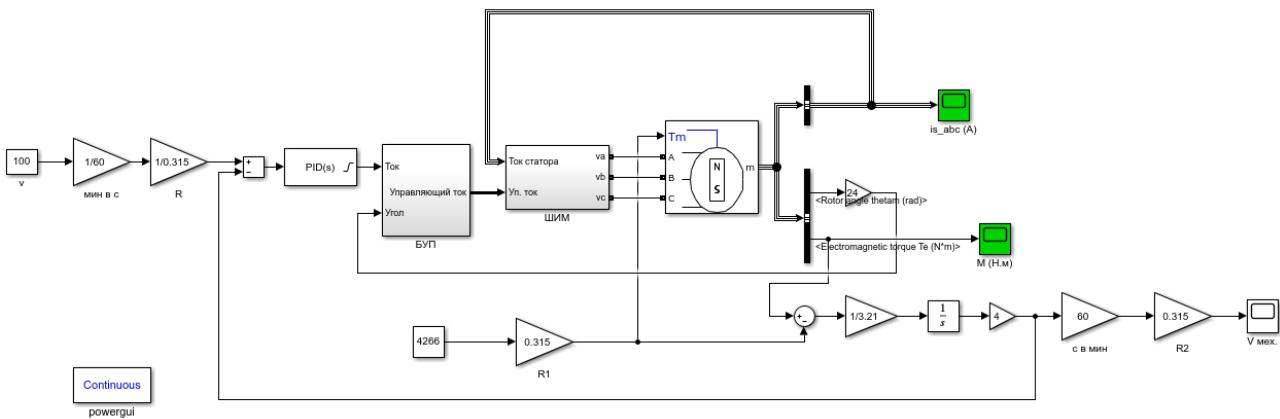


Рис. 7. Модель линейного привода

Графики скорости, тока и силы приведены на рис. 8-19.

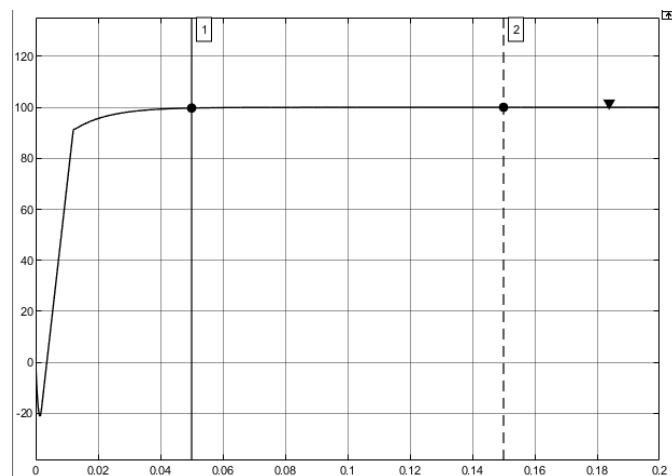


Рис. 8. График переходного процесса привода по координате X при $F=4266$ Н и заданной $v=100$ м/мин

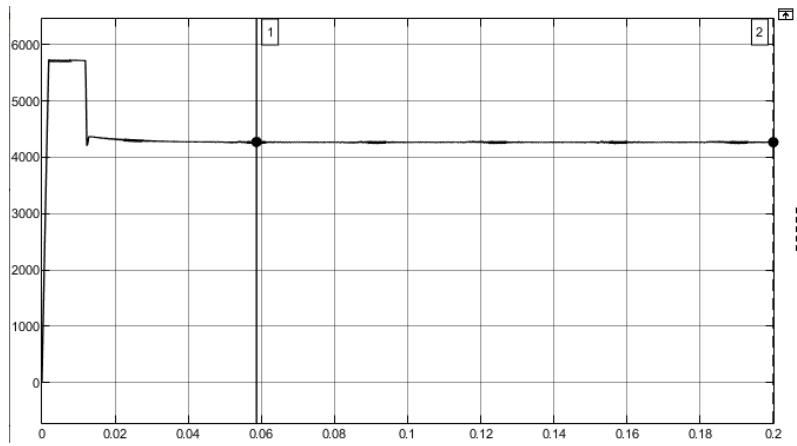


Рис. 9. График силы по координате X при $F=4266$ Н и заданной $v=100$ м/мин

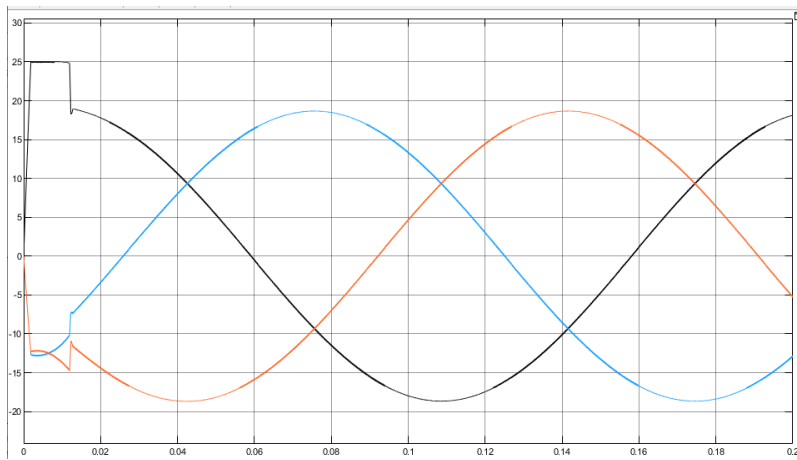


Рис. 10. График тока по координате X при $F=4266$ Н и заданной $v=100$ м/мин

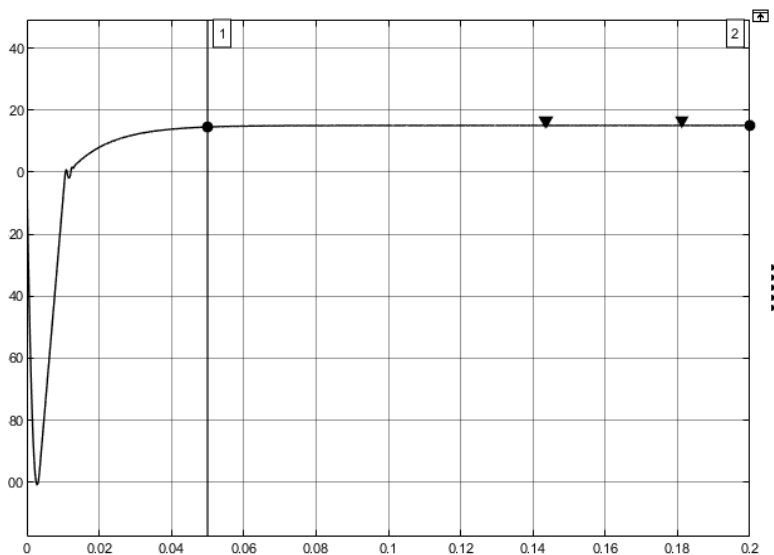


Рис. 11. График переходного процесса привода по координате X при $F=9600$ Н и заданной $v=15$ м/мин

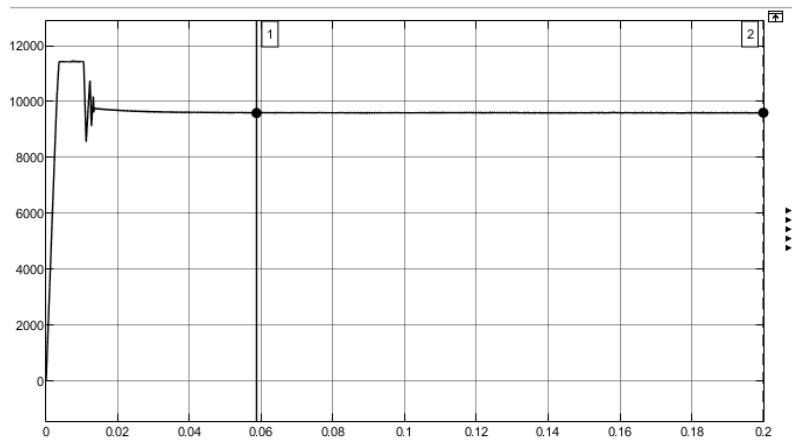


Рис. 12. График силы по координате X при $F=9600$ Н и заданной $v=15$ м/мин

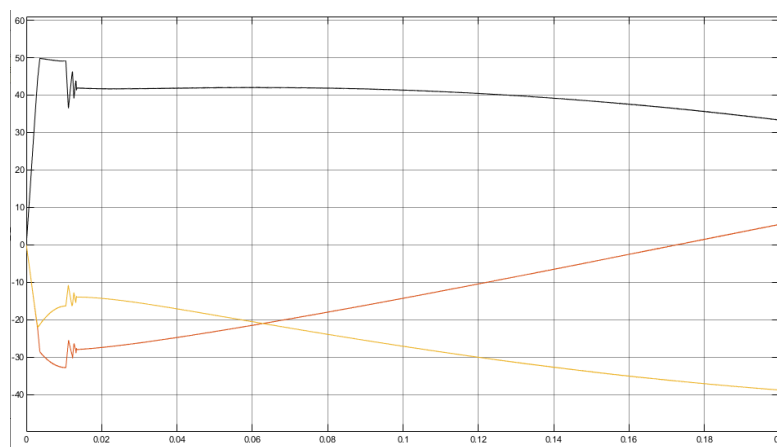


Рис. 13. График тока по координате X при $F=9600$ Н и заданной $v=15$ м/мин

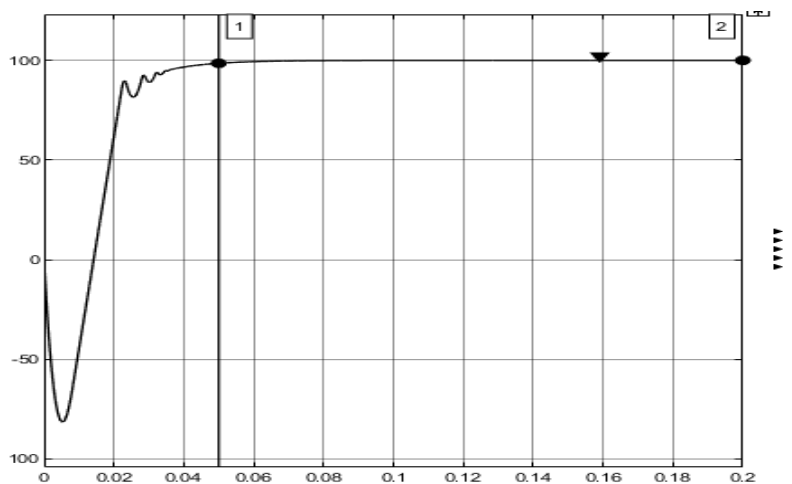


Рис. 14. График переходного процесса привода по координате Z $F=5688$ Н и заданной $v=100$ м/мин

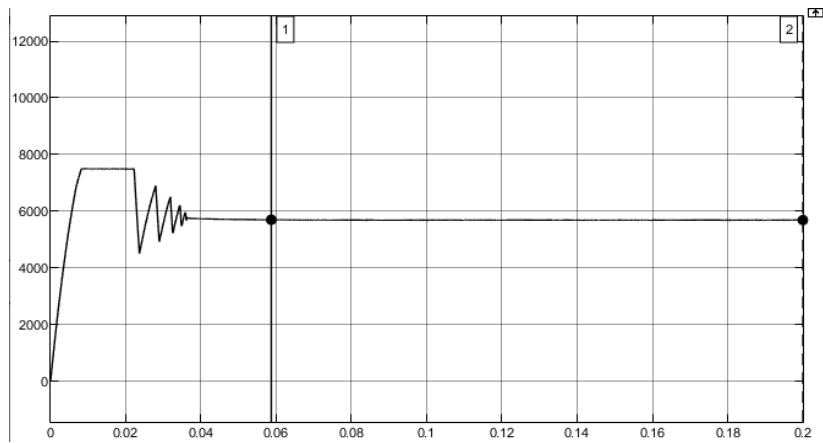


Рис. 15. График силы по координате Z при $F=5688$ Н и заданной $v=100$ м/мин

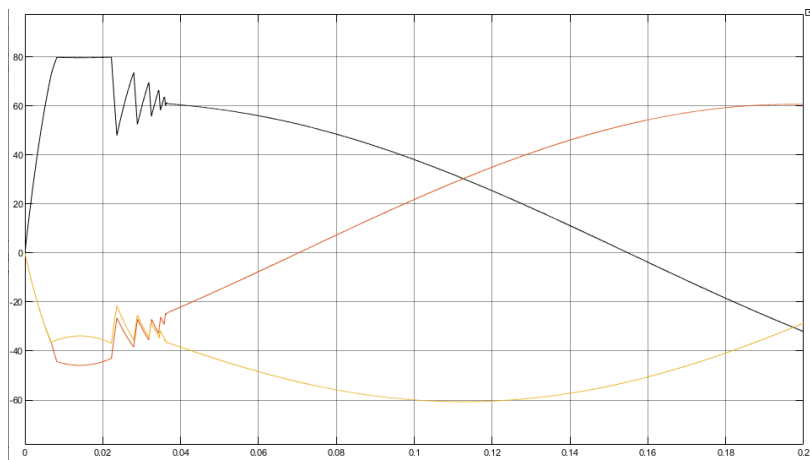


Рис. 16. График тока по координате Z при $F=5688$ Н и заданной $v=100$ м/мин

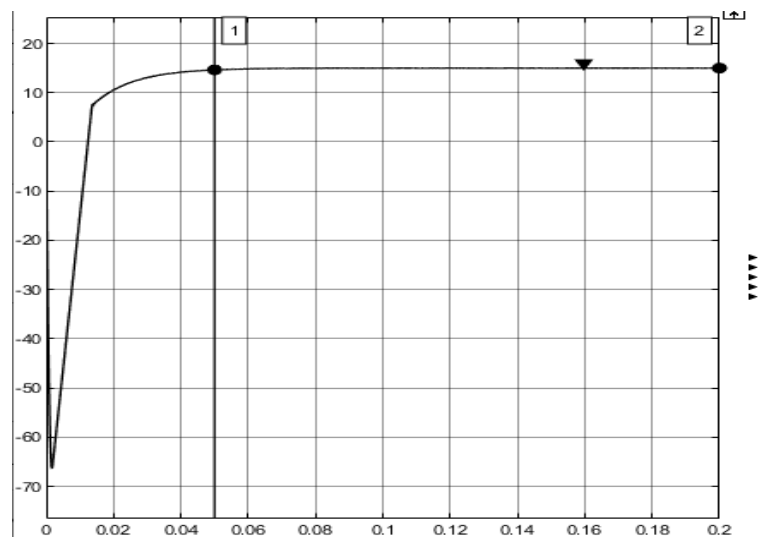


Рис. 17. График переходного процесса привода по координате Z при $F=13000$ Н и заданной $v=15$ м/мин

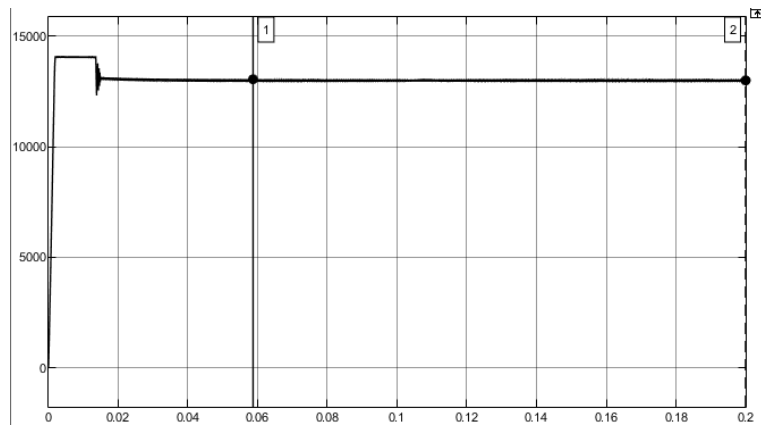


Рис. 18. График силы по координате Z при $F=13000$ Н и заданной $v=15$ м/мин

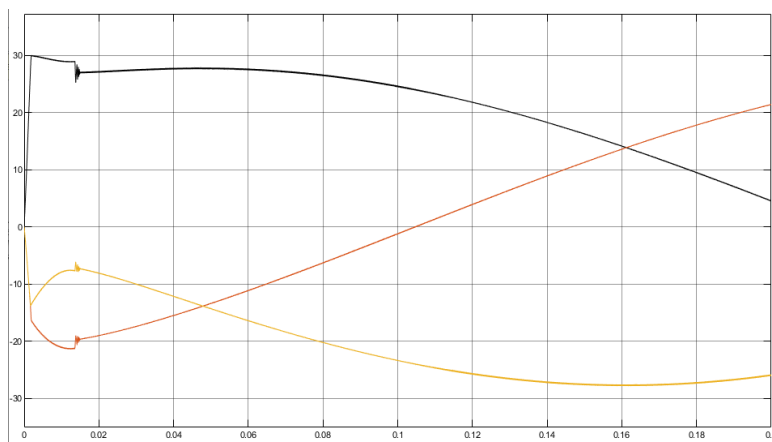


Рис. 19. График тока по координате Z при $F=13000$ Н и заданной $v=15$ м/мин

При сравнении роторного двигателя с линейным можно выделить ряд значительных преимуществ последнего, которые приведены в табл. 4 [5].

Выводы

В работе описан подход к моделированию линейного синхронного двигателя с постоянными магнитами, с использованием стандартного пакета программ Matlab/Simulink. Подводя итог всему выше сказанному можно резюмировать, что линейный привод значительно повысит динамику станка, при этом сохраняя заданную точность. Ряд значительных преимуществ таких как: отсутствие промежуточных элементов передачи к рабочим органам, отсутствие потерь на трении, значительно возросшая скорость перемещения – говорит о целесообразности замены стандартного роторного двигателя на линейный. Стоит также учесть, что это также позволит сократить количество двигателей, так как обе колонны проектируемого станка смогут работать на одной и той же линии.

Сравнение традиционных и линейных приводов станков

Сравнение традиционных и линейных приводов станков		
Факторы, характеристики	Традиционные приводы с ШВП	Линейные приводы
Промежуточные элементы передачи к РО	Ротор, вал, шкив, ремень, шкив, винт, шарики, гайка	НЕТ
Передача энергии на РО	От статора электродвигателя на ротор, через вал ротора на шкив, на ходовой винт, на шарики гайки, на гайку и на РО	НЕТ
Потери на трение	Подшипники ротора, ременная передача, подшипники ходового винта, шарики, плоскости профиля канавки гайки	НЕТ
Элементы с упругими деформациями	Вал ротора, ремень шкива, вал винта, плоскости профиля канавки винта, шарики, плоскости профиля канавки гайки	НЕТ
Элементы с температурными деформациями в приводе	Ротор двигателя, вал ротора, подшипники ротора, шкив, ремень, шкив, подшипники винта, винт, шарики, гайка	НЕТ
Изнашиваемые элементы привода	Подшипники ротора электродвигателя, шкив, ремень, шкив, подшипники винта, ходовой винт, шарики, гайка	НЕТ
Обязательные зоны для смазки	Подшипники ротора, подшипники винта, зона ШВП	НЕТ
Элементы, создающие инерционные нагрузки при ускорениях и реверсе	Вращающийся ротор, вал ротора, внутренние кольца подшипников вала ротора, шкивы, ремень, подшипники винта, винт, гайка и шарики в поступательном движении	Плоский ротор привода в поступательном движении
Основные зоны загрязнения (уровень сложности очистки)	Подшипники вала ротора двигателя (сложно), подшипники ходового винта (сложно), ШВП-гайка (очень сложно)	Зазор между статором и плоским ротора (просто)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Линейные двигатели нового поколения. Серебrenицкий П. П., БГТУ "Военмех" им. Д. Ф. Устинова https://electroprivod.ru/linear_public.htm
2. Каталог продукции Oemeri MotorElettrci S.P.A. <http://www.oemerspa.com/>
3. Каталог продукции ООО ЗЕТЕК https://www.zetek.ru/products/the_companys_products_hiwinmikro/linear_motor
4. Терехин В. Б. Моделирование систем электропривода в Simulink, издательство томского политехнического университета. 2010. 292 с.

СЕКЦИЯ 3. РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ МЕХАТРОННЫХ СТАНОЧНЫХ СИСТЕМ

Сабиров Ф. С.

Sabirov F. S.

fanira5057@yandex.ru

Кочинев Н. А.

Kochinev N. A.

Курасов Н. В.

Kurasov N. V.

ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет
«СТАНКИН», Москва

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ РОТОРНЫХ СИСТЕМ СТАНКОВ

MODELING OF MULTILAYER ROTOR SYSTEMS OF MACHINE TOOLS

Аннотация. Рассмотрены вопросы, связанные с компьютерным моделированием многослойных роторных систем методом конечных элементов. На примере шпиндельного узла гильзовой конструкции шлифовального станка с ЧПУ показаны возможности оригинального программного комплекса для расчета и анализа частотных характеристик и форм колебаний многослойных роторных систем. Предложены меры улучшения динамических характеристик за счет допустимых конструктивных изменений в шпиндельном узле.

Abstract. The following issues associated with the modeling of multilayer rotor systems using finite element method were considered. On the example of the spindle the barrel assembly design CNC grinding machine we show capabilities of the original software for the calculation and analysis frequency characteristics and waveforms multilayer rotary systems. We propose measures to improve the dynamic characteristics due admissible structural changes in spindle assembly.

Ключевые слова: шпиндельный узел, гильзовая конструкция, частотные характеристики, метод конечных элементов.

Keywords: spindle assembly, mating design, frequency characteristics, of the finite element method.

Многослойные роторные системы, когда основной вал вращается, например, на подшипниках качения во втулке, а втулка, в свою очередь, вращается на подшипниках скольжения в гильзе, а гильза может перемещаться в осевом направлении относительно корпуса, характерны для многих металлорежущих станков, у которых шпиндель расположен в гильзе с возможностью осевого перемещения. Это токарные многшпиндельные, сверлильные, расточные, фрезерные станки. Расчет деформаций и определение динамических характеристик таких многослойных роторных систем с использованием имеющегося программного обеспечения затруднен и не дает приемлемого результата [1-3]. В МГТУ «Станкин» разработана программа для ЭВМ, позволяющая решить эту задачу [4, 5].

Программа SpinDyna_FE предназначена для автоматизированного расчета статических и динамических характеристик многослойных роторных систем, позволяет моделировать шпиндельные узлы станков на различных опорах (качения, аэро-, гидростатических и других) при наличии параметров, характеризующих их жесткостные и демпфирующие свойства.

Результатом статического расчета роторной системы являются осевые и радиальные упругие деформации, а также углы поворота сечений вала и гильзы, соответствующие узловым точкам расчетной схемы от заданных нагрузок и (или) веса вала; реакции в опорах вала и стыках.

При динамическом расчете роторной системы определяются собственные частоты и модальные коэффициенты демпфирования, изгибные формы колебаний упругой системы вала и гильзы в заданном частотном диапазоне, амплитудно-частотные (АЧХ) и фазо-частотные характеристики роторной системы по любой заданной координате, как от силы резания, так и от силы (момента), приложенной в любой узловой точке расчетной схемы.

При разработке модели ротор разбивают на N участков, разграниченных изменением диаметра, опорой, сосредоточенной массой, внешней сосредоточенной нагрузкой. Пружинами обозначаются опоры, стыки. Каждый слой описывается в отдельном окне, места контакта слоев через подшипники или стыки отмечаются пружинами с соответствующей жесткостью. Максимальное количество слоев – 3 (не считая корпуса).

Моделированию, расчету и оптимизации динамических характеристик шпиндельных узлов уделяется большое внимание [6-10], поскольку именно от шпиндельных узлов зависит точность, производительность и долговечность металлорежущих станков. Схожие задачи по моделированию и анализу напряженно-деформированного состояния упругих систем есть и в других областях [11-13].

Одним из примеров использования программы SpinDyna_FE, является работа, посвящённая улучшению конструкции шпиндельного узла (ШУ) пятикоординатного шлифовального станка с ЧПУ. Сам шпиндель (рис. 1) смонтирован внутри гильзы на пяти радиально-упорных подшипниках качения. Наружный диаметр гильзы 179 мм, а общая длина ШУ - 832 мм. В станке гильза со шпинделем размещена внутри бабки.

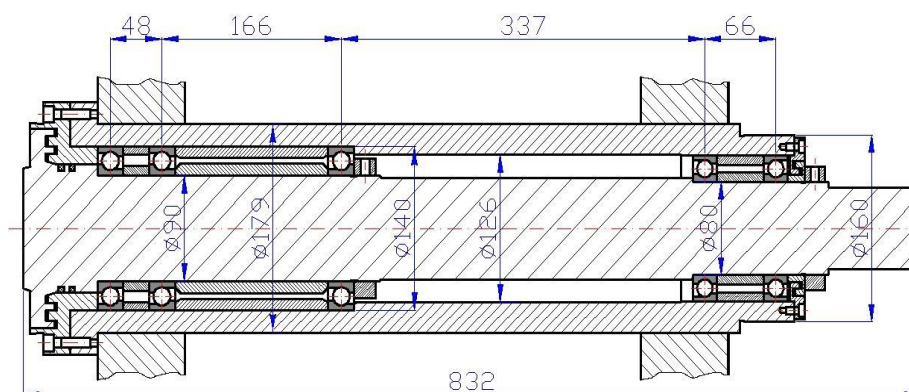


Рис. 1. Эскиз шпиндельного узла гильзовой конструкции шлифовального станка

Исследуемый шпиндельный узел некоторое время уже находился в опытной эксплуатации, затем был снят со станка для некоторой доработки с целью улучшения динамических характеристик путем допустимых изменений конструкции. ШУ был установлен на стенде и закреплен в тех же местах, что и на станке. Попутно с исследованием динамических характеристик проводились исследования состояния опор по виброакустическому сигналу, аналогичные исследованиям [14-16].

Расчетная модель ШУ и окно программы с параметрами модели представлены на рис. 2. Пружины, обозначающие опоры, стоят по центру подшипников. Их жесткости взяты из каталога, а коэффициенты демпфирования, приняты в соответствии с рекомендациями [17].

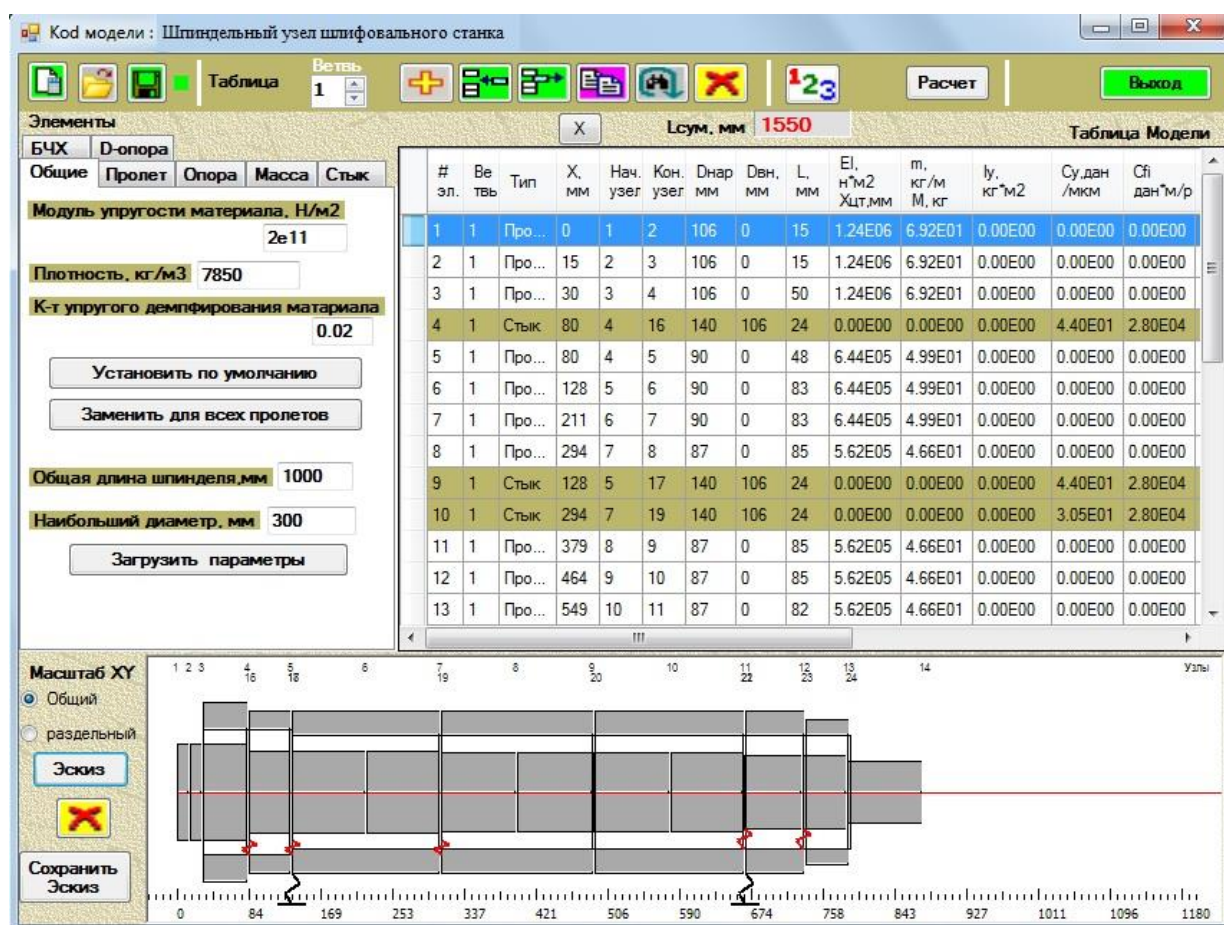


Рис. 2. Рабочее окно программы и модель шпинделя (SpinDyna_FE)

Идентификация параметров исходной модели проводилась на основе частотных характеристик, полученных экспериментальным путем при импульсном нагружении шпинделя на переднем конце [18]. В результате идентификации удалось добиться весьма хорошего совпадения экспериментальных и расчетных собственных частот, и высот пиков (АЧХ) в частотном диапазоне 0–1700 Гц, выбранном для дальнейшего анализа.

В шпиндельных узлах гильзовой конструкции шпиндель и гильза работают параллельно, внося свой вклад в перемещение переднего конца

шпинделя. Анализ статических деформаций базового варианта показал, что перемещение переднего конца шпинделя зависит не только от собственных деформаций и деформаций опор. В значительной степени оно определяется подсистемой гильзы, причем, в основном, опорами гильзы.

Наличие адекватной математической модели ШУ, позволило начать поиск вариантов, которые могли обеспечить улучшение динамических характеристик ШУ и могли быть реализованы конструктивно. Варьировались положения подшипников в передней и задней опорах (рис. 3), жесткостные характеристики подшипников качения, а также конструктивные изменения в виде сквозного отверстия в шпинделе.

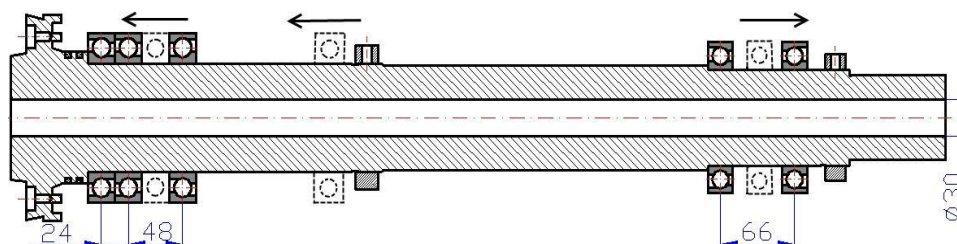


Рис. 3. Исходная модель шпинделя (пунктирные линии) и модель с улучшенными характеристиками (основная линия)

На рис. 4 представлены расчетные АЧХ исходного варианта ШУ и улучшенного варианта. Видно, что вместо трех собственных частот стало две, частота максимального пика увеличилась с 1068 до 1222 Гц, а амплитуда уменьшилась на 15%. Все это положительно сказывается на виброустойчивости ШУ. Однако недостатком улучшенного варианта является то, что понизилась частота первой формы колебаний с 847 до 640 Гц. Но это не должно вызывать опасений, поскольку амплитуда стала ниже.

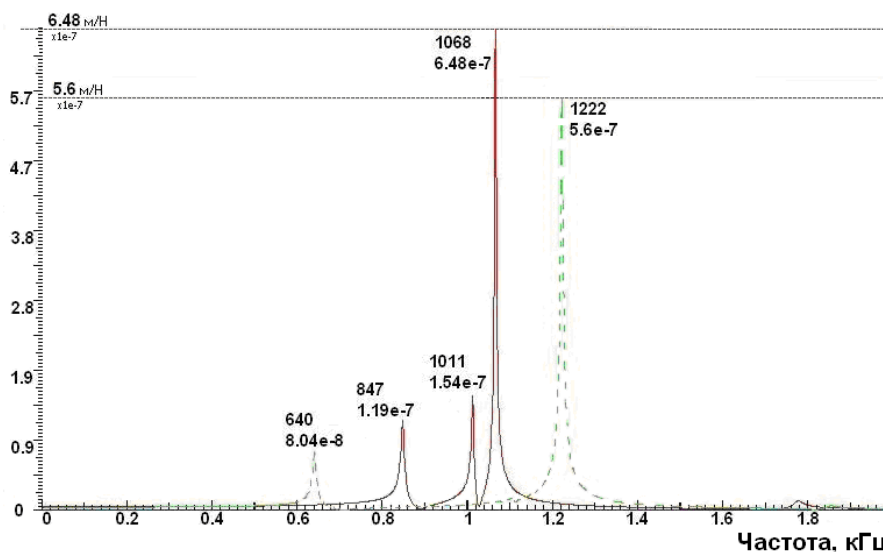


Рис. 4. АЧХ исходного (сплошные линии) и улучшенного варианта (пунктирные линии) моделей ШУ.

Добавление отверстия диаметром 30 мм в шпинделе существенного влияния на собственные частоты и резонансные амплитуды по сравнению со сплошным шпинделем не оказывает.

Построение форм колебаний на собственных частотах позволяет оценить долю каждого из элементов, шпинделя и гильзы, в общем балансе упругих перемещений узловых точек на этих частотах.

Изменение конструктивных параметров на динамические характеристики шпиндельного узла показало следующее:

- смещение передней опоры гильзы к краю способствует снижению амплитуды на 8% и увеличению собственной частоты шпиндельного узла на 9%;

- сближение задних опор шпинделя приводит к значительному увеличению амплитуды на частоте 670 Гц (с $3,7 \cdot 10^{-8}$ м/Н до $5,29 \cdot 10^{-8}$ м/Н) и относительно небольшому снижению амплитуды на частоте 422 Гц (с $4,1 \cdot 10^{-8}$ м/Н до $4,74 \cdot 10^{-8}$ м/Н);

- существенное положительное влияние на АЧХ шпиндельного узла оказывает смещение 2-ой опоры шпинделя вплотную к 1-ой – на частоте 422 Гц амплитуда снизилась с $5,02 \cdot 10^{-8}$ м/Н до $4,16 \cdot 10^{-8}$ м/Н (- 17%), а на частоте 853 Гц снижение с $2,24 \cdot 10^{-8}$ м/Н до $1,73 \cdot 10^{-8}$ м/Н (-22,8%);

- удаление 3-ей опоры шпинделя отрицательно сказывается на АЧХ, происходит резкое возрастание более чем на 50% амплитуды на частоте 621 Гц;

- при добавлении центрального отверстия происходит незначительное снижение амплитуды (- 4%) на частоте 422 Гц и смещение пика с частоты 853 Гц до 946 Гц.

Выводы

Таким образом, разработанный программный комплекс SpinDyna_FE позволяет моделировать многослойные шпиндельные узлы, рассчитывать их частотные характеристики и формы колебаний методом конечных элементов. Использование программного комплекса при моделировании шпиндельного узла шлифовального станка позволило оценить различные варианты конструктивных изменений, оценить влияние жесткостных характеристик опор, которые зависят от предварительного натяга в подшипниках, предложить вариант конструкции с улучшенными динамическими характеристиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хомяков В.С., Кочинев Н.А., Сабиров Ф.С. Исследование динамических характеристик шпиндельных узлов // «Вестник МГТУ «Станкин». М.: МГТУ «Станкин», 2008, № 4, с. 15-22.
2. Хомяков В.С., Кочинев Н.А., Сабиров Ф.С. Экспериментальное и расчетное исследование динамических характеристик шпиндельных узлов // СТИН. 2009. № 3. С. 5-9.

3. Sabirov F., Suslov D., Savinov S. Diagnostics of spindle unit, model design and analysis // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer-Verlag London Ltd. Vol. 62 (9-12), 2012, pp. 861-865, DOI: 10.1007/s00170-011-3848-7
4. Хомяков В.С., Сабиров Ф.С. Экспериментальное исследование и моделирование гильзовой конструкции шпиндельного узла шлифовального станка // СТИН. 2012. № 5. С. 10-15.
5. Khomyakov, V.S., Sabirov, F.S. Spindle and sleeve in grinding machines // Russian Engineering Research, vol. 32 (11-12), 2012, pp. 733-737.
6. Щетинин В.С., Космынин А.В. Математическая модель расчета несущей способности высокоскоростного шпиндельного узла на газомангнитной опоре // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. № 8. С. 31-35.
7. Усакин К.С., Игнатъев А.А. Моделирование динамического состояния шпиндельного узла прецизионного токарного модуля // Вестник Саратовского гостехуниверситета. 2010. Т. 2. № 1. С. 89-97.
8. Гиловой Л.Я., Молодцов В.В., Чернусь Г.В. Исследование теплового состояния и температурных деформаций шпиндельного узла на комбинированных опорах методами имитационного моделирования // СТИН. 2009. № 6. С. 2-8.
9. Кудояров Р.Г., Башаров Р.Р. Расчетный метод определения траектории движения оси шпинделя станка при высокоскоростной обработке // Технология машиностроения. 2011. № 4. С. 26-29.
10. Захаров П.А., Четвержук Т.И., Гордеев А.Ф. Идентификация и моделирование деформационных свойств стыков металлорежущих станков // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 11 (148). С. 10-16.
11. Яхутлов М.М., Карамурзов Б.С., Батыров У.Д., Беров З.Ж. Моделирование напряженно-деформированного состояния системы зерно-матрица при динамическом нагружении // Вестник КБГУ. Серия Технические науки. Вып. 6. Нальчик, 2008. С. 36-40.
12. Башаров Р.Р., Кудояров Р.Г. Моделирование точности обработки при концевом фрезеровании деталей // Известия вузов. Авиационная техника. 2013. № 1. С. 66-72.
13. Бровкава М.Б., Свиридов С.В. Динамический мониторинг технологического оборудования // Южно-Сибирский научный вестник. 2012. № 1. С. 19-21.
14. Сабиров Ф.С., Шемякин А.А. Оперативная оценка виброустойчивости станков и состояния шпиндельных подшипников // Вестник машиностроения, № 8, 2015, с. 14-16.
15. Бушуев В.В., Гиловой Л.Я., Молодцов В.В., Сабиров Ф.С. Анализ ресурса эксплуатации подшипников высокоскоростных мотор-шпинделей с инструментальным соединением HSK // СТИН. 2019. № 7. С. 22-25.
16. Сабиров Ф.С. Диагностика станков с использованием трехкомпонентных датчиков вибрации // Контроль. Диагностика. 2012. № 12 (174). С. 66-72.
17. Хомяков В.С. Учет демпфирования при динамических расчетах станков // СТИН. 2010. № 6. С. 9-13.
18. Сабиров Ф.С. Импульсный метод оценки динамических характеристик упругих систем станков // «Справочник. Инженерный журнал». 2009. № 11. С. 38-43.
19. Кочинев Н.А., Сабиров Ф.С. Квасистатический метод измерения баланса упругих перемещений несущей системы станков // Измерительная техника, 2006, №6, с. 32-35.
20. Kochinev N.A., Sabirov F.S. Quasi-static Method of Measuring the Balance of Elastic Displacements of the Supporting System of Machine Tools // Measurement Techniques, Springer New York. Vol. 49, No 6, 2006, p. 572-578. DOI: 10.1007/s11018-006-0152-2
21. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С., Молодцов В.В. Диагностика состояния станков по вибрационным характеристикам // Materials. Technologies. Design. 2020. Т. 2. № 1 (2). С. 69-77.

Сабиров Ф. С.

Sabirov F. S.

fanira5057@yandex.ru

Шемякин С. С.

Shemiakin S. S.

shemiackin.sergei@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет
«СТАНКИН», Москва

ОЦЕНКА СТАТИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА ТОКАРНОГО СТАНКА В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ, ПОЛУЧЕННЫМ ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

ASSESSMENT OF THE STATIC RIGIDITY OF THE TURNING MACHINE UNDERMANUFACTORY BY DYNAMIC CHARACTERISTICS

***Аннотация.** Проведено исследование статической жесткости токарного станка 1М63Н-5 традиционным методом, с нагружением динамометрическим нагрузочным устройством шпиндельного узла, и методом оценки статической жесткости по динамическим характеристикам, полученным импульсным методом. Сделаны выводы по результатам оценки.*

***Abstract.** The study of the static rigidity of the 1M63N-5 turning was carried out by the traditional method with loading by a dynamometric mechanism and by the method of assessing the static rigidity from the dynamic characteristics. Conclusions based on the assessment results.*

***Ключевые слова:** жесткость станка, токарный станок, АЧХ, динамические характеристики, модальный анализ.*

***Keywords:** machine rigidity, turning machine, amplitude-frequency response characteristic, dynamic characteristic, modal analysis.*

Традиционный метод определения статической жесткости представляет собой метод нагружения динамометрическим нагрузочным устройством узлов станка с измерением деформации датчиками перемещений [1-3, 6]. При этом установка нагрузочного устройства и измерителя деформаций, требуют специальной оснастки, навыков, достаточных трудозатрат для проведения измерений и обработки результатов, что в производственных условиях затруднительно и не эффективно. Поэтому актуальной является задача разработки метода оценки жесткости для токарных станков, на основе других физических принципов, который не требует специальной оснастки и минимизирует время проведения измерений, например, метод оценки статической жесткости токарных станков по динамическим характеристикам, полученным импульсным методом [4, 7].

На одном из машиностроительных предприятий проводилось комплексное исследование жесткости и динамических характеристик токарного станка 1М63Н-5. Оценивалась жесткость шпиндельного узла и суппортной группы путем нагружения упругой системы статической силой через

динамометр и измерения деформаций от этой силы. Далее проводилась оценка динамических характеристик путем нагружения шпинделя и суппорта динамометрическим молотком, и измерения реакции на это воздействие с помощью датчиков вибрации.

Нагружение статической силой осуществлялось суппортом станка через камертонный динамометр. Деформация измерялась индикатором относительно корпуса шпиндельной бабки (рис. 1). Результаты испытаний приведены в табл. 1

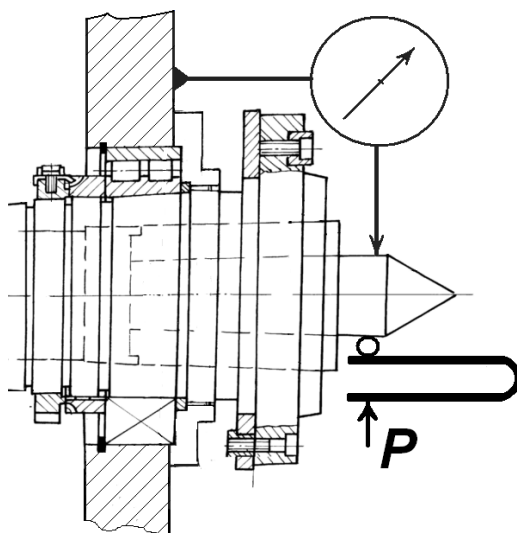


Рис. 1. Нагружение шпинделя токарного станка 1М63Н-5

Таблица 1

Нагрузка, Н	Деформация, мкм
70	0,5
140	1,0
210	1,5
280	2,0
350	2,5
420	3,0

Жесткость шпинделя в точке нагружения составила 140 Н/мкм, а на фланце шпинделя будет примерно в 3-3,5 раза выше, т.е. порядка 420-490 Н/мкм.

Были получены динамические характеристики ШУ. На рис. 2 представлена АЧХ ШУ в вертикальном направлении, а на рис. 3 в горизонтальном. Собственная частота составила 540 Гц в вертикальном и 425 Гц в горизонтальном. Отличие собственных частот в вертикальном и горизонтальном направлении можно объяснить тем, что в вертикальном направлении жесткость выше из-за того, что собственный вес шпинделя давит на подшипники, а в горизонтальном направлении этого не происходит. Кроме этого различие вертикальной и горизонтальной жесткости возможно из-за эллиптической расточки корпуса под передний подшипник.

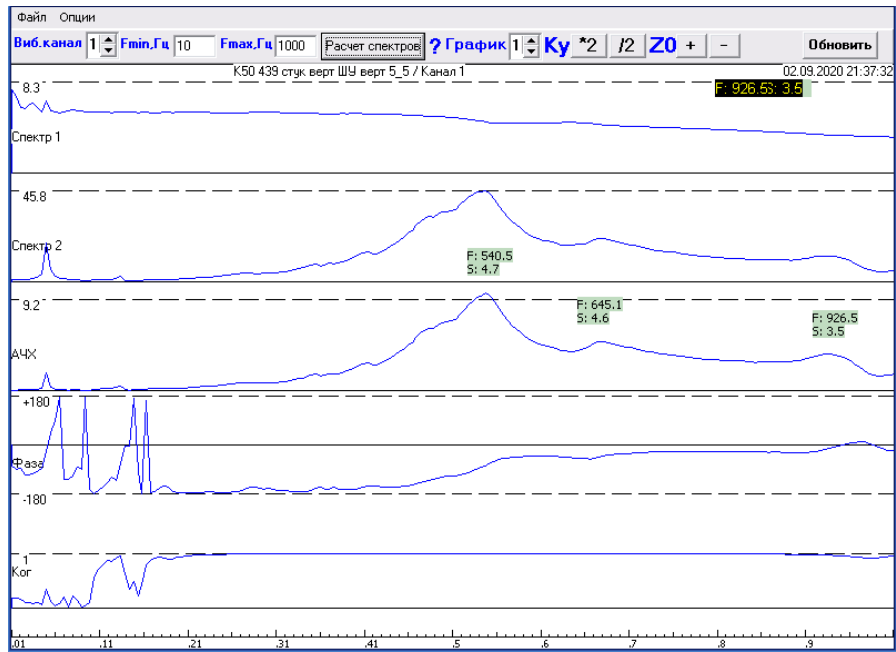


Рис. 2. АЧХ ШУ станка 1М63Н-5 экспериментальная по вертикальной оси

Модальный анализ и оценка статической жесткости проводилась в программе ExpDynaXL [5], разработанной в МГТУ СТАНКИН. В программе АЧХ была разложена на моды с основными характеристиками, такими как собственная частоты, декремент затухания и динамическая жесткость (таблица на рис. 4). Там же (рис. 4) изображена аппроксимация АЧХ.

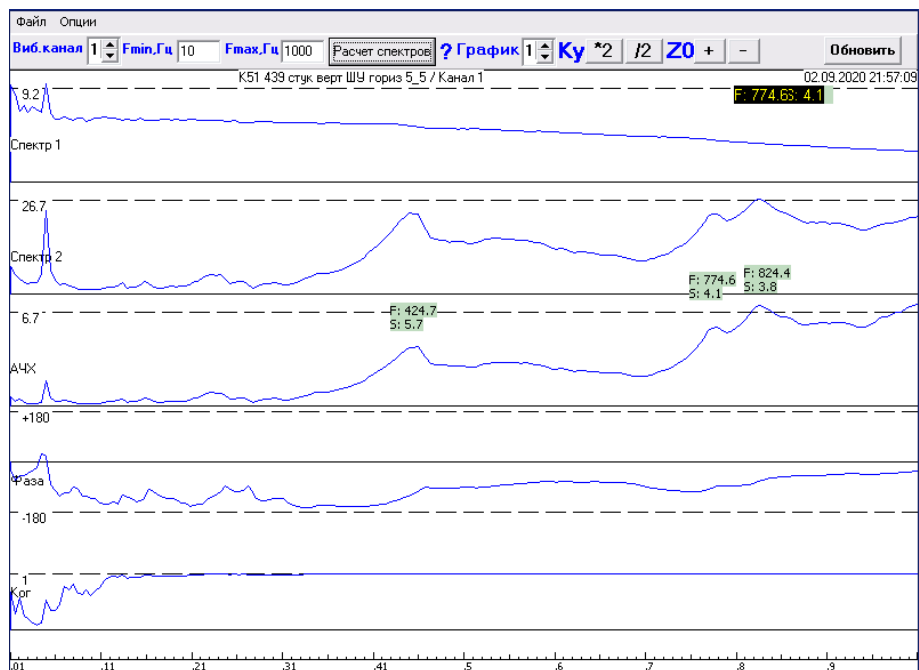


Рис. 3. АЧХ ШУ станка 1М63Н-5 экспериментальная по горизонтальной оси

По результатам оценки статической жесткости, было получено, что жесткость шпинделя в точке нагружения 144 Н/мкм. Погрешность оценки составляет 2,9%.

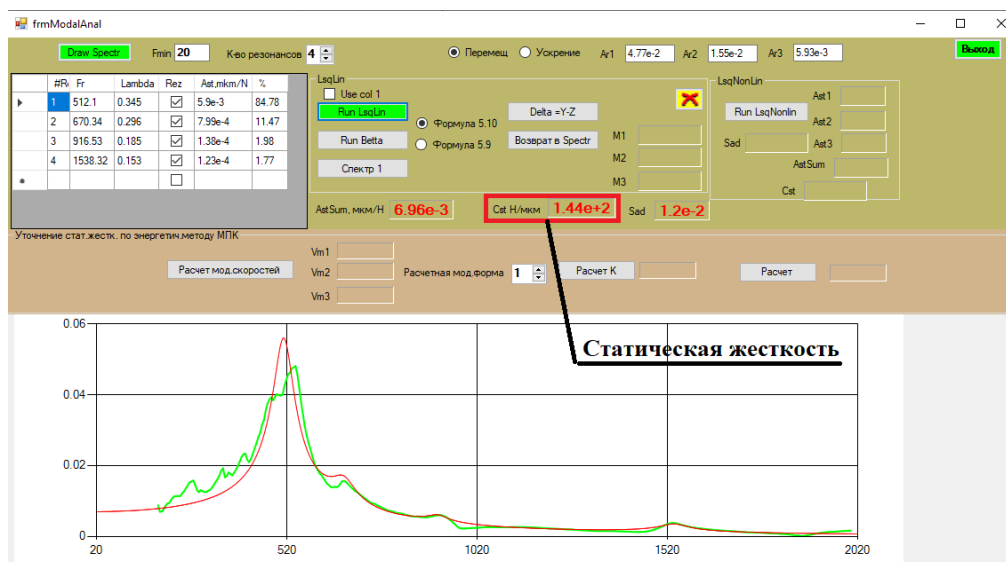


Рис. 4. АЧХ и ее аппроксимация, оценка статической жесткости

Выводы

Наиболее перспективным методом диагностики является метод импульсного нагружения из-за его универсальности (позволяет использовать единый набор аппаратуры) и относительной простоты проведения опытов в производственных условиях. Разработанный метод оценки статической жесткости не требует уникальной оснастки и долгой подготовки эксперимента.

Данное экспериментальное исследование показывает, что в производственных условиях применение метода оценки статической жесткости токарных станков на основе модального анализа по импульсным динамическим характеристикам позволяет получить значения статической жесткости с приемлемой погрешностью, не превышающей 3...5%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козочкин М. П., Маслов А. Р., Сабиров Ф. С. Испытание и диагностика технологического оборудования. Уч. пособие. М.: ИЦ МГТУ «СТАНКИН», 2012. 250 с.
2. Козочкин М. П., Маслов А. Р., Сабиров Ф. С., Порватов А.Н. Диагностика и сертификация металлорежущего оборудования: учебное пособие. М.: Инновационное машиностроение, 2017. 240 с
3. Козочкин М. П., Сабиров Ф. С. Виброакустическая диагностика шпиндельных узлов // СТИН. № 5. 2009. С. 8-12.
4. Кочинев Н. А., Сабиров Ф. С. Квазистатический метод измерения баланса упругих перемещений несущей системы станков // Измерительная техника, 2006, №6, с. 32-35.
5. Кочинев Н. А., Сабиров Ф. С., Козочкин М. П., Шемякин С. С. программный комплекс обработки и анализа вибрационных сигналов ExpDynaXL //Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017613178, 13.03.2017.
6. Кудинов В. А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967, 360 с.
7. Sabirov F. S., Shemyakin S. S., Kochinev N. A. Operational assessment of machine tool vibration resistance // Procedia Engineering. 2016. T. 150. С. 215-219.

Блохин Д. А.

Blohin D. A.

blohin.da@mail.ru

Попов А. Ю.

Porov A. Yu.

porov_a_u@list.ru

ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», Омск

Нуртдинов Ю. Р.

Nurtdinov Yu. R.

nurtdinov_tts@mail.ru

АО «ОДК» Производственный Комплекс «Салют», Москва

Дроздов И. Н.

DrozdoV I. N.

seh2@progress-omsk.ru

ФГУП «ФНПЦ «Прогресс», Омск

СПОСОБ КОНТРОЛЯ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ СТОЛА ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА

METHOD OF VIBRATION RESISTANCE CONTROL OF THE TABLE OF A VERTICAL MILLING MACHINE

***Аннотация.** Современное машиностроение и станкостроение активно заинтересованы в развитии технологий контроля виброустойчивости и повышения жесткости оборудования. Авторами предложен способ контроля виброустойчивости стола вертикально-фрезерного станка с применением телескопического датчика типа ballbar и источника вынужденных колебаний, установленного на столе станка. Применение данного способа дает возможность определения зон с минимальной виброустойчивостью для определения последующих ремонтных мероприятий либо выбора наилучшей зоны обработки.*

***Abstract.** Modern mechanical engineering and machine tool building are actively interested in the development of technologies for controlling vibration resistance and increasing the rigidity of machine tools, as well as in the development of standardization. The authors propose a method for controlling the vibration resistance of the table of a vertical milling machine using a telescopic ballbar sensor and a vibrator installed on the machine table. The apply of this method makes it possible to determine the zones with maximum vibration to determine subsequent repair measures or to select the best machining zone.*

***Ключевые слова:** контроль виброустойчивости, фрезерный станок, координатно-расточной станок, ballbar, износ ходовых винтов.*

***Keywords:** vibration resistance control, milling machine, boring machine, ballbar, ballscrew wear.*

Два основных вектора развития машиностроения в последние десятилетия – это повышение точности обработки и производительности съема стружки. В связи с широким распространением и преобладанием высокоскоростного фрезерования над силовым сложилась ситуация, в которой значительная часть производственного оборудования непригодна для силового

фрезерования в том числе из-за возникновения автоколебаний в процессе резания.

Причинами возникновения автоколебаний являются переменные значения сечений срезаемой стружки, врезание и выход зуба из зоны резания. И даже продвинутые стратегии обработки, например, трохоидальное фрезерование, не способны полностью избавиться от последствий вибрации, часто называемой в производстве «волной», а в зарубежной литературе «chatter».

Анализ эксплуатации оборудования в процессе их жизненного цикла позволяет сделать вывод о том, станок, находящийся в пределах паспортных значений по точности в ненагруженных состояниях в некоторых зонах рабочего пространства становится склонен к вибрациям даже при чистовых режимах обработки. Происходить это может при обработке с задействованием от 1 до 5 осей и на практике довольно сложно назначить оправданный регламент ремонтных работ для устранения данной ситуации.

Определение отклонений, возникающих при квазистатических и нагруженных состояниях, могут определяться двумя способами [1]. Первый способ снизу вверх: определение с помощью лазерного интерферометра и проведения множества прямых измерений, определение позиционных зависимостей для разного типа погрешностей: накопленные ошибки шага, люфты в ШВП, неперпендикулярности осей и других [2]. Затем проводится объединение полученных в ненагруженных условиях результатов в единую картину с помощью матричных преобразования и последующая оценка приложенных деформаций.

Однако, в прошлом десятилетии получили развитие методы моделирования «сверху вниз»: основным источником информации является измерение непрямым методом, например, приборами типа Ballbar с применением нагрузки [3]. Эти методы позволяют определять статическую жесткость при приложении силы в какой-либо плоскости.

Утвержденные на данный момент способы контроля точности станков по ГОСТ 8-82 не охватывают весь спектр возникающих на производстве ситуаций. Контроль точности в статике и без нагружения не дает информации о возможном возникновении вибрации. Типовые детали, по которым происходит проверка точности обработки, как правило, значительно меньше габаритов стола и точность её изготовления не дает полного представления о точности оборудования.

В качестве промежуточного варианта предлагается измерение точности непрямым методом с приложением вибрационной нагрузки. В принципе, источник вибраций можно закреплять и на шпиндельной бабке, однако, проще всего продемонстрировать некоторые явления путем установки источника колебаний на стол фрезерного станка.

Для определения того, насколько велика амплитуда колебаний можно использовать различные методы и инструменты: значения текущих координат с линейных датчиков обратной связи, использование виброанализаторов и

различных вибродатчиков, оптические измерения и многие другие способы [4]. На рис. 1 приведен способ оценки амплитуды колебаний по оси X (сверху) и Y (снизу) при прохождении круговых траекторий с разным значением частоты (слева больше). По толщине этих зигзагообразных линий величин рассогласования можно оценить амплитуду вибраций. Полнота таких данных зависит от параметров линейки, а использование затруднено тем, что исходное колебание разделено на две составляющие.

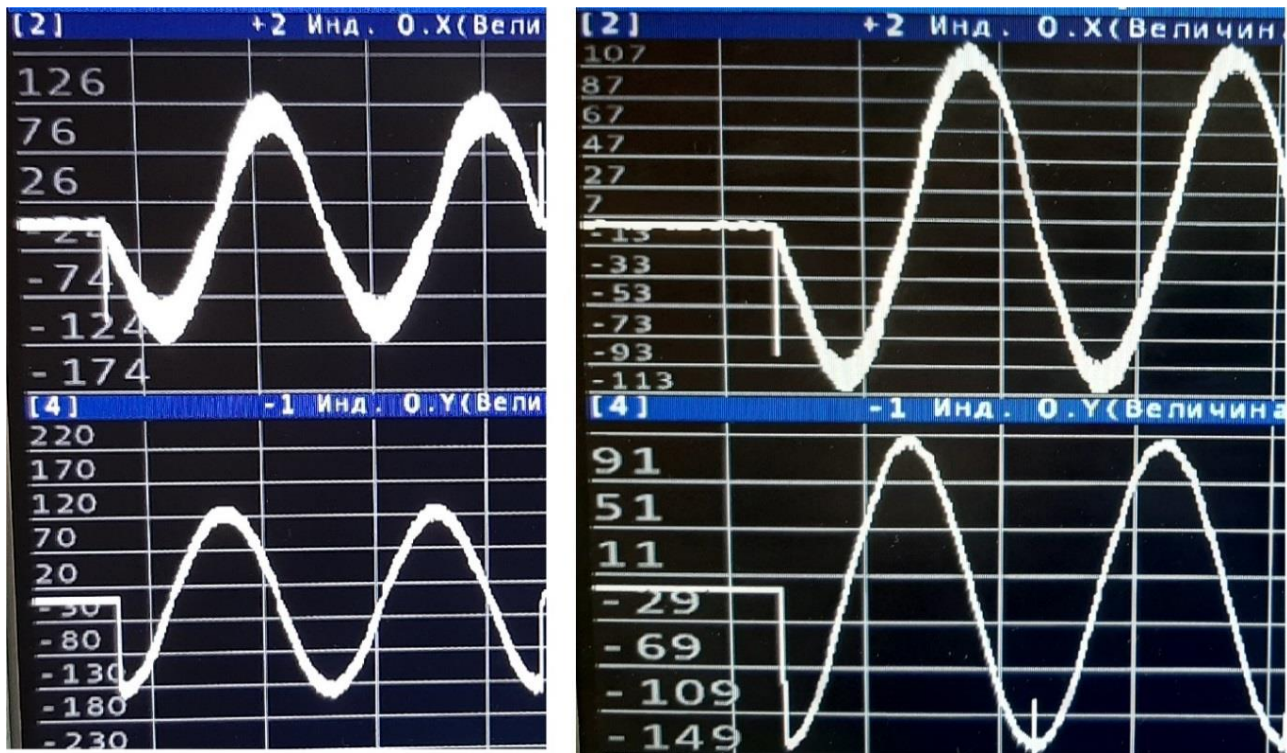


Рис. 1. Определение амплитуды виброперемещений по данным осциллограммы в системе ЧПУ станка

Нагружение вибрацией с помощью автоколебаний можно выполнить с использованием источника вынужденных колебаний с регулируемой массой эксцентрика и частотой вращения ротора. Это позволяет приложить к станку вибрационную нагрузку с допустимыми условностями приближенную к процессу резания.

На рис. 2 представлена предлагаемая схема измерения: на фрезерном столе жестко закреплен источник вынужденных колебаний: трехфазный электродвигатель, подключенный через частотный преобразователь, с установленным на конце вала грузом переменной массы, расположенным эксцентрично. Таким образом, действующая на груз центробежная сила передается на стол станка и может изменяться в зависимости от массы груза и частоты вращения ротора двигателя.

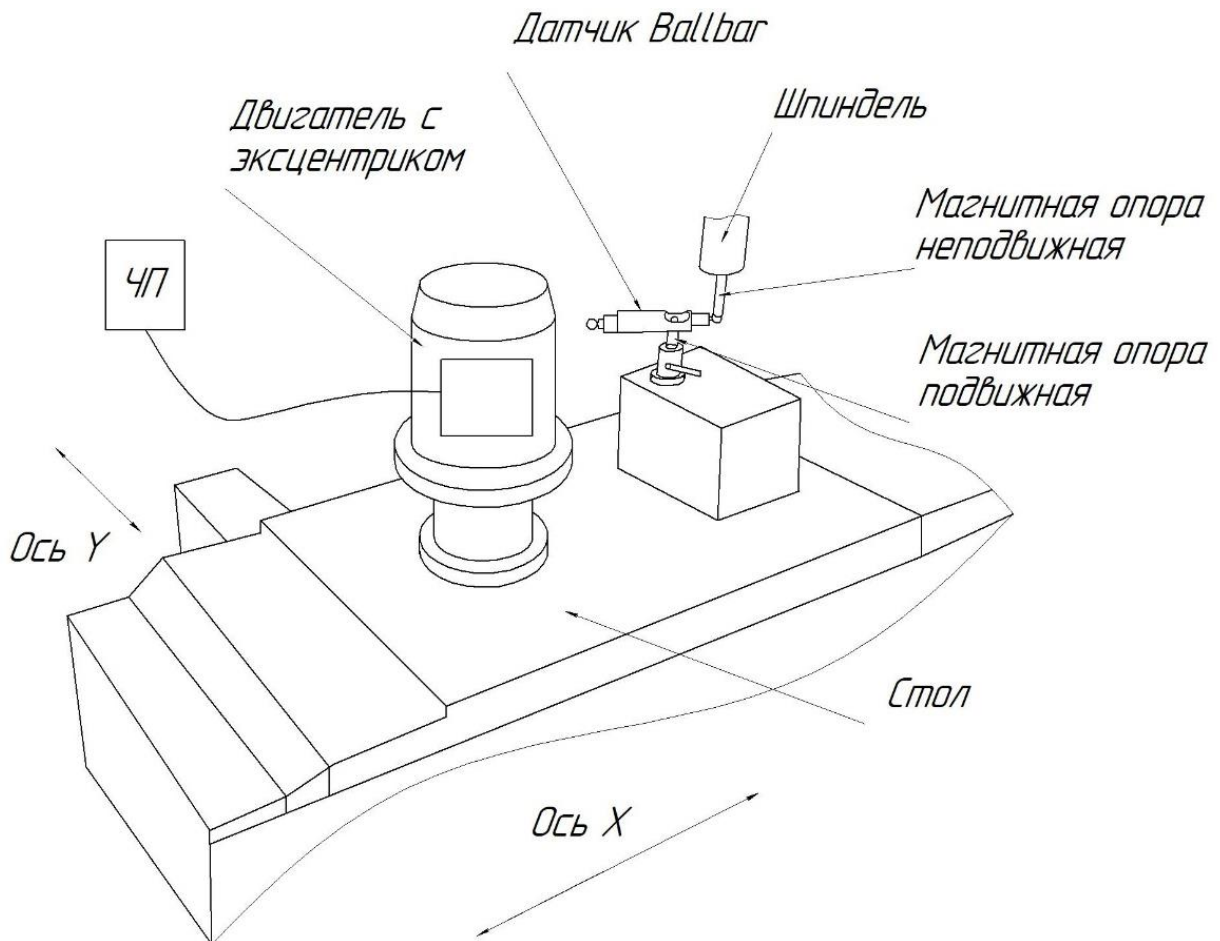


Рис. 2. Схема измерения виброустойчивости при нагружении вибрацией стола фрезерного станка

В работе предлагается использовать телескопический датчик с двумя сферическими шарнирами на конце, как пример применялся прибор Renishaw Ballbar со встроенным пьезодатчиком с точностью измерения $\pm 0,5$ мкм. Программное обеспечение данного прибора позволяет выделить из динамически изменяющегося радиуса при перемещении по круговым траекториям множество элементарных погрешностей: люфты в ШВП и направляющих, неперпендикулярность осей, рассогласование приводов и многие другие.

Определение этих величин происходит по средним расчетным значениям, то есть ключевой недостаток данного метода заключается в необходимости ручного измерения амплитуд на круговой диаграмме. Очевидно, что существует возможность автоматизации сбора такого рода данных. Путем пересчета также можно получить полярную диаграмму жесткости в определенной точке станка [3].

Теоретически возможно проводить измерения в плоскостях, наклоненных относительно плоскости вибраций как показано в работе [5]. Однако в случае непрямого измерения амплитуды вибраций при помощи ballbar довольно сложно разложить общую погрешность на отдельные составляющие, поэтому проведение такого рода обследований представляет смысл только для пяти

координатных станков, наклонно-поворотные столы которых можно позиционировать в разных точках.

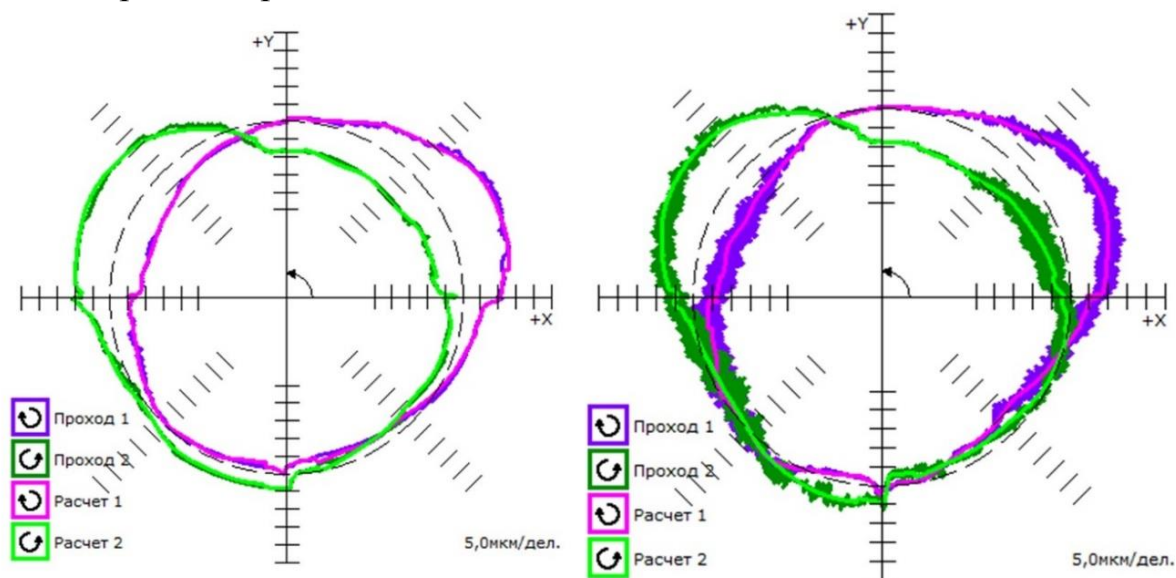


Рис. 3. Круговые диаграммы в одной позиции на холостом ходу слева и с вынужденными колебаниями справа

На рис. 4 приведены круговые диаграммы круговых перемещений стола под вибрационной нагрузкой и на холостом ходу. Очевидно, что приложение вибраций не приводит к значительным (более 15%) искажениям средних значений, а наблюдение зоны повышенных вибраций становится гораздо более простым.

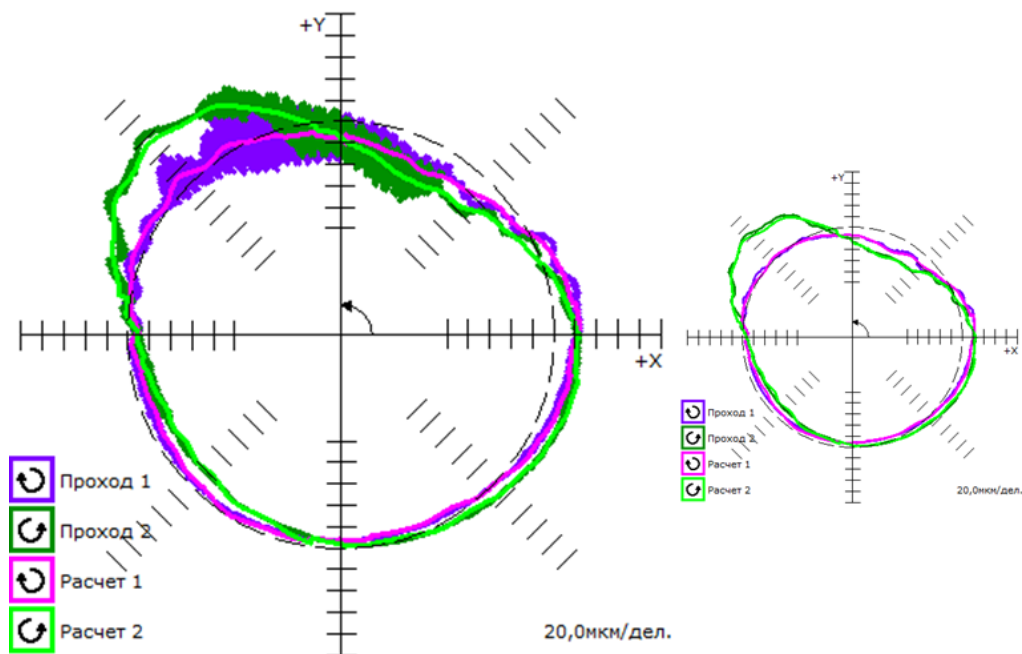


Рис. 4. Наблюдение локальной вибрации на круглограмме (слева) и круговая диаграмма холостых перемещений.

Широкое распространение получил способ устранения неточностей перемещения с применением программной коррекции [6], однако проведенные исследования дают понимание того, что изношенная ШВП может с помощью выверенной обратной связи позиционироваться с очень высокой точностью, но не сможет иметь такие значения жесткости, какие имеет не подвергшийся активному износу участок ШВП.

Выводы

- Разработка методов определения точности перемещений под нагрузкой представляет наибольший интерес в развитии технологий контроля виброустойчивости и повышения жесткости оборудования.
- Предложен способ контроля виброустойчивости стола вертикально-фрезерного станка с применением телескопического датчика со сферическими наконечниками типа ballbar и источника вынужденных колебаний.
- Применение данного прибора дает возможность определения зон с минимальной виброустойчивостью для назначения цикла ремонтных мероприятий либо выбора зоны допустимой для обработки данных деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Szipka K., Laspas T., Archenti A. Measurement and analysis of machine tool errors under quasi-static and loaded conditions // Precision Engineering. Vol. 51. 2018. P. 59–67.
2. Серков Н. А., Никуличев И. В. Методы и средства измерения первичных отклонений звеньев механизмов несущей системы многокоординатных станков с ЧПУ // Проблемы машиностроения и автоматизации. № 2. 2012. С. 43-51.
3. Archenti A., Nicolescu M., Casterman G., Hjelm S. A new method for circular testing of machine tools under loaded condition // 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012. 2012. P. 575 – 580.
4. Бурков А. П., Красильникъянц Е. В., Смирнов А. А., Салахутдинов Н. В. Современные требования к электроприводам станков с ЧПУ // Вестник ИГЭУ Вып. 4. 2010. С. 1-6.
5. Kato N., Sato R., Tsutsumi M. 3D circular interpolation motion equivalent to cone-frustum cutting in five-axis machining centers and its sensitivity analysis // 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012. 2012. P. 530 – 535.
6. Majda P. The influence of geometric errors compensation of a CNC machine tool on the accuracy of movement with circular interpolation // Advances in manufacturing science and technology. Vol. 36. No. 2. 2012. P. 59-67.

Давудов Ш. О.
Davudov Sh. O.
Shamil2210@yandex.ru

Фецак С. И.

Fetsak S. I.
format_invest@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ РОБОТИЗИРОВАННОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛИ ТИПА «ПЛАНШАЙБА»

TECHNICAL DESIGN OF A ROBOTIC MODULE FOR PROCESSING A PART OF THE "FACEPLATE" TYPE

***Аннотация.** В данной статье приведен пример автоматизации процесса обработки детали «Планшайба» путем внедрения промышленного робота. Изображена компоновка робототехнического комплекса, приведен алгоритм работы комплекса.*

***Abstract.** This article provides an example of automating the processing of a "Faceplate" part by implementing an industrial robot. The layout of the robotic complex is shown, the algorithm of the complex operation is given.*

***Ключевые слова:** Робототехника, автоматизация, промышленный робот, станки с ЧПУ.*

***Keywords:** Robotics, automation, industrial robot, CNC machines.*

К деталям специальных устройств и станков с ЧПУ предъявляются высокие требования с точки зрения точности обработки и качества поверхностного слоя. Обработка резанием является одним из основных технологических процессов. Применяемые методы механической обработки и разработанные на их базе технологические процессы неразрывно связаны со средствами их реализации – технологическим оборудованием и технологической оснасткой. Наряду с оборудованием, применяемым в общем машиностроении, широко используются промышленные роботы.

Спроектированный роботизированный модуль (РТК) для обработки детали типа «Планшайба» (рис 1.) позволяет решить следующие задачи [1]:

- автоматизировать существующий процесс обработки детали;
- автоматизировать систему загрузки-выгрузки деталей и заготовок;
- сократить время обработки детали;
- повысить точность и производительность обработки;
- достичь улучшения технико-экономических параметров;
- применять современные программные продукты для получения комплекта конструкторской, технологической документации, разработки управляющих программ, а также проведения инженерного анализа;
- повысить безопасность производства.

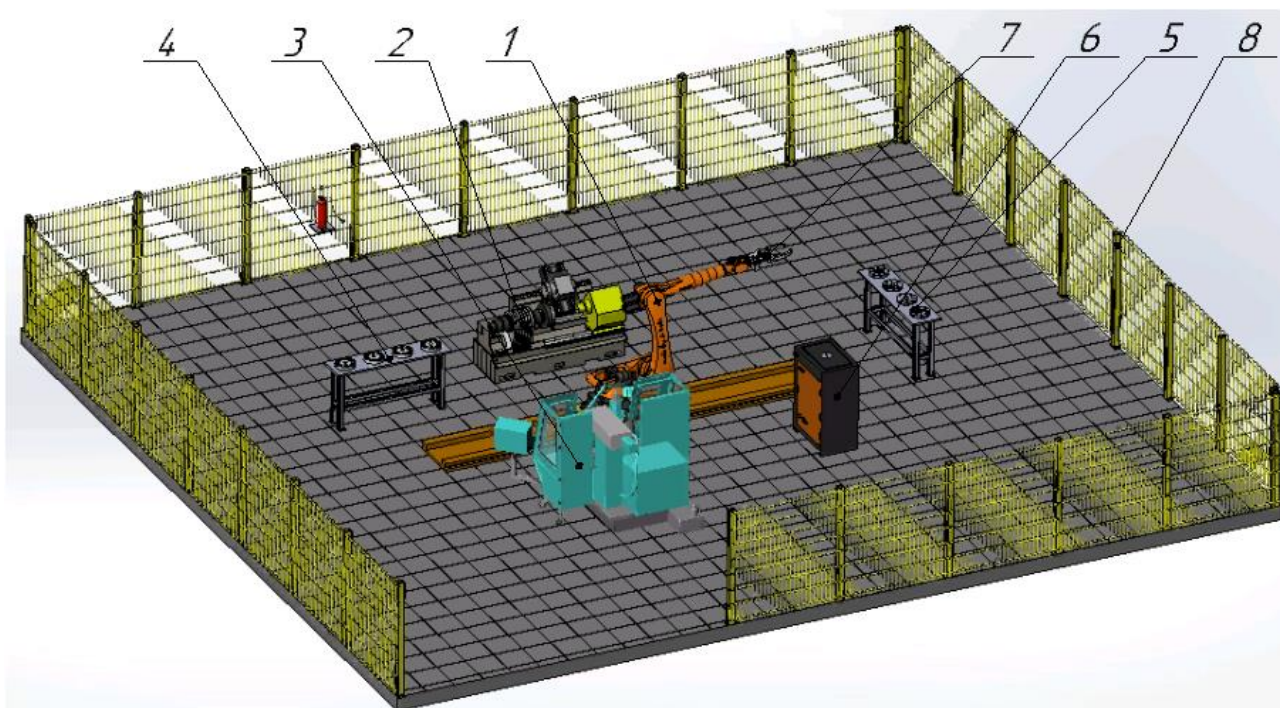


Рис. 1. Компоновка РТК для обработки детали «Планшайба»

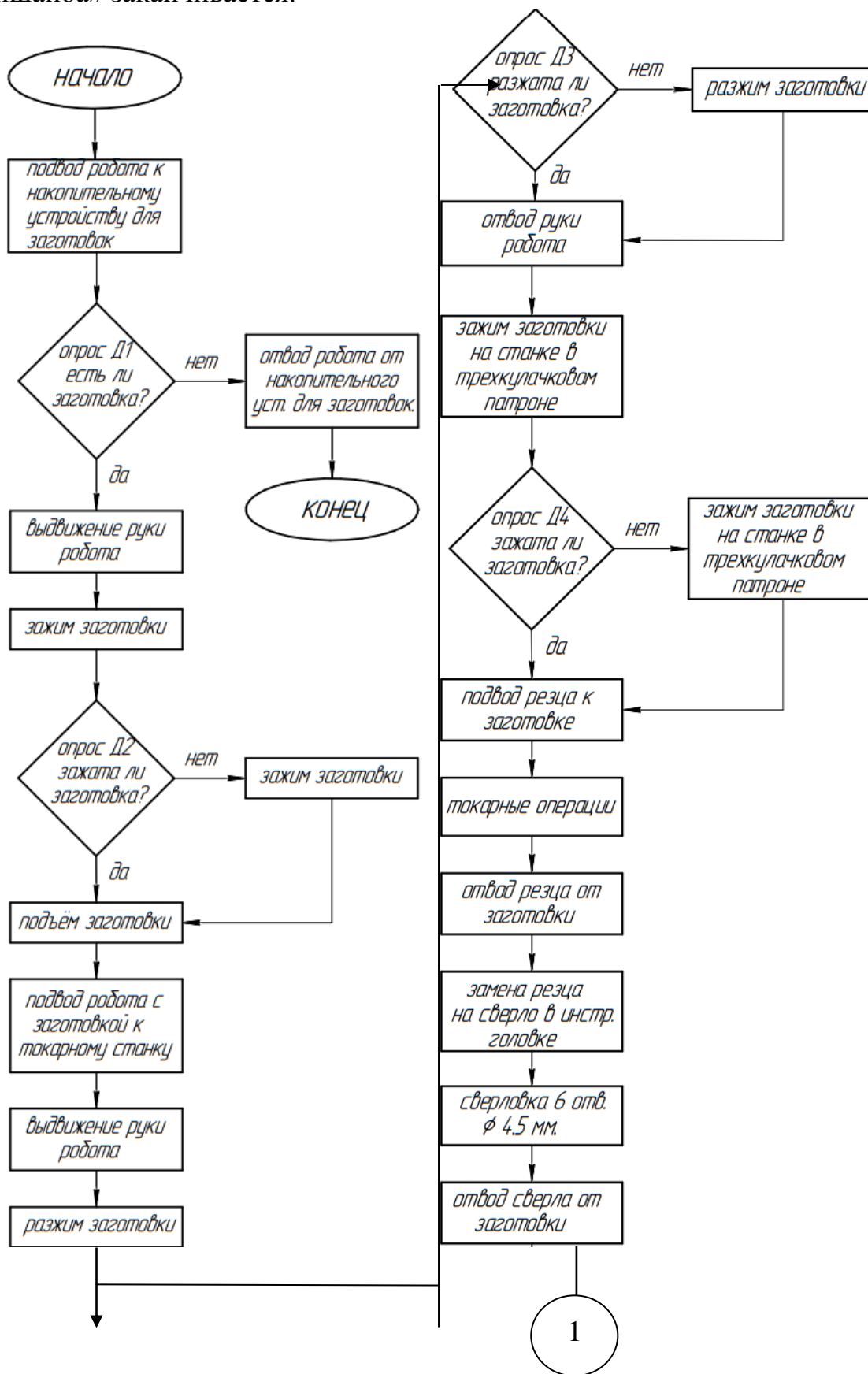
В состав модуля входит:

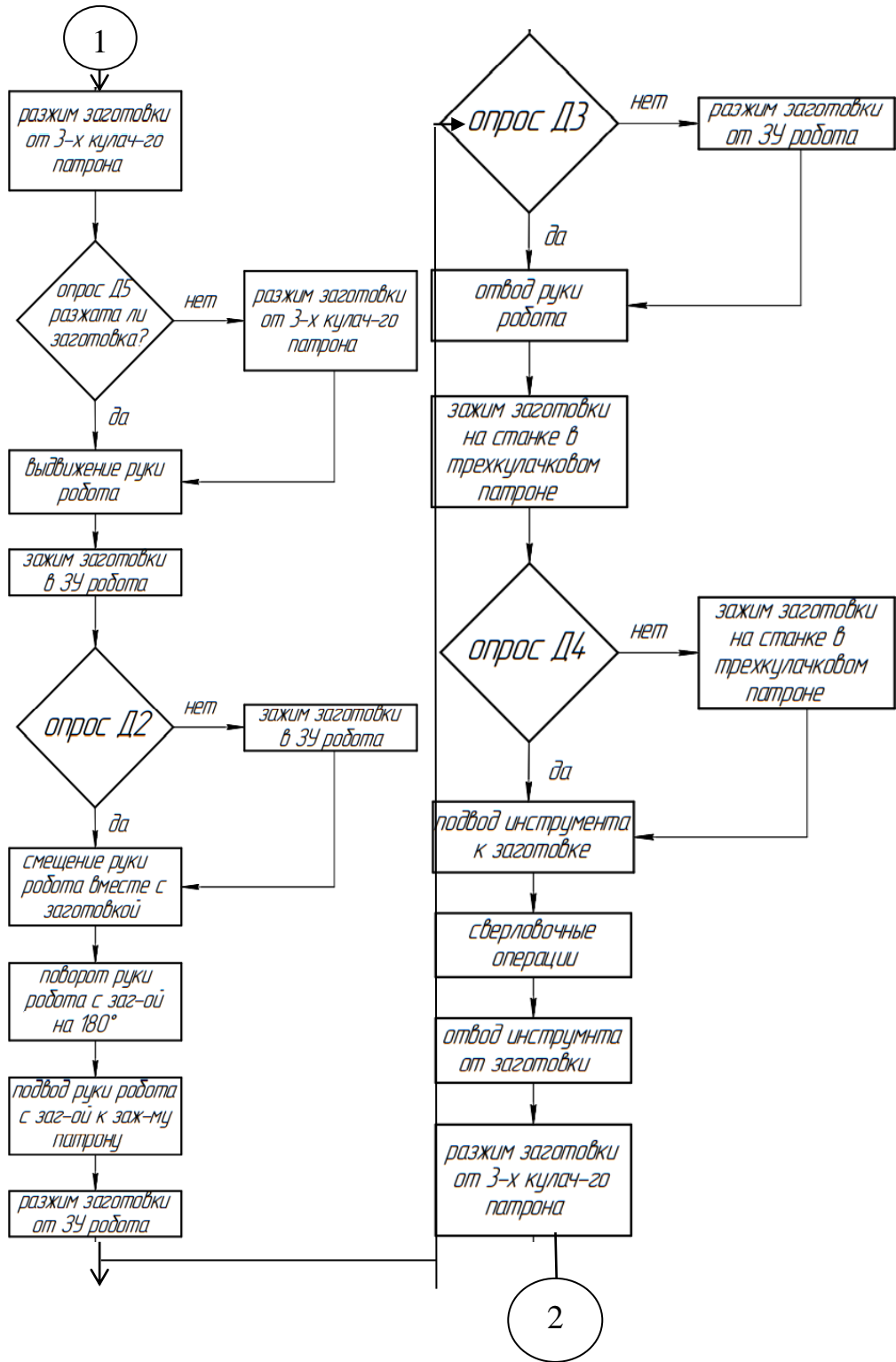
- 1 – Промышленный робот KUKA KR 90;
- 2 – Токарный станок с ЧПУ 200 НТР;
- 3 – Фрезерный станок с ЧПУ VHF-680;
- 4 – Накопительный стол с заготовками;
- 5 – Накопительный стол с обработанными деталями;
- 6 – Шкаф управления KUKA;
- 7 – Захватное устройство;
- 8 – Ограждение.

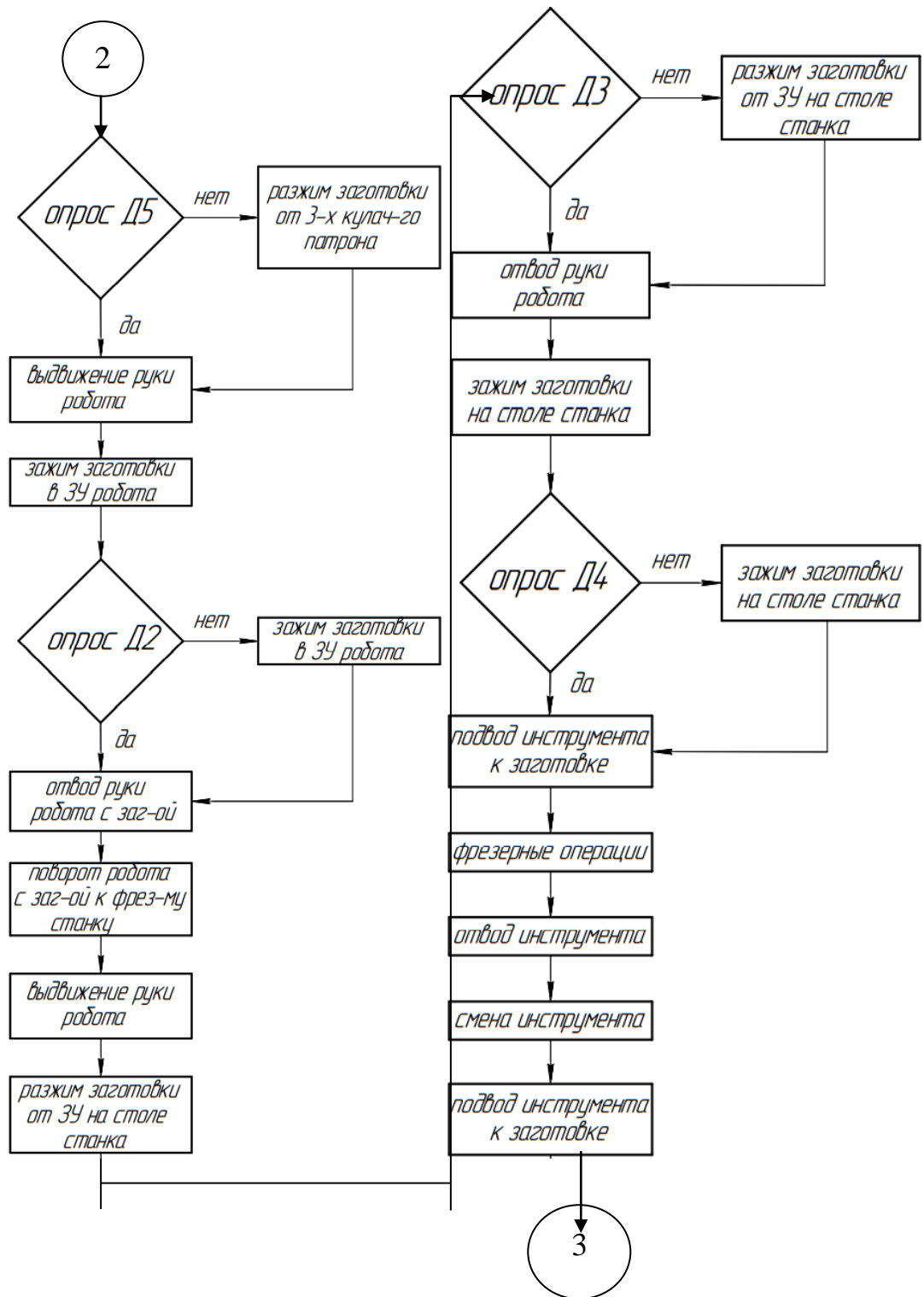
Алгоритм работы РТК (рис. 2).

Робот (поз. 1) подводится к накопительному устройству для заготовок (поз. 4). С помощью специального разработанного захватного устройства (поз. 7) робот зажимает и поднимает заготовку со стола. Далее робот подводится к токарному станку (поз. 2), разжимает заготовку. На токарном станке заготовка зажимается при помощи зажимного патрона, после чего проводятся токарные и сверлильные операции с одной стороны. Далее заготовка разжимается, и робот с помощью ЗУ зажимает и переворачивает заготовку, после чего деталь снова зажимается на станке и производятся оставшиеся сверлильные операции. После всех операций на токарном станке заготовка зажимается в схвате робота, после чего робот подводит заготовку к фрезерному станку (поз. 3), на котором заготовка также крепится при помощи 3-х кулачкового механизма. Далее производятся фрезерные операции, после которых деталь разжимается. Робот зажимает обработанную деталь в захватное устройство, поднимает со стола и движется к накопительному устройству для обработанных деталей (поз. 5). Далее деталь опускается на стол, и робот

движется к первоначальному положению. На этом цикл обработки детали «Планшайба» заканчивается.







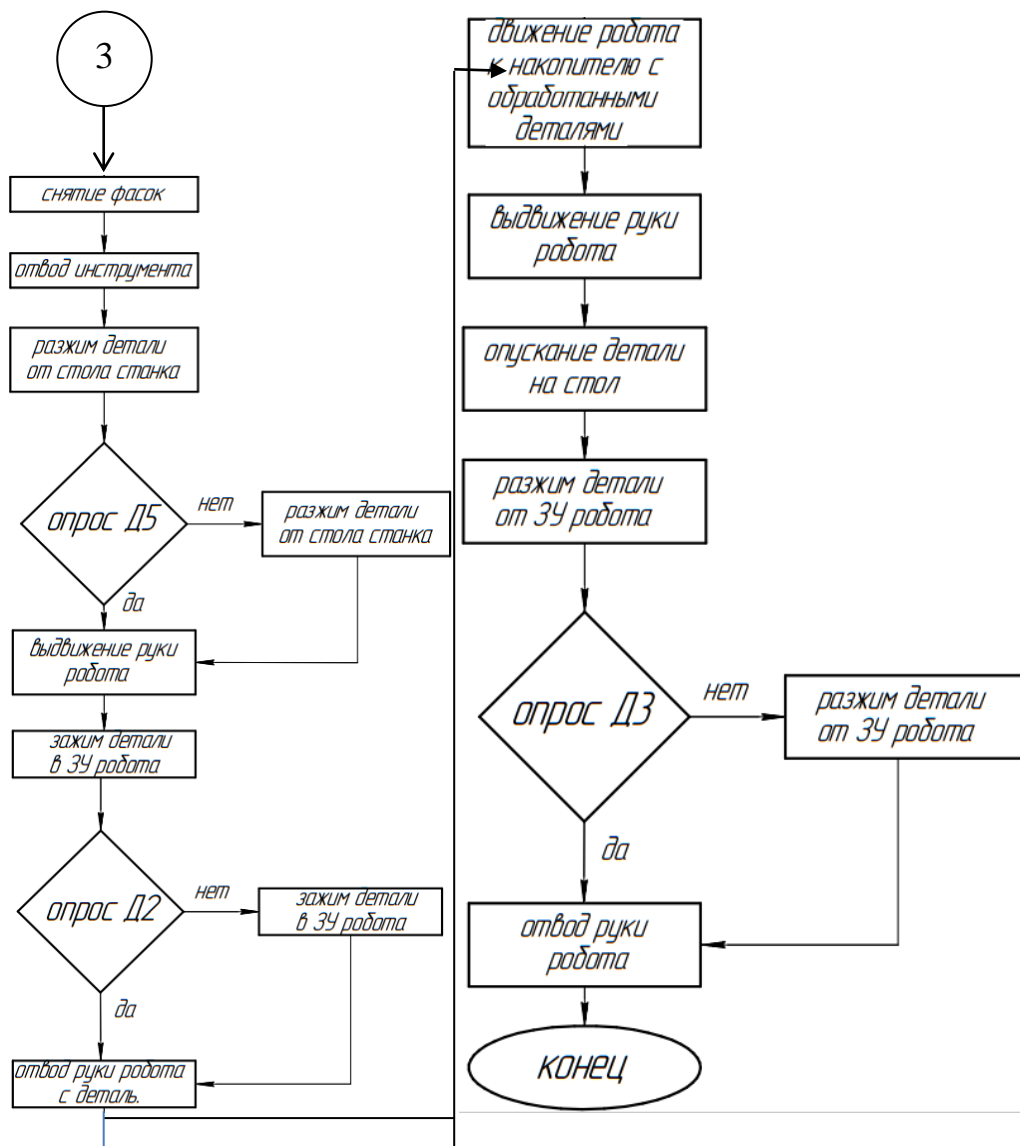


Рис. 2. Алгоритм работы РТК

Выводы

Данная спроектированная модель роботизированного комплекса приведена как пример автоматизации и роботизации конкретных операций и задач в промышленных предприятиях, а также может быть внедрена в такие отрасли как автомобилестроение, в авиационную промышленность и другие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушуев В. В., Кузнецов А. П., Молодцов В. В. Инновации в проектировании технологического оборудования [Текст]; Инновации №8, 2015, 6 с.

Уразбахтин А. Р.

Urazbakhtin A. R.

urazbahtin2016@mail.ru

ПАО «ОДК – Уфимское моторостроительное производственное объединение»

Фецак С.И.

Fetsak S.I.

format_invest@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический

университет», Уфа

ОРБИТАЛЬНАЯ СВАРКА ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

ORBITAL FRICTION MIXING WELDING

Аннотация. В данной статье рассмотрены орбитальная сварка трением с перемешиванием. Предлагается установить сварочную головку для сварки трением с перемешиванием, что позволит ускорить процесс сварки и получить более качественный шов.

Abstract. In this article, the orbital friction welding with mixing is considered. It is proposed to install a friction stir welding head, which will speed up the welding process and obtain a better weld.

Ключевые слова: сварка, сварка трением с перемешиванием, орбитальная сварка, сварка труб.

Keywords: welding, friction stir welding, orbital welding, pipe welding.

Сварка трением с перемешиванием

Сварка трением с перемешиванием (СТП) – это процесс соединения деталей в твердом состоянии, в котором для соединения материалов используется тепло трения, выделяемое вращающимся инструментом.

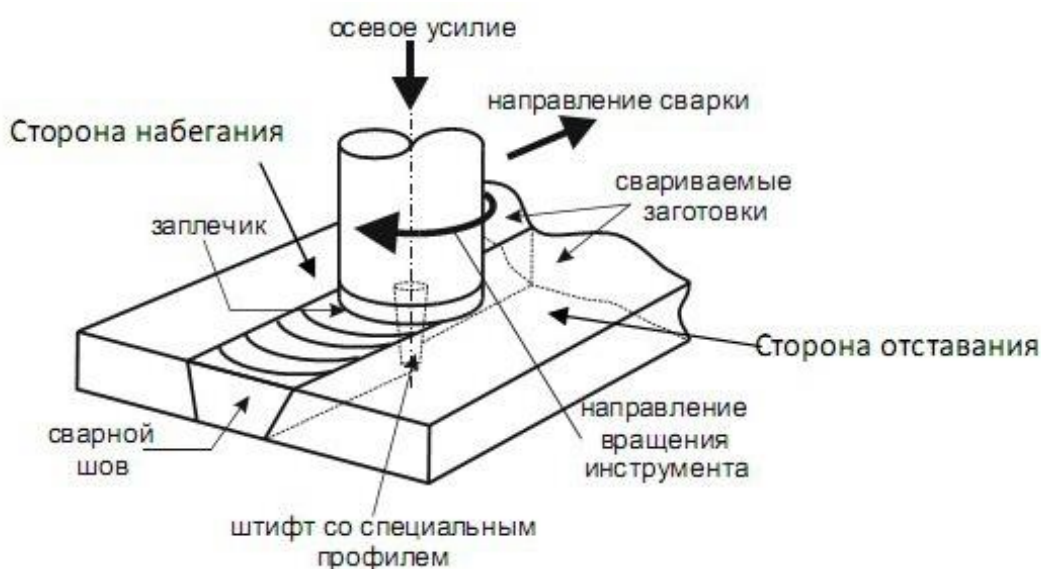


Рис. 1. Схема процесса сварки трением с перемешиванием

Процесс используется в промышленности в основном для соединения алюминиевых сплавов всех сортов, будь то литые, прокат или экструдированные. Сварка трением с перемещением сваривает стыковые соединения из алюминиевого сплава толщиной от 0,3 мм до 75 мм за один проход, в зависимости от используемого исходного материала, мощности станка и структурной жесткости заготовки.

Другие материалы, например, магний, титан, медь и стальные сплавы, а также пластмассы и композиты с металлической матрицей (ММС) также могут свариваться сваркой трением с перемешиванием. Также было доказано, что этот процесс может сваривать различные комбинации этих материалов.

Основные сферы применения:

- судостроение, особенно подводный флот, где необходимы полностью герметичные сварные соединения;
- строительство космических объектов и шаттлов;
- хранилища и баки для хранения криогенных газов и жидкостей, которые обладают повышенной летучестью.

СТП имеет множество достоинств. Среди них:

1) нетоксичность. В отличие от других разновидностей, здесь нет горения электрической дуги, благодаря которой расплавленный металл испаряется в зоне сварки;

2) увеличение скорости формирования шва, благодаря чему снижается время производственного цикла;

3) снижение затрат на электроэнергию в два раза;

4) отсутствие необходимости в дальнейшей обработке сварного шва.

Инструмент для сварки трением с перемешиванием в процессе работы формирует идеальный шов, не требующий зачистки;

5) нет необходимости в дополнительных расходных материалах (сварочной проволоки, технических газов, флюсов);

6) возможность получения соединений металлов, недоступных для остальных видов сварки;

7) нет необходимости в особой подготовке сварочных кромок, за исключением очистки и обезжиривания;

8) получение однородной структуры шва без пор, в результате чего становится проще контроль качества, который регламентирован для сварки трением с перемешиванием ГОСТ Р ИСО 857-1-2009.

При многочисленных достоинствах метод сварки трением имеет сопутствующие минусы:

1) отсутствие мобильности. СТП предполагает соединение неподвижных деталей, жестко закрепленных в пространстве. Это накладывает на оборудование для сварки трением с перемешиванием определенные свойства, такие как неподвижность;

2) низкая универсальность. Громоздкое оборудование настраивается на выполнение однотипных операций. В связи с этим приспособления для сварки

проектируются под конкретные задачи. Например, для сваривания автомобильных боковин на конвейере, и ни для чего другого;

3) сварочный шов имеет радиальную структуру. В связи с этим при определенных видах деформации или при работе детали в агрессивной среде может накапливаться усталость сварного шва.

Орбитальная сварка

Для монтажа трубопроводов в полевых условиях используется орбитальная сварка. Это автоматизированный процесс соединения бесповоротных стыков. Труба проваривается головкой, закрепленной на вращающемся устройстве. Специальный зажим плотно фиксирует аппарат в рабочей зоне. Сварщик выбирает необходимый режим в зависимости от размера, толщины стенки, химического состава сплава.

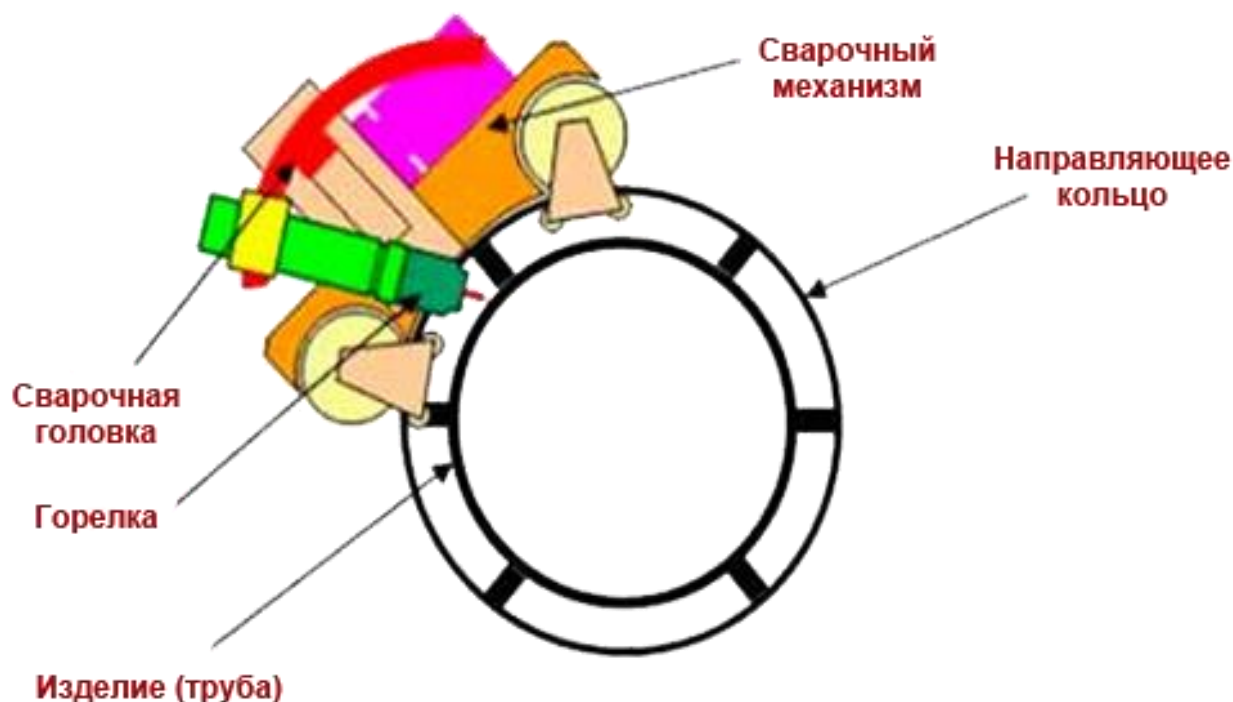


Рис. 2. Схема процесса орбитальной сварки

Автоматы для орбитального соединения трубных стыков используют:

- для линейного монтажа трубопроводов;
- крепления фланцев;
- соединения отрезков трубного проката с отводами, тройниками, другой трубной арматурой;
- сварки трубной доски теплообменников.

Преимущества орбитальной сварки труб:

- снижается риск дефектов шовного валика;
- регулирование дуги снижает область разбрызгивания ванны расплава;
- соединение частей трубопровода, трубных досок можно производить в любом пространственном положении;
- широкий диапазон свариваемых сплавов: углеродистых и легированных сталей, цветного металла;

- возможность работать с присадкой и без нее;
- отсутствие окалины на шве;
- процесс протекает без образования дыма.

Недостатки:

- высокая стоимость аппаратов;
- сложность ремонта и обслуживания оборудования;
- низкая скорость сварки трубопроводов с малыми диаметрами (головка медленно движется по небольшой орбите).

Описание технологии.

Главный принцип данной технологии, благодаря которому она и получила своё название, заключается в следующем. Сварочная головка аппарата перемещается вдоль неподвижного шва по выставленным направляющим, совершая при этом оборот в 360° , двигаясь по орбите.

Орбитальное перемещение сварочной головки полностью автоматизировано, так же, как и все остальные технологические операции, сопутствующие ему. Длина сварочной дуги предустанавливается путём жёсткой фиксации головки на нужной высоте над поверхностью трубы.

Процесс орбитальной сварки проходит под контролем процессора, управляемого специальной программой, в которой прописаны все параметры. Настройки программы учитывают изменяющиеся условия сварки при движении электрода по орбитальной траектории.

Сварочный шов по периметру свариваемой трубы делится на секторы, внутри которых параметры процесса имеют постоянное значение. Таким образом, круговой «орбитальный» шов делится на участки горизонтальные (половые и потолочные), вертикальные (с движением вниз и вверх), и участки, находящиеся под некоторым углом.

В данной статье предлагается для орбитальной сварки использовать процесс сварки трением с перемешиванием, который имеет множество преимуществ, рассмотренных ранее.

Орбитальная головка для сварки трением с перемешиванием

Предлагается концепция устройства для соединения концов стальных труб орбитальной сваркой. За основу предлагаемой концепции орбитальной головки взят патент РФ № 2627066 от 03.08.2017 [1]. Концы труб имеют кромки под сварку. Предлагаемое устройство состоит из устанавливаемых с обеих сторон на соответствующих концах труб в зоне места сварки и прочно зажимаемых направляющих оснований. Направляющие основания имеют по центру круглую выемку с радиальным отверстием для пропускания и размещения по центру свариваемых труб. Зажимные элементы для зажима направляющих оснований с концами труб прочно присоединены к внешним сторонам направляющих оснований. Рама для размещения сварочных и контрольных инструментов с возможностью орбитального перемещения установлена с возможностью вращения на внутренних сторонах направляющих оснований. Она имеет угол поворота, по меньшей мере, на 360° вокруг концов труб.

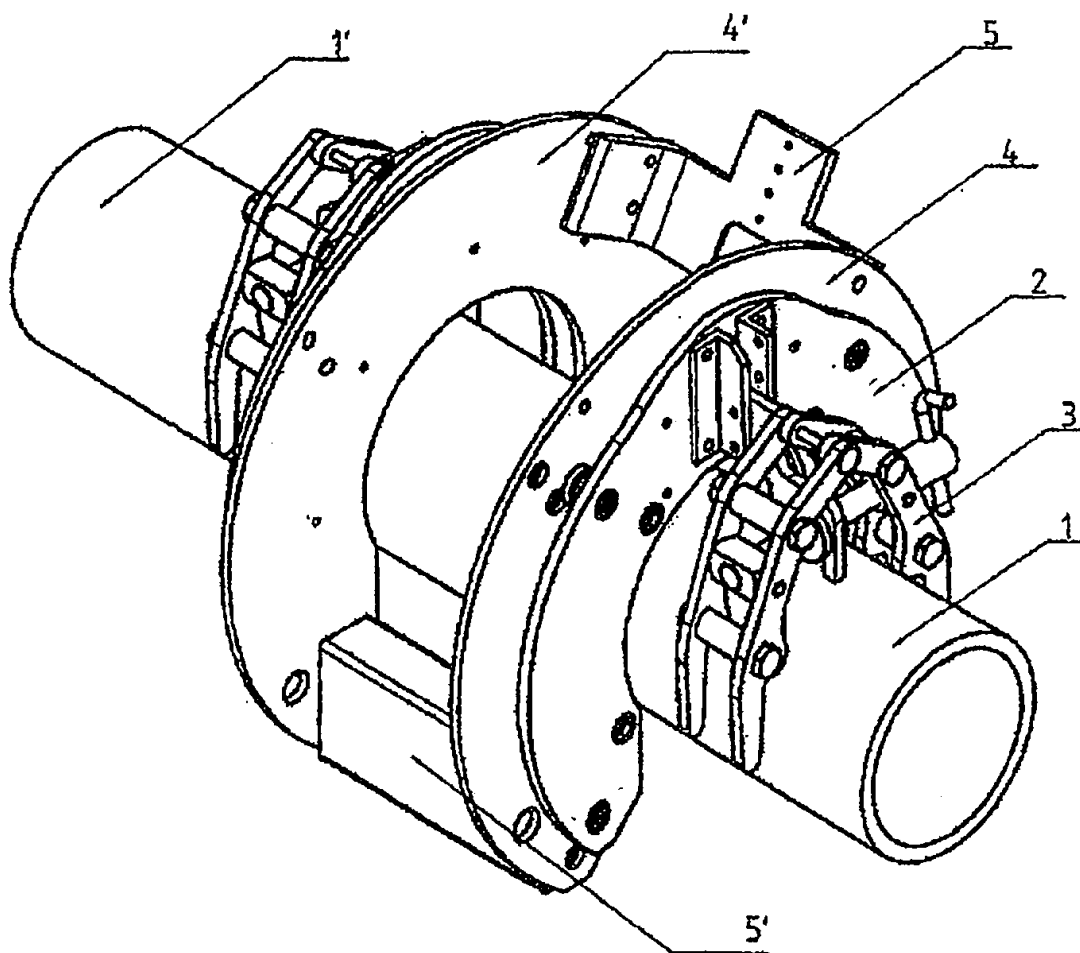


Рис. 3. Устройство для соединения концов стальных труб орбитальной сваркой:
 1, 1' - соединяемые трубы; 2 – направляющие основания; 3 – зажимные элементы;
 4, 4' – поворотные хомуты; 5, 5' – присадочные приспособления

Предлагается на данное устройство установить сварочную головку для сварки трением с перемешиванием.

Выводы

В данной статье рассмотрены орбитальная сварка, сварка трением с перемешиванием. Предлагается установить сварочную головку для сварки трением с перемешиванием на орбитальную головку, что позволит ускорить процесс сварки и получить более качественный шов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ № 2627066, 03.08.2017. Устройство для соединения концов стальных труб орбитальной сваркой // Патент России № 2627066. 03.08.2017. Бюл. № 22. / Кокс, Ханс-Юрген(DE), Винкельс, Йорн(DE), Кайтель, Штеффен(DE), и др.

Мунасыпов Р. А.
Munasipov. R. A.
Фецак С. И.
Fetsak S. I.
format_invest@mail.ru

Акмаев О. К.
Akmaev O. K.
Красников И. П.
Krasnikov I. P.
interpo@list.ru
Красников Д. П.
Krasnikov D. P.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОРТЕЗОВ И ПРОТЕЗОВ

TECHNICAL DESIGN OF A ROBOTIC COMPLEX FOR MILLING PRODUCTS FOR CREATING ORTHOSES AND PROSTHESES

Аннотация. В статье рассматривается разработка и проектирование роботизированного комплекса для создания ортезов и протезов.

Abstract. The article deals with the development and design of a robotic complex for creating orthoses and prostheses.

Ключевые слова: Роботизированный комплекс, фрезерование, протезы, ортезы.

Keywords: Robotic complex, milling, prostheses, orthoses.

Актуальность данной статьи заключается в том, что в настоящее время изготовление протезов и ортезов осуществляется непосредственно с участием человека, которому жизненно необходим один из вышеперечисленных приспособлений. В свою очередь данная процедура сопровождается дискомфортом для человека и представляет собой трудоемкий процесс.

Целью работы является разработка робототехнического комплекса [1, 2], который позволит свести участие пациента в изготовление протезов и ортезов к минимуму.

Решаемые задачи:

- 1) подобрать необходимое оборудование и программное обеспечение;
- 2) разработать робототехнический комплекс с возможностью смены инструмента;
- 3) поставить герметичное ограждение, которое соответствует требованиям техники безопасности;
- 4) обеспечить удаление мелкодисперсной пыли из зоны обработки.

В процессе разработки робототехнического комплекса было разработано и подобрано оборудование, разработана планировка робототехнического комплекса, которая представлена на рис. 1.

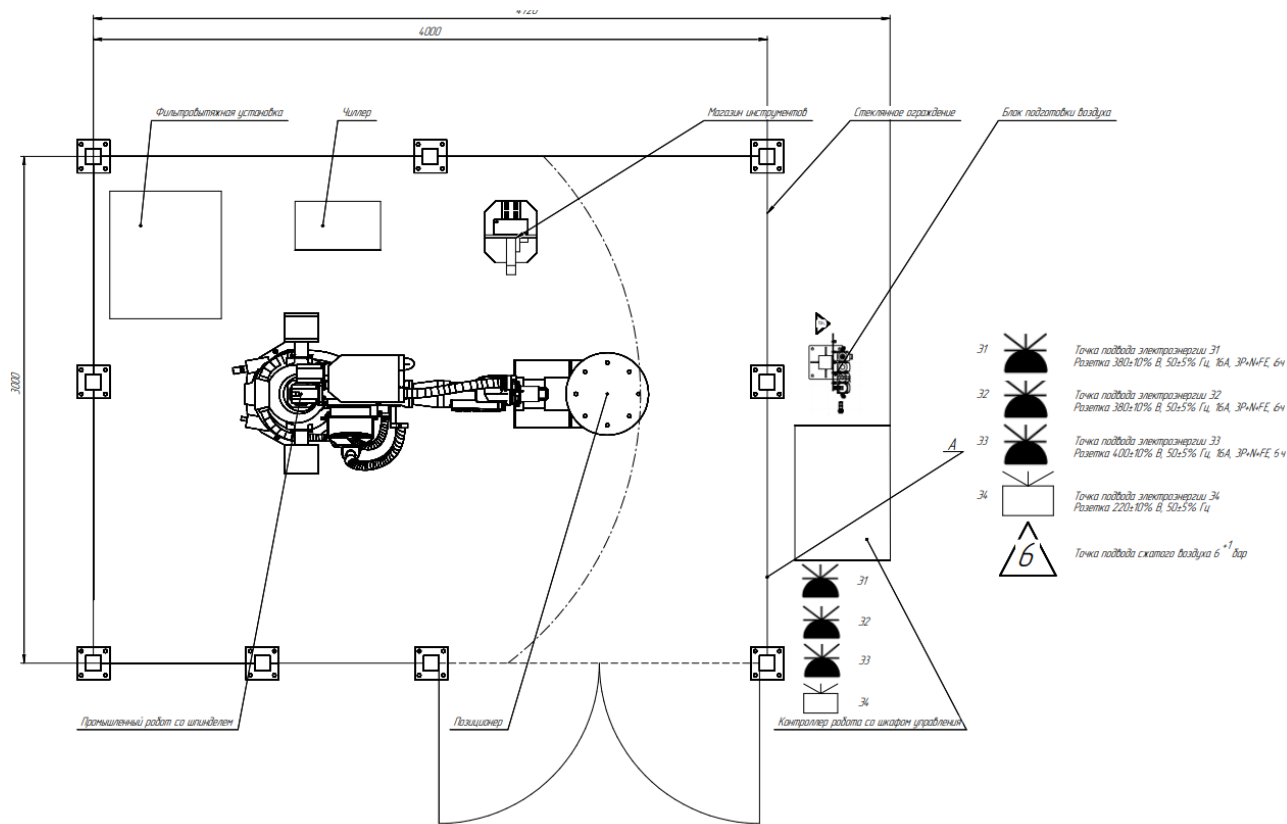


Рис. 1. Планировка робототехнического комплекса

В качестве необходимого оборудования были выбраны и разработаны следующие комплектующие робототехнического комплекса:

- 1) робот KUKA KR60;
- 2) позиционер KP1-НС, также разработаны увеличенная планшайба и поддерживающий центр;
- 3) система пылеудаления Extor-2100;
- 4) разработан магазин инструментов.

Внешний вид необходимого оборудования и их технические характеристики представлены в табл. 1. Обработка изделий производилась при следующих условиях:

- материал: полиуретан;
- материал фрезы: твердый сплав ВК8;
- диаметр фрезы: $\varnothing 20$ мм;
- скорость резания: 4000 мин^{-1} ;
- подача: 30000 мм/мин;
- глубина резания: 70 мм;
- припуск на чистовую обработку: 10 мм.

Таблица 1

Внешний вид и технические характеристики оборудования

Наименование оборудования	Внешний вид	Технические характеристики
Робот KUKA KR60		<p>Полезная нагрузка – 16-30 кг. Максимальный радиус действия – 2429-2952 мм. Число управляемых осей – 6. Способ монтажа – напольный, потолочный. Класс защиты корпуса – IP64.</p>
Позиционер КР1-НС, Планшайба и поддерживающий центр		<p>Номинальная грузоподъемность: 500 кг. Повторяемость: $\pm 0,08$ мм.</p>
Система пылеудаления Extor		<p>Частота: 50 Гц. Макс. производительность: 2000 м³/час. Макс. Вакуум: 2700 Па. Напряжение: 400 В. Сила тока: 3,1 А. Мощность: 2,2 кВт. Уровень шума: 69 дБ.</p>
Магазин инструментов		<p>Вместимость: 5 инструментов. Возможность закрытия посадочных мест оправки от пыли .</p>

Процесс обработки и готовый результат представлены на рис. 2.

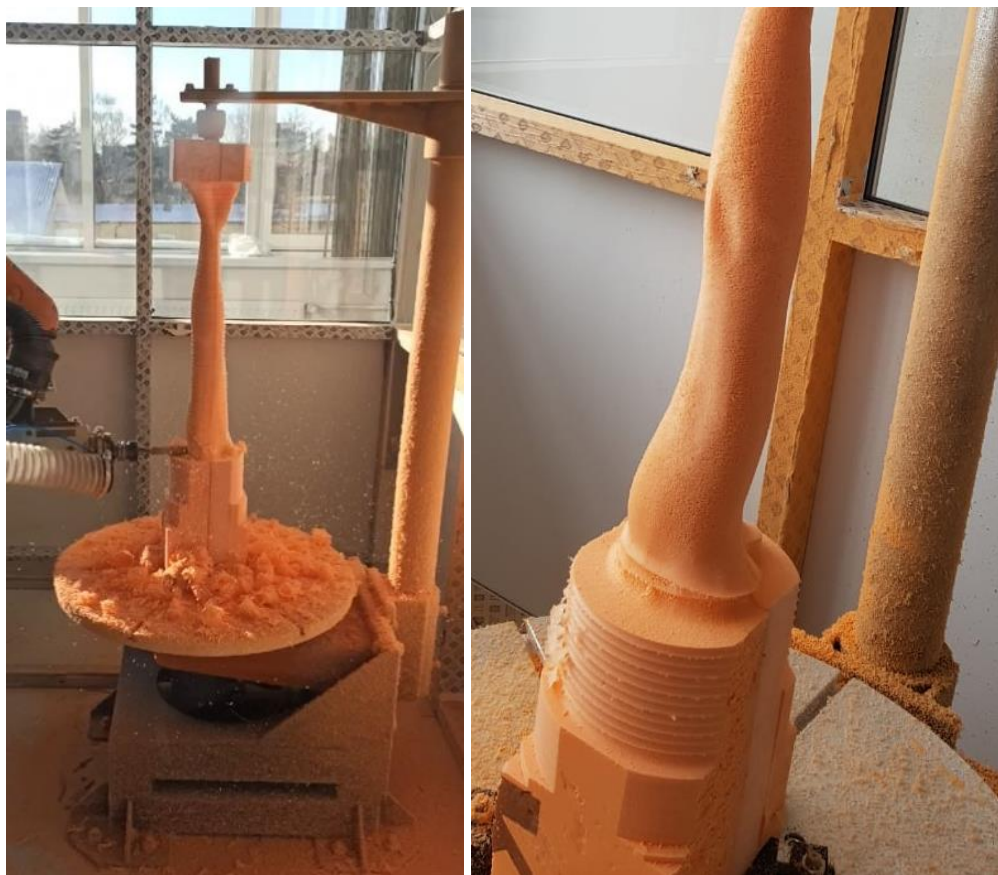


Рис. 2. Процесс и результат обработки изделия

Для соответствия требованиям техники безопасности данный комплекс оснащен электромеханическим замком и лучевыми барьерами, которые исключают нахождения человека в комплексе во время его работы.

Выводы

Выбрано оборудование для робототехнического комплекса.

Разработана планировка робототехнического комплекса.

Разработаны следующие компоненты РТК:

- 1) магазин инструментов;
- 2) планшайба;
- 3) поддерживающий центр.

Проведен монтаж, пусконаладочные работы и обучение персонала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фрезерный робот (3d фрезерный станок) [Электронный ресурс]. URL: <https://mirrobotics.ru/фрезерный-робот-3d-фрезерный-станок/>. (Дата обращения 08.03.2021).
2. Промышленные роботы конкурируют со станками с ЧПУ [Электронный ресурс]. URL: http://rus-robot.com/articles/promyshlennye_roboty_konkuriruyut_so_stankami_s_chpu/. (Дата обращения 08.03.2021).

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА РОССИИ

Атрощенко В. В.

Atroschenko V. V.

91250@mail.ru

Фецак Н. И.

Fesak N. I.

Markelova-ugatu@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ НА БАЗОВОЙ КАФЕДРЕ ФГБОУ ВО УГАТУ

PECULIARITIES OF TRAINING SPECIALISTS OF WELDING PRODUCTION FOR OIL AND GAS INDUSTRY AT THE BASIC DEPARTMENT OF USATU

Аннотация. В статье представлены новые подходы в подготовке специалистов сварочного производства по программе магистратуры «Сварочные технологии в нефтегазовой отрасли» (далее - программа), обеспечивающие получение обучающимися не только теоретических знаний, но и практических навыков, необходимых в производственных условиях, а также получить именно тот профессиональный опыт, который нужен работодателю в настоящее время. Новизна представленных подходов обусловлена такими составляющими как: организация образовательной деятельности при освоении программы в форме практической подготовки; немедленное реагирование на изменения запросов рынка за счет оперативного внесения изменений и дополнений в программу; обязательным включением специалистов-практиков сварочного производства в преподавательский состав; полное «погружение» в профессиональную деятельность до окончания обучения.

Показаны конкурентные преимущества практикоориентированного обучения магистров по программе с акцентом на инженерно-техническую подготовку для сварочного производства на базовой кафедре «Современные методы сварки и контроля конструкций» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по сравнению с традиционными кафедрами технических вузов, а именно: трудоустройство на базовом предприятии на весь срок обучения, получение практических навыков сварки и неразрушающего контроля, автоматизированного проектирования ремонтных технологий и нефтегазовых сооружений, а также проведение научно-исследовательских работ по тематикам предприятий нефтегазовой отрасли с применением принципов проектного обучения.

Представлены новые подходы в оценке квалификации магистров, а именно:

сопряжение программы и инструментов независимой оценки квалификации, в том числе, путем сопоставления тематических структур оценочных средств, используемых при проведении профессионального экзамена по соответствующей квалификации с тематикой дисциплин программы;

направление магистров – сотрудников базового предприятия – в центр оценки квалификации сразу после получения диплома об окончании университета для прохождения независимой оценки квалификации.

Abstract. The article presents new approaches to the training of specialists in welding production under the Master's program "Welding technologies in the oil and gas industry" (hereinafter - the program), which ensure that students receive not only theoretical knowledge, but also practical skills required in production conditions, as well as get exactly that professional the experience that the employer needs at the moment. The novelty of the presented approaches is due to such components as: the organization of educational activities when mastering the program in the form of practical training; immediate response to changes in market demands by promptly making changes and additions to the program; the mandatory inclusion of practitioners in welding production in the teaching staff; full "immersion" in professional activity before graduation..

Shown competitive advantages praktikoorientirovannogo learning of master's program with a focus on engineering and technical training for welding at the Department "Modern methods of welding and control structures" of the Ufa State Aviation Technical University compared with the traditional departments of technical universities, namely: employment in the base enterprise for the entire period of training, the practical skills of welding and nondestructive testing, computer-aided design and repair technologies of oil and gas installations, as well as conducting research on the topics of oil and gas industry enterprises with the application of the principles of project training.

New approaches to the assessment of masters' qualifications are presented, namely:

combining the program and tools for independent assessment of qualifications, including by comparing the thematic structures of assessment tools used in conducting a professional exam for the relevant qualification with the topics of the program's disciplines;

the direction masters – employees core business – center evaluation of the training immediately after receiving a diploma of graduation from the University to undergo an independent qualification assessment.

Ключевые слова: профессиональный стандарт, программа магистратуры, нефтегазовая отрасль, практическая подготовка, независимая оценка квалификации.

Keywords: professional standard, master's degree program, oil and gas industry, practical training, independent qualification assessment.

В настоящее время нефтегазовая отрасль России входит в число одной из приоритетных отраслей страны, обеспечивая её стабильность и развитие экономики. Крупнейшие компании нефтяной отрасли, такие как ПАО «Транснефть», ПАО «Газпром», заинтересованы в профессиональном развитии своих сотрудников и получении ими новых компетенций в условиях широкого использования в производстве инноваций, передовых знаний и технологий, а также в привлечении в компанию молодых специалистов-универсалов, имеющих не только знания в области сварки и неразрушающего контроля, но и умеющих осуществлять комплексное видение и решение производственных задач предприятий нефтегазовой отрасли, обладающие практическими навыками при проектировании, эксплуатации и ремонте нефтегазовых сооружений.

В этой связи, подготовка инженерно-технических специалистов с набором профессиональных и социальных компетенций [1] в области сварки и неразрушающего контроля при строительстве, эксплуатации и ремонте нефтегазовых сооружений остается актуальным и острым вопросом в настоящее время [2].

При этом, в последние годы, все чаще работодатели отмечают снижение уровня подготовленности выпускников технических вузов [3-5], в том числе в области сварочного производства. Причин этому несколько [6]. Рассмотрим некоторые из них.

Одна из причин низкого уровня готовности выпускников к профессиональной деятельности в области сварки – разрыв между программами подготовки и требованиями рынка труда. Известно, что информация быстро устаревает и требует постоянного обновления [7]. Из-за отсутствия диалога между вузом и работодателем на постоянной основе о текущем состоянии современного производства и перспективных технологиях, о требованиях к профессиональным компетенциям специалистов преподаватели технических вузов имеют определенный дефицит актуальных знаний при реализации образовательных программ. Отсутствует или носит формальный характер реальное участие представителей работодателя как в процессе разработки и согласования образовательных программ, так и в процессе их реализации. Это приводит к несоответствию содержания образовательных программ современному уровню развития сварочного производства. Сегодня вузы сотрудничают с предприятиями, в основном, в рамках организации производственной практики, которая, как правило, носит формальный характер и не способствует получению и закреплению профессиональных навыков [8]. Таким образом, темпы развития современного сварочного производства опережают актуализацию содержания образовательных программ, реализуемых в вузах. Это приводит к тому, что актуальность знаний пропадает быстрее, чем выпускник покинет вуз.

Вторая причина – использование в образовательном процессе пассивных методов обучения в форме пересказа вычитанных в книгах или давно известных истин, когда обучающиеся выступают в роли пассивных слушателей классических лекций по определенной дисциплине или пассивных наблюдателей за какой-либо деятельностью специалиста при выполнении лабораторных работ с использованием оборудования, не имея возможности самостоятельно выполнить необходимые действия, формирующие требуемые программой умения. В результате обучающиеся усваивают лишь сумму знаний по курсу, актуальность которых, как было отмечено выше, не всегда соответствует современному уровню развития сварочного производства. При этом, при компетентностном подходе конечным результатом обучения должны выступать не знания, а определенный набор освоенных «деятельностей». А знание является лишь необходимым ресурсом этой деятельности. С точки зрения современных педагогических технологий и эффективности усвоения обучающимися учебного материала пассивный метод обучения считается самым неэффективным. Пассивная форма обучения приводит к потере интереса к изучаемому курсу, снижению мотивации, а также к слабой практической подготовке обучающихся. И даже при выполнении всех заданий по изучаемым дисциплинам в полном объеме такой подход не позволяет обучающимся освоить профессиональные компетенции, необходимые в производственных

условиях и получить именно тот профессиональный опыт, который нужен работодателю.

Проявить активность студент может только при выполнении, например, научно-исследовательской работы под руководством преподавателя, являющегося специалистом в соответствующей области [9-11], а также при применении в учебном процессе активных форм обучения, являющихся средствами развития познавательной деятельности. Надо отметить, что использование активных методов во всех видах учебной работы студентов, а также проблемное обучение [12-14] наиболее полно передают сущность процессов совместной деятельности преподавателей и студентов.

И, наконец, не менее важной причиной снижения уровня подготовленности выпускников технических вузов является невозможность получить полную и объективную картину качества их подготовки. Используемые в большинстве российских вузов процедуры текущего контроля успеваемости, промежуточной и итоговой аттестации обучающихся имеют узкую направленность, связанную с конкретным учебным курсом, и не позволяют оценить сформированные профессиональные компетенции. Иногда при проведении контроля результатов обучения может доминировать достаточно формальный и субъективный характер оценки.

Таким образом, перед высшей школой, в том числе перед техническими вузами, реализующими образовательные программы в области сварочного производства, стоит важная задача – найти и использовать в образовательном процессе такие подходы к обучению и объективной оценке уровня квалификации выпускника, которые позволят, во-первых, немедленно реагировать на изменения запросов рынка за счет оперативного внесения изменений и дополнений в образовательные программы и, во-вторых, подготовить за короткое время востребованных и конкурентоспособных специалистов сварочного производства с профессиональными навыками, необходимых предприятиям нефтегазовой отрасли в настоящее время.

Объединение ресурсов предприятий и образовательных организаций, а также обучение бакалавров и магистров с акцентом на инженерно-техническую подготовку является эффективным способом преодоления сложившейся ситуации в системе высшего образования [15].

На различных дискуссионных площадках все чаще обсуждаются разнообразные подходы к подготовке специалистов, отвечающих требованиям работодателей, продолжается поиск путей мотивации к обучению и повышения профессиональной компетентности выпускников [16; 17]. Все чаще встает вопрос о необходимости совершенствования технологии обучения.

Одной из современных форм взаимодействия вуза с бизнесом и повышения практикоориентированности обучения является создание в университетах базовых кафедр как инструмента качественной подготовки специалистов [18].

Новые подходы к подготовке магистров с акцентом на инженерно-техническую подготовку для сварочного производства реализуются на базовой

кафедре современных методов сварки и контроля конструкций в ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (далее – кафедра) при разработке и реализации программы «Сварочные технологии в нефтегазовой отрасли» (далее – программа), учитывающей интересы предприятий региона в нефтегазовой отрасли, таких как ООО «Газпром трансгаз Уфа», ООО «Газпром нефтехим Салават», ПАО «Газпром газораспределение Уфа», АО «Транснефть-Урал», НТЦ ООО «НИИ Транснефть», ООО «Транснефть Надзор» и других.

Кафедра располагается на территории ООО «Аттестационный центр «СваркаТехСервис», созданного на базе Центра компетенций по сварке ГАЦ РБ, специализирующегося в области аттестации персонала, сварочных технологий, материалов и оборудования по правилам НАКС (Национального Агентства Контроля Сварки), Ростехнадзора и независимой оценке квалификаций и объединяет ресурсы как базового предприятия, так и профильных предприятий региона. Обучение на кафедре способствует внедрению в образовательный процесс современной ресурсной базы предприятия, закрепление за обучающимся на весь период обучения специалиста-наставника из числа сотрудников предприятия, а также мониторингу развития профессиональных, интеллектуальных, ситуативных и социальных компетенций обучающегося для формирования его карьерного роста.

В отличие от традиционных профильных кафедр технических вузов базовая кафедра имеет ряд существенных конкурентных преимуществ при комплексной подготовке магистров и формировании необходимых в профессиональной деятельности компетенций, а именно:

1) трудоустройство на базовом предприятии на весь срок обучения, вовлечение обучающихся в трудовую деятельность, «погружение» в реальную производственную среду с первого дня обучения по программе и привлечение к работам над реальными задачами сварочного производства. В отличие от студентов других профильных кафедр, обучающихся по классическим магистерским программам, для магистрантов базовой кафедры решение реальных производственных задач не отдаленная перспектива, а ежедневная работа. При таком подходе они имеют возможность с минимальными затратами времени на адаптацию и доучивание включиться в производственный процесс, что исключительно ценно для потенциального работодателя;

2) получение практических навыков сварки в реальных производственных условиях (способы сварки – РД, РАД, МП, Т, Г, сварка пластмасс) с целью глубокого изучения физических процессов сварки и технологии изготовления сварных конструкций, неразрушающего контроля (методы контроля – ВИК, УЗК, РК, МК, ВК, ПВК, ПВТ, ЭК, ТК, ВД) и механических испытаний под руководством и наблюдением мастеров производственного обучения, что позволит магистрам в процессе трудовой деятельности найти понимание и «говорить на одном языке» при решении производственных вопросов как по вертикали управления (с представителями

рабочей профессии – сварщиками и дефектоскопистами), так и по горизонтали (работниками одного уровня – руководителями сварочного производства);

3) проведение научно-исследовательских работ по тематикам предприятий ПАО «Газпром» и ПАО «Транснефть» с применением принципов проектного обучения. В процессе проектной деятельности студенты получают практические навыки работы в команде при создании проектных решений, необходимых при строительстве и ремонте нефтегазовых сооружений, распределяя и планируя разные виды деятельности по проекту между членами команды;

4) организация образовательной деятельности при освоении программы в форме практической подготовки (превалирование в программе практики над теорией – 30% теории, 70% практики).

При разработке образовательной программы с учетом требований профессиональных стандартов в группу разработчиков наряду с педагогическими работниками были включены руководители и ведущие специалисты-практики предприятий нефтегазовой отрасли. Разработка программы велась под общим руководством начальника отдела сварки ПАО «Газпром» и ориентирована на конкретные потребности и задачи предприятий нефтегазовой отрасли.

При реализации программы к работе с магистрантами привлечены не только преподаватели университета, но высококвалифицированные наставники – специалисты сварочного производства IV уровня профессиональной подготовки по классификации НАКС. Актуальность полученных знаний, обеспечивается за счет обязательного участия магистров в вебинарах и отраслевых совещаниях предприятий нефтегазовой отрасли, где ведущие специалисты-практики представляют актуальную информацию всему профессиональному сообществу о текущем состоянии и основных направлениях развития сварочного производства ПАО «Газпром» и ПАО «Транснефть», а также о новых технологиях сварки, новых типах и марках отечественного сварочного оборудования и сварочных материалов, о средствах неразрушающего контроля качества сварных соединений. Для проведения лекционных и семинарских занятий приглашаются руководители сварочного производства ведущих предприятий нефтегазовой отрасли. В отличие от традиционных магистерских программ обучение по программе базовой кафедры проводится в основном с использованием активных форм обучения, в ходе которых студенты получают не только определенные знания, но и умения применения их в конкретной практической ситуации. Используемая в программе система методов направлена не на изложение преподавателем готовых знаний, их запоминание и воспроизведение, а на самостоятельное овладение студентами знаниями и умениями в процессе активной мыслительной и практической деятельности.

По завершению обучения по программе осуществляется комплексная оценка уровня квалификации магистров, заключающаяся в применении

инструментов независимой оценки для оценки квалификации выпускников кафедры [19], а именно:

1) применение инструментов независимой оценки квалификации при разработке программы, а именно, сопоставления тематических структур оценочных средств, используемых при проведении профессионального экзамена по соответствующей квалификации с тематикой дисциплин образовательной программы;

2) направление магистров – сотрудников базового предприятия – в центр оценки квалификации сразу после прохождения государственной итоговой аттестации и получения диплома об окончании университета для прохождения независимой оценки квалификации, по результатам которой работодатель может убедиться в том, что он получает именно те кадры, на которые рассчитывает. Успешное прохождение выпускниками кафедры независимой оценки квалификации также является критерием качества программы.

Независимая оценка квалификации не заменяет государственную итоговую аттестацию, а включается в нее, как дополнительная возможность получить по завершении обучения в университете сразу два документа – диплом магистра и свидетельство о квалификации, подтверждающее соответствие квалификации требованиям профессионального стандарта «Специалист сварочного производства». Инструменты, используемые при независимой оценке квалификаций, могут дать объективную картину реального уровня подготовки выпускников к профессиональной деятельности.

Выводы

Таким образом, достоинства подхода, обеспечивающего растить кадры в компании, воспитывать их под свои нужды, очевидны: отрасль получает высококвалифицированных специалистов, выпускники – гарантированное трудоустройство. А магистры, прошедшие обучение на кафедре и независимую оценку квалификации в центре оценки квалификации – это готовые конкурентоспособные специалисты высокой квалификации в области сварки и неразрушающего контроля сварных соединений, востребованные, как на производстве, так и в науке, в любых динамично развивающихся предприятиях нефтегазового комплекса страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сенашенко В. С. Уровни сопряжения системы высшего образования и сферы труда // Высшее образование в России. 2018. Т. 27. № 3. С. 38-47.
2. Владимиров А. И. О подготовке кадров для нефтегазового комплекса. М.: Издательский дом Недра. 2014. 59 с.
3. Алексеенков А. С., Ермаков С. А., Карев В. И. Проблемные аспекты инновационной профильной подготовки студентов машиностроительных вузов // Сибирский педагогический журнал. 2014. № 4. С. 197-202.
4. Радионов А. А., Рулевский А. Д. Проблемы инженерного образования // Вестник ЮУрГУ. Серия «Образование. Педагогические науки». 2016. Т. 8. № 1. С. 87-93.

5. Никольская В. В. Вопросы организации высшего образования в российской федерации // Вестник УГАТУ. 2018. Т. 21. № 1 (75). С. 1-5.
6. Mills J. E., Treagust D. F. Engineering Education – Is Problem-Based or Project-Based Learning the Answer? // Australasian Journal of Engineering Education. 2003. Vol. 3, no. 2. P.2-16.
7. Шамис В. А. Активные методы обучения в вузе // Сибирский торгово-экономический журнал. 2011. №14, С. 136-144.
8. Чугунов Д. Ю. Введение программ прикладного бакалавриата в российскую систему образования: зачем и как? / Д. Ю. Чугунов, К. Б. Васильев, И. Д. Фруммин // Вопросы образования. 2010. № 4. С. 247-267.
9. Боков Л. А. Технология группового проектного обучения в вузе как составляющая методики подготовки инновационно-активных специалистов / Л. А. Боков, М. Ю. Катаев, А. Ф. Поздеева // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11762> (дата обращения: 19.12.2020).
10. L. Pan, Research on paths to cultivate occupational quality of higher vocational college students under the guidance of the spirit of the craftsman, Proc. of the 2nd Int. Conf. on contemporary education, social sciences and humanities (ICCESSH 2017): Advances in social sci. ed. and humanities res, 124, pp. 205–208 (2017).
11. S. Lutovac, R. Kaasila, J. Komulainen, University lecturers' emotional responses to and coping with student feedback: a Finnish case study, Eur. J. of psychology of ed., 32(2), 235–250 (2017). DOI: 10.1007/s10212-016-0301-1.
12. Огольцова Е. Г. Формирование активного обучения как средство развития познавательной деятельности студентов / Е. Г. Огольцова, О. М. Хмельницкая // Развитие качества высшего профессионального образования в современных условиях: материалы региональной научно-практической Интернет-конференции. 2009. С. 129-133.
13. Gijseleers W. H. Connecting problem-based practices with educational theory / L.Wilkerson and W.H. Gijseleers (eds.), Bringing Problem-Based Learning to Higher Education: Theory and Practice, Jossey-Bass Publishers, San Francisco, 1996. P.13-21. doi:10.1002/tl.37219966805.
14. Perrenet J. C., Bouhuijs P. A. J., Smits J. G. M. M. The suitability of problem-based learning for engineering education: theory and practice // Teaching in higher education. 2000. Vol. 5, no.3. P. 345-358.
15. Борисова Е. В. Сравнительный анализ образовательных стандартов ФГОС ВО 3+ и ФГОС ВО 3++ по направлению подготовки «Информационные системы и технологии»/ Е. В. Борисова, Б. В. Соболев, М. В. Ступина // Санкт-Петербургский образовательный вестник. 2019. №1. С.29-35.
16. Мишин И. Н. Критическая оценка формирования перечня компетенций в ФГОС ВО 3++ // Высшее образование в России. 2018. № 4. С.66-75.
17. Fayziyeva K. A., Mansurova G. M. An integrative approach in professionally oriented training of specialists in the oil and gas industry // Modern science. 2020. №6-4. pp.31-32.
18. Радионов А. А. Условия эффективности деятельности базовых кафедр вузов / А. А. Радионов, А. Д. Рулевский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Образование. Педагогические науки». 2016. Т. 8, № 1. С. 87-93.
19. Калугина Т. Г. Независимая оценка и сертификация выпускников учреждений профессионального образования, персонала предприятий и организаций на региональном уровне // Вестник Челябинского государственного университета. 2012. № 19 (273). Философия. Социология. Культурология. Вып. 26. С. 62-66.

Сидоров В. П.

Sidorov V. P.

Vladimir.sidorov.2012@list.ru

Советкин Д.Э.

Sovetkin D.E.

mitya.sovetkin@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», Тольятти

ЭФФЕКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ VP-GTAW ДУГИ НА АЛЮМИНИЕВОЙ ДЕТАЛИ

VP-GTAW ARC EFFECTIVE FOR ALUMINUM PART

***Аннотация.** Выполнен обзор исследований эффективного КПД дуг с неплавящимся и плавящимся электродом в среде аргона на изделиях из различных металлов. Значения эффективного КПД имеют существенный разброс. Установлено, что в таких условиях наименее исследовано действие стационарной во времени дуги на алюминиевые детали. Эффективный КПД в большинстве работ приводится без значений напряжения дуги, что затрудняет его использование в инженерной практике. Наиболее целесообразным, с позиций тепловой эффективности при сварке, является использование понятия удельной эффективной мощности на 1 А тока дуги. Перспективным способом сварки алюминиевых сплавов в настоящее время является сварка вольфрамовым электродом в аргоне с использованием разнополярных прямоугольных импульсов тока (способ VP-GTAW). Разработанные численные математические модели для этого способа сварки дали противоречивые результаты. Вклад полярностей дуги в общую эффективную мощность исследован недостаточно. Это затрудняет выбор оптимальных соотношений длительностей полярности в периоде. Для определения роли полярностей применена методика калориметрирования алюминиевых деталей на одинаковых токах импульсов при различном соотношении длительности импульсов прямой и обратной полярности. Проведенные эксперименты позволили составить системы уравнений для общей эффективной мощности дуги. Решение систем уравнений дало высокую сходимость данных по удельной эффективной мощности полярностей. При токе около 100 А удельная эффективная мощность на обратной полярности почти в 2 раза выше, чем на прямой полярности. Этот результат согласуется с данными о соотношении скоростей плавления алюминиевой проволоки при наплавке плавящимся электродом.*

***Abstract.** The basis for this research was a review of papers related to the effective efficiency of non-consumable and consumable electrode arc welding of various metal products in argon. The result shows that the variation of effective efficiency values is essential. It was found that the stable arc effect on aluminum parts is the least understood. In most works, the effective efficiency is given without arc voltage values that complicate its use in practical engineering. The most preferred concept from the point of welding thermal efficiency is the specific effective power per 1 A of the arc current. Nowadays, the most promising method of aluminum alloy welding is of variable polarity gas tungsten arc welding (VP-GTAW). Numerical mathematical models developed for this welding method show contradicting results. The contribution of arc polarities to the total effective power is not well studied. This makes it difficult to choose optimal ratios for polarity duration and a period. To determine the role of polarities, we apply the method of aluminum parts calorimetry at the same pulse current and different ratios of the pulse duration of straight and reverse polarities. The experiments made it possible to compose several systems of equations for the total arc effective power. Equations solving showed high convergence of data on the specific effective power of*

polarities. If the current is about 100 A, the specific effective power of the reverse polarity arc is about twice higher when compared to the straight polarity arc. This result accord with data on the ratio of aluminum wire fusion rate at consumable electrode hardfacing.

Ключевые слова: *сварка алюминия, свободная дуга, вольфрамовый электрод, аргон, разнополярные импульсы, эффективная мощность, эффективный КПД, вклад полярностей, калориметрирование, система уравнений, VP-GTAW.*

Keywords: *aluminum welding, non-constricted arc, tungsten electrode, argon, variable pulses, effective power, effective efficiency, polarity contribution, calorimetry, system of equations, VP-GTAW.*

Благодаря универсальности в отношении сварки сталей покрытыми электродами и в аргоне вольфрамовым электродом на постоянном токе, а также очистке алюминиевого катода в дуге с импульсами тока прямоугольной формы, установки с разнополярными импульсами тока находят все большее применение [1]. Процесс дуговой сварки с переменной полярностью *VP-GTAW* имеет значительные перспективы применения при сварке алюминиевых сплавов средней толщины. Актуальным, по-прежнему, является определение общей тепловой эффективности дуги *VP-GTAW* в зависимости от соотношения полярностей и токов импульсов. Кроме того, необходим выбор оптимальных значений токов нагрузки для обеспечения длительной стойкости вольфрамовых электродов и качественной очистки поверхности алюминия. Поэтому исследование различий теплопередачи и ее эффективности в дуге переменной полярности важны для выбора оптимальных характеристик теплопередачи и обеспечения стабильности процесса сварки.

В работе [2] эффективный КПД дуги *VP-GTAW* при действии дуги на сплавы алюминия исследовался калориметрическим методом. При диаметре электрода 2 мм зависимость от длительности обратной полярности имеет минимум $\eta=0,52$. При диаметрах 3 и 4 мм для тока 250 А наблюдалось только снижение η . Интересное явление было обнаружено при увеличении длительности E_P выше 6,25 мс, что приводило к оплавлению остро заточенного электрода. Эффективный КПД при этом резко снижался с 0,58 до 0,52. При постоянном значении времени E_P эффективный КПД снижался с увеличением тока дуги. Следует отметить, что данные по КПД дуги сложно использовать в инженерной практике, так как необходима и информация о напряжении дуги.

В [3] численное моделирование дуги *VP-GTAW* использовалось для оценки эффективности проплавления алюминиевого сплава *AA1060*. Толщина пластин составляла 4 мм, скорость сварки 2,5 мм/с. Средний ток дуги за период не изменялся при изменении тока импульсов прямой (E_N) и обратной (E_P) полярности и отношения α . Для расчета эффективной мощности использовали эффективный КПД обеих дуг $\eta_{EN}=\eta_{EP}=0,72$, что не вполне корректно, так как по данным ряда работ КПД дуги обратной полярности примерно $\eta_{EP}\approx 0,5$. Фиксировались средние значения токов и напряжений дуг в импульсах. Полученные эффективные мощности импульсов использовали при численном моделировании размеров сварочной ванны. Сходимость расчетных и опытных

размеров шва в работе [3] хорошая, однако на фотографии лицевой стороны шва при $\alpha=30\%$ видно существенное уменьшение ширины шва по его длине.

В обзоре [4] приведены данные из 27 работ по калориметрированию дуг с неплавящимся электродом с 1955 по 2011 гг. Из них к алюминиевой детали относятся данные только трех работ. КПД для полярности *EN* определен в диапазоне 0,76-0,89, то есть несколько выше, чем для сталей. КПД полярности *EP* существенно меньше: $\eta = 0,52-0,63$. Для дуги переменного тока $\eta = 0,65-0,83$, что намного выше, чем было получено в первых исследованиях. Данные по эффективности полярности *EP* алюминии в работе [4] отсутствуют.

Вольфрамовый электрод сильно нагревается в стадии *EP*, поэтому трудно измерить тепловые характеристики именно этой стадии. Следовательно, необходимо измерение и расчет тепловых характеристик одной фазы в течение всего периода. В работе [5] была применена методика проточного калориметрирования медного анода при регулировании длительности и токов обеих полярностей. В результате решения систем уравнений были получены значения эффективных мощностей и эффективных КПД от токов импульсов.

Целью данной работы было на основании подхода, примененного в работе [5] при действии сжатой дуги *VP-PAW* на медную деталь, разработать методику дифференцирования удельной эффективной мощности полярностей свободной дуги при действии на алюминиевую деталь.

Сущность методики исследований заключалась в калориметрировании алюминиевых образцов при различных длительностях полярности *EP*. Методика калориметрирования отличалась от методики, изложенной в работе [6] тем, что учитывались потери энергии образцами во время наплавки и переносе образца в калориметр, а также потери калориметром на теплоотдачу во время перемешивания воды. Для определения коэффициентов поверхностной теплоотдачи от пластины и калориметра предварительно были выполнены специальные эксперименты. Суммарно обе поправки не превышали 1,5% от эффективной энергии наплавки.

Для наплавки использовался источник питания *BRIMA TIG 200P AC/DC*. В качестве заготовки использовались пластины из сплава АМц толщиной 4 мм размерами 100x50x4 мм. Для наплавки неподвижной дугой использовалась сварочная горелка с диаметром электрода 3 мм марки *WT-20*. Торцевой электрод оставался плоским. В качестве защитного газа служил аргон марки А. Вылет вольфрамового электрода из цанги составлял 15 мм, из сопла 6 мм. Расстояние от торца электрода до пластины устанавливалось 1,9 мм. Расход аргона во всех опытах был постоянным 8 л/мин и измерялся ротаметром. Диаметр выходного сечения сопла горелки составлял 12 мм.

Время наплавки и переноса образца и время перемешивания фиксировались посредством видеосъемки со скоростью 120 кадров в секунду. Токи импульсов обеих полярностей от источника питания в наших опытах были одинаковыми. Время наплавки составляло около 15 секунд и точно определялось по данным видеофиксации. В одной серии опытов при токе дуги 98 А использовали три значения баланса полярностей. На каждом балансе

повторяли три опыта. Затем рассчитывали удельную эффективную мощность на 1 А тока q_1 и среднее алгебраическое отклонение (САО) q_1 по данным трех опытов от среднего значения [7].

Для двух серий опытов на разных балансах можно записать следующую систему уравнений для полных удельных эффективных мощностей

$$q_{11} = q_{1EN}\Omega_1 + q_{1EP}(1-\Omega_1), \quad (1)$$

$$q_{12} = q_{1EN}\Omega_2 + q_{1EP}(1-\Omega_2), \quad (2)$$

где q_{1EN} и q_{1EP} – соответственно удельная эффективная мощность дуги в процессе действия импульсов прямой и обратной полярности, Вт/А, Ω_1 , Ω_2 – относительная длительность в периоде импульсов прямой полярности в первой и второй серии опытов.

Таким образом, для серии из трех балансов полярностей можно составить три пары уравнений, подобных (1) и (2) получить по ним значения q_{1EN} , q_{1EP} и усреднить их. Разброс полученных данных будет свидетельствовать об адекватности их результатов (табл.1).

Таблица 1

Значения удельной эффективности дуги при различной относительной длительности EN

№ серии	Ω EN, %	q_1 , Вт/А	САО, %
1	90	6,33	0,9
2	75	7,12	4,3
3	60	7,96	2,3

Среднее значение САО для трех серий опытов составляет 2,5%, в то время как относительный размах значений q_1 составляет $\pm 11,4\%$. Это показывает, что точность калориметрирования достаточна для дифференциации удельных эффективных мощностей полярностей. Для повышения точности определения зависимостей q_{EN} и q_{EP} от баланса полярностей значения q_1 из табл.1 аппроксимировали линейной функцией по методу наименьших квадратов с помощью стандартной компьютерной программы [8]. В результате получили формулу для q_1 в Вт/А:

$$q_1 = 5,79 + 5,43\Omega. \quad (3)$$

САО расчетных значений q_1 по формуле (3) по отношению к табличным, всего 0,23%.

Для расчета значений q_{EN} и q_{EP} с помощью уравнений (1) и (2) использовали расчетные значения по формуле (3). Результаты расчета сведены в табл.2.

Таблица 2

Расчетные значения удельных эффективных мощностей полярностей

Система для серии	1-2	2-3	1-3	Среднее значение	CAO, %
EN , Вт/А	5,78	5,9	5,78	5,82	0,91
EP , Вт/А	13,61	11,03	11,21	11,95	9,23

Получили, что CAO удельной эффективности прямой полярности почти в 10 раз меньше, чем обратной полярности. Это позволяет в опытах по определению влияния баланса полярностей определять вклад прямой полярности расчетным путем. Среднее значение удельной эффективной мощности обратной полярности почти в 2 раза выше. Это согласуется с данными работы [6], в которой получено, что скорость расплавления алюминиевой электродной проволоки в 2,2 раза больше на прямой полярности, чем на обратной. В удельную эффективную мощность полярностей существенный вклад вносит мощность от потока плазмообразующего аргона. Поэтому важной является оценка мощности плазменных потоков, выполненная для дуги обратной полярности в работе [9] на основе изучения эффективной мощности при наплавке плавящимся электродом.

Методику, учитывающую высокую точность определения q_{EN} дополнительно проверяли в другой серии экспериментов, когда время горения дуги составляло около 10 секунд, а ток дуги 74 А. Снижение тока дуги позволило увеличить длительность импульсов с преобладанием обратной полярности. Расчеты показали высокую сходимость значения $q_{EP}=11,26$ Вт/А для балансов 75/25% и 60/40 %, но для 90/10% методика дает существенно завышенные результаты. Это объясняется малым вкладом мощности обратной полярности при малой ее длительности, что сказывается на точности определения удельной эффективной мощности обратной полярности. Поэтому для данных трех серий экспериментов из табл. 1 целесообразно исключить системы уравнений серий 1-3, 1-3 и ориентироваться на решение системы серий 2-3. В результате можно рекомендовать значения удельных эффективных мощностей $q_{EN}=5,9$ Вт/А и $q_{EP}=11,0$ Вт/А.

При выполнении экспериментов на токе 74 А при переходе на режим $EN/EP=10/90$ % вольфрамовый электрод оплавился и его торец принял форму полусферы. В следующем опыте электрод оплавился еще больше, его длина уменьшилась, а удельная эффективная мощность снизилась с 10,5 Вт/А до 9,25 Вт/А. Подобное явление описано в работе [2] при использовании остро заточенного электрода диаметром 3 мм. На токе 180 А оплавление произошло при длительности импульса $t_{EP}=6,25$ с. При частоте импульсов 50 Гц это дает значение среднего тока полярности EP $I_{EP}=56$ А. В нашем случае среднее значение тока $I_{EP}=67$ А. При среднем токе 44,4 А электрод в наших опытах еще сохранял плоскую форму. Полученные значения среднего тока, при котором

оплавляется электрод могут быть использованы для проверки математической модели распространения тепла в неплавящемся электроде.

Выводы

1. Разработанная методика разделения удельных эффективных мощностей полярностей дуги VP-GTAW при равных импульсах тока посредством калориметрирования полной эффективной мощности обеспечивает точность аналогичную точности измерения полной электрической мощности дуги, а именно $\pm 2\%$.

2. Использование методики на токе около 100 А показало, что удельная эффективная мощность у алюминиевого анода составляет 5,9 Вт/А, у катода 11,0 Вт/А. Это объясняет повышенную проплавленную способность дуг обратной полярности при сварке плавящимся электродом и согласуется с высокой производительностью расплавления алюминиевой электродной проволоки в дуге прямой полярности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гринюк А. А., Коржик В. Е., Шевченко Е. Н. и др. Основные тенденции развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов // Автоматическая сварка. –2015. – № 11. – С. 39 – 50.
2. Савинов А. В., Лапин И. Е., Лысак В. И. Дуговая сварка неплавящимся электродом. М.: Машиностроение, 2011. – 477 с.
3. H.Jeong, K.Park, S. Bajek, J.Cho. Thermal efficiency decision of variable polarity aluminum arc welding through molten pool analysis / International Journal of Heat and Mass Transfer 138 (2019) 729– 737.
4. Stenbacka N. Review of Arc Efficiency for Tungsten Arc Welding. IIW Commission IV-XII-SG212 Intermediate Meeting BAM, Berlin, Germany 18-20 April, 2012. Doc. XII-2070-12/212-1229-12.
5. F. Jiang, Ch. Li, Sh. Chen. Experimental investigation on heat transfer of different phase in variable polarity plasma arc welding. Welding in the World (2019) 63: p.1153–1162 <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00722-3>
6. Сидоров В.П., Ковтунов А.И., Бочкарев А., Советкин Д.Э. Эффективная мощность сварочной дуги обратной полярности при наплавке алюминия плавящимся электродом / Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2020. № 4 (54) С.34-42. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-4-00-00
7. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М.Высшая школа, 1988. –239 с.
8. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ. М.: Наука, 1987. –240 с.
9. Сидоров В.П., Советкин Д.Э., Борисов Н.А. О плавлении алюминиевого электрода аргоновой дугой прямой полярности / Вектор науки ТГУ. –2019. – № 4(50). – С. 52–57.

ЕЛЬЦОВ В. В.

Eltsov V. V.

VEV@tltso.ru

ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», Тольятти

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ОТ ТРЕХФАЗНОЙ ДУГИ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СВАРИВАЕМЫЙ МЕТАЛЛ

MODELING OF HEAT FLOWS FROM A THREE-PHASE ARC AND THEIR IMPACT ON THE METAL BEING WELDED

Аннотация. Особенность трехфазной дуги вызывает специфическое ее воздействие на основной металл при его расплавлении и последующей кристаллизации. Специфика воздействия заключается в том, что при горении трехфазной дуги в ее факеле четко прослеживается воздействие на металл двух источников тепла – электродинамической составляющей (столб дуги) и газокинетической составляющей (поток нагретых газов). Каждая из этих составляющих оказывает на формирование расплава и последующую кристаллизацию металла особое воздействие, сказывающееся на свойствах сварного соединения. Моделирование теплового воздействия трехфазной дуги на металл определяли, как суперпозицию температурных полей от двух источника тепла – точечного и нормально-распределенного. Механизм формирования расплава (сварочной ванны) и последующей кристаллизации металла в месте окончания сварки рассматривался на модели как изменение плотности и объема жидкого металла при его кристаллизации в момент окончания сварки, в то время, как масса металла оставалась постоянной. Расчет температурных полей в основном металле в момент формирования сварочного кратера и при движении тепловых потоков по поверхности – расчет изотерм сварочной ванны – проводили с помощью программного обеспечения MathCad.

Annotation. The peculiarity of the three-phase arc causes its specific effect on the base metal during its melting and subsequent crystallization. The Gorenje effect is that when a three-phase arc is burned in its flare, the effect of two heat sources on the metal is clearly traced – the electrodynamic component (arc column) and the gas-kinetic component (flow of heated gases). Each of these components has a special effect on the formation of the melt and the subsequent crystallization of the metal, affecting the properties of the welded joint. Modeling of the thermal effect of a three-phase arc on metal was defined as a superposition of temperature fields from two heat sources – a point and a normally distributed one. The mechanism of formation of the melt (welding bath) and subsequent crystallization of the metal at the end of welding was considered in the model as a change in the density and volume of the liquid metal during its crystallization at the end of welding, while the mass of the metal remained constant. The calculation of the temperature fields in the base metal at the time of the formation of the welding crater and during the movement of heat flows on the surface-the calculation of the isotherms of the welding bath-was carried out using the MathCad software.

Ключевые слова: Трехфазная дуга, математическая модель, источник тепла, кристаллизация металла, тепловой поток, температурное поле.

Keywords: Three-phase arc, mathematical model, heat source, metal crystallization, heat flow, temperature field.

Введение

Процессы расплавления металла электрической дугой и последующая кристаллизация металла шва и сварочного кратера существенным образом

зависят от характеристики теплового потока дуги и особенности воздействия ее на расплавляемый металл. Особенно важное значение это имеет при формировании сварочного кратера в месте окончания сварки, поскольку этим определяется качество сварного соединения в целом. Геометрия шва и сварочного кратера определяется многими параметрами, включающими как теплофизические характеристики самого свариваемого материала, так и энергетические показатели, и технологические возможности источника тепла для сварки. Многочисленность факторов, влияющих на форму и размеры сварного шва и кратера, усложняют и удорожают экспериментальные исследования. Математическое моделирование делает этот путь более простым и менее затратным, так как в настоящее время существует мощная компьютерная техника и программное обеспечение с широкими возможностями [1]. Поэтому целью работы является снижение затрат на экспериментальные исследования формирования сварного шва и кратера путем создания математической модели взаимодействия тепловых потоков от дуги и расплавляемого металла при сварке трехфазной дугой.

Основная часть

Практический интерес для моделирования тепловых процессов, с точки зрения сварочных работ, представляет определение температурного поля в «полубесконечном теле» или «плоском слое», т.к. при наплавке слоя на поверхность изделия температура по его толщине будет величиной переменной, а размеры свариваемых изделий, как правило, таковы, что необходимо учитывать отражение теплового потока от его нижней границы.

Для расчета температурных полей при сварке, тепловое действие электрической дуги моделируется, как правило, источником тепла, интенсивность которого распределена по нормально-круговому закону с различной степенью сосредоточенности, вплоть до точечного [2]. Результаты расчетов по этой модели нашли применение в практике, но большая погрешность в зоне высоких температур заставила искать новые варианты решения этой задачи. Исследования структуры трехфазной электрической дуги, ранее проведенные нами [3,4] показали, что сварочная дуга представляет собой симбиоз двух источников тепла с различной степенью концентрации тепловой энергии – распределенного по нормально-круговому закону (газокинетическая составляющая) и сосредоточенного источника тепла (электродинамическая составляющая). Причем установлено, что эти источники тепла могут действовать как соосно друг другу, так и на некотором расстоянии (рис.1) [5,6].

Схематизация теплового действия дуги посредством одного нормально-кругового источника не соответствует механизму передачи энергии двумя потоками различной сосредоточенности, за исключением случая, когда интенсивность более мощного потока тепла распределена по нормально-круговому закону, а центры областей, через которые потоки вводятся в свариваемый металл, совпадают или близки друг к другу. Такая ситуация наблюдается в случае, когда скорость сварки равна нулю, что характерно для заварки трехфазной дугой точечных дефектов на изделии.

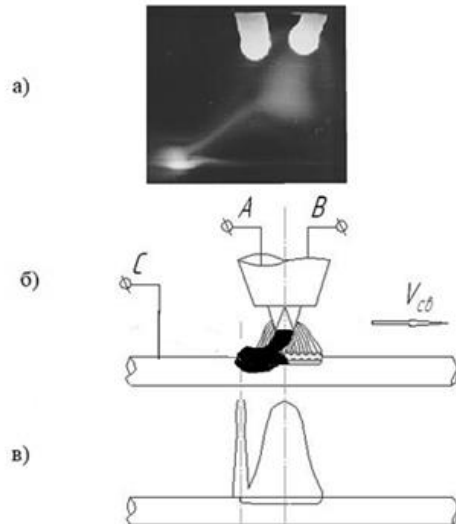


Рис. 1. Воздействие на металл тепловых потоков трехфазной дуги:
 а) реальный процесс; б) схема процесса; в) математическая модель тепловых потоков

Математическая модель воздействия трехфазной сварочной дуги, предложенная авторами [7,8] представляет собой следующее выражение:

$$T^1(x, y, z) = \frac{Q}{\sqrt{\pi^3} * \lambda} * \left\{ \begin{array}{l} \mu * \sqrt{K_{T1}} * e^{-\frac{\sqrt{\left[X - \frac{v}{4aK_{T1}} \right]}}{2a}} * I(m_1, n_1, p_1) + \\ + (1 - \mu) * \sqrt{K_{T2}} * \frac{1}{2} * e^{-\frac{\sqrt{\left[X + L - \frac{v}{4aK_{T2}} \right]}}{2a}} * [I(m_2, n_2, p_2) + I(m_3, n_3, p_3)] \end{array} \right\} \quad (1)$$

где: Q – общая мощность дуги;

λ, a – теплофизические коэффициенты свариваемого материала;

μ – доля мощности, вводимая в изделие нагретым газом (распределенным источником тепла Q_g);

K_{T1}, K_{T2} – коэффициенты сосредоточенности тепловых потоков от газа и столба дуги соответственно;

V – Скорость сварки;

L – Расстояние между осями источников тепла Q_g и Q_m .

Если учесть, что в момент окончания сварки и заварки кратера, сварочная горелка останавливается, то есть, скорость сварки становится равная нулю, и источники тепла действуют на одной оси (рис.2), то выражение (1) приобретает следующий вид

$$T(x, y, z) = \frac{Q}{\sqrt{\pi^3} \lambda} \mu \sqrt{K_{T1}} I(m_1, n_1, p_1) + (1 - \mu) \sqrt{K_{T2}} \frac{1}{2} [I(m_2, n_2, p_2) + I(m_3, n_3, p_3)] \quad (2)$$

Используя это выражение можно рассчитать и построить линии изотерм плавления во время кристаллизации металла в конце сварки при различных условиях подвода и отвода тепла и получить расчетную конфигурацию сварочного кратера. Варьируя мощностью дуги во время заварки кратера, можно получать его требуемые геометрические размеры и форму.

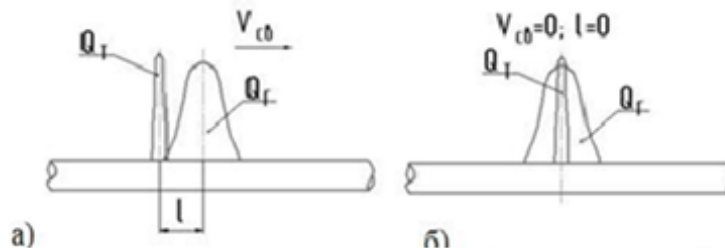


Рис. 2. Модель воздействия источников тепла на поверхность металла:
а) при движении; б) в момент остановки

Расчет геометрической формы усадочного кратера можно вести основываясь на разности плотности твердого и жидкого металла, и на разности их объемов, то есть при кристаллизации металла сварочной ванны меняется ее плотность и объем, при этом масса металла остается неизменной (рис. 3).

При формировании сварочного кратера его глубина h_k и радиус r_k будут функциями времени: $h_k(t) = fh_k(t)$; $r_k(t) = fr_k(t)$.

Эти функции определяют параметрически форму кратера по его радиусу, как $r_k = f(h_k)$. Найдём эти функции.

1. Допустим, что в начальный момент времени (t_0)

$$fh_k(t_0) = h_{k0}; fr_k(t_0) = r_{k0}, \text{ причём, } r_{k0} = fiz(h_{k0}, t_0),$$

где $r = fiz(z, t)$ – радиус изотермы плавления.

2. Дадим времени (t) некоторое приращение (Δt), тогда h_k и r_k также получат приращения Δh_k , Δr_k . Найдём изменение приращения глубины кратера Δh_k . Для этого обозначим $v_l(t_0, h_{k0})$ – объём расплава в сварочном кратере в момент времени (t_0). Это есть объём, ограниченный изотермической поверхностью плавления $r = fiz(z, t_0)$ при $z > h_0$.

Масса расплава при этом определяется как:

$$m_l(t_0) = v_l(t_0, h_{k0})\rho_l, \quad (3)$$

где ρ_l – плотность расплавленного металла.

Через время (Δt) часть расплава застынет, его масса будет определяться как:

$$\Delta m_s(\Delta t) = \rho_s [v_l(t_0, h_{k0}) - v_l(t_0 + \Delta t, h_{k0})], \quad (4)$$

а масса оставшегося жидкого металла определяется выражением

$$m_l(t + \Delta t) = \square v_l(t_0 + \Delta t, h_{k0} + \Delta h_k)\rho_l. \quad (5)$$

Так как общая масса металла не меняется со временем, то

$$m_l(t_0) = \Delta m_s(\Delta t) + m_l(t_0 + \Delta t) \quad (6)$$

или

$$v_l(t_0, h_{k0}) \rho_l = \rho_s [v_l(t_0, h_{k0}) - v_l(t_0 + \Delta t, h_{k0})] + v_l(t_0 + \Delta t, h_{k0} + \Delta h_k) \rho_l. \quad (7)$$

3. Допустим, что

$$v_l(t_0 + \Delta t, h_{k0} + \Delta h_k) = v_l(t_0 + \Delta t, h_{k0}) - \pi \Delta h_k (\text{fiz}(h_{k0}, t_0 + \Delta t))^2 \quad (8)$$

тогда,

$$v_l(t_0, h_{k0}) = v_l(t_0 + \Delta t, h_{k0}) - \pi \Delta h_k (\text{fiz}(h_{k0}, t_0 + \Delta t))^2 + \rho_s / \rho_l [v_l(t_0, h_{k0}) - v_l(t_0 + \Delta t, h_{k0})] \quad (9)$$

Из этого выражения можно определить приращение глубины кратера:

$$\Delta h_k = (\rho_s / \rho_l - 1) \{v_l(t_0, h_{k0}) - v_l(t_0 + \Delta t, h_{k0})\} / \pi (\text{fiz}(h_{k0}, t_0 + \Delta t))^2 \quad (10)$$

Используя это равенство, можно найти зависимость $h_k = fh_k(t)$, задавшись определённым шагом Δt_i и определяя приращения Δh_{ki} на этом временном шаге. Суммируя Δh_{ki} для $i = 1, 2, \dots, n$, получим значение h_{kn} к моменту $t_n = \sum \Delta t_i$. Зная h_{kn} , найдём радиус кратера на глубине h_{kn} . Он определяется как:

$$r_{kn} = \text{fiz}(h_{kn}, t_n) \quad (11)$$

4. Чтобы определить на каком шаге кратер сформируется полностью, необходимо на каждом временном шаге определять объём уже сформировавшейся части кратера:

$$v_{kn} = \sum \Delta v_{ki}, \quad (12)$$

где Δv_{ki} - приращение объёма кратера на i -ом шаге итерации

$$\Delta v_{ki} = \pi [r(h_{k(i-1)}, t_i)]^2 \Delta h_{ki}. \quad (13)$$

Наибольший объём кратера v_{kmax} таков, что

$$\rho_l v_l(0, 0) = \rho_s [v_l(0, 0) - v_{kmax}]. \quad (14)$$

откуда

$$v_{kmax} = v_l(0, 0) (1 - \rho_l / \rho_s). \quad (15)$$

Если на шаге $i = n+1$ $v_{ki} > v_{kmax}$, то процесс вычислений заканчивается.

5. Определение величины объёма расплава $v_l(t, h)$, ограниченного симметричной относительно оси OZ изотермой плавления с радиусом $r = \text{fiz}(z, t)$ и плоскостью $z = h$ в момент времени (t).

Если в момент времени (t) изотерма плавления описывается уравнением $r = fiz(z, t)$, а z_{max} – является максимальной глубиной изотермы, то z_{max} – есть корень уравнения $0 = fiz(z, t)$.

В этом случае объем расплава определится интегральным выражением

$$V_l(t, h, z_{max}) = \pi \int_h^{z_{max}} fiz(z, t)^2 dz \quad (16)$$

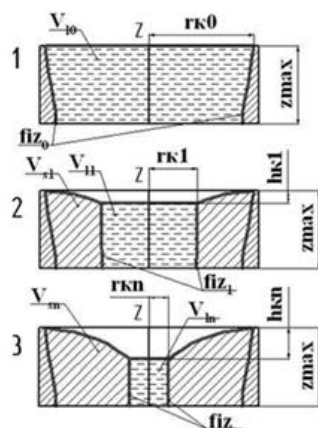


Рис. 3. Кинетика затвердевания металла в соответствии с математической моделью

Рассмотрим вариант модели воздействия тепловых потоков трехфазной дуги при ее движении по поверхности металла с определенной скоростью, т.е. когда оси тепловых потоков разнесены относительно друг друга на некоторое расстояние (рис. 2, а). Дополнительным условием в этой схеме является подача присадочной проволоки в зону сварки, непосредственно на участок воздействия электродинамической составляющей (столба дуги). На модели этот тепловой поток отличается от газокинетической составляющей большей степенью сосредоточенности. В реальности – это реализация процесса наплавки поверхности проволокой, электрически подключенной к средней фазе трехфазного источника питания, который ранее был представлен в работе [9] (рис. 4).

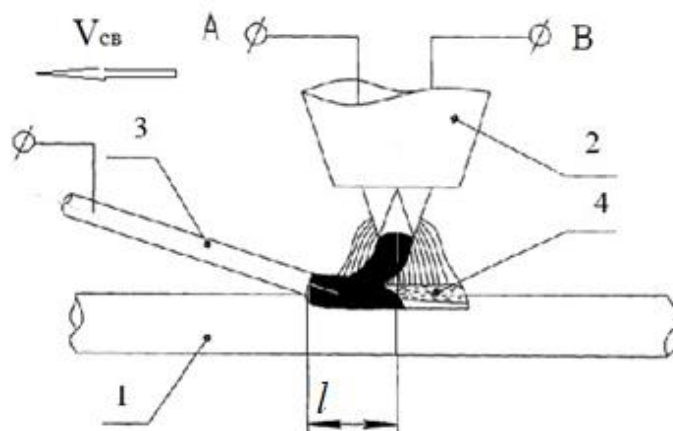


Рис. 4. Схема сварки с подачей проволоки:

1 – изделие; 2 – горелка; 3 – проволока, подключенная к фазе ИП;
4 – сварочная ванна; l – расстояние между тепловыми потоками

Поступающий в изделие тепловой поток создается двумя источниками тепла: первый мощностью (q_1) распределен на поверхности равномерно в пределах круга радиуса (r_1) (моделирует тепло, передаваемое расплавленной присадкой); второй – мощностью (q_2) распределен на поверхности по нормальному закону (моделирует тепло, передаваемое струей нагретого дугой газа, текущей от электродов к изделию). Источники тепла движутся со скоростью (v) друг за другом на расстоянии (l) между их осями.

Используя математическую модель тепловых потоков трехфазной дуги, представленную выше, и дифференциальные уравнения для расчета распределения температуры в полубесконечном теле от действия движущихся по поверхности с одинаковой скоростью (v) равномерно распределенного и нормально-распределенного источников тепла, находящихся на расстоянии (l) друг от друга, определяли с помощью *MathCad* характер изотерм сварочной ванны в плоскостях X, Y, Z . Координатная плоскость XOY лежит на поверхности тела, ось OX направлена по скорости ($V_{св}$), ось OZ направлена в тело, начало координат лежит на оси второго источника. Варьируемой величиной при расчетах изотерм являлось расстояние между источниками тепла.

Результаты расчетов (рис.5) показали, что расстояние между источниками тепла существенным образом влияют на форму и размеры изотермы плавления сварочной ванны. При увеличении расстояния между источниками тепла в диапазоне от нуля (рис. 5а) до 8 мм (рис. 5б) снизилась на 60% глубина сварочной ванны (на рисунке – пунктирная линия в плоскости Z), уменьшилась на 70% ширина ванны (на рисунке линия точек в плоскости Y). В тоже время длина сварочной ванны увеличилась на 65% (с 9мм до 14мм). Полученный с помощью моделирования эффект можно использовать в реальном процессе сварки, например, для снижения глубины проплавления основного материала при наплавочных работах.

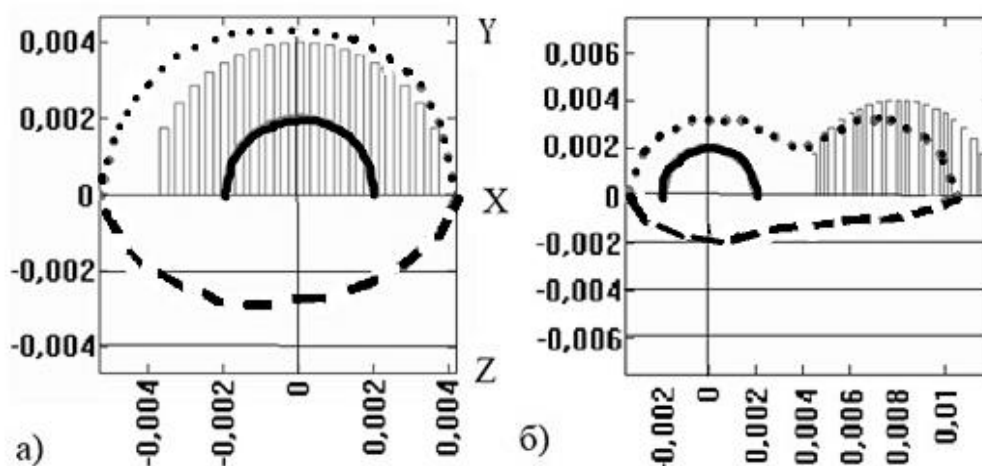


Рис. 5. Изотермы сварочной ванны (X, Y, Z) при сварке с подключенной проволокой к фазе ИП:

- а) при расстоянии между тепловыми потоками = 0;
- б) расстояние между тепловыми потоками = 8 мм

Выводы

Моделирование процесса горения трехфазной дуги двумя тепловыми источниками тепла различной степени сосредоточенности и действующих на некотором расстоянии друг от друга позволяет уточнить характер распределения температуры в сварочной ванне и расширить реальные технологические возможности процесса за счет введения дополнительного параметра режима сварки – расстояние между источниками тепла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березовский Б.М. Математическое моделирование и информационные технологии, модели сварочной ванны и формирование шва. [Текст] /Б.М. Березовский//Том1.- Издательство ЮУрГУ. – Челябинск – 2003 – С. 585.
2. Дилигенский Н.В. Математические модели подвижных тепловых полей концентрированных источников энергии. [Текст] /Н.В. Дилигенский, В.З.Чертков, Ю.В. Михеев//В кн – Управление распределенными системами с подвижным воздействием. – М: Наука – 1979 – С.187.
3. Столбов В.И. Форма свободной поверхности сварочной ванны. [Текст] /В.И. Столбов, С.С. Верховская// Сварочное производство. – 1980 - №7. – С. 13 – 17.
4. Столбов В.И. Сварочная ванна: Монография / [Текст]. В.И. Столбов//Тольятти: ТГУ – 2007 – С. 147.
5. Ельцов В.В. Особенности воздействия сварочной дуги на поверхность металла при наплавке изделий из алюминиевых сплавов. [Текст] /В.В. Ельцов//Техника машиностроения. – 2002 - №2. – С. 65 – 69.
6. Ельцов В.В. Исследование температурного поля при наплавке алюминиевых деталей с дифференцированным тепловложением. [Текст] /В.В. Ельцов, М.В. Тугай, А.С. Кашкаров //Машиностроитель. – 2002 - №5–С25 – 27.
7. Столбов В.И. Модель нагрева поверхности сварочной дугой. [Текст] /В.И. Столбов, В.П. Потехин// Автоматическая сварка - 1979- №12 - С.20-22.
8. Ельцов В.В. Исследование формирования усадочного кратера в наплавленном слое при восстановлении поверхностей деталей из алюминиевых сплавов [Текст]. / В.В. Ельцов, О.А. Дитенков, А.Ю. Лейпинен // Материалы международной конференции «Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций» Санкт-Петербург, 2008. – С. 123 – 126.
9. Пат. №2367546 Российская Федерация, В23К9/167, Способ наплавки трехфазной дугой [Текст] / Ельцов В.В., Зеленков А.С., Потехин В.П.; заявитель и патентообладатель Тольяттинский гос университет; опубл.. БИ №26 от 20.09.2009.

Ковтунов А. И.

Kovtunov A. I.

akovtunov@rambler.ru

Плахотный Д. И.

Plahotniy D. I.

baza@ssdc-delta.ru

Вершинин Л. В.

Vershinin L. V.

verschinintop1@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», Тольятти

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ДВУХДУГОВОЙ НАПЛАВКИ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ НАПЛАВЛЕННЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ НИКЕЛЬ-АЛЮМИНИЙ

STUDY OF THE EFFECT OF TWO-IN-A-HEAD SURFACING REGIMES ON GEOMETRIC PARAMETERS AND THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE SMELTED ALLOYS OF THE NICKEL-ALUMINIUM SYSTEM

Аннотация. В работе представлены результаты исследования процессов наплавки сплавов на основе алюминидов никеля на сталь с применением электродных проволок из никеля НП2 и алюминия Sv-AK12. Установлено влияние режимов наплавки на геометрические параметры наплавленного валика и его химический состав. Проведенные исследования показали влияние режимов наплавки на твердость, относительную износостойкость и жаростойкость наплавленных сплавов.

Abstract. The paper presents the results of a study of the processes of surfacing alloys based on nickel aluminides on steel using electrode wires made of nickel NP2 and aluminum Sv-AK12. The influence of surfacing modes on the geometric parameters of the deposited roller and its chemical composition is established. The conducted studies have shown the influence of surfacing modes on the hardness, relative wear resistance and heat resistance of the deposited alloys.

Ключевые слова: двухдуговая наплавка, интерметаллиды, алюминиды никеля, электродная проволока, никель, алюминий.

Keywords: double-arc surfacing, intermetallides, nickel aluminides, electrode wire, nickel, aluminum.

Введение

Интерметаллидные сплавы системы никель-алюминий на основе фаз Ni_3Al и $NiAl$ отличаются высокой жаростойкостью [1,2] и могут успешно применяться для формирования наплавленных слоев на изделиях из сталей, работающих при повышенных температурах [3,4].

Для формирования интерметаллидных покрытий было предложено использовать двухдуговую наплавку с применением никелевой и алюминиевой электродных проволок. Процесс двухдуговой наплавки обладает широкими

технологическими возможностями по формированию износостойких, жаростойких покрытий на основе алюминидов [5,6].

Методика проведения исследования

Наплавку образцов на основе алюминидов никеля выполняли на пластины толщиной 10мм из стали 20 с никелевой проволокой НП2 диаметром 1,2мм и алюминиевой проволокой Св-АК12 диаметром 1,2мм. Сварка выполнялась в аргоне с расходом 10-15 л/мин.

Для плавки использовали автоматическую установку с двумя сварочными источниками тока Kemract 323R фирмы КЕМРР1 с подающими механизмами и двумя сварочными горелками ММТ 42С (рис. 1).

При наплавке (рис. 1), осуществляется механизированная подача двух проволок с приложением к ним различных электрических потенциалов при объединении двух независимых дуг в объединенный дуговой процесс и формирование единой сварочной ванны. Регулирование расходом проволок при наплавки можно управлять содержанием основных компонентов наплавленных сплавов в широких пределах [5,6].

При наплавке напряжение на никелевой проволоке составляло 25,5В, а на алюминиевой 15,5В, расход аргона на каждой горелке - 10-12 л/мин, скорость подачи никелевой проволоки составляла 3; 3,5; 4 м/мин, а алюминиевой 4м/мин (таблица 1). Скорость наплавки составляла 0,15; 0,3; 0,45 м/мин.

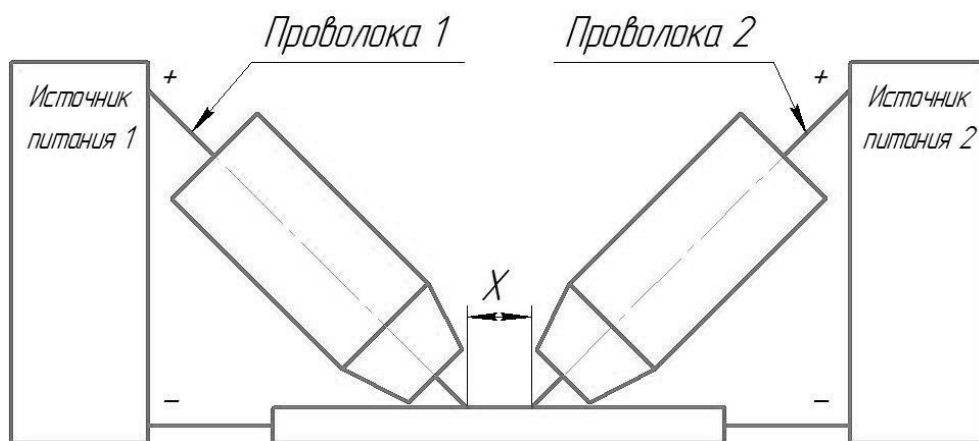


Рис. 1. Схема процесса двухдуговой наплавки

Качество наплавленного покрытия определяли путем визуально-измерительного контроля. Склонность к образованию трещин оценивалась по наличию трещин на участке наплавки длиной 100 мм.

Исследование структуры и химического состава наплавленного металла проводились методами растровой электронной микроскопии на комплексе сканирующего электронного микроскопа LEO 1455 VP (ZEISS, Германия) с блоками рентгеновского энергетического спектрометра INCA Energy-300 и рентгеновского волнового спектрометра INCA Wave-500.

Твердость наплавленных покрытий определялась по методу Роквелла с применением стационарного универсального твердомера HBRV-187.5.

Износостойкость образцов при абразивном изнашивании определялась при трении о закрепленные абразивные частицы и оценивалась относительной износостойкостью:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_{\text{э}}}{\Delta l_{\text{м}}}, \quad (1)$$

где $\Delta l_{\text{э}}$ — линейный износ эталона;

$\Delta l_{\text{м}}$ — линейный износ испытуемого материала.

В качестве эталона использовали сталь 45.

Жаростойкость покрытия определялась по относительному изменению массы образцов с одинаковой площадью поверхности, выдерживаемых в печи сопротивления при 800°C. Массу образцов измеряли через каждые 100 часов выдержки после предварительного удаления продуктов высокотемпературной коррозии с поверхности образцов.

Таблица 1

Режимы двухдуговой плавки и химический состав сплавов системы титан-никель

$U_{\text{Ni}}, \text{В}$	$U_{\text{Al}}, \text{В}$	Скорость подачи никелевой проволоки, м/мин	Скорость подачи алюминиевой проволоки, м/мин	Скорость наплавки, м/мин	Отношение скорости подачи никелевой проволоки к скорости подачи алюминиевой проволоки
25,5	15,5	3	4	0,3	0,75
25,5	15,5	3,5	4	0,3	0,875
25,5	15,5	4	4	0,3	1
25,5	15,5	3	4	0,45	0,75
25,5	15,5	3,5	4	0,45	0,875
25,5	15,5	4	4	0,45	1
25,5	15,5	3	4	0,15	0,75
25,5	15,5	3,5	4	0,15	0,875
25,5	15,5	4	4	0,15	1

Результаты исследований и обсуждение результатов исследований

Проведенные опытные наплавки с применением алюминиевой и никелевой электродных проволок показали, что при выбранных режимах формируются наплавленные валики со стабильными геометрическими параметрами. Значения глубины проплавления, ширины валика и величины усиления зависят от режимов наплавки. Величина глубины проплавления изменяется в пределах 0,9-3,4мм (рис. 1). Увеличение скорости наплавки приводит к снижению глубины проплавления вследствие уменьшения значений погонной энергии, а увеличение скорости подачи никелевой проволоки

увеличивает глубину проплавления. Ширина наплавленного валика также уменьшается с увеличением скорости наплавки и увеличивается с повышением скорости подачи никелевой электродной проволоки (рис. 1). Ширина валика изменяется в пределах 9,7-18,5мм. Величина усиления изменяется в зависимости от режимов в пределах 2-4,7мм (рис. 1).

Химический состав наплавленного металла определялся скоростью наплавки и скоростью подачи никелевой проволоки. Среднее содержание алюминия уменьшалось с 24% до 19% при увеличении скорости подачи присадочной проволоки, а содержание никеля увеличивалось с 38% до 42%.

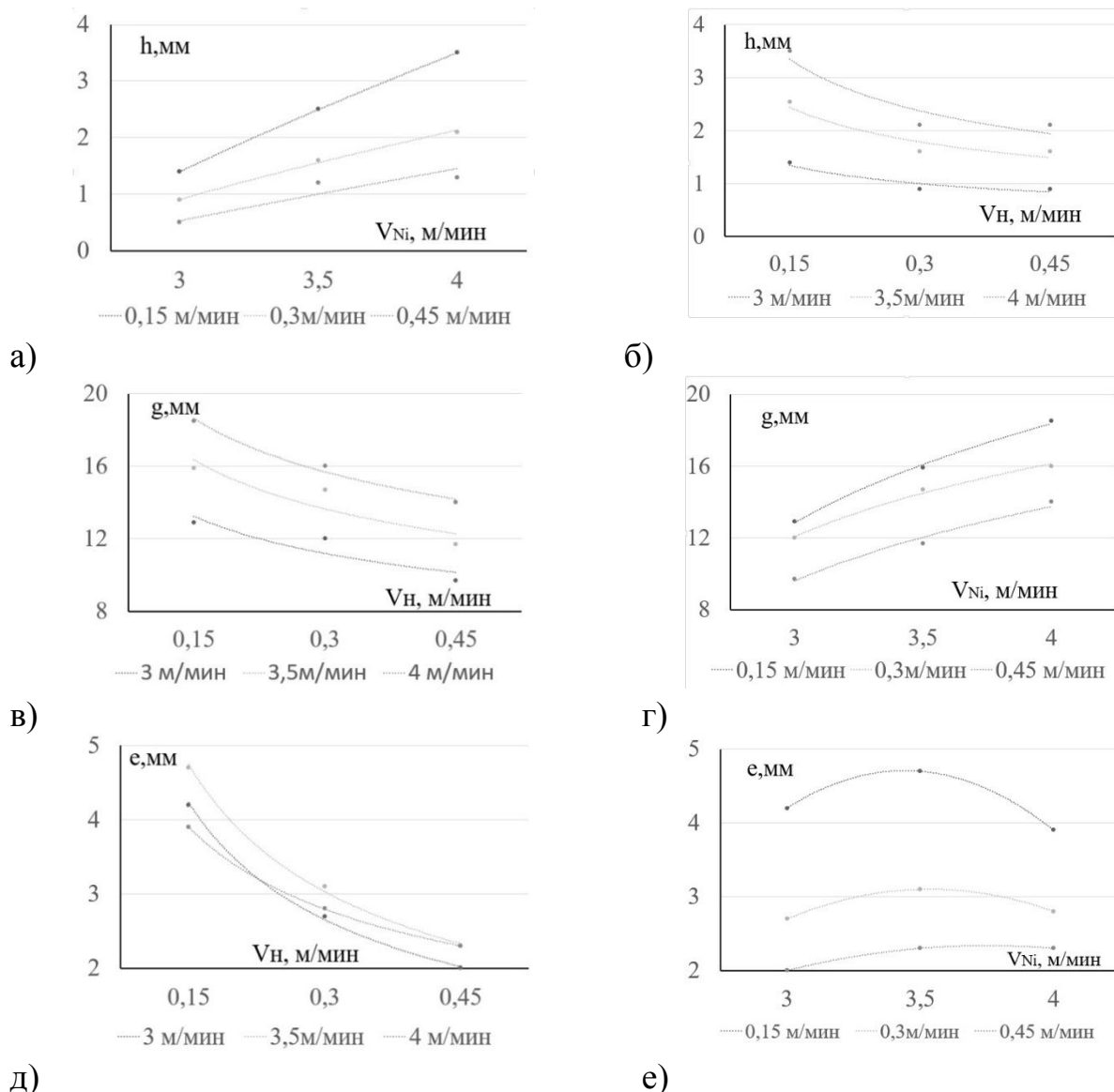


Рис. 2. Зависимость глубины проплавления (а, б), ширины (в, г) и высоты наплавленного валика (д, е) от скорости наплавки и скорости подачи никелевой электродной проволоки

Твердость наплавленного металла изменяется в пределах 43-51HRC (рис. 2). С увеличением скорости подачи никелевой проволоки твердость увеличивается. Максимальная твердость наблюдалась при скорости наплавке

0,15 м/мин.

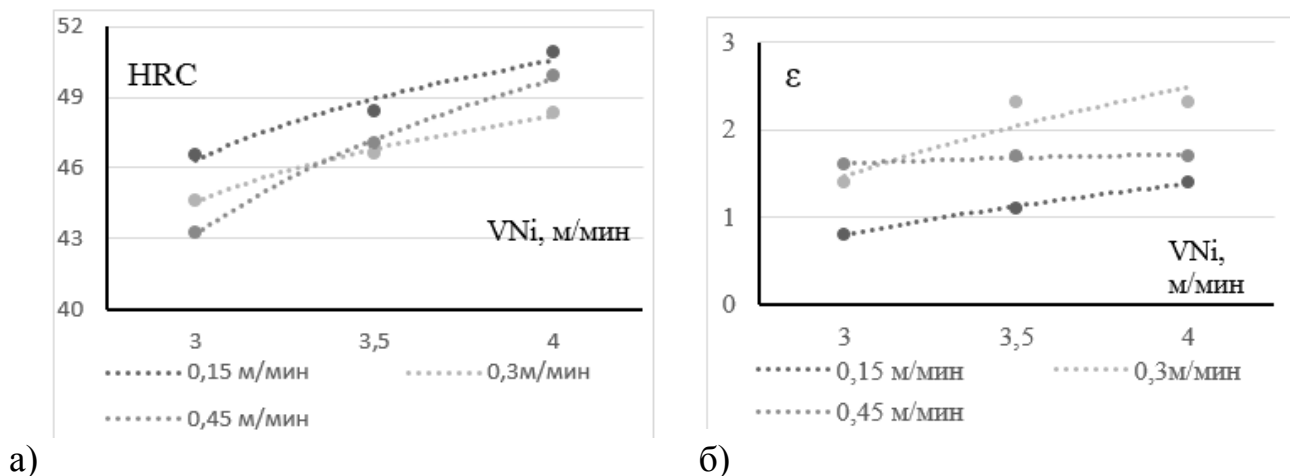


Рис. 3. Зависимость твердости (а) и относительной износостойкости (б) наплавленных сплавов от скорости подачи никелевой проволоки

Величина относительной износостойкости изменялась в пределах 0,8-2,3. Увеличение скорости подачи присадочной алюминиевой проволоки способствовало повышению относительной износостойкости. Максимальные значения относительной износостойкости зафиксированы при скорости наплавки 0,3 м/мин.

Потеря массы образцов при испытании жаростойкости в течение 600 часов при температуре 800°C составляла не более 4,8% (рис. 3). При скорости наплавки 0,15 м/мин потеря массы составляла 0,1- 0,5%.

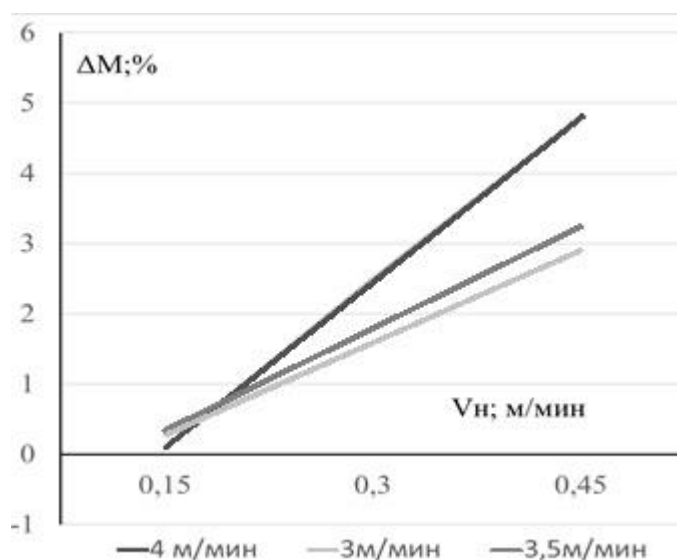


Рис. 4. Изменения массы образцов при испытаниях на жаростойкость в течение 600 часов при 800°C

Выводы

1. Проведенные исследования процессов двухдуговой наплавки алюминидов никеля на сталь с применением электродных проволок НП2 и Св-АК12 показали, что при выбранных режимах формируются валики со стабильными геометрическими параметрами. Установлено влияние режимов наплавки на ширину наплавленного валика, глубину проплавления и высоту усиления и его химический состав.

2. Твердость наплавленного металла в зависимости от режимов наплавки изменяется в пределах 43-51HRC. Относительная износостойкость составляет 0,8-2,3. Изменение массы образцов при испытаниях жаростойкости наплавленных сплавов составляет 0,1-4,5% при выдержке в течение 600 часов при температуре 800°C.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колачев, Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. – М.: МИСИС, 1999. – 416 с.
2. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / под ред. Симса Ч. Т., Столоффа Н. С., Хагеля У. К. пер. с англ. В 2-х книгах. Кн. 1. / Под ред. Шалина Р. Е. – М: Металлургия, 1995. – 384 с.
3. Соколов, Г. Н. Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей: монография / Г. Н. Соколов, В. И. Лысак / ВолгГТУ. – Волгоград, 2005. – 284 с.
4. Зорин И. В. Разработка композиционных электродных материалов и технологии наплавки термо- и износостойкого металла на основе алюминидов никеля Ni₃Al: дис. док. техн. наук. — Волгоград, 2020. — 291 с.
5. Ковтунов А.И. Особенности применения сплавов системы железо-алюминий для наплавки покрытий литейных форм/ А.И. Ковтунов, Д.И.Плахотный, А.Г.Бочкарев// Сварочное производство. - 2017. № 1.- С. 31-35.
6. Ковтунов А.И. Технология наплавки постоянных кокильных покрытий/ А.И. Ковтунов, Д.И.Плахотный, А.Г.Бочкарев// Литейщик России. - 2015. № 4.- С. 26-28.

Сидоров В.П.

Sidorov V.P.

Vladimir.sidorov.2012@list.ru

ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», Тольятти

О РЕЖИМАХ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

COVERED ELECTRODE MANUAL METAL ARC WELDING CONDITIONS

***Аннотация.** Проанализирован применяемый подход к назначению режимов сварки покрытым электродом (РД). Ток сварки допускается в диапазоне, рекомендованным производителем, а его конкретное значение выбирается сварщиком. Это приводит к неоднородности характеристик сварных соединений, а выбранный сварщиком ток и скорость сварки зачастую не являются оптимальными. Рекомендованное сечение сварочного валика нельзя проконтролировать. Предложено существенно снизить диапазон допустимых токов и регламентировать скорость сварки путем расчета необходимой для нее длины валика. При этом используется методика учета зависимости коэффициента наплавки от тока дуги. Для уменьшения неоднородности химического состава шва рекомендуется вести сварку на минимальных токах рекомендуемого диапазона.*

***Abstract.** This paper analyses the approach applied to the purpose of covered electrode welding conditions. The welding current is allowed within a range recommended by the manufacturer, and its specific value is selected by a welder. This leads to inhomogeneity of welding joint characteristics, and welding current and speed selected by a welder are often not optimal. The recommended welding bead cross-section cannot be checked. In this regard, it is provided to significantly reduce the range of permissible currents and regulate welding speed by calculating the required beam length. For this purpose, the method of hardfacing ratio vs the arc current dependence method shall be used. To reduce inhomogeneity of weld chemical composition, it is recommended to weld with a minimum current of the recommended range.*

***Ключевые слова:** покрытый электрод, режим сварки, сечение валика, скорость сварки, длина валика, коэффициент наплавки, вылет электрода, сварной шов, химический состав*

***Keywords:** covered electrode, welding condition, bead cross-section, welding speed, bead length, hardfacing ratio, electrode stick-out, weld, chemical composition.*

Ручной дуговой сваркой покрытыми электродами (РД) по-прежнему выполняется большой объем работ, как при ремонте стальных конструкций, так и при их производстве. Значительная часть сварочных работ этим способом выполняется на ответственных конструкциях.

При РД наибольшую сложность представляет сварка на весу корневого слоя шва стыковых соединений с разделкой кромок. Считается, что ручная сварка имеет то преимущество, что сварщик за счет техники сварки может нивелировать влияние неточностей параметров разделки свариваемых кромок и их сборки. Зачастую это приводит и к тому, что на производстве точности подготовки кромок и сборки уделяется недостаточно внимания.

Несмотря на важность, такого понятия как режим сварки, его определения довольно размыты и редко встречается в литературе. В учебнике

для подготовки сварщиков [1] приводится такое определение: «режимом сварки называют основные показатели, определяющие процесс сварки, которые устанавливаются на основе исходных данных и должны выполняться для получения сварного соединения требуемого качества, размеров и формы, установленных проектом».

К режимам РД авторы [1] отнесли марку и диаметр электрода, силу и род сварочного тока, полярность при постоянном токе, число слоев в шве. В работе [2] предлагается параметры процесса сварки разделять на условия и режимы сварки, что важно с позиции установления требований к точности размеров шва и возможностей автоматического регулирования процесса. Под условиями понимаются параметры, которые устанавливаются до сварки и которые нельзя изменить в ее процессе. Соответственно, к режимам относятся параметры, которые могут изменяться в процессе сварки и быть измерены. В соответствии с этим определением к режимам РД следует отнести только ток сварки и напряжение дуги (длина дуги).

В расчетной методике выбора режимов РД [3] диаметр электрода назначают в зависимости от толщины свариваемого металла или порядкового номера свариваемого слоя, а поперечное сечение наплавляемого валика F_H рекомендуют из заданного диапазона в зависимости от выбранного диаметра электрода по формуле

$$F_H = (C_1 \dots C_2) d_{\text{э}}, \quad (1)$$

где C_1 и C_2 – коэффициенты, зависящие от вида выполняемого валика, мм.

Для сварки корневого слоя шва значения рекомендованы в диапазоне $C_1 \dots C_2 = 6 \dots 8$, для сварки заполняющих слоев $C_1 \dots C_2 = 8 \dots 12$. При этом диаметр электрода при сварке заполняющих слоев существенно возрастает.

В соответствии с рекомендуемыми коэффициентами получаем, что допустимое относительное отклонение для F_H составляет для корневого валика $\Delta F_H \pm 14,3\%$, для заполняющих слоев $\Delta F_H \pm 20\%$ от средних значений.

На производстве сложилась практика, когда сила сварочного тока в технологических картах задается в пределах, рекомендуемых производителем электродов в их паспорте [4]. В табл.1 представлены данные одного из производителей [5] для распространенных марок электродов.

Таблица 1

Рекомендуемые токи для электродов диаметром 3 мм

Марка	Диапазон токов	$\Delta I / (2I_c)$, %	α_H , г/(А·ч)
УОНИ 13/45	70-100	17,6	9,5
МР-3	80-110	15,8	8,5-9,0
ТМУ-21У	60-120	33,3	8,5

Как следует из табл.1 допускаемые отклонения тока от среднего значения I_C диапазона достигают $\Delta I/(2I_C) = 33\%$. Диапазон изменения коэффициента наплавки α_H приведен в [5] только для марки МР-3, но его относительное отклонение от среднего значения $\Delta\alpha_H \pm 3\%$ невелико и может быть применено ко всем маркам, если известен усредненный коэффициент наплавки. Изменение α_H от тока следует отнести к влиянию нагрева вылета электрода за счет тепла Джоуля-Ленца. В работе [6] установлено, что скорость расплавления электрода возрастает от времени горения дуги по линейному закону. Коэффициент пропорциональности увеличивается с ростом тока. Поэтому минимальное значение α_H следует использовать для минимального тока диапазона, а максимальное для максимального. При минимальном токе практически будет отсутствовать химическая неоднородность по длине шва, так как не будут изменяться проплавление основного металла и скорость плавления электрода.

Скорость сварки плавящимся электродом определяется по формуле

$$V_C = \frac{I\alpha_H}{\rho F_H}, \quad (2)$$

где α_H – коэффициент наплавки электродов, г/(А·с), ρ – плотность металла стержня, г/см³.

В соответствии с рекомендациями по назначению сечения валика (1) и тока сварки по табличным значениям скорость сварки может иметь относительное отклонение от среднего значения порядка $\pm 30\%$, а погонного тока, который является аналогом погонной энергии сварки, такое же, как отклонение сечения валика. Такой широкий диапазон возможных скоростей сварки и погонных токов может приводить к существенной неоднородности структуры и свойств сварных соединений при РД, так как конкретную силу тока выбирает сварщик.

Изучение работы группы сварщиков при тренировке сварки корня шва на трубах показало, что даже при назначении конкретного тока время выполнения валика сильно отличается.

К этому следует добавить, что практически данная методика не находит практического применения, так как в технологических картах сечение валика в явном виде не указывается. На практике это приводит к значительным отличиям в скорости сварки при выполнении сварочных валиков, выполняемых разными сварщиками в зависимости от назначаемой силы тока. Выбранный ток и скорость могут быть оптимальным с позиции удобства и техники сварки конкретного сварщика, но не оптимальным по термическим циклам зоны сварки и провару основного металла и, следовательно, свойствам сварного соединения.

Даже если бы диапазон рекомендуемых площадей валиков указывался в технологии, проконтролировать соблюдение скорости сварки через площадь поперечного сечения валика сложно. В работе [3] указано, что этого можно

достичь контролем размеров сварного шва. Наиболее удобно это сделать посредством задания длины сварочного валика [7].

Выразив скорость сварки через длину валика и время сварки валика одним электродом $t_{\text{Э}}$, получим формулу для длины сварочного валика одного электрода

$$L_B = \frac{I \cdot \alpha_H \cdot t_{\text{Э}}}{\rho F_H} \quad (3)$$

Т. е., чтобы соблюдать рекомендованное сечение валика и скорость сварки необходимо формировать валики заданной длины, что намного проще поддается контролю. Числитель (3) представляет собой массу наплавленного с электрода металла. Если нормировать длину расплавленной части покрытия $L_{\text{П}}$ (например, $L_{\text{П}} = 0,95L_{\text{Э}}$), то при известном коэффициенте α_H легко определить L_B и соответствующую ей скорость сварки. Методика, каким образом с высокой точностью рассчитывать коэффициент наплавки, была приведена выше. Также следует отметить, что изучение данных группы сварщиков по длине огарков электродов показывает, что разброс длин огарков достаточно велик. На производстве этому вопросу не уделяется должного внимания. Нормирование длины расплавленной части покрытия могло бы способствовать экономии электродов, трудоемкости и электроэнергии и охране окружающей среды.

В табл. 2 приведены данные расчета глубины проплавления стальной пластины толщиной 6 мм при использовании схемы нормально-кругового источника тепла на поверхности пластины [8]. На двух режимах погонная энергия сварки оставалась постоянной, при изменении скорости сварки в 2 раза.

Таблица 2

Влияние скорости сварки на провар пластины

$q_{\text{и}}$, Вт	$V_{\text{с}}$, см/с	$D_{\text{н}}$, см	E , см	H , см
800	0,2	0,85	0,6	0,19
1600	0,4	1,2	0,79	0,34

Примечание: $D_{\text{н}}$ – диаметр пятна нагрева.

Ширина шва E и провар H с увеличением скорости сварки значительно возрастают. Это объясняется тем, что при повышении скорости сварки улучшается использование мощности источника тепла, снижаются потери мощности на теплоотвод в основной металл, а больше мощности расходуется на проплавление основного металла. Эти результаты качественно относятся и к случаю сварки корневого слоя шва соединения с разделкой кромок. Аналогично существенно отличаются и термические циклы сварки. Поэтому критерий постоянства погонной энергии не является характеристикой стабильности режима сварки.

Наиболее целесообразным следует считать подход, при котором при разработке технологии сварки для ответственных сварных соединений устанавливаются оптимальные токи и скорости сварки и на основе этих данных фиксируются с определенными допусками в технологических картах сварки. При этом скорость сварки задается длиной валика, свариваемого одним электродом и допуском на эту длину. В качестве справочной информации может дополнительно указываться скорость сварки. Вполне достижимым представляется снижение допустимых отклонений режимов РД в 2 раза. В этом случае швы сварщиками выполняются при близких режимах сварки, что приведет к более стабильным характеристикам свойств сварных соединений. Это приблизит стабильность свойств швов РД к способам автоматической сварки. При обучении сварщиков с учетом предлагаемого варианта назначения режимов они также должны быть ориентированы на обеспечение требуемой скорости сварки, задаваемой током и длиной сварочного валика.

Выводы

1. Для оптимизации свойств сварных соединений, выполненных РД и повышения их стабильности следует рассмотреть возможность задания в технологии номинальных тока сварки и длины валика с назначением их допустимых отклонений. Регламентация длины валика при РД эквивалентна заданию скорости при автоматической сварке. Длину валика смогут контролировать как сварщики, так и контролеры сварочных работ.

2. Для расчета длины валика (скорости сварки) можно использовать имеющиеся данные по коэффициенту наплавки электродов с учетом влияния на него тока дуги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малышев Б.Д., Мельник В.И., Гетия И.Г. Ручная дуговая сварка. М.: Высшая школа, 1991. 320 с.
2. Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В. Методика определения требований к точности параметров сварки // Сварка и диагностика. 2014. № 3. С. 10 –13.
3. Акулов А.И., Бельчук Г.Д., Демянцевич В.П. Технология и оборудование сварки плавлением. М.: Машиностроение, 1977. 432 с.
4. Типовые карты технологического процесса РД. [Электронный ресурс]. URL: <http://nanolife.info/teoriya-svarki/142-primer-tehnologicheskaya-karta-svarki-processa.html> (дата обращения 18.03.2021).
5. Сварочные материалы. Каталог. Мценск: Межгосметиз, 2004. 233 с.
6. Сидоров В.П., Федякин В.А., Кутулбаев Р.В. Исследование скорости расплавления покрытых электродов // Сварочное производство. 2016. № 1. С.3 –5.
7. Сидоров В.П. Способ ручной дуговой сварки штучными покрытыми электродами / Патент РФ № 2661526. Оpubл. 17.07.2018. Бюл. № 20.
8. Кархин В.А. Тепловые процессы при сварке. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2015. 572 с.

Ковтунов А. И.
Kovtunov A. I.
akovtunov@rambler.ru

Ельцов В. В.
Eltsov V. V.
vev@tltsu.ru

Бочкарев А. Г.
Bochkarev A. G.
a.bochkarev93@mail.ru

ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», Тольятти

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ НАПЛАВЛЕННЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ ТИТАН- АЛЮМИНИЙ ЛЕГИРОВАННЫХ ЦИРКОНИЕМ

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND OPERATIONAL PROPERTIES OF DEPOSITED COATINGS OF THE TITANIUM-ALUMINUM SYSTEM DOPED WITH ZIRCONIUM

«Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90097»

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния режимов аргонодуговой наплавки с применением присадочной проволоки SvA5, SvAK12 и дополнительной циркониевой присадочной проволокой на химический состав наплавленного металла. Установлено влияние легирования цирконием, цирконием и кремнием наплавленных сплавов системы титан-алюминий на твердость, износостойкость и жаростойкость наплавленного металла.

Abstract. The results of the study of the effect of argon-arc surfacing modes with the use of the filler wire SvA5, SvAK12 and an additional zirconium filler wire on the chemical composition of the deposited metal are presented. The influence of doping with zirconium, zirconium and silicon of the deposited alloys of the titanium-aluminum system on the hardness, wear resistance and heat resistance of the deposited metal is established.

Ключевые слова: наплавка, сплавы титан-алюминий, цирконий, присадочная проволока, износостойкость, жаростойкость, химический состав.

Keywords: surfacing, titanium-aluminum alloys, zirconium, filler wire, wear resistance, heat resistance, chemical composition.

Введение

Интерметаллидные сплавы титан-алюминий находят применение в промышленности благодаря высокой жаростойкости и жаропрочности, низкой плотности, высокой температуры плавления, высокому отношению прочности к плотности, возрастанию предела текучести с повышением температуры, высокой износостойкости [1,2].

Алюминиды титана могут применяться и в качестве жаростойких покрытий и наплавленных слоев на титан и титановые сплавы [3,4]. Для повышения механических, технологических и эксплуатационных свойств

алюминиды титана дополнительно легируются, в том числе и при наплавке. В качестве легирующих элементов для интерметаллидных сплавов системы титан-алюминий успешно применяется ниобий, который повышает механические свойства и жаростойкость сплавов на основе алюминидов: Ti_3Al и $TiAl$ [1,5,6].

Целью работы являлось определить влияние циркония на свойства наплавленных сплавов системы титан-алюминий при аргонодуговой наплавке с применением присадочных проволок СвА5, СвАК12.

Методика проведения исследований:

Аргонодуговую наплавку неплавящимся электродом сплавов системы титан-алюминий легированных ниобием проводили на специальной автоматической двухкоординатной установке с использованием сварочной горелки AUT-TIG 400W фирмы Abicor-Bensel и универсального сварочного источника Migatronik BDH 550 [4,6].

Для наплавки использовали образцы из титана марки ВТ1-0 размером $150 \times 120 \times 10$ мм, алюминиевую присадочную проволоку СвА5 диаметром 1,2 мм и алюминиево-кремниевую присадочные проволоку СвАК12 с таким же диаметром. Для легирования цирконием использовали циркониевую проволоку диаметром 1,0 мм, которую укладывали в специальные пазы предварительно изготовленные в титановых образцах. Содержание циркония регулировалось изменением количества проволок, укладываемых в пазы.

Скорость подачи присадочной проволоки изменялась в пределах $V_{п/п} = 1-4$ м/мин при скорости наплавки $V_n = 0,15$ м/мин и силе тока $I_n = 270$ А. Варьирование скоростью подачи присадочной проволоки позволяло получать наплавленный металл с различным содержанием алюминия.

Твердость наплавленных покрытий определялась по методу Роквелла с применением стационарного универсального твердомера HBRV-187.5.

Износостойкость образцов при абразивном изнашивании определялась при трении о закрепленные абразивные частицы и оценивалась относительной износостойкостью:

$$\varepsilon = \Delta l_{\varepsilon} / \Delta l_m, \quad (1)$$

где: Δl_{ε} — линейный износ эталона; Δl_m — линейный износ испытуемого материала. В качестве эталона использовали сталь 45.

Жаростойкость покрытия определялась по относительному изменению массы образцов с одинаковой площадью поверхности, выдерживаемых в печи сопротивления при 800°C . Температуру испытаний, выбрали исходя из максимальной температуры эксплуатации алюминидов титана [1]. Массу образцов измеряли через каждые 100 часов выдержки после предварительного удаления продуктов высокотемпературной коррозии с поверхности образцов.

Исследование химического состава наплавленного металла проводились методами растровой электронной микроскопии на комплексе сканирующего электронного микроскопа LEO 1455 VP (ZEISS, Германия) с блоками

рентгеновского энергетического спектрометра INCA Energy-300 и рентгеновского волнового спектрометра INCA Wave-500.

Результаты исследований:

Проведенные исследования процессов наплавки показали, что при выбранных режимах формируются валики со стабильными геометрическими параметрами. Химический состав наплавленного металла определяется режимами наплавки и природой используемых присадочных материалов (рис. 1).

Содержание алюминия в наплавленном металле зависит от скорости подачи присадочной проволоки и изменяется в пределах 10-40% (рис. 1). Содержание циркония составляло 2,5-4% (по массе) при использовании одной проволоки, 4,5-6,5% при использовании двух проволок циркония, а при укладке в 3 ряда - до 8,5% (рис. 26). Содержание кремния при наплавке с использованием проволоки СвАК12 не превышало 4%.

С увеличением скорости подачи присадочной проволоки увеличивалось содержание алюминия в наплавленном металле, в связи с увеличением массового расхода проволоки и уменьшения доли проплавленного металла по отношению к наплавленному (рис. 1). Содержание циркония увеличивается в связи со снижением содержания титана вследствие уменьшения доли проплавленного металла. Укладка проволоки в 2 и 3 ряда пропорционально увеличивало содержание циркония в наплавленном металле.

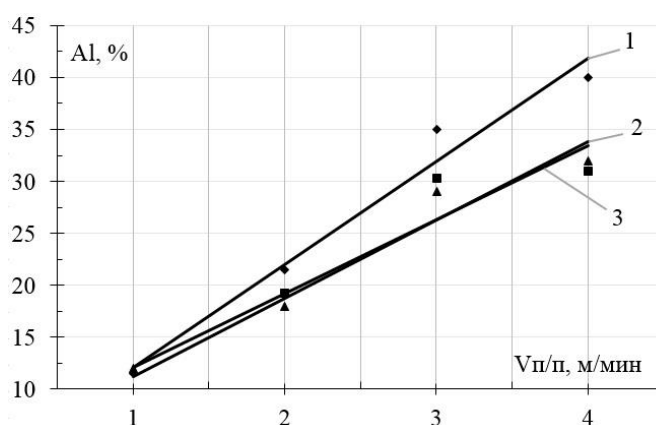


Рис. 1. Зависимость содержания алюминия от скорости подачи присадочной проволоки:

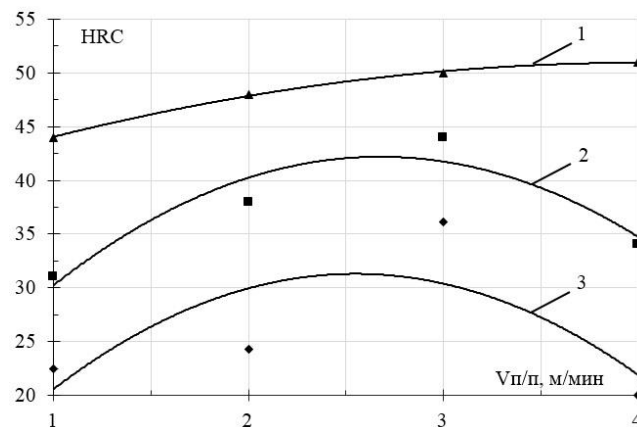
1 – наплавка проволокой СвА5; 2 – наплавка проволокой СвА5 (с укладкой проволоки циркония в один паз); 3 – наплавка проволокой СвА5 (с укладкой проволоки циркония в два паза)

Твердость наплавленного металла определяется режимами наплавки и химическим составом наплавленного металла (рис. 2). Увеличение скорости подачи присадочной проволоки до 2-3 м/мин приводит к повышению твердости наплавленного металла. Максимальная твердость при наплавке с использованием присадочной проволоки СвА5 составляла порядка 36 НРС при содержании алюминия 35%.

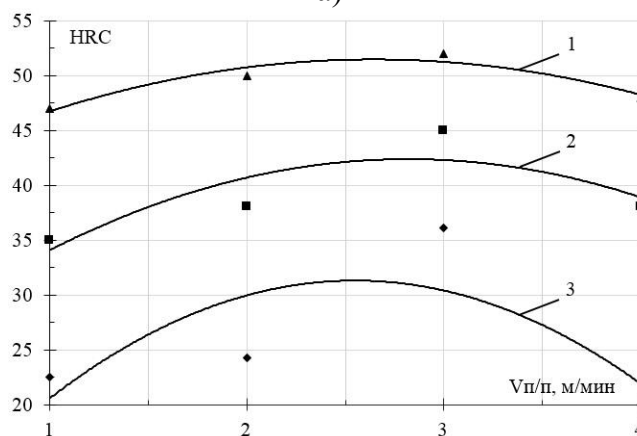
При легировании цирконием максимальная твердость составляла 44 HRC при скорости подачи присадочной проволоки 3 м/мин и содержании алюминия около 30%, а циркония 4% (рис. 2а). При укладке циркония в 2 ряда максимальная твердость составила 45 HRC при той же скорости подачи проволоки и содержании циркония около 7% (рис. 2б).

Использование присадочной проволоки СвАК12 повысило твердость наплавленного металла на 7-15HRC (рис. 2б).

При скорости подачи присадочной проволоки более 3 м/мин твердость наплавленного металла снижалась, что вероятно связано с появлением в структуре наплавленного металла хрупкой интерметаллидной фазы γ (TiAl) [7].



а)

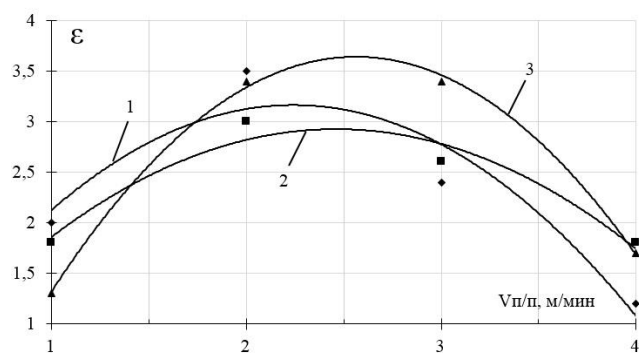


б)

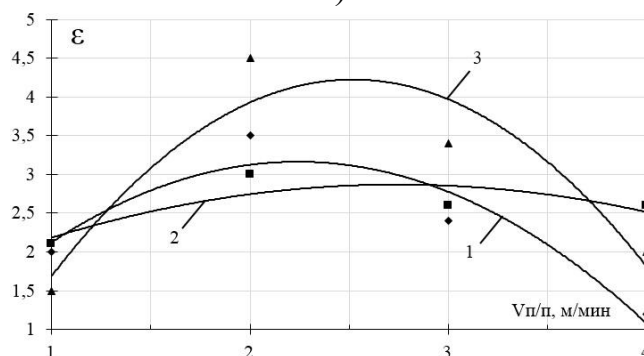
Рис. 2. Зависимость твердости наплавленного металла от скорости подачи присадочной проволоки при укладке циркониевой проволоки в один (а) и два ряда (б):

1 – наплавка проволокой СвАК12 с укладкой циркониевой проволоки; 2 – наплавка проволокой СвА5 с укладкой циркониевой проволоки; 3 – наплавка проволокой СвА5

Максимальная износостойкость наплавленного металла так же наблюдалась при скоростях подачи присадочной проволоки 2-3 м/мин. Совместное легирование цирконием и кремнием при этом обеспечивают повышение относительной износостойкости (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Зависимость износостойкости наплавленного металла от скорости подачи присадочной проволоки при укладке циркониевой проволоки в один (а) и два ряда (б):

1 – наплавка проволокой SvA5;

2 – наплавка проволокой SvA5 с укладкой циркониевой проволоки;

3 – SvAK12 с укладкой циркониевой проволоки

Исследования жаростойкости при выдержке в течение 300 часов при температуре 800°C показали, что потеря массы образца, наплавленного с применением проволоки SvA5 составляла более 8% при скорости подачи 1 м/мин и содержании алюминия около 10% (рис. 4). При содержании алюминия около 37% (скорость подачи 4 м/мин) потеря массы составляла 3%.

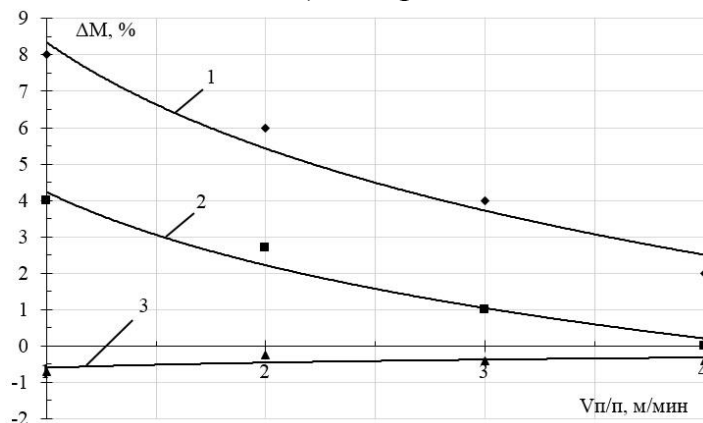


Рис. 4. Зависимость жаростойкости наплавленного металла от скорости подачи присадочной проволоки при укладке циркониевой проволоки в два ряда: 1 – наплавка проволокой SvA5; 2 – наплавка проволокой SvA5 с укладкой циркониевой проволоки; 3 – SvAK12 с укладкой циркониевой проволоки

Легирование цирконием заметно повышает жаростойкость наплавленного металла, потеря образцов уменьшалась практически в 2 раза.

Применение присадочной проволоки СВАК12 совместно с легированием цирконием так же повышает жаростойкость наплавленного металла. При этом из-за более прочной связи окисленного слоя с основным металлом и невозможностью его удаления наблюдалось увеличение массы образцов, но не более чем 0,5%.

Выводы

1. Легирование цирконием при аргонодуговой наплавке сплавов системы титан-алюминий обеспечивает формирование наплавленного валика со стабильными геометрическими параметрами, химический и фазовый состав металла определяется расходом присадочной проволоки и ее составом.

2. Легирование цирконием повышает твердость и жаростойкость наплавленных алюминидов титана. Применение алюминиево-кремниевой присадочной проволоки с одновременным легированием цирконием обеспечивает повышение механических и эксплуатационных свойств наплавленных сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колачев Б.А., Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. Москва: МИСИС, 2005. 432 с.

2. Nazmy M., Lupine V. Materials for advanced power engineering. Editors: Lecomte-Beckers J., Carton J.M., Schubert E, Ennis P.J. Forschungszentrum Julich GmbH, 2002, v. 21, Part I, p. 43 -56.

3. Сычев А.Е. Особенности взаимодействия интерметаллидов на основе Ti-Al, Ni-Al с металлическими подложками Ti и Ni в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / А.Е. Сычев, С.Г. Вадченко, О.Д. Боярченко, D.Vrel, Н.В. Сачкова // Перспективные материалы. - 2012.- № 2. – С. 35-37.

4. Ковтунов А.И. Влияние режимов наплавки на структуру и свойства покрытий системы титан-алюминий / А.И. Ковтунов, Д.И. Плахотный, А.А. Гушин и др. // Сварка и диагностика. - 2016. - №2. – С – 35-37.

5. Даутов С.С. Дегратация поверхности лопаток авиационных двигателей ГТД из интерметаллидного сплава TNM-B1 и разработка способов их защиты: дис. ... кандидата технических наук 05.07.05 / Даутов Станислав Сагитович. Уфа, 2017. - 135 с.

6. Ковтунов А.И., Аргонодуговая наплавка сплавами на основе системы железо-алюминий. Тольятти: ТГУ, 2014. 140 с.

Паутов А. Н.

Pautov A. N.

njkzytrol@inbox.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ЛИНЕЙНОЙ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ ДЕТАЛЕЙ С ОТЛИЧАЮЩИМСЯ РЕЛЬЕФОМ

NUMERICAL SIMULATION OF RESIDUAL STRESSES THAT OCCUR DURING LINEAR FRICTION WELDING OF PARTS WITH DIFFERENT RELIEF

Аннотация. В работе представлена численная модель для оценки напряженно-деформированного состояния соединений деталей с разным рельефом из титановых сплавов, полученных с применением линейной сварки трением.

Abstract. The paper presents a numerical model for assessing the stress-strain state of joints of parts with different relief from titanium alloys, obtained using linear friction welding.

Ключевые слова: линейная сварка трением, сварка давлением, остаточные напряжения, напряженно-деформированное состояние, численное моделирование, титановые сплавы

Keywords: linear friction welding, pressure welding, residual stresses, stress-strain state, numerical simulation, titanium alloys.

Линейная сварка трением (ЛСТ) относится к способам сварки давлением, при которой нагрев в тонких приповерхностных слоях металла осуществляется за счет работы сил трения, возникающих при линейном возвратно-поступательном перемещении друг относительно друга соединяемых частей свариваемого изделия (рис. 1).

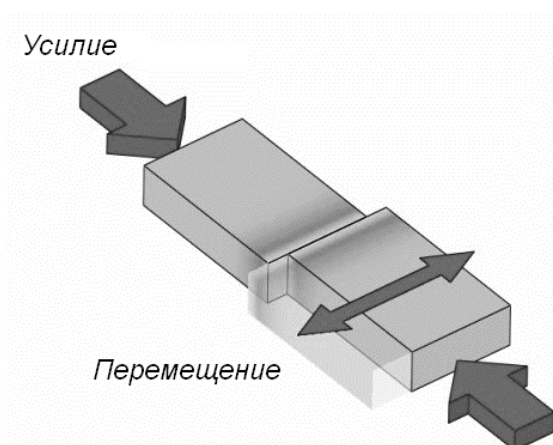


Рис. 1. Схема процесса линейной сварки трением

Материал соединяемых деталей нагревается ниже температуры плавления и деформируется в вязко-пластичном состоянии за счет приложения усилия по

нормали к поверхности свариваемого образца, что приводит к пластической деформации и образованию грата.

Значительное влияние при ЛСТ на точность изготовления и прочность конструкции оказывают остаточные напряжения, возникающие в процессе сварки. Актуальной задачей является выбор методики определения уровня остаточных напряжений. Из всех известных методик наиболее рационально использовать численное моделирование, так как этот метод вкупе с хорошей повторяемостью при ЛСТ позволяет с приемлемой точностью определить уровень остаточных напряжений с минимальным количеством экспериментов.

В зарубежной статье [1] с помощью моделирования процесса ЛСТ определен уровень остаточных напряжений для заготовок в форме 2-х параллелепипедов. В статье [2] также описана методика определения остаточных напряжений при ЛСТ на стадии проковки для образцов с симметричным рельефом. В указанных источниках форма сварного шва близка к плоской.

В данной работе предпринята попытка создания модели, позволяющей оценить влияние параметров режима ЛСТ, механической обработки после сварки и формы рельефа соединяемых деталей на поле остаточных напряжений.

Исследования проводились на сварных образцах (рис.2) с сечением рельефа в месте стыка 13×26 мм и 8×26 мм из сплава Ti6Al4V. Изогнутая в виде желоба форма сварного шва построена на основе результатов металлографических исследований.

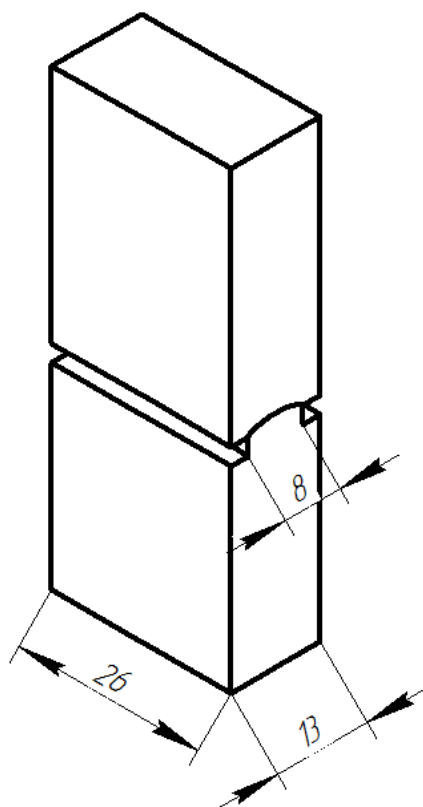


Рис. 2. Сварной образец

Поскольку остаточные напряжения формируются в процессе остывания нагретого при сварке металла, то целесообразно моделировать процесс в четыре стадии (рис. 3): нагрев с приложением сварочных нагрузок и закрепления в технологической оснастке, охлаждение с приложением сварочных нагрузок и закрепления в технологической оснастке, высвобождение образцов из технологической оснастки и удаление части металла образца.

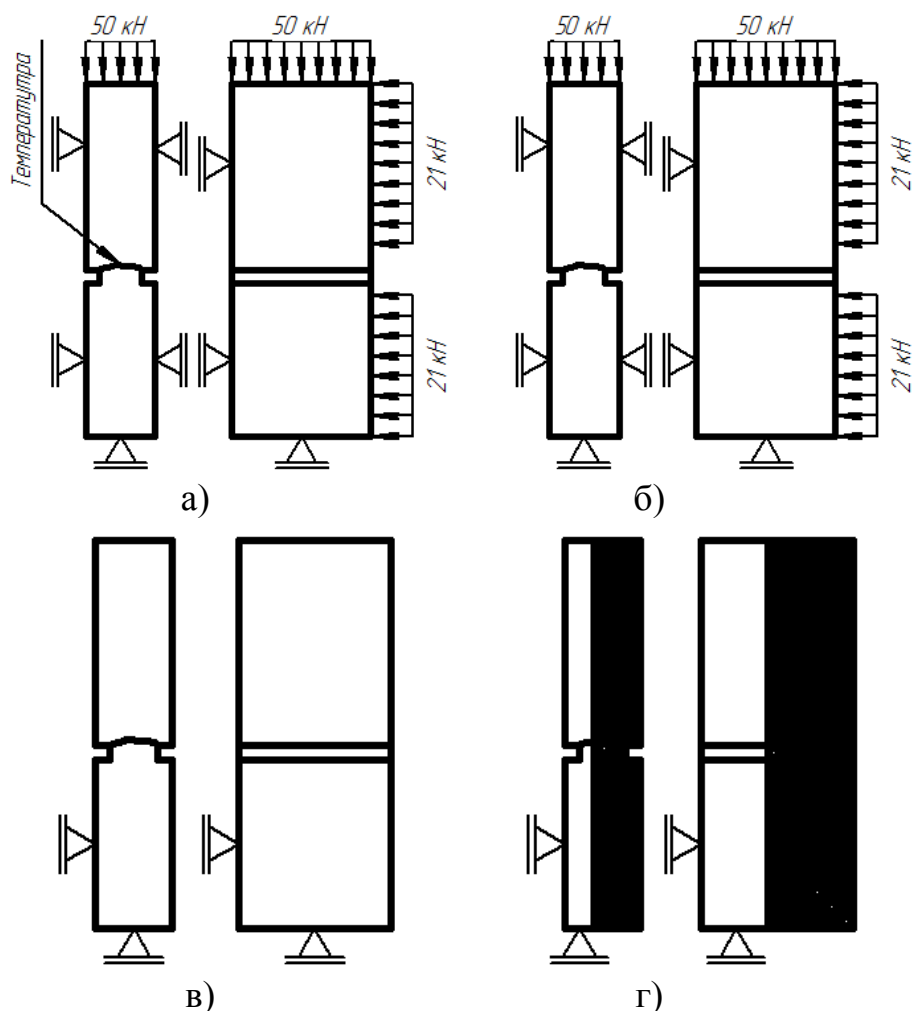


Рис. 3. Стадии процесса моделирования:

а) нагрев, б) охлаждение, в) высвобождение, г) имитация механической обработки

Разработка численной модели осуществлялась с применением пакета *ANSYS Workbench*. Для каждой стадии решались связанные задачи термического и механического анализов. Причем результаты анализа каждой стадии принимались, как предварительная нагрузка для последующих стадий.

Теплофизические свойства сплава Ti6Al4V, используемые для расчетов, получены по методу *OPENCALTHAD*. Коэффициент поверхностной теплоотдачи принимался равным $90 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}^2$. Термические циклы были поучены в результате экспериментальной сварки образцов и задавались как нагрузка на поверхность сварного шва.

Для моделирования остаточных напряжений использовались 8-ми узловые элементы SOLID 186 с конечно-элементной сеткой с размером не более 1,0 мм. На первой стадии контакт между деталями был без проникновения, а на последующих заменен на связанный.

На рис. 4 показано распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в полученном сварном образце в конце каждой стадии процесса моделирования.

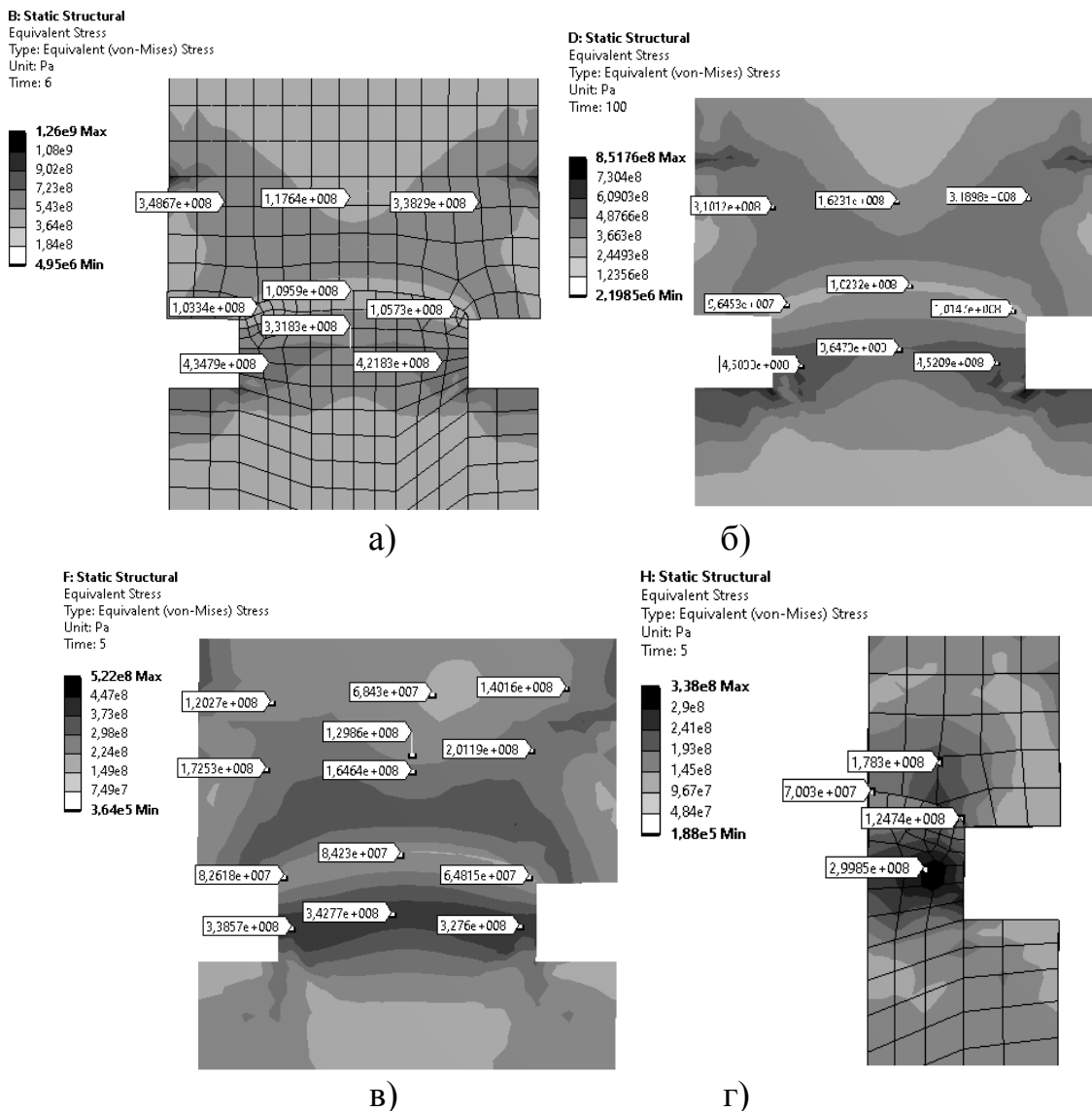


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу:
а) нагрев, б) охлаждение, в) высвобождение г) имитация механической обработки

По результатам моделирования в области сварного шва на первых двух стадиях напряжения изменяются не значительно и составляют порядка 100 МПа в сварном стыке и 300-450 МПа в околосшовной зоне. При снятии сварочных нагрузок и высвобождении образцов из технологической оснастки общий уровень напряжений снижается до 60-80 МПа в сварном стыке и 200-350

МПа в околошовной зоне. В результате имитации механической обработки в сварном стыке по месту реза напряжения изменились не значительно, но в наиболее удаленном от реза участке наблюдается скачок напряжений до 120-130 МПа. В околошовной зоне в месте реза напряжения снижаются, но на участке, смещенном от места реза, наблюдаются напряжения порядка 300 МПа.

Выводы

Разработанная численная модель позволяет качественно спрогнозировать величину остаточных напряжений в области сварного шва деталей с отличающимся рельефом, полученных с помощью линейной сварки трением. Однако, для проведения количественного анализа необходимо уточнить распределение температур и зависимости механических и теплофизических свойств. Требуется провести процедуру верификации модели на основе экспериментального определения уровня остаточных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Magnitude and Origin of Residual Stress in Ti-6Al-4V Linear Friction Welds: An Investigation by Validated Numerical Modeling/ Turner, R; Ward, R M; March, R; Reed, R C. // Metallurgical and Materials Transactions: Process Metallurgy and Materials Processing Science.- 2012, В; New York Vol. 43, No. 1, P. 186-197.
2. Сварка и диагностика /Атрощенко В.В. [и др] // Численное моделирование стадии проковки в сварных соединениях, полученных линейной сваркой трением. – 2016. – №5. – С.19-22.

Овчинников И. П.

Ovchinnicov I. P.

owhinnikov1@yandex.ru

Щицын Ю. Д.

Shitsyn Y. D.

schicin@pstu.ru

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ЭРОЗИИ КАТОДА ПЛАЗМАТРОНА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ СВОЙСТВ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ

USE OF PLASMATRON CATHODE EROSION PRODUCTS FOR FORMATION OF SPECIAL PROPERTIES OF WORKING SURFACES OF PRODUCTS

***Аннотация.** Выполнены исследования скорости эрозии катодов плазматрона из различных металлов, произведена оценка переноса продуктов эрозии материала катода плазматрона на подложку. Определены коэффициенты переноса материала катода для различных металлов. Установлено влияние расстояния от плазматрона до подложки на ширину напыляемых дорожек.*

***Abstract.** The erosion rate of plasmatron cathodes made of various metals has been investigated, and the transfer of erosion products of the plasmatron cathode material to the substrate has been estimated. The transfer coefficients of the cathode material for various metals have been determined. The effect of the distance from the plasmatron to the substrate on the width of the sprayed tracks is established.*

***Ключевые слова:** плазменное напыление, эрозия катодов, металлические покрытия.*

***Keywords:** plasma spraying, cathode erosion, metal coatings.*

В настоящее время в промышленности используются различные методы получения покрытий с заданными свойствами [1]. Одним из направлений формирования поверхностных слоев с требуемыми свойствами является нанесение покрытий определенного состава. Плазменные технологии позволяют не только изменять свойства поверхности конструкционных материалов, но и дают возможность создавать новые композиционные материалы и покрытия, которые не могут быть получены другими методами. Разработаны и применяются различные технологии плазменного нанесения покрытий, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки. Высокие эксплуатационные характеристики при минимальном расходе осаждаемого на поверхности изделия материала обеспечивает ионно-плазменная обработка [2]. Она основана на переносе продуктов эрозии катода на поверхность изделия. Однако несмотря на высокое качество покрытий массового внедрение этого процесса не происходит, в следствие высокой стоимости оборудования, низкой производительности и ограничением габаритов обрабатываемых изделий размерами рабочей вакуумной камеры [3].

Исходя из этого необходимы исследования и разработка новых процессов плазменного нанесения покрытий с использованием переноса продуктов эрозии электродов на поверхность изделий. В данной работе представлено исследование эрозии кольцевых катодов плазматрона, состоящие из следующих этапов: определение скорости эрозии катодов, исследование переноса продуктов эрозии, определение коэффициентов переноса продуктов эрозии

Исследование проводилось с использованием плазматрона, работающего в режиме непереносной дуги на токе обратной полярности, в котором роль катода выполняет плазмообразующее сопло с кольцевой вставкой. Схема плазматрона приведена на рис. 1. В ходе исследования изменялись основные параметры, представленные в табл. 1. Ток дуги подбирали из условия отсутствия плавления кольцевых катодов.

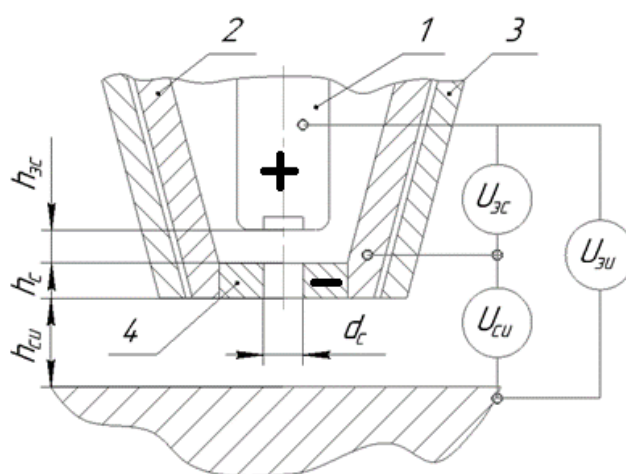


Рис. 1. Схема плазматрона:

1 – электрод-анод с вольфрамовой вставкой; 2 – плазмообразующее сопло;
3 – защитное сопло; 4 – кольцевой катод

Таблица 1

Параметры исследования

$h_{\text{си}}$, мм	4; 5 ;8; 10; 12; 16; 20
$I_{\text{д}}$, А	30; 50; 100; 150
Материал катода	Cu; Al; X18H10T

Первоначальным этапом исследования являлось выявление основных закономерностей эрозии катодов плазматрона путём определения их скорости эрозии. Исследование проводилось в следующей последовательности, в начале осуществлялось взвешивание катодов, катод представляет из себя цилиндрическую таблетку высотой $h_c = 6$ мм, в центре которой имеет цилиндрическое отверстие диаметром $d_c = 3; 4$ мм. Затем данная таблетка устанавливалась в плазмообразующее сопло, после чего осуществлялся

эксперимент, в ходе которого производилось измерение напряжений (рис. 1). Завершающим этапом, являлось контрольное взвешивание катодов. Результаты экспериментов приведены в табл. 2. На рис. 2 показан внешний вид катодов после эксперимента, на верхнем фото внутрисопловой торец, на нижнем наружный.

Таблица 2

Результаты экспериментов

Исходные данные				Измеряемые данные				Расчётные данные	
Материал катода	I_d , А	$t_{\text{экс}}$, мин	d_c , мм	$U_{\text{эс}}$, В	T_c , °С	$T_{\text{э}}$, °С	$T_{\text{и}}$, °С	P_d , кВт	J , г/кВт*ч
Cu	50	5	4	27	18	21	19	1,35	0,89
	100	5	4	28	21	27	23	2,8	0,86
	150	5	4	29	25	32	28	4,35	0,83
	150	10	4	30	26,5	34	22	4,5	0,67
	100	10	3	36	23	29	28	3,6	0,67
	150	10	3	37	27	34	31	5,55	0,76
Al	50	10	3	28	19	18	19	1,4	1,29
	100	5	3	29	22	27	22	2,9	0,41
X18H10T	50	5	3	24	18	20	18	1,2	10

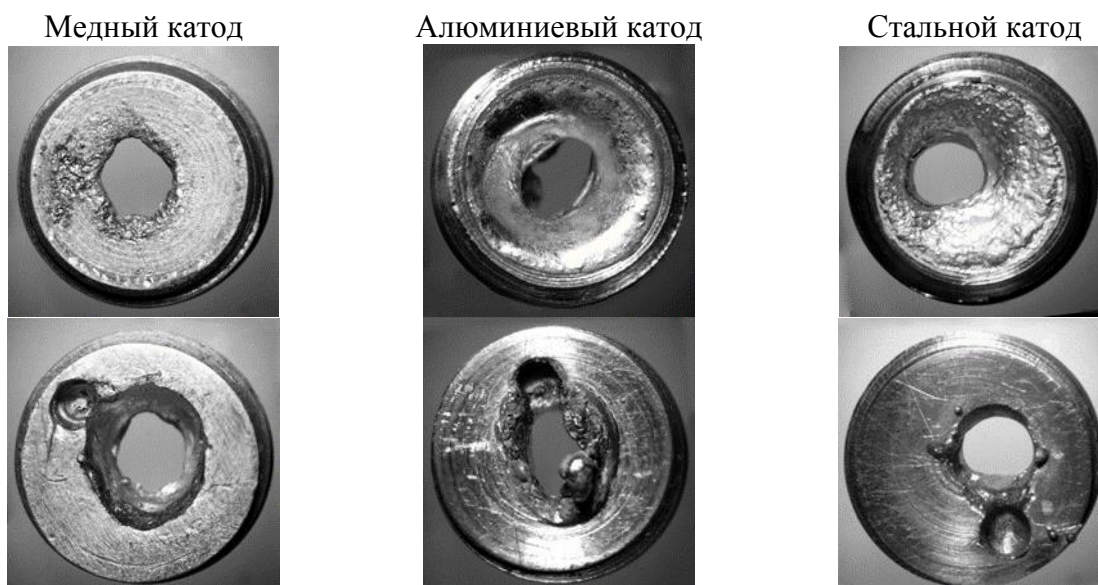


Рис. 2. Внешний вид катодов

Далее производилось исследование степени перехода продуктов эрозии кольцевых катодов плазматрона на подложку. Работа выполнялась в следующей последовательности: перед началом эксперимента осуществлялось взвешивание кольцевого катода ($m_{к0}$) и подложки ($m_{п0}$). После установки катода в плазматрон проводились эксперименты при различных расстояния от плазматрона до подложки ($h_{\text{си}}$), в ходе которого измеряли напряжение на дуге, после завершения производили контрольное взвешивание катода ($m_{к1}$) и

подложки ($m_{п1}$), по полученным данным определяли долю перенесённого на подложку ($m_{п.м}$) и потерянного в окружающую среду материала, путём оценивания изменения массы катода (Δm_k) и подложки. Результаты приведены в таблице 3. На рис. 3 представлен внешний вид слоя напыляемого продукта эрозии стального катода.

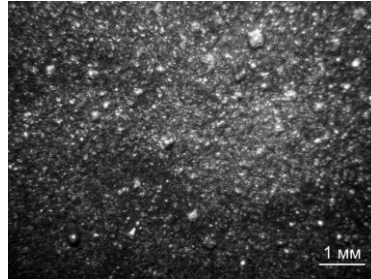


Рис. 3. Внешний вид слоя напыляемого продукта эрозии стального катода

Таблица 2

Результаты экспериментов по переносу материала

Материал катода	Q_p , л/мин	I_d , А	U_d , В	$m_{к0}$, Г	$m_{п0}$, Г	$t_{экс}$, МИН	$m_{к1}$, Г	$m_{п1}$, Г	Δm_k , Г	$m_{п.м}$, Г
Al	5	50	30	3,0	141,4	10	2,8	141,5	0,2	0,1
Cu		150	26	7,1		10	6,3	142,0	0,8	0,6
Al		50	30	3,0		10	2,8	141,5	0,2	0,1
Cu		150	26	7,1		10	6,3	142,0	0,8	0,6
X18H10T	8	50	25	6,7		5	6,0	142,0	0,7	0,6

Внешний вид дорожки	Расстояние от плазматрона до подложки		
	5 мм	10 мм	20 мм
С копотью			
Без копоти			

Рис. 4. Внешний вид дорожек при напылении без защитного сопла

Затем проводились исследования ширины дорожки напыляемого материала в зависимости от изменения расстояния от плазматрона до подложки

$h_{си}$, постоянными параметрами являлись материал кольцевого катода – медь, $Q_{п} = 3$ л/мин и $I_{д} = 30$ А, при этом суммарное время работы плазматрона составило 15 мин, а изменение массы кольцевого катода 0,3 г. Результаты экспериментов приведены в таблице 3. Внешний вид напыляемых дорожек показан на рис. 4.

Таблица 3

Результаты опытов без защитного сопла

$h_{си}$, мм	$U_{д}$, В	Ширина дорожки, мм	
		По копоту	Без копоту
20	36	8	-
10	35,5	9	4,4
5	35,5	8,5	4,1

Выводы

1. Проведены исследования скорости эрозии кольцевых катодов, определено что процесс эрозии кольцевых медных катодов стабилен и устойчив в широком диапазоне токов от 50 до 150 А. Не смотря на различие теплофизических свойств катоды из стали и алюминия показали практически одинаковые результаты, эрозия наблюдается при использовании небольших токов в пределах 50 А, использование силы тока в 100 А вызывает их оплавление, при этом сам процесс становится нестабильным. Скорость эрозии катодов, выполненных из меди на прямую, зависит от силы тока, чем выше ток, тем больше скорость эрозии. Самую высокую скорость эрозии продемонстрировал стальной катод.

2. Установлено, что коэффициент переноса материала катода для различных металлов различен и составляет для медного катода 0,8, для алюминиевого около 0,5, для стального 0,85.

3. Установлено влияние расстояния от плазматрона до подложки на ширину дорожек, так при расстоянии в 10 мм наблюдается самая большая ширина дорожек, дальнейшее увеличение расстояния приводит к уменьшению ширины дорожек и к трудности определения её границ. При изменении расстояния от плазматрона до подложки в диапазоне от 5 до 10 мм ширина дорожки практически не изменяется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные технологии поверхностного упрочнения и нанесения покрытий: учебное пособие / Б. С. Зенин, А. И. Слосман; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — 2-е изд. — Томск: Изд-во ТПУ, 2012. — 119 с.: ил.
2. Андреев А.А., Саблев Л.П., Григорьев С.Н. Вакуумно-дуговые покрытия. – Харьков, НИЦ ХФТИ, 2010. – 318 с.
3. «EQUIPMENT AND PROCESSES OF VACUUM ELECTRON-ION PLASMA SURFACE ENGINEERING» Devyatkov V.N., Ivanov Y.F., Krysina O.V., Koval N.N., Petrikova E.A., Shugurov V.V. Vacuum. 2017. Т. 143. С. 464-472.

Муругова О. В.
Murugova O. V.
murugova.oxan@mail.ru
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический
университет», Уфа

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ УЗЛА АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

MATHEMATICAL MODELING OF STRESS-DEFORMED STATE OF AIRCRAFT ENGINE UNIT STRUCTURE

***Аннотация.** В данной работе рассматривается построение термомодеформационной модели состояния узла авиационного двигателя из жаропрочного сплава ЭП718. Были проведены математические эксперименты для различных видов сварки и разных порядков наложения швов (три схемы). Были получены и проанализированы результаты моделирования.*

***Abstract.** In this paper, we consider the construction of a thermal deformation model of the state of an aircraft engine unit made of EP718 heat-resistant alloy. Mathematical experiments were carried out for different types of welding and different orders of seams (three schemes). Simulation results were obtained and analyzed.*

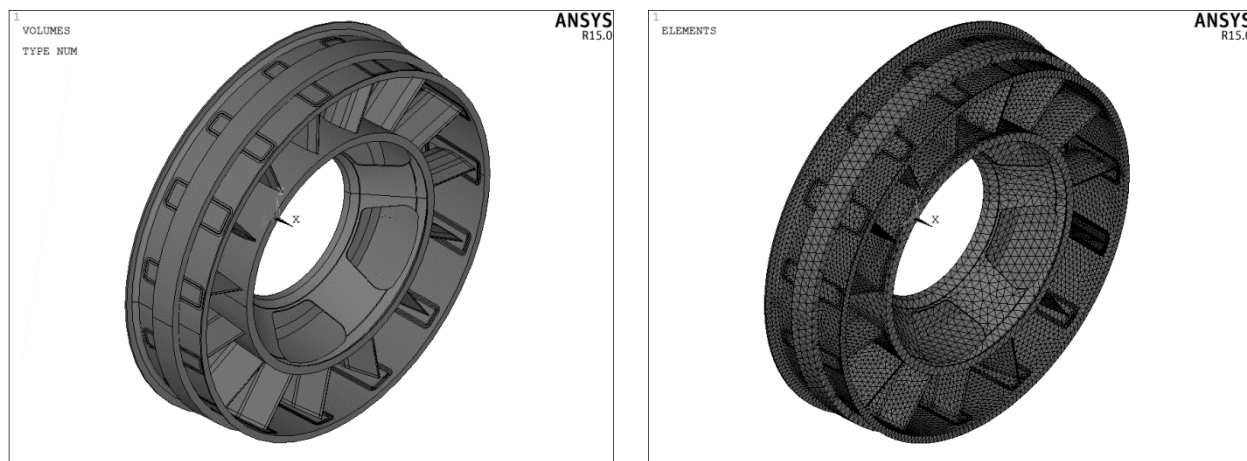
***Ключевые слова:** математическое моделирование, ЭП718, роботизированная сварка, напряженно-деформированное состояние, температурные поля.*

***Keywords:** mathematical modeling, EP718, robotic welding, stress-strain state, temperature fields.*

Технологический процесс сварки плавлением является важным этапом при производстве современных авиационных двигателей 4-го и 5-го поколений. Процесс сварки плавлением сопровождается резкими изменениями температуры в ЗТВ, что может породить ряд дефектов (например, трещины, поры, коробления, прожоги, непровары и т.д.). В этом числе значимой является проблема трещинообразования при сварке геометрически сложных узлов авиационного двигателя, выполненных из ограниченно свариваемых сплавов, например, из жаропрочного никелевого дисперсионно-твердеющего сплава ЭП718.

Определение годных режимов сварки требует проведения ряда натурных экспериментов. В дополнение к натурным экспериментам целесообразно применение современных методов численного моделирования сварочных процессов, которые позволяют оценить суммарное влияние остаточных напряжений при сварке всех стоек.

На рис. 1 показаны 3D-модель узла авиационного двигателя и глобальная конечно-элементная сетка. Тип используемых конечных элементов – Solid 70, 8-ми узловые тетраэдрические. Максимальный размер конечных элементов был во внутреннем теле и достигал 10 мм. В области сварного шва и ЗТВ было создано локальное сгущение сетки с размером конечного элемента в 1 мм, а в стойке – 7 мм.



а) б)
 Рис.1. 3D-модель узла авиационного двигателя (а) и глобальная конечно-элементная сетка (б)

Зависимость теплофизических и механических свойств ЭП718 и присадочной проволоки ЭП533 от температуры принимали в соответствии с расчетами программы OPENCALTHAD по усредненному химическому составу сплавов, поскольку в научной литературе и статьях отсутствует информация о свойствах сплавов.

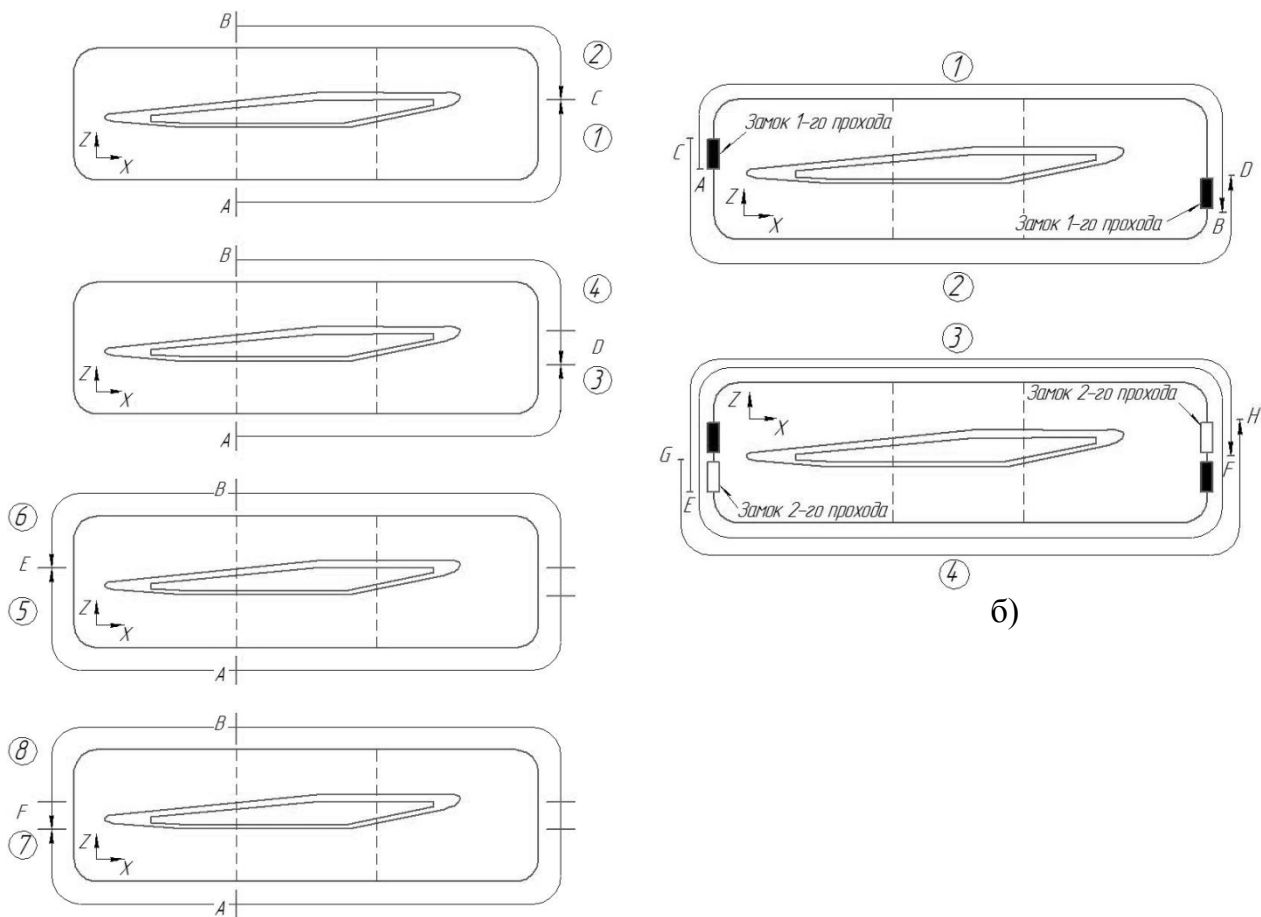
В базовой технологии АрДС предусмотрено заполнение сварного шва в 3 прохода. Роботизированная СПЭ с поперечными колебаниями позволяет получить подобный сварной шов за 2 прохода, при этом вводимая погонная энергия будет меньше на 11-16% за проход, чем при базовом варианте сварки, что снижает уровень остаточных напряжений после сварки.

Было проведено численное моделирование сварки по следующим расчетным схемам:

1. **Схема №1.** Оценка напряженно-деформированного состояния узкой стойки после 2-х проходной аргодуговой сварки неплавящимся электродом с присадочной проволокой (порядок наложения швов представлен на рис. 2, а);

2. **Схема №2.** Оценка напряженно-деформированного состояния узкой стойки после 2-х проходной роботизированной СПЭ с поперечными колебаниями (порядок наложения швов представлен на рис. 2, б).

3. **Схема №3.** Оценка напряженно-деформированного состояния узкой стойки после 2-х проходной роботизированной СПЭ с поперечными колебаниями (порядок наложения швов представлен на рис. 2, а).



а)

Рис. 2. Схема заполнения 2-х проходного сварного шва для схем № 1, 3 (а), для схемы №2 (б)

Параметры источника нагрева подбирались таким образом, чтобы термические циклы на ОШЗ конечно-элементной модели соответствовали верифицированным термическим циклам ОШЗ при натуральных экспериментах.

Источник нагрева для имитации сварочного процесса представлял собой двойной эллипсоид Годака [1]. Формула Годака была адаптирована для уравнения равномерного движения по синусоиде, имитирующее поперечные колебания источника нагрева (1):

$$q = Q \cdot \exp \left(-3 \left(\left(\frac{Z - v \cdot \text{Time}}{r_1} \right)^2 + \left(\frac{Y}{r_2} \right)^2 + \left(\frac{X - T \sin(A \cdot \text{Time})}{r_3} \right)^2 \right) \right), \quad (1)$$

где Q – вводимая мощность, Вт; V – скорость источника, м/ч; r_i – полуоси эллипсоида, м; T – период, s^{-1} ; A – амплитуда, мм

Пример результатов моделирования температурной задачи представлен на рис. 3. Термические циклы узлов в ОШЗ при роботизированной СПЭ подбирались максимально приближенными к термическим циклам, полученным в результате экспериментов на листовых заготовках ЭП718.

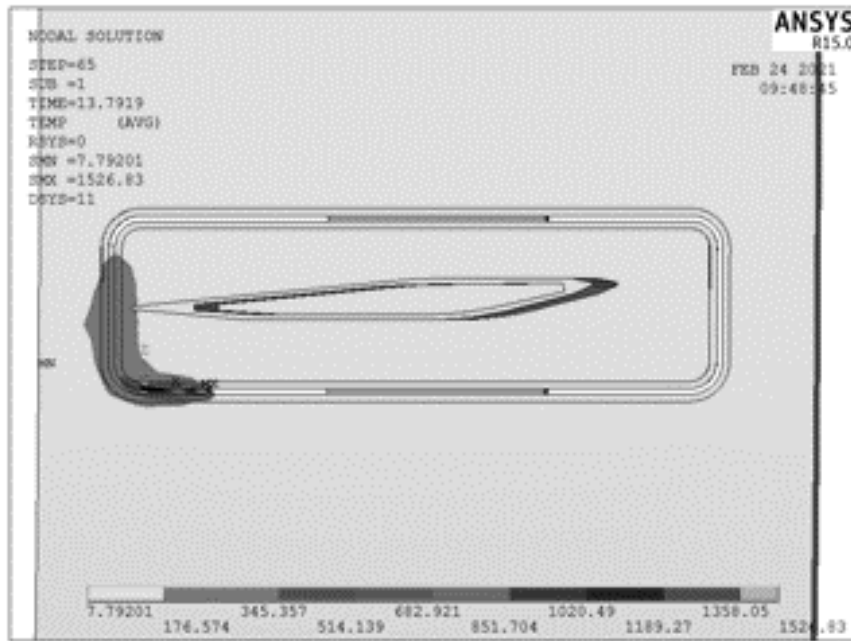
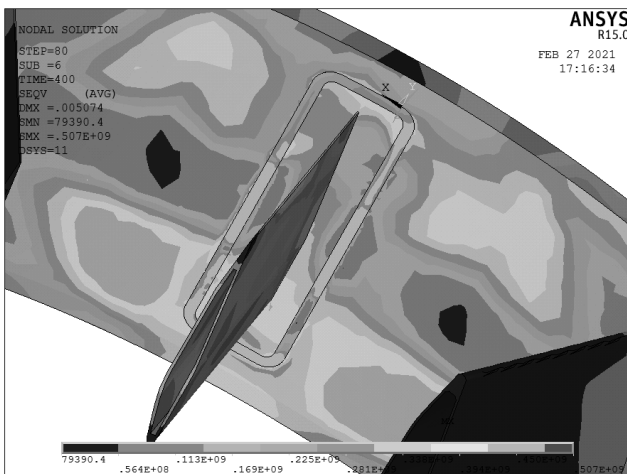


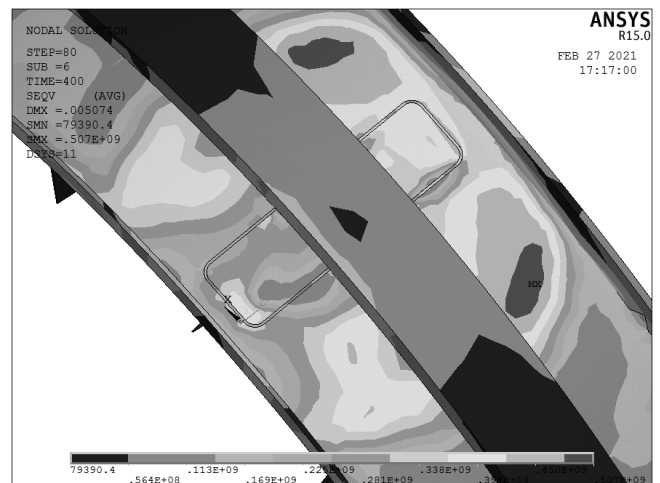
Рис. 3. Тепловые поля при роботизированной СПЭ с поперечными колебаниями

Были проведены математические эксперименты для каждой из разработанных схем, был проведен масштабный анализ результатов.

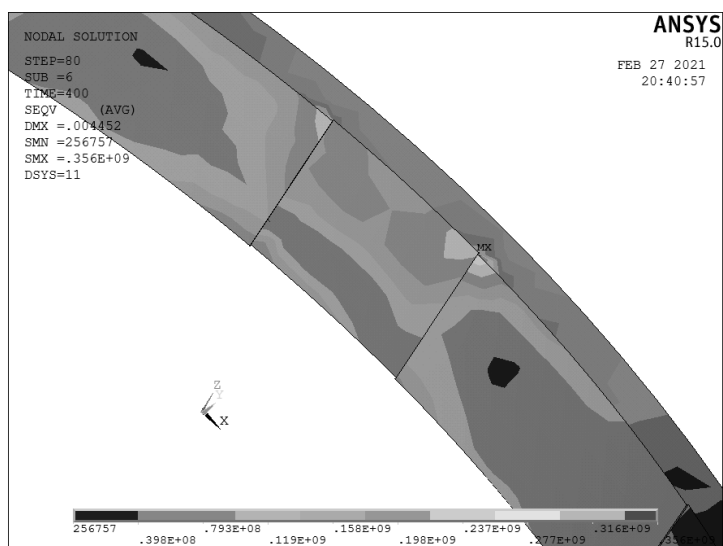
Пример результатов по расчетной схеме 3. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния узкой стойки после 2-х проходной роботизированной СПЭ с поперечными колебаниями по схеме №1 на экспериментально полученных режимах сварки показаны на рис. 4.



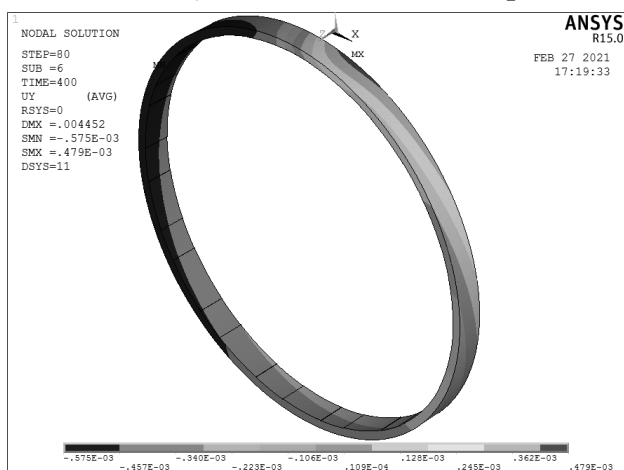
а) Эквивалентные напряжения по Мизесу в месте приварки узкой стойки в наружное тело



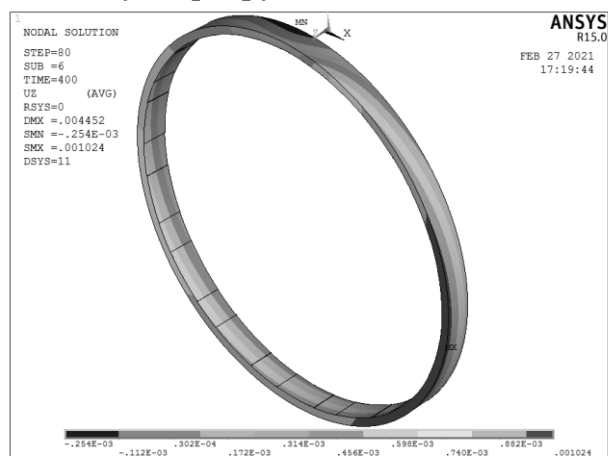
б) Эквивалентные напряжения по Мизесу в месте приварки узкой стойки в наружное тело с внешней стороны



в) Эквивалентные напряжения по Мизесу по ребру жесткости



г) Перемещения по оси OY



д) Перемещения по оси OZ

Рис. 4. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния узкой стойки после 2-х проходной роботизированной СПЭ с поперечными колебаниями

Эквивалентные напряжения по Мизесу в месте приварки узкой стойки в наружное тело в сварном шве составили 314 МПа изнутри и снаружи узла. Как снаружи, так и изнутри узла заметны зоны локальной концентрации эквивалентных напряжений величиной до 507 МПа, но поскольку они находятся на значительном расстоянии от ОШЗ, то не влияют на вероятность трещинообразования и снижаются при последующей термообработке после сварки. Эквивалентные напряжения по Мизесу по ребру жесткости составляли ≈ 362 МПа. Перемещения узлов ребра жесткости по оси OY 0,21 мм и по оси OZ – 0,23 мм.

Результаты моделирования по расчетным схемам №1-3 сведены в табл. 1.

Результаты оценка напряженно-деформированного состояния узла авиационного двигателя после приварки узкой стойки по схемам №1-3

Расчетная схема	Эквивалентные напряжения по Мизесу в сварном шве при приварке узкой стойки изнутри, МПа	Эквивалентные напряжения по Мизесу в сварном шве при приварке узкой стойки снаружи, МПа	Эквивалентные напряжения по Мизесу по ребру жесткости, МПа
№1 (АрДС с присадочной проволокой)	539	350	119
№2 (СПЭ с поперечными колебаниями)	716	610	310
№3 (СПЭ с поперечными колебаниями)	314	314	366

Выводы

Были проведены математические эксперименты по вварке стоек в наружное тело узла авиационного двигателя для трех расчетных схем, был проведен сравнительный анализ результатов, в ходе которого было выявлено, что схема №3 дает меньший уровень остаточных напряжений в сравнении другими расчетными схемами.

Таким образом, для достижения минимального уровня остаточных сварочных напряжений и минимального коробления конструкции необходимо использовать при вварке стоек в наружное тело роботизированной СПЭ с поперечными колебаниями по схеме заполнения вразброс небольшими участками в 2 прохода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атрощенко В. В., Никифоров Р. В., Муругова О. В. Моделирование тепловых процессов при дуговой сварке высокопрочной трубной стали с учетом структурно-фазовых превращений // Сварка и диагностика. 2018. №2. С. 50-54.

Кагарманов Э. И.
Kagarmanov E. I.
kagarmanov@naks-rb.ru
ООО «ГАЦ РБ», Уфа
Селиванов А. С.
Selivanov A. S.
selivanov@naks-rb.ru
Лобачев В. С.
Lobachev V. S.
vladik1997okt@mail.ru
Шугаипов Ш. Д.
Shugaipov Sh. D.
shugaipov17@gmail.com
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ДЕФЕКТА ВИДА ЗАГЛАЖЕННЫЙ НЕПРОВАР ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМГ4 ТОЛЩИНОЙ 6 ММ

PREVENTION OF WORMHOLE DURING FRICTION STIR WELDING OF ALUMINUM ALLOY AMG4 WITH A THICKNESS OF 6 MM

***Аннотация.** В процессе экспериментальных исследований технологии сварки трением с перемешиванием (СТП) алюминиевого сплава АМг4 толщиной 6 мм был разработан инструмент для СТП, определены режимы сварки и их влияние на дефект в виде заглаженного непровара.*

***Abstract.** In the process of experimental studies of the technology of friction stir welding (FSR) of the AMg4 aluminum alloy with a thickness of 6 mm, a tool for FSC was developed, the welding modes and their influence on the defect in the form of smoothed non-penetration were determined.*

***Ключевые слова:** сварка трением с перемешиванием, СТП, сварка алюминиевых сплавов, сварка сплава АМг4, заглаженный непровар, тоннельный дефект.*

***Key words:** friction stir welding, STP, welding of aluminum alloys, welding of AMg4 alloy, smoothed lack of penetration, tunnel defect.*

Введение

В процессе изготовления изделий из алюминиевых сплавов возникают трудности при сварке из-за наличия плотной оксидной пленки на поверхности, высокой теплопроводности в сочетании с низким модулем упругости. В связи с этим при плавлении материала в процессе сварки имеет место неравномерно распределение температуры и увеличение объема зоны расплавления, что приводит к повышенной чувствительности структуры сварного соединения к условиям сварки, появлению трещин и других дефектов сварки [1].

Большинства этих проблем можно избежать применением способа сварки алюминиевых сплавов в отсутствие жидкой фазы, из которых наиболее перспективным является способ сварки трением с перемешиванием (FSW).

К сожалению, многие публикации по сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов не раскрывают механизм образования и предотвращения тоннельного дефекта или заглаженный непровара.

Заглаженный непровар (канал) представляет собой протяженную несплошность внутри сварного шва, ориентированная в долевом направлении [3]. Может образоваться как по толщине, так и выходить на поверхность сварного шва [2]. На рисунке 1 представлен эскиз данного дефекта.

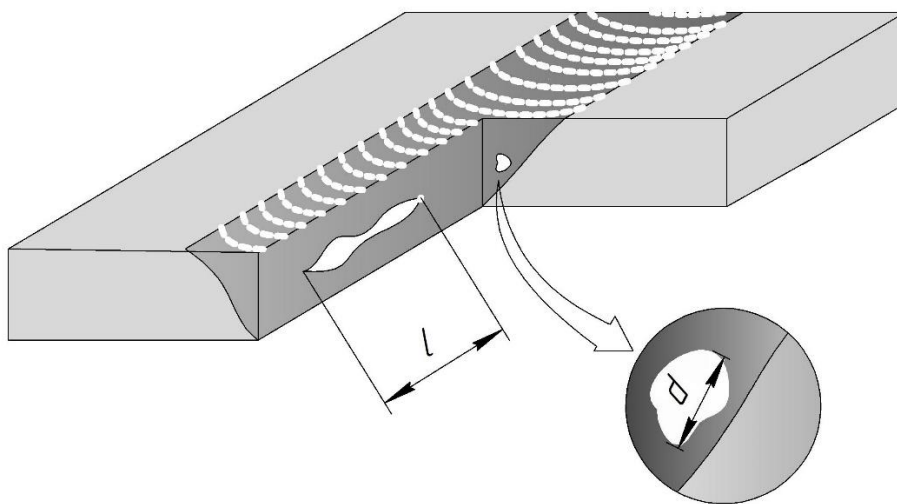


Рис.1. Эскиз тоннельного дефекта

По ОСТ 134-1051-2010 «Сварка фрикционная. Технические требования к сварным соединениям» данный дефект называется «каналом» и является недопустимым. В ГОСТ ISO 25239-5-2020 «Сварка трением с перемешиванием. Алюминий. Часть 5. Требования к качеству и контролю» данный дефект не обозначен.

Перед авторами встала задача исследовать механизм образования и возможности предотвращения заглаженного непровара.

Материалы и методика исследования

Объектом исследований является сварное соединение двух пластин толщиной 6 мм из сплава АМг4, выполненное сваркой трением с перемешиванием. Химический состав был подтвержден на оптико-эмиссионном спектрометре Belec IN-SPECT.

Работы велись на фрезерном станке модели FSS-400. Для контроля перемещения инструмента использовались цифровые оптические линейки с точностью 0,001 мм.

Исходя из условий работы инструментов, в качестве материала была выбрана сталь 20Х13 [1,2], обладающая высокой теплоустойчивостью. Сварка осуществлялась на подкладке, выполненной в виде стальной пластины размером 500х300х25.

Первым этапом проводимых работ было получение соединения на различных режимах сварки. В ходе данных работ проводилась оценка внешнего

вида получаемых участков. Для выявления дефектов, полученные стыки подвергались оценки внешнего вида, микроструктурному анализу, радиографической дефектоскопии. РГК контроль проводился при помощи программно-аппаратного комплекса цифровой радиографии «Цифракон». Методика контроля проводилась согласно методическим указаниям. По результатам НК режимы сварки корректировались.

Решено было использовать заплечик с плоской формой так как выпуклая форма плеча является неэффективной, а вогнутая приведет к значительному утонению шва [10].

Для упрощения конструкции, форму пина приняли цилиндрическую [8,10]. Определили, что длина пина должна быть равной 90-95% толщины материала [2], так же учли то, что заплечик погружается в материал на 0,2-0,7 мм. Опираясь на вышеописанные данные, был разработан инструмент в соответствии с рисунком 2.



Рис. 2. Инструмент для СТП листов толщиной 6 мм из сплава АМг4

Регулирование режимов сварки производилось по четырем параметрам: частота вращения (n), скорость сварки (v), глубина погружения заплечика (l), угол наклона инструмента (α).

Результаты исследования и их обсуждение

На рисунке 3 показан образец, на котором проводилась сварка трением с перемешиванием. Режимы сварки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы сварки образца №2

№ соединения	n , об/мин	v , мм/мин	l , мм	α , град.
44	1400	80	0,275	1
45	1330	13	0,425-0,700	1
46	710	125	0,600	1



Рис. 3. Образец №2

Как видно на рис. 3, соединения имеют удовлетворительный внешний вид. Вследствие изменения во время сварки глубины погружения инструмента, на поверхности сварного соединения 45 образовался грат. Это связано с чрезмерным увеличением глубины погружения инструмента [2,7].

Контроль методом РГК выявил заглаженный непровар по толщине. На рис. 4 показан радиографический снимок.

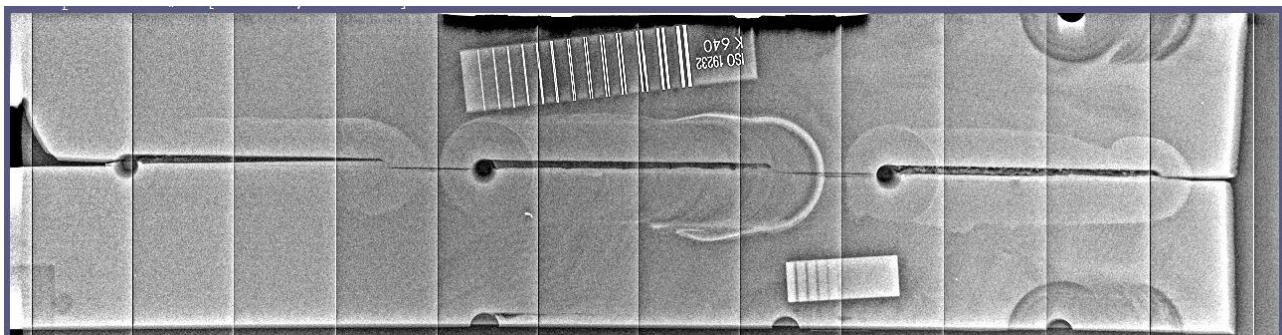


Рис. 4. Радиографический снимок образца №2

Заглаженный непровар образовался вследствие недостаточного давления в зоне сварки [2]. Увеличить давление можно увеличив глубину погружения инструмента и угол наклона инструмента.

На основании, проведенных исследований было решено изменить угол наклона инструмента в интервале $1-3^\circ$ и глубину погружения инструмента, при неизменных скорости сварки и частоты вращения инструмента.

На рис. 5 показан образец, на котором проводилась сварка на режимах, приведённых в табл. 2.

Режимы сварки образца №3

№ соединения	n, об/мин	v, мм/мин	l, мм	α , град.
51	900	80	0,74	1
52	900	80	0,43	1
53	900	80	0,53	2
54	900	80	0,51	3



Рис. 5. Образец №3

Все соединения имеют удовлетворительный внешний вид. Рентген снимок выявил заглаженный непровар. По сравнению с предыдущими опытами раскрываемость данного дефекта имеет меньшее значение. На рисунке 13 представлен радиографический снимок.

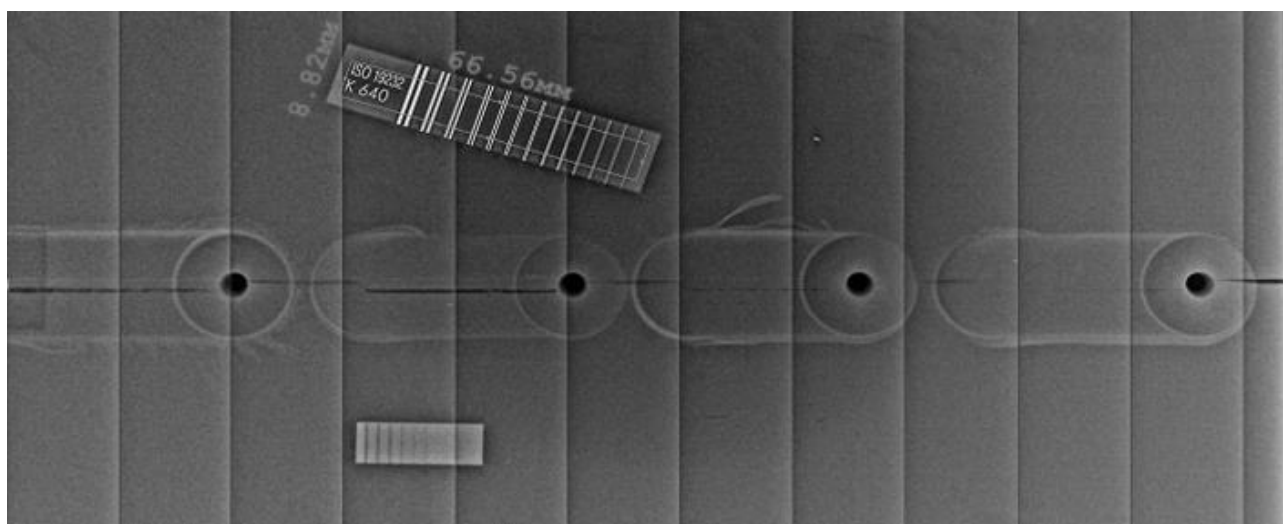


Рис. 6. Радиографический снимок образца №3

Для оценки величины заглаженного непровара, был проведен металлографический контроль сварных соединений. На рисунке 7 представлены результаты.

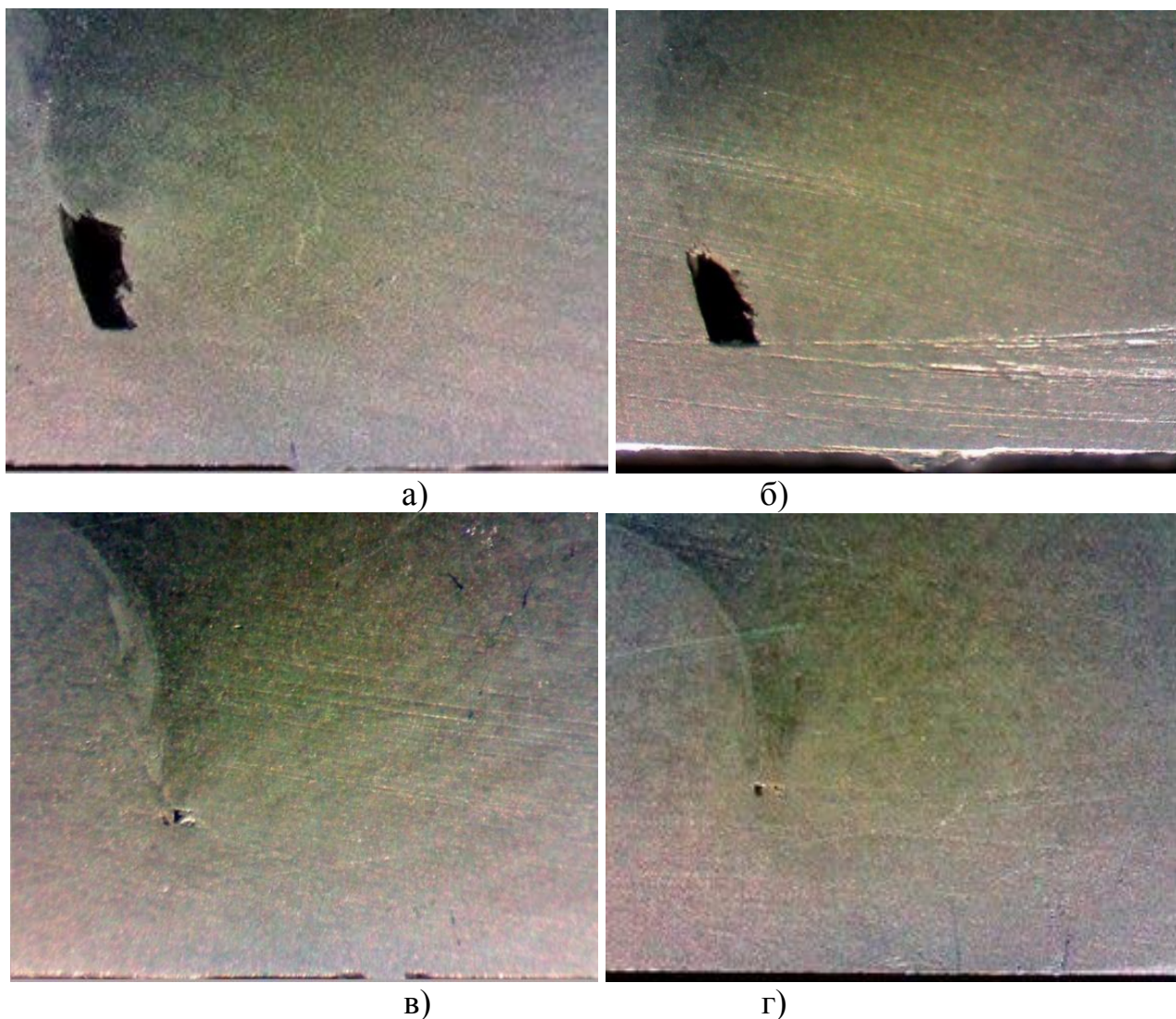


Рис. 7. Макрошлифы образца №3 с 6 кратным увеличением:
а – соединение №51, б – соединение №52, в – соединение №53, г - соединение №54

В результате проведения металлографического контроля было выявлено, уменьшение размеров заглаженного непровара.

Выводы

Заглаженный непровар по толщине образуется вследствие недостаточного давления на свариваемый металл. Экспериментально выявлено, что увеличение угла наклона инструмента в пределах $2-3^\circ$ уменьшает размер заглаженного непровара. Увеличение глубины погружения инструмента на размер данного дефекта не повлияло.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов в строительстве/ Ю.Г. Людимский, Р.Р. Котлышев// Научный вестник ВГАСУ. – 2010. - №3. – С. 15-22.
2. Котлышев Р.Р. Сварка трением с перемешиванием алюминиевого сплава АД31 / Р.Р. Котлышев // Сварочное производство: сб. тр. молодых учёных / ДГТУ. - г. Ростов н/Д, 2009. - С. 65-71
4. ГОСТ ISO 25239-1:2011 Сварка трением с перемешиванием алюминий. Часть 1. Словарь.
5. ГОСТ ISO 25239-5-2020 Сварка трением с перемешиванием. Алюминий. Часть 5. Требования к качеству и контролю
6. ОСТ 134-1051-2010 «Сварка фрикционная. Технические требования к сварным соединениям»
7. The role of tool offset on the microstructure and mechanical properties of Al/Cu friction stir welded joints / Wentao Hou, Luqman Hakim Ahmad Shah, Guoqiang Huang, Yifu Shena Adrian Gerlic // Journal of Alloys and Compounds - Volume 825, 5 June 2020.
8. Effect of Tool Rotational Speed on Mechanical Properties Of Aluminium Alloy 5083 Weldments in Friction Stir Welding / K. Aruna Prabha. Prasad Kumar Putha, Balla Srinivasa Prasad // Materials Today: Proceedings - Volume 5 - Issue 9 - Part 3- 2018 – С. 18535-18543
10. Review: friction stir welding tools/ R. Rai, A. De, H. K. D. H. Bhadeshia and T. DebRoy//University of Cambridge. – 2011. - №4. – с. 325-342.

Селиванов А. С.

Selivanov A. S.

selivanov@naks-rb.ru

Логачёв Ю. В.

Logachev Y. V.

yuryk33@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ МЕДИ

FEATURES OF THE FORMATION OF JOINTS DURING FRICTION STIR WELDING OF COPPER

***Аннотация.** В процессе экспериментальных исследований технологии сварки трением с перемешиванием (СТП) чистой технической меди толщиной 5 мм был разработан инструмент для СТП, определен режим сварки и был выявлен дефект в виде заглаженного непровара.*

***Abstract.** In the course of experimental studies of the technology of friction stir welding (FSW) of pure technical copper with a thickness of 5 mm, a tool for STP was developed, the welding mode was determined and a defect in the form of a smoothed non-steam was revealed.*

***Ключевые слова:** сварка трением с перемешиванием, СТП, сварка меди, медь.*

***Keywords:** friction stir welding, FSW, welding of copper, copper.*

Медь благодаря высокой электро- и теплопроводности, сочетанию прочности и пластичности, а также коррозионной стойкости, находит применение в ряде отраслей промышленности, таких как атомная, электронная, электроэнергетическая, нефтегазовая и химическая промышленность, при изготовлении токоведущих деталей, электротехнических шин силового оборудования, различного технологического оборудования и других изделий.

Сварка меди традиционными способами сварки плавлением осложнена ее высокой теплопроводностью, жидкотекучестью, высокой скоростью окисления при температуре плавления и склонностью к образованию трещин.

Для решения проблем, возникающих при сварке меди возможно применение способов сварки в твердой фазе, одним из которых является сварка трением с перемешиванием (СТП). В настоящее время СТП успешно применяется в различных отраслях промышленности: судостроении, железнодорожном транспорте, аэрокосмической промышленности, автомобилестроении, строительстве и ряде других [1]. Первоначально данный способ применялся как альтернатива дуговой сварке легких сплавов на основе алюминия, но с развитием процесса СТП начал находить применение для сварки материалов с более высокой температурой плавления. Несмотря на значительное количество публикаций по исследованию и применению процесса

СТП, большинство из них посвящены сварке сплавов на основе алюминия, а количество работ по сварке меди и медных сплавов незначительно.

Схема процесса СТП представлена на рис. 1. Основными параметрами процесса являются: n – частота вращения инструмента, $V_{св}$ – скорость сварки, α – угол наклона инструмента, P_z – осевое усилие или глубина погружения инструмента l , конструкция инструмента.

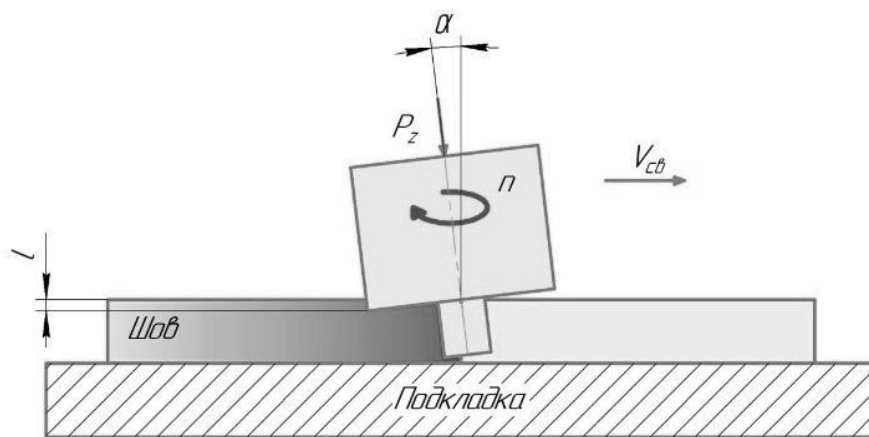


Рис. 1. Схема процесса СТП

В отличие от традиционных способов сварки трением, при которых вращается одна из свариваемых деталей, при СТП сварка производится вращающимся инструментом. Форма инструмента представлена на рис. 2, в наиболее простом исполнении это цилиндр с плоским заплечиком диаметром D и пином меньшего диаметра d_n длиной l_n .

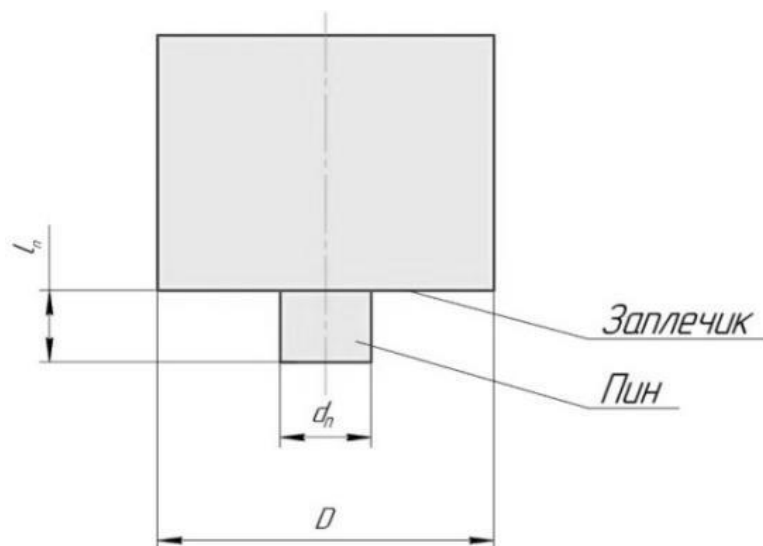


Рис.2. Инструмент для СТП

Форма пина инструмента влияет на течение пластифицированного материала, микроструктуру и механические свойства сварного шва, сваренной трением с перемешиванием [2]. Надёжные соединения могут быть получены с

использованием шести различных форм пина, таких как конический, цилиндрический, конический с резьбой, цилиндрический с резьбой, треугольный, квадратный, пятиугольный и шестиугольный.

При выборе материала инструмента при СТП необходимо учитывать теплофизические свойства свариваемых материалов. В работе [3] приведены рекомендации по выбору материала инструмента для СТП меди и её сплавов. Для сварки рекомендуется применять инструменты из стали Н13, жаропрочных никелевых сплавов, вольфрама и поликристаллического нитрида бора [3], а также комбинированные инструменты с пином из вольфрама и заплечиком из быстрорежущей стали [4].

На основании литературного обзора был сконструирован инструмент для сварки трением с перемешиванием медных листов толщиной 5,0 мм (рис. 3). Инструмент для сварки включает в себя корпус, выполненный из легированной стали марки 20Х13 и цилиндрический пин из вольфрама. Основные параметры рабочего инструмента D заплечика 25 мм, L пина 4,8 мм, d пина 6 мм.



Рис.3. Инструмент для СТП меди 5 мм

С использованием данного инструмента был получен пробный образец чистой меди толщиной 5 мм на стальной подкладке при частоте вращения инструмента $n=900$ об/мин, скорости сварки $v=80$ мм/мин и углом наклона инструмента в 1° (рис.4) [5,6].



Рис.4. Образец полученный СТП

После сварки образец был проверен визуально измерительным контролем (ВИК), рентгенографическим контролем (РК) и металлографическим контролем. В результате ВИК поверхностных дефектов не обнаружено. Рентгенографический контроль показал дефект заглаженный непровар по всей длине шва (рис. 5). Металлографический метод контроля помог выявить, что заглаженный непровар уменьшается в области окончания шва (рис. 6).

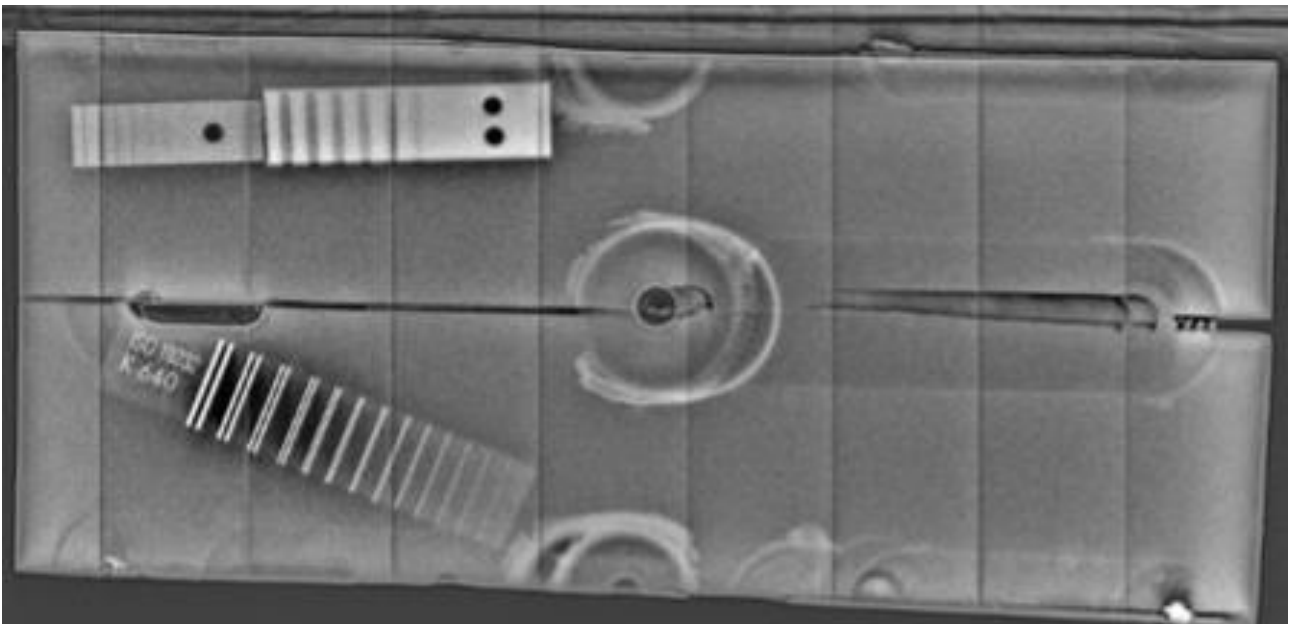


Рис. 5. Рентген снимок образца, полученного способом СТП меди 5 мм

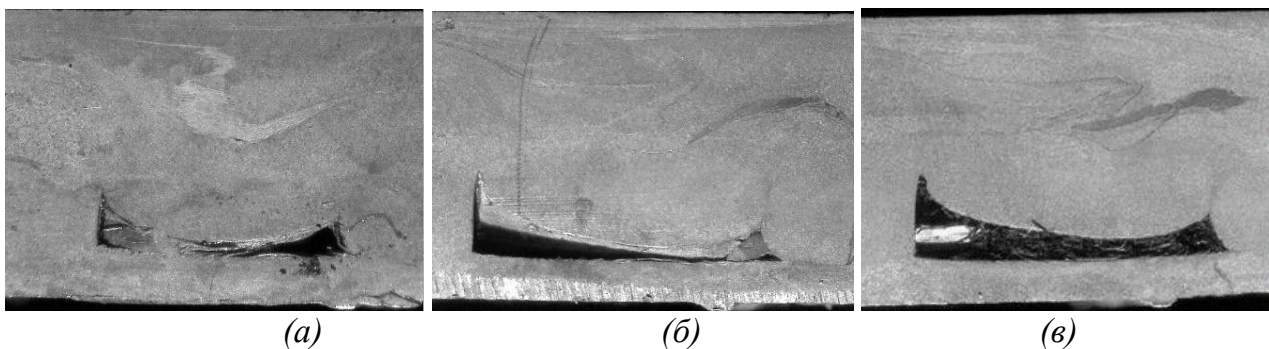


Рис. 6. Макрошлифы образца, полученного способом СТП меди 5 мм:
а – конец шва, б – середина шва, в – начало шва

Выводы

1. В ходе проведённой работы был разработан инструмент для сварки трением перемешиванием меди толщиной 5 мм. Геометрические размеры инструмента: D заплечика 25 мм, L пина 4,8 мм, d пина 6 мм.

2. С использованием разработанного инструмента был получен сварной образец из чистой технической меди толщиной. Режимы сварки: скорость вращения инструмента 900 об/мин, скорость сварки 80 мм/мин, угол наклона инструмента 1° .

3. В полученном образце наблюдался дефект типа заглаженный непровар по всей длине шва.

4. В дальнейших исследованиях, для исключения наблюдаемого дефекта, планируется уменьшить скорость сварки с 80 мм/мин до 40 мм/мин и изменение угла наклона инструмента с 1° до 2° и 3° .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штрикман М.М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений. Ч. 3. Промышленное применение процесса СТП. // Сварочное производство. 2007. № 11. С. 36-45.
2. A. Kumar, L. Suvarna Raju. Influence of Tool Pin Profiles on Friction Stir Welding of Copper // Materials and Manufacturing Processes. 2012. Т. 27. № 12. pp. 1414-1418.
3. K. Nakata. Friction stir welding of copper and copper alloys // Welding International. 2005. № 19 (12). pp. 929-933.
4. H. Pashazadeh, J. Teimournezhad, A. Masoumi. Numerical investigation on the mechanical, thermal, metallurgical and material flow characteristics in friction stir welding of copper sheets with experimental verification // Materials and Design. 2014. № 55. pp. 619–632.
5. H. Farrokhi, A. Heidarzadeh, T. Saeid. Frictions stir welding of copper under different welding parameters and media // Science and Technology of Welding and Joining. 2013. Т. 18. № 8. pp. 697-702.
6. H. Khodaverdizadeh, A. Mahmoudi, A. Heidarzadeh, E. Nazari. Effect of friction stir welding (FSW) parameters on strain hardening behavior of pure copper joints // Materials and Design. 2012. Т. 35. pp. 330–334.

Селиванов А. С.

Selivanov A. S.

selivanov@naks-rb.ru

Бачаев Д. А.

Bachaev D. A

denisba4aev14@gmail.com

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ И ПАРАМЕТРОВ ИНСТРУМЕНТА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

INFLUENCE OF FRICTION STIR WELDING MODES AND TOOL PARAMETERS ON MECHANICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF TITANIUM ALLOYS

***Аннотация.** Проведен анализ научных статей по сварке трением с перемешиванием (СТП) титановых сплавов толщиной от 1 до 6 мм, приведены результаты механических испытаний и исследования микроструктуры сварного шва. Описано влияние режимов СТП на механические свойства сварного соединения. Указаны рекомендации по выбору геометрии и материала инструмента для СТП титановых сплавов.*

***Abstract.** The analysis of scientific articles on friction stir welding (FSR) of titanium alloys with a thickness of 1 to 6 mm is carried out, the results of mechanical tests and studies of the microstructure of the weld are given. The article describes the effect of the STP mode on the mechanical properties of the welded joint. Recommendations are given on the choice of geometry and material for the RTP of titanium alloys.*

***Ключевые слова:** сварка трением с перемешиванием, СТП, сварка титана, титан.*

***Keywords:** friction stir welding, FSW, welding titanium, titanium.*

Титановые сплавы благодаря высокой прочности и жаропрочности при достаточно хорошей пластичности, высокой коррозионной стойкости и малой плотности, находят применение в ряде отраслей промышленности, таких как авиастроение, ракетостроение, химическая промышленность, газовая и нефтяная промышленность.

Для сварки изделий из титановых сплавов, как правило, применяется сварка плавлением, сопровождающаяся рядом проблем, связанных с физико-технологическими свойствами титана. Низкая теплопроводность, чувствительность к термическому циклу, высокая химическая активность титана и его сплавов значительно усложняют технологию сварки, что негативно сказывается на себестоимости и трудоемкости сварочных операций, а также ограничивают применение титановых сплавов в промышленности. Тонкостенные стыковые соединения титановых сплавов, с толщиной 1-3 мм, могут выполняться аргонодуговой сваркой. По сравнению с аргонодуговой сваркой сварка трением с перемешиванием (СТП) происходит в твердой фазе и

имеет ряд существенных преимуществ по получаемым свойствам сварных соединений и экономическим показателям. Многолетние исследования этого способа и постоянное совершенствование технологий и оборудования, позволили успешно применять СТП при изготовлении высокотехнологичных изделий из сплавов на основе алюминия в авиастроении, судостроении, вагоностроении, автомобилестроении и других отраслях промышленности.

Схема процесса СТП представлена на рис. 1. Основными параметрами процесса являются: n – частота вращения инструмента, $V_{сб}$ – скорость сварки, α – угол наклона инструмента, P_z – осевое усилие или глубина погружения инструмента l , конструкция инструмента.

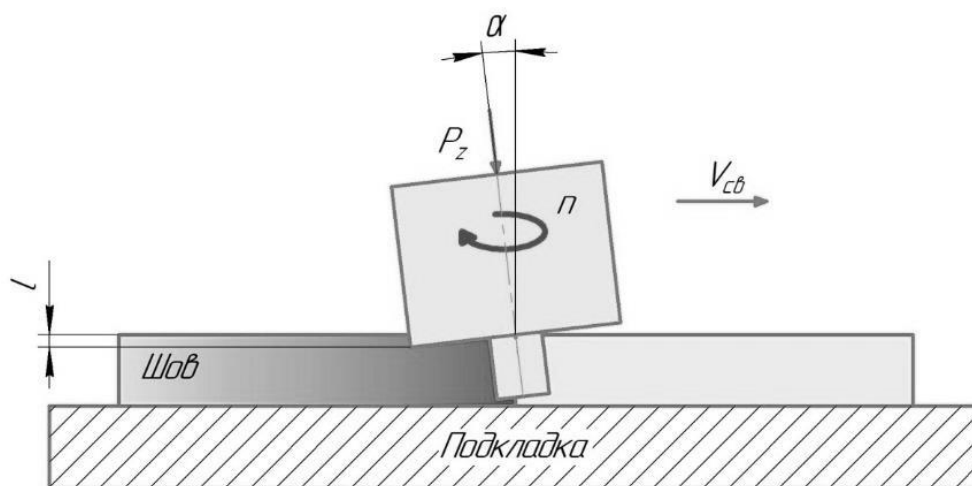


Рис. 1. Схема процесса СТП

При СТП сварка производится вращающимся инструментом. Форма инструмента представлена на рис. 2, в наиболее простом исполнении это цилиндр с плоским заплечиком диаметром D и пином меньшего диаметра d_n длиной l_n .

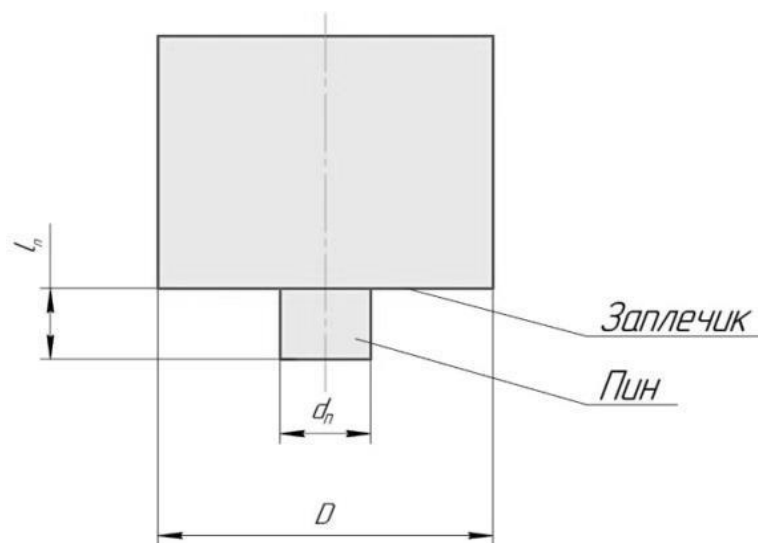


Рис. 2. Инструмент для СТП

Большинство современных публикаций по сварке титановых сплавов посвящено оценке влияния режимов сварки на свойства и структуру сварных соединений. Также в некоторых публикациях рассматривалась геометрия инструмента СТП и ее влияние на структуру сварного шва.

При сварке образцов Ti - 6Al - 4V толщиной 3 мм использовались следующие режимы сварки [1]: частота вращения инструмента – 500 об/мин, Скорость сварки варьировалась от 40 мм/мин до 200 мм/мин с шагом 80 мм. Угол наклона инструмента составлял 1,5°, и поддерживался постоянными для всех соединений. По результатам испытаний прочность соединения составляла 1040 МПа при 40 мм/мин и 716 МПа при 200 мм/мин. Отсутствие проплавления и дефекты наблюдались при скорости сварки 200 мм/мин вследствие недостаточного тепловыделения. При более низкой скорости дефекты отсутствовали.

Для подбора режимов сварки листов Ti-6Al-4V толщиной 2 мм проводилось 6 экспериментов с разными режимами сварки приведенные в табл. 1 [2]. При сварке применялся защитный газ аргон, расход которого составил 20 л/мин и инструмент для СТП, где в качестве материала пина использовался сплав W-Re25%, а в качестве материала для заплечика был выбран матери на основе никеля GH4043.

Таблица 1

Применяемые режимы сварки

№	Частота вращения, об/мин	Скорость сварки, мм/мин
1.	700	20
2.	800	20
3.	900	20
4.	1000	30
5.	1100	30
6.	1200	30

При сварке на режимах 1 и 2 наблюдались несплавления и непровары, образовавшиеся образование которых авторы связывают с недостаточным тепловыделением при частоте вращения инструмента до 800 об/мин. Образцы, полученные на режимах 3, 4, 5 и 6 не имели поверхностных или внутренних дефектов.

В работе [3] исследовались механические свойства и микроструктура соединений титанового сплава TC4 толщиной 2 мм, полученного методом СТП. Эксперименты проводились с использованием инструмента с пином из материала W-Re. Для предотвращения окисления поверхности свариваемых образцов сварка выполнялась в среде аргона. Все сварные швы были выполнены в направлении, перпендикулярном прокатки листа, при скорости вращения инструмента 400 об/мин и скорости сварки 50 мм/мин.

Эксперимент показал, что прочность соединения на растяжение эквивалентна 92% прочности от основного металла. Соединение разрушается по сварному шву, и поверхность излома имеет типичные характеристики пластического разрушения, при этом ЗТВ имеет более низкую твердость, чем основной металл.

В статье [4] были изучены характеристики сварного шва пластины из Ti-5111 толщиной 12,7 мм полученного методом СТП. Образец сваривался при частоте вращения инструмента 200 об/мин и скорости сварки 1,48 мм/мин. Инструмент для сварки представлял собой стержень на основе вольфрама с гладкой конической головкой.

Результаты сварки показывают, что в области, на которую непосредственно воздействует инструмент при СТП, возникающие в результате нагрева и деформация значительно увеличивают текучесть и пластичность материала. Также было обнаружено, что прочность сварного шва сравнима с прочностью основным металлом.

В публикации [5] был рассмотрен способ сварки трением с перемешиванием титанового сплава Ti-6Al-4V толщиной 2,5 мм обратным нагревом (BNAFSW). Результаты показывают, что при обычной СТП непровары всегда появляются в нижней части шва, и их можно устранить только при скорости вращения 100 об/мин и скорости сварки 30 мм/мин. Метод обратного нагрева уменьшает градиент температуры, что способствует устранению непроваров. Максимальный предел прочности соединения BNAFSW достигает 958,45 МПа, что составляет 93,6% от основного материала.

В работе [6] оценивалось влияние частоты вращения инструмента на микроструктуру сварного шва при СТП листов Ti-6Al-4V толщиной 2 мм с применением инструмента из сплава на основе карбида вольфрама, с диаметром заплечика 15 мм, диаметром пина 6 мм и длиной пина 1,8 мм. Для предотвращения окисления применялся защитный газ аргон. Угол наклона инструмента составлял 3°. Частота вращения инструмента изменяли в диапазоне от 225 до 300 об/мин при постоянной скорости сварки 50 мм/мин.

Микроструктура зоны перемешивания имела неоднородное строение по толщине пластины из-за градиента температуры. Полностью пластинчатая структура наблюдалась около верхней поверхности, а полностью равноосная структура наблюдалась около нижней поверхности пластины.

При исследовании [7] параметров режимов при сварке образцов из сплава VT-20 толщиной 1,5 мм проводилось несколько экспериментов. Наилучшие результаты сварки с отсутствием непроваров в шве были получены при частоте вращения 1250 об/мин и скорости сварки 80 мм/мин и, соответственно при 1000 об/мин и 63 мм/мин. Для предотвращения окисления при сварке образцов в зону сварки осуществлялась подача аргона из сопла диаметром 5 мм со стороны отхода инструмента. Температура в процессе сварки составляла 800–1000 °С.

В табл. 2 приведены сводные данные по применяемым режимам сварки для титановых сплавов различной толщины, при которых не наблюдалось образование дефектов.

Из табл. 1 видно, что по данным различных исследований формирование бездефектных соединений возможно в широком диапазоне параметров режимов сварки, что затрудняет выбор конкретных режимов сварки для заготовок определенной толщины.

Таблица 2

Применяемые режимы сварки титановых сплавов методом СТП

Толщина свариваемых листов, мм	Частота вращения, об/мин	Скорость сварки, мм/мин	Источник
3	500	40, 200	[1]
2	700-1200	20, 30	[2]
2	400	50	[3]
17,7	200	1,47	[4]
2,5	200	30	[5]
2	225-300	50	[6]
1,5	1000, 1250	63, 80	[7]

Форма пина инструмента влияет на течение пластифицированного материала, микроструктуру и механические свойства сварного шва, сваренной трением с перемешиванием [7]. Результаты экспериментов показали, что надежные бездефектные соединения могут быть получены с использованием шести различных форм пина, таких как конический, цилиндрический, конический с резьбой, цилиндрический с резьбой, треугольный, квадратный, пятиугольный и шестиугольный, имеющие постоянный диаметр заплечика. Разработанный инструмент в работе [7] имел уникальную геометрию пина в форме тройко выпуклого усеченного тетраэдра.

Инструмент изготавливался из корбида вольфрама. В результате исследования было обнаружено, что соединения, выполненные с использованием пина инструмента в форме тройко выпуклого усеченного тетраэдра, привели к лучшим механическим свойствам по сравнению с другими формами инструмента.

При выборе материала инструмента при СТП необходимо учитывать теплофизические свойства свариваемых материалов. В работе [7] приведены рекомендации по выбору материала инструмента для СТП титановых сплавов. Для сварки титановых сплавов рекомендуется применять инструменты на основе вольфрама также комбинированные инструменты с пином из карбида вольфрама и заплечикам из быстрорежущей стали.

В табл. 3 приведены основные характеристики конструкции инструментов, применяемых для СТП титановых сплавов.

Таблица 3

Характеристики инструментов для сварки методом СТП

Толщина свариваемых листов, мм	Диаметр заплечика, мм	Диаметр пина, мм	Форма пина	Материал инструмента	Источник
2	14	1,75	Цилиндрическая	W-Re25%	[2]
2	15	6	Коническая	Карбид вольфрама	[6]
2	16	1,7	Трояковыпуклый усеченный тетраэдр	Карбид вольфрама	[7]
3	14	2,9	Цилиндрическая	Вольфрама-лантановый сплав	[1]

Из таблицы видно, что корреляция между толщиной свариваемых листов и геометрией применяемых инструментов отсутствует. Широкий диапазон геометрических размеров, применяемых в различных исследованиях инструментов для СТП затрудняет выбор конструкции инструмента для сварки заготовок определенной толщины.

Выводы

1. Большинство исследований по сварке трением с перемешиванием титановых сплавов посвящено оценке влияния режимов сварки на свойства и структуру сварных соединений. В публикациях различных авторов прочность соединений составила от 80 до 93% от прочности основного металла, при этом в некоторых случаях разрушение образцов при испытании на растяжение происходило по зоне термического влияния и по основному металлу.

2. Исследование микроструктуры показало, что структура сварного шва отличалась от структуры основного металла. Зона термического влияния имела более низкую твердость, чем основной металл, в то время как сварной шов является самой слабой частью соединения. Также для предотвращения окисления сварка выполнялась в среде аргона.

3. По данным различных исследований формирование бездефектных соединений возможно в широком диапазоне параметров режимов сварки, что затрудняет выбор конкретных режимов сварки для заготовок определенной толщины.

4. Широкий диапазон геометрических размеров, применяемых в различных исследованиях инструментов для СТП затрудняет выбор конструкции инструмента для сварки заготовок определенной толщины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P.M Machine a, I. Dinaharan b, J. David Raja Selvam a, D. G. Hutting c. Evolution of microstructure and mechanical characteristics of titanium Ti alloy welded with friction with mixing - 6Al - 4 V using lanthanum-tungsten tool // Material Characteristics №139. 2020. pp. 328-336.
2. Junping Li, Yifu Shen *, Ventao Hou, Yiming Qi. Friction welding with mixing of Ti-6Al-4V alloy: friction tool, microstructure and mechanical properties // Manufacturing Process Log №58. 2020. pp. 344–354.
3. Liu Hui-jie, ZHOU Li. Microstructural zones and tensile characteristics of the welded friction stirring joints made of titanium alloy TC4 // Transactions Nonferrous Metals Society of China №20 2010. pp. 1873-1878.
4. Salahudin Nimer a, Jennifer Walk b, Mark Zupan. Characterization of local properties of frictional welding with stirring Ti-5111 // Acta materiala №61. 2013. pp. 3050-3059
5. Shude Ji a, •, Zhengwei Li b, •, Yue Wang a, Ling Ma a. Formation of joints and mechanical properties of Ti obtained by friction welding with mixing with reverse heating - 6Al - Alloy 4V // Materials and Design №113 2017. pp. 37-46.
6. Sunguk Yun •, Rintaro Weji, Hidetoshi Fuji. Effect of rotation speed on microstructure and texture evolution in Ti friction welding with stirring - 6Al - Plates 4V // Characteristics of materials №106 2015. pp. 352-358.
7. И. К. Черных, Е. В. Васильев, И. Л. Чекалин, Е. В. Кривонос, Д. С. Макашин. Получение сварного соединения пластин из титановых сплавов методом сварки трением с перемешиванием.

Сафиуллин Р. Ш.

Safiullin R. Sh

safiullinrsh@yandex.ru

ООО «ГАЦ РБ», Уфа

Никитин В. В.

Nikitin V. V.

vladislav.n2010@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ СТП

EXPERIMENTAL STUDY OF THE CONDITIONS OF FORMATION OF WELDED JOINTS BY THE FST METHOD

Аннотация. В процессе экспериментальных исследований технологии сварки трением с перемешиванием (СТП) алюминиевого сплава АМг4 толщиной 6 мм был разработан инструмент для СТП, определены режимы сварки. Приведены рекомендации для дальнейших исследований сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов.

Abstract. In the process of experimental research of friction stir welding technology (FST) of aluminum alloy АМg4 with thickness of 6 mm the tool for FST was developed, welding modes were determined. Recommendations for further research of friction stir welding of aluminum alloys are given.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием; СТП; сварка алюминиевых сплавов, сварные соединения и конструкции, рабочий инструмент, режимы сварки, сварочное оборудование.

Key words: friction stir welding ; FSW; welding of aluminium alloys, welding joints and structures, working tools, welding modes, welding equipment.

Проблема сварки алюминиевых сплавов традиционными способами заключается в склонности металла шва к образованию различных дефектов: рыхлостей, цепочек пор в шве и у зоны сплавления, трещин в ЗТВ, оксидных включений [1, 2]. Одним из вариантов решения указанной проблемы является использование сравнительно нового сварочного процесса – сварки трением с перемешиванием (СТП), известного в России с 1967 года [3] и реализованного в Великобритании [4] в 1990-х годах в Технологическом институте сварки (TWI – Technological Welding Institute) [1].

Выполненные в последние годы исследования показали, что СТП является эффективным способом получения высококачественных соединений конструкций различной геометрии, включая листовые материалы, пространственные профильные конструкции, трубы, восстановления изношенных деталей, модифицирования и улучшения структуры материалов, заживления трещин и литейных дефектов.

Таким образом, СТП становится универсальной технологией, имеющей большие перспективы в различных отраслях производства [1]. По мнению

ведущих мировых экспертов, данный процесс является революционным в области сварки листовых материалов из легких сплавов (алюминиевых и магниевых).

Целью исследования является разработка инструмента и определение режимов, на которых образуется сварное соединение пластин из сплава АМг4 толщиной 6,0 мм.

Для осуществления процесса сварки использовался вертикальный консольно-фрезерный станок FSS-400 показанный на (рис. 1).



Рис. 1. Фрезерный станок FSS 400 [4]

Несмотря на большое количество патентов по СТП, а также большой объем исследований в области разработки инструментов, определенной методики по разработки инструмента нет. Основным требованием к конструкции инструмента является обеспечение нагрева металла в зоне сварки до пластического состояния, перемешивание его по всей толщине свариваемых кромок и перемещение в замкнутом объеме при избыточном давлении.

Для разработки сварочного инструмента необходимо определить следующие параметры: диаметр пина, длина пина, диаметр заплечика и материал инструмента.

В ходе литературного обзора удалось найти информацию рекомендательного характера по подбору некоторых параметров инструмента, необходимых для получения качественного сварного соединения листов из сплава АМг4 толщиной 6,0 мм [5, 6].

Заплечик отвечает за генерирование тепла и перемешивание верхних слоев металла. На основании литературных данных диаметр заплечика был принят равным 25 мм.

Пин отвечает за перемешивание металла по толщине (дробление оксидных пленок и их равномерное распределение в объеме, обеспечение

физического контакта, активацию поверхностей) свариваемых заготовок. Пин имеет форму усеченного конуса, для предотвращения его разрушения под действием касательных напряжений, возникающих в процессе сварки. Диаметр конуса приняли 6,0 мм. Угол наклона между осью и образующей 15° .

Инструмент для СТП работает в достаточно сложных условиях: при высокой температуре и значительных нагрузках, поэтому крайне важно правильно подобрать материал инструмента. Для данной конструкции была выбрана легированная сталь марки 20X13. Химический состав стали представлен в (табл. 1) [7].

Таблица 1

Химический состав стали марки 20X13 [7]

Примеси	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Fe
Содержание, %	0,16-0,25	До 0,6	До 0,6	До 0,6	До 0,025	До 0,03	12-14	~84

На основании указанных рекомендаций и нескольких экспериментов, был сконструирован инструмент для сварки трением с перемешиванием листов из сплава АМг4 толщиной 6,0 мм, представленный на рис. 2.



Рис. 2. Рабочий инструмент для СТП алюминия 6,0 мм

Основными параметрами инструмента для сварки алюминия толщиной 6,0 мм способом СТП являются: диаметр заплечика 25 мм, длина пина 6,0 мм, диаметр пина 6,0 мм.

Данным инструментом было выполнено ряд стыковых сварных соединений алюминиевых пластин толщиной 6,0 мм. Опробованные режимы сварки представлены в табл. 2.

Таблица 2

Режимы сварки

№	Частота вращения, об/мин	Скорость сварки, мм/мин	Результат сварки
1	1400	315	Формирование сварного шва не произошло, вследствие разрушения пина.
2	1400	80	Шов сформировался
3	1400	16	Шов сформировался
4	900	80	Шов сформировался
5	900	80	Шов сформировался

Сварное соединение, представленное на рис. 3, получено на режиме №5 (табл. 2): частота вращения инструмента $n=900$ об/мин, скорость сварки $v=80$ мм/мин, угол наклона инструмента в 1° , величина заглабления заплечика 0,43 мм.

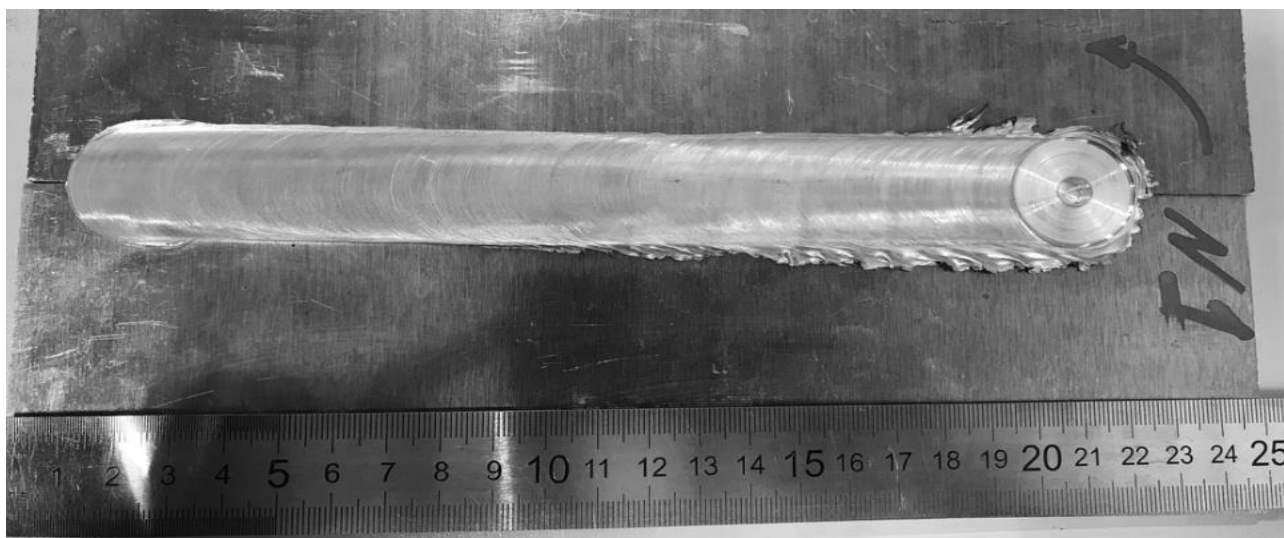


Рис. 3. Сварка алюминиевого листа толщиной 6,0 мм способом СТП

Из (рис. 3) видно, что инструмент обеспечивает необходимый разогрев металла, его пластическое деформирование и формирование сварного шва.

Выводы

1. На основании рекомендаций и экспериментальных данных, был сконструирован и изготовлен инструмент для сварки листов алюминиевых сплавов толщиной 6,0 мм со следующими параметрами: диаметр заплечика 25 мм, длина пина 6.0 мм, диаметр пина 6,0 мм.

2. В ходе исследования были получены сварные соединения из алюминиевого сплава АМг4 толщиной 6,0 мм в следующем диапазоне режимов: частота вращения – от 900 до 1400 об/мин, скорость сварки – от 16 до 80 мм/мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Людимский Ю.Г., Котлышев Р.Р. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов в строительстве // Научный вестник ВГАСУ. – 2010. - №3. – С. 15-22.

2. Aritoshi M. Friction stir welding of magnesium alloys sheets // Journal of the Japan Welding Society. – 2005. – 74, №3. – С. 18 – 23.

3. Муравьев В.И., Бахматов П.В., Мелкоступов К.А. К вопросу актуальности исследования сварки трением с перемешиванием конструкций из высокопрочных алюминиевых сплавов // Ученые записки. – 2010. - №11-2(2). - С. 110-125.

4. Технические характеристики фрезерного станка FSS-40

URL: http://stanki-katalog.ru/sprav_fss400.htm

5. Покляцкий А.Г., Ищенко А.Я., Подельников С.В. Влияние параметров процесса сварки трением с перемешиванием на формирование швов соединений алюминиевых сплавов толщиной 1,8...2,5мм // Автоматическая сварка.. – 2008. - №10. – С. 27–30.

6. Третьяк Н.Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов // Автоматическая сварка.. – 2002. - №2. – С. 12–21.

7. Марочник стали и сплавов

URL: http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1429

8. Сафин В.Н., Щуров И.А., Федоров В.Б. Отработка технологии сварки трением с перемешиванием для соединения труб из алюминиевых сплавов // Вестник ЮУрГУ– 2012. - №33. – С. 117–121.

Савичев М. П.
Savichev M. P.
savichevmax@mail.ru

Артемьев Р. Е.
Artemyev R. E.
aruslan98@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF ALUMINUM ALLOYS WELDS OBTAINED BY FRICTION STIR WELDING

***Аннотация.** В статье оцениваются возможности различных методов неразрушающего контроля для определения характерного для сварки трением с перемешиванием дефекта в виде «заглаженного непровара», применительно к стыковому соединению из алюминиевого сплава АМг4. С помощью металлографического исследования получена характерная морфология рассматриваемого дефекта. Для его идентификации также применялись такие методы, как цветная и люминесцентная дефектоскопия, рентгенографический контроль, цифровая радиография, ультразвуковой контроль и ультразвуковой контроль цифровокусируемыми антенными решетками, тепловизионный контроль. Получили исчерпывающую информацию о дефекте не только в местах его выхода на лицевую поверхность сварного соединения, но и в местах, заглаженных плечами инструмента, где визуально данный дефект не определяется. Проведено сравнение полученных результатов контроля.*

***Abstract.** In this article evaluates the possibilities of various methods of non-destructive testing for determining the defect characteristic of friction stir welding in the form of «wormhole», in relation to the weld made of aluminum alloy AMg4. The characteristic morphology of the defect under consideration is presented using metallographic analysis. To identify it, also such methods as color and luminescent flaw detection, X-ray inspection, digital radiography, ultrasonic inspection and ultrasonic inspection with digitally focused antenna arrays, and thermography control were used. We received comprehensive information about the defect not only in the places where it reaches the front surface of the welded joint, but also in the places smoothed by the tool shoulders, where this defect is not visually determined. The obtained control results are compared.*

***Ключевые слова:** неразрушающий контроль, сварка трением с перемешиванием, алюминиевые сплавы.*

***Keywords:** non-destructive testing, friction stir welding, aluminum alloys.*

Проблема сварки алюминиевых сплавов традиционным способом заключается в склонности металла шва с высокой теплопроводностью, коэффициентом теплового расширения в сравнительно широком диапазоне температуры застывания и растворимостью водорода в алюминии в расплавленном состоянии к усадке в два раза большей при затвердевании, разрушению в зонах теплового воздействия по стыкам деталей и образованию

дефектов: несплошностей, цепочек пор в шве и у зоны сплавления, трещин в высокотемпературной зоне термического влияния, включений прочной оксидной пленки и ферросплавов в шве. Одним из вариантов решения указанной проблемы является использование сравнительно нового сварочного процесса – сварки трением с перемешиванием (СТП). Схема СТП представлена на рис. 1.

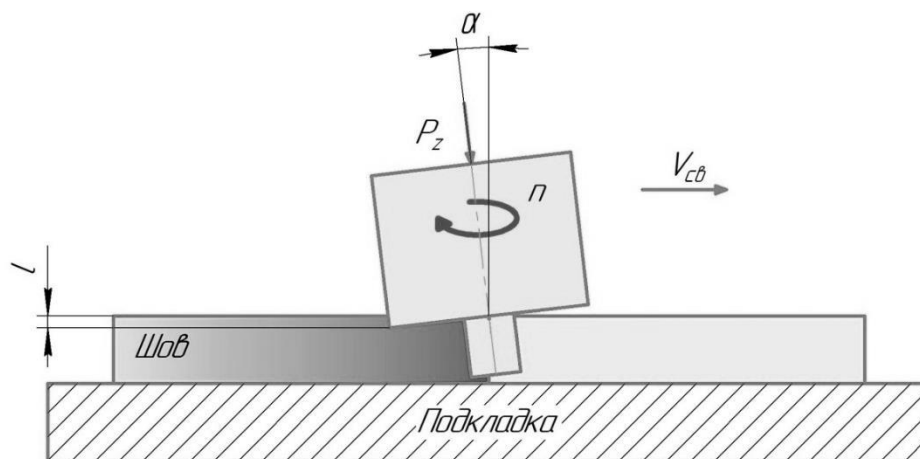


Рис. 1. Схема СТП

Преимуществом метода СТП по сравнению с обычными методами сварки можно считать отсутствие расплава при сварке трением и дефектов, обусловленных затвердеванием жидкого металла. Сварка трением с перемешиванием успешно применяется при соединении различных металлов и сплавов: алюминия, титана, меди и стали, но наибольшее распространение получила при сварке конструкций из алюминиевых и медных сплавов. За рубежом процесс сварки трением с перемешиванием в последние годы применяется в судостроении, вагоностроении, автомобилестроении, в ракетно-космической и авиационной отраслях. Постоянно растущий список пользователей СТП включает крупные компании и организации Boeing, SpaceX, Airbus, Eclipse Aviation Corporation, NASA, ВМС США, Mitsubishi, Kawasaki, Alstom LHB GmbH, а также другие промышленные предприятия в США, Европе, Китае и Японии. В авиационно-космической промышленности США с помощью сварки трением с перемешиванием изготавливаются крупные отсеки для ракет и спутников из высокопрочных алюминиевых сплавов. В авиационной промышленности применение СТП позволяет отказаться от большого количества заклепок и крепежей, что обеспечивает значительный рост производительности. Кроме того, повышается прочность соединений и усталостная прочность. В Европе производители железнодорожного подвижного состава используют этот процесс для изготовления крупных панелей, полученных сваркой алюминиевых профилей. В настоящее время ряд железнодорожных компаний – Alstom, CAF, Angel Trains, HSBC Rail и «RSSB»

участвуют в совместном проекте с целью расширить применение сварки трением с перемешиванием в железнодорожной отрасли.

В настоящее время наблюдается отставание России от ведущих мировых держав в освоении технологии сварки трением с перемешиванием в отраслях промышленности. В России наиболее успешно данный метод применяется на ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель», где метод СТП используется при изготовлении автомобильных полуприцепов-цистерн из алюминиевого сплава. Разработка и внедрение СТП корпусных конструкций ракет-носителей из алюминиевых сплавов ведется в Государственном космическом научно-производственном центре имени М. В.Хруничева., в Пермском национальном исследовательском политехническом [2] и Донском государственном техническом университетах [4]. ОАО РКК «Энергия» [1].

Вместе с тем в настоящее время в России отсутствуют нормативные документы и нет однозначных критериев образования качественного сварного соединения при СТП. Для формулирования таких критериев необходимо всестороннее изучение механизмов формирования структуры материала, в том числе структурных неоднородностей и несплошностей, в зоне сварного соединения. Также в ходе литературного обзора выяснилось, что и выбор методов НК существенно различается. Целью данного исследования является практическая проверка эффективности различных методов НК для оценки качества сварных соединений алюминиевых сплавов, полученных СТП.

В настоящее время на кафедре СМСиКК проводятся работы по разработке технологии СТП алюминиевых сплавов с использованием, переоборудованного под СТП вертикально-фрезерного станка SSS-400. Принятое обозначение опытных образцов приведено на рис. 1. В результате работ получены образцы листа АМг4 толщиной 5, 6 и 10 мм (рис. 2), годных по результатам визуально-измерительного контроля, но имеющие непровар в виде туннеля, идущего вдоль сварной линии стыка. Дефект во многих источниках принято называть «заглаженный» непровар.

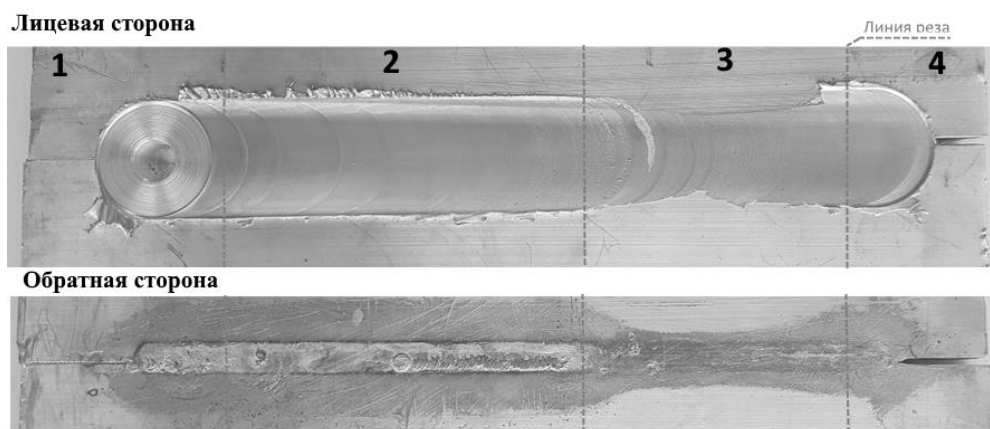


Рис. 2. Образец №38 из сплава АМг5 толщиной 10 мм, полученный СТП: 1 – начало шва; 2 – участок с «правильной» шириной шва равной диаметру «заплетика» инструмента; 3 – участок недостаточной ширины шва; 4 – конец шва

Для полученных образцов опробованы часть методов контроля качества, выбранных в ходе литературного обзора [3, 5, 6]: ВИК, капиллярный контроль двумя методами: цветная дефектоскопия (ЦМ) и люминесцентный контроль (ЛЮМ-1ОВ), радиографический контроль (РК), цифровая радиография (ЦРК) и тепловизионный контроль (ТК).

Для проведения ЦМ использовался набор дефектоскопических материалов «Sherwin» и контрольный образец по 2 классу чувствительности ГОСТ 18442-80 с раскрытием дефекта 2,3 мкм. Контроль проводился в соответствии с инструкцией производителя, указанной на наборе: 1) очистка путем нанесения очистителя DR-60; 2) через 30 секунд после нанесения сушка поверхности сухой тканью; 3) нанесение пенетранта DP-55 на поверхность ровным слоем; 4) через 10 мин. удалить излишки пенетранта с поверхности до исчезновения розового фона с помощью сухой ткани или ткани, смоченной очистителем. 5) сушка поверхности; 6) нанесение проявителя DP-100.

Для проведения ЛЮМ1-ОВ использовался набор дефектоскопических материалов, рекомендованный для особо ответственных деталей: очиститель ОЖ-1, люминесцентная жидкость ЛЖ-6А, проявитель ПР-1; а также контрольный образец по 1 классу чувствительности ГОСТ 18442-80 с раскрытием дефекта 0,12...0,5 мкм. Контроль проводился в соответствии с инструкцией отраслевого авиационного стандарта ОСТ 1 90282-79: 1) очистка 5 мин в ацетоне; 2) очистка 5 мин. в бензине «Нефрас»; 3) сушка на воздухе 1 час; 3) окунание в люминесцентную жидкость ЛЖ-6А на 15 мин; 4) удаление излишек пенетранта под струей воды с использованием душевой насадки; 5) очистка в жидкости ОЖ-1 40 сек. с непрерывным перемешиванием; 6) проверка отсутствия «фона» путем просмотра очищенного образца в ультрафиолетовом облучении; 7) сушка не более 5 мин., образец при этом не должен полностью высохнуть; 6) нанесение проявителя ПР-1 с использованием краскопульта давлением 2...4 атм.; 7) сушка не менее 1 часа; 8) осмотр в ультрафиолетовом излучении интенсивностью с использованием фонарика «Микрокон УФ-102».

РК проводился по 1 классу чувствительности ГОСТ 7512 с использованием источника излучения постоянного действия «Raycraft CP-250» на высококонтрастную пленку Agfa D4 в вакуумной упаковке со свинцовыми усиливающими экранами. Режимы просвечивания: фокусное расстояние $f=1000$ мм; время экспозиции 18 сек (0,3 мин). Результаты РК приведены на рис.3.



Рис. 3. Радиографический контроль темплета 2 и 3

ЦРК проводился в соответствии с ГОСТ ISO 17636-2— 2017 с использованием эталона типа «дуплекс» на комплексе «Цифракон» с применением импульсного аппарата «Арина 7» на режиме: время экспозиции 5 сек, мощность 20%, 1 кадр. Результаты ЦРК приведены на рис.4.

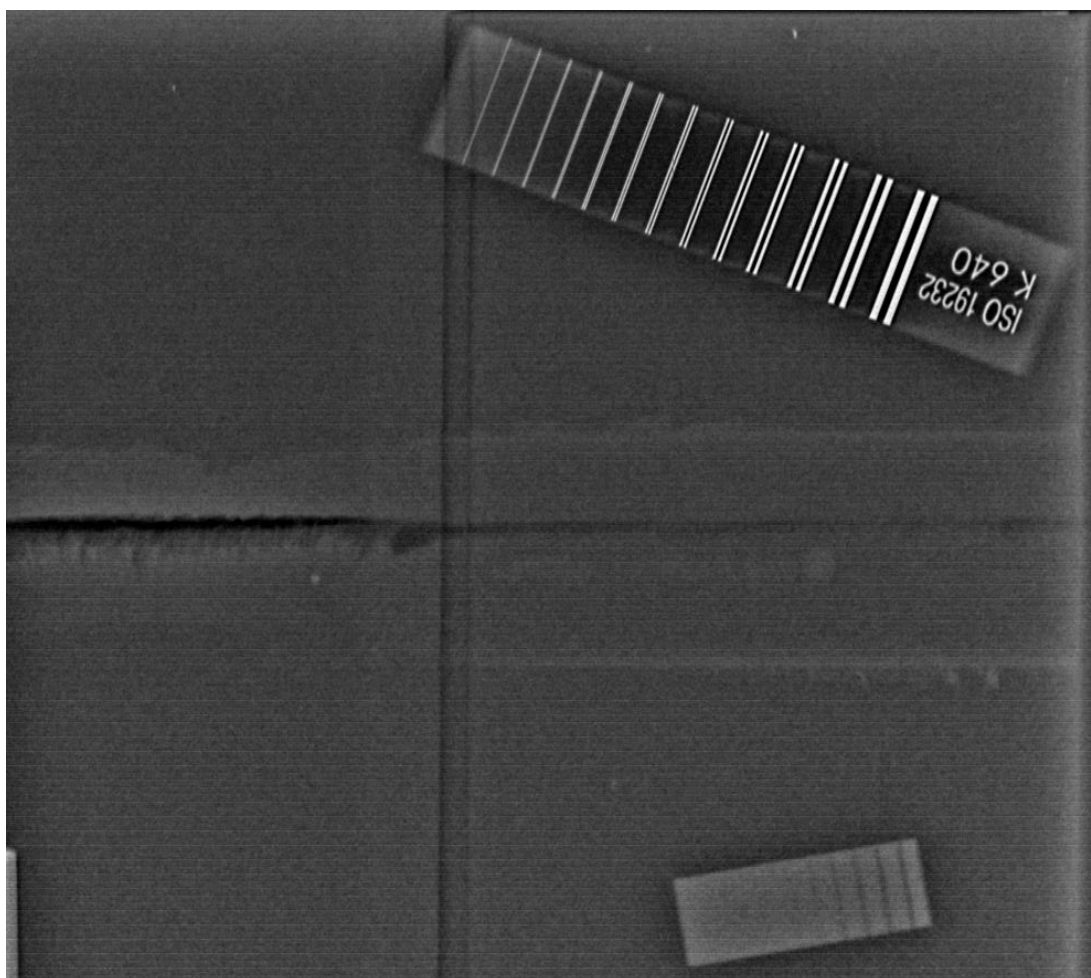


Рис. 4. Компьютерная радиография «Цифракон» темплета 2 и 3

Ультразвуковой контроль («классический» и цифروفкусированными антенными решетками) проводился на дефектоскопе А1550 «Introvisor» с настройкой по настроечному образцу (НО), выполненного на заказ из исследуемого материала, с зарубкой 2×1. Результаты УЗК приведены на рис. 5.

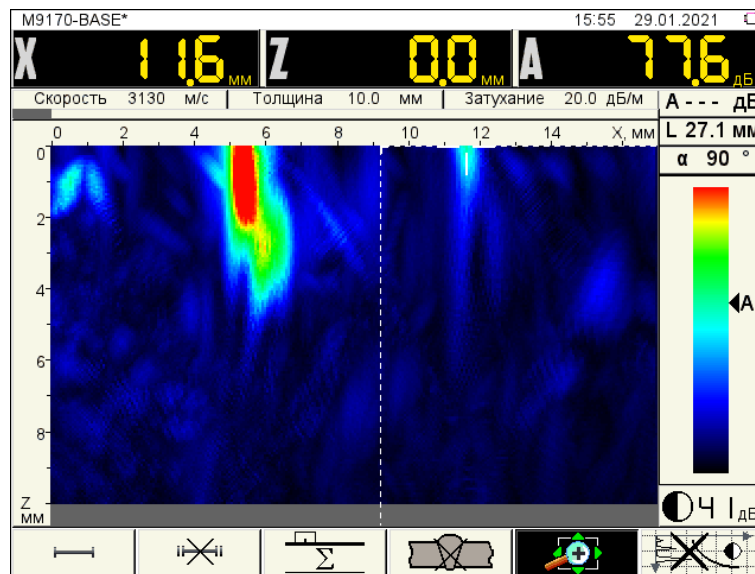


Рис. 5. Результаты УЗК

Тепловизионный контроль проводился на тепловизоре Testo 868. Образцы перед контролем нагревались в камерной печи до 300 °С. Для настройки коэффициента отражения использовался контактный термометр Testo 905-T2. УЗК с цифровой фокусировкой – хорошо различим непровар на как на 3, так и на 3 темплете. Результаты ТК приведены на рис. 6 и 7.

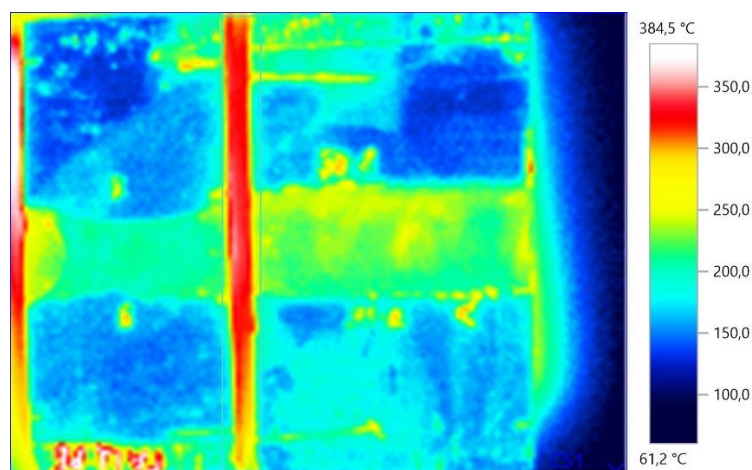


Рис. 6. Тепловизионный контроль темплет 2 и 3 (лицевая сторона)

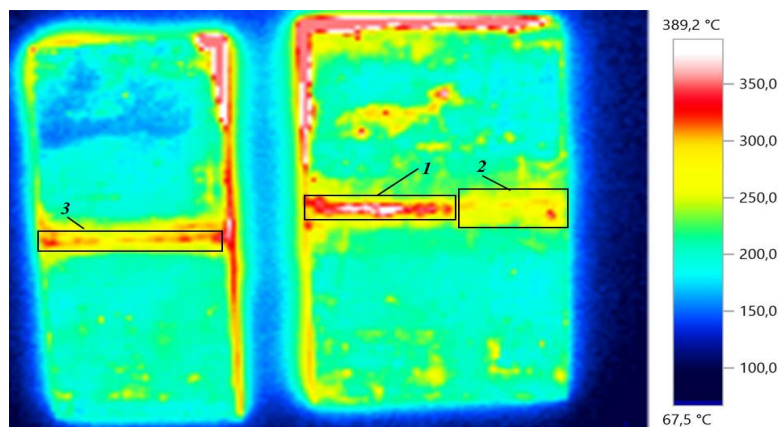


Рис. 7. Тепловизионный контроль темплета 2 и 3 (обратная сторона):
 1 – дефект поверхности с большой шероховатостью на темплете №2;
 2 – бездефектная область темплета №2; 3 – Темплет №3 с заглаженным непроваром

Образец был разрезан на три части для проведения металлографии. Для шлифования использовались зернистые шкурки со следующей последовательностью зернистости: 120, 320, 860, 1200, 1500, 2000. При переходе на более мелкую зернистость шкурки изменялось направление обработки поверхности на 90°. Затем проводилась полировка образцов на специальном полировальном станке, диск которого обтянут бархатом. Полировальный диск смачивался алмазной суспензией. Для травления образцов использовался реактив Келлера. Результаты контроля представлены на рис. 8.

Темплеты 3, 4 имеют дефект в виде заглаженного непровара. Характерная морфология рассматриваемого дефекта была изучена при металлографическом исследовании. Макрошлиф темплета №4 представлен на рис. 8.

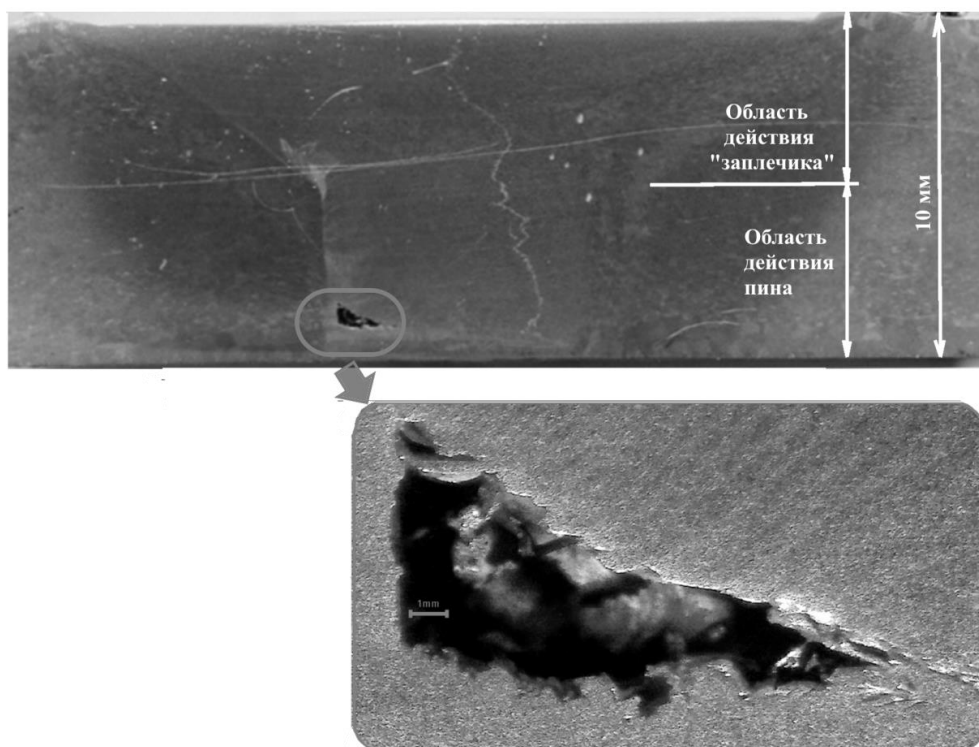


Рис. 8. Макрошлиф темплета №4 с дефектом типа «заглаженный непровар»

Дефект ЗН присутствует даже на 2 темплете. Хотя ТК и УЗК его не выявляют (рис. 9).

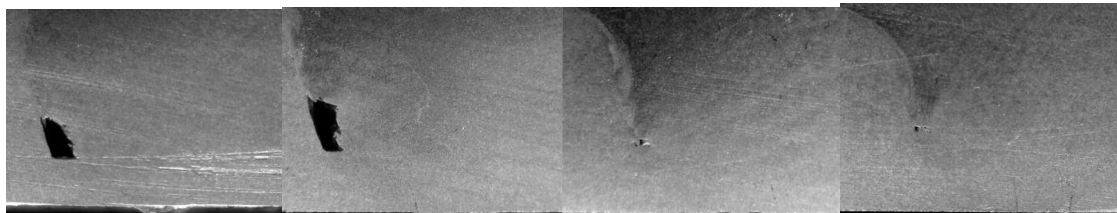


Рис. 9. Макрошлиф темплета №2 с дефектом типа «заглаженный непровар»

Выводы

1. Радиографический контроль позволил выявить только непровар в корне. Требуется дальнейшая проверка выявляемости дефектов шва, типичных для СТП (несплавлений по кромке и пр.), путем сравнения полученных радиографических пленок с данными металлографических исследований.

2. В ходе дальнейших исследований необходимо опробовать другие вышеупомянутых методов НК: УЗК с ФАР, ВК и ТК. После получения достаточного количества сварных образцов предполагается проведение РОС-анализа эффективности различных методов неразрушающего контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колубаев Е.А. Особенности формирования структуры сварного соединения, полученного сваркой трением с перемешиванием // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – С. 887-893.

2. Рубцов В.Е., Тарасов С.Ю., Колубаев Е.А., Гнусов С.Ф. Использование методов неразрушающего контроля для диагностики дефектов в сварных швах, полученных сваркой трением с перемешиванием // Контроль. Диагностика. 2015. № 2. с. 51-58.

3. Рубцов В.Е., Колубаев Е.А., Тарасов С.Ю. Методика ультразвукового контроля сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием, с использованием технологии фазированной антенной решетки // Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия. Современные проблемы науки и образования. 2014. №6. с. 229.

4. Филиппов А.В., Тарасов С.Ю., Колубаев Е.А., Рубцов В.Е. Определение дефекта в виде заглаженного непровара после сварки трением с перемешиванием при неразрушающем контроле // Фундаментальные исследования. 2015. № 6-2. с. 296-300.

5. Hossein Taheri, Margaret Kilpatrick, Matthew Norvalls, Warren J. Harper, Lucas W. Koester, Timothy Bigelow and Leonard J. Bond. Investigation of Nondestructive Testing Methods for Friction Stir Welding // Iowa state university. 2019. №9. с. 5-29.

6. Кузин А.И., Егоров А.В., Мазуркевич А.Н., Ахмедов Ф.А., Кинжагулов И.Ю., Степанова К.А., Ермаков В.А., Сухоруков К.А. Оценка применимости метода акустической эмиссии для контроля качества соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием // Сварочное производство. 2020. №4. с. 41-47.

Савичев М. П.
Savichev M. P.
savichevmax@mail.ru

Ситдикова А. Ф.
Sitdikova A. F.
nastya-sitdikova@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕДНЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF WELDED JOINTS OF COPPER ALLOYS OBTAINED BY FRICTION STIR WELDING

Аннотация. Предпринята попытка изучения возможностей различных методов неразрушающей и разрушающей дефектоскопии для швов, полученных методом сварки трением с перемешиванием (СТП) на медных сплавах. Данный метод сварки не предполагает плавления металла в зоне сварки и поэтому имеет свои типы дефектов. В результате были получены данные о типах дефектов и местах их залегания, которые выявляются отдельными методами. Проведено сравнение результатов по применяемым методам, которое подтверждает вывод о необходимости использования комплексного подхода к дефектоскопии СТП-соединений.

Abstract. An attempt was made to study the possibilities of non-destructive and destructive flaw detection methods for welds obtained by friction stir welding (FSW) on copper alloys. This welding method does not imply melting of the metal in the welding zone and therefore has its own types of defects. As a result, data were obtained on the types of defects and their locations, which are identified by separate individual ones. Comparison of the results for the applied methods is carried out, which confirms the need to use an integrated approach to flaw detection of FSW joints.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, СТП, сварка меди, медь, неразрушающий контроль, разрушающий контроль.

Keywords: friction stir welding, FSW, welding of copper, copper, non-destructive testing, destructive testing.

Сварка трением с перемешиванием (СТП) – это относительно новый процесс соединения, который в настоящее время вызывает значительный интерес. Этот процесс является твердотельным по своей природе и основан на локальной ковке зоны сварного шва для создания соединения [1].

В России СТП активно применяется при разработке принципиально новых образцов техники и прорывных промышленных технологий: автомобильных полуприцепов, железнодорожных вагонов и цистерн, пешеходных мостов и др. Предложены технологии и оборудование для неразрушающего контроля (НК), сварные швы которых выполнены СТП.

СТП является одной из разновидностей сварки трением, отличительная черта по сравнению с другими методами состоит в том, что во время процесса движется не свариваемая заготовка, а инструмент. Основные элементы инструмента – пин и заплечник. Медь и ее сплавы широко используются в промышленности благодаря их превосходной электрической и теплопроводности, хорошей прочности, устойчивости к коррозии и усталости. Схема СТП представлена на рис. 1.

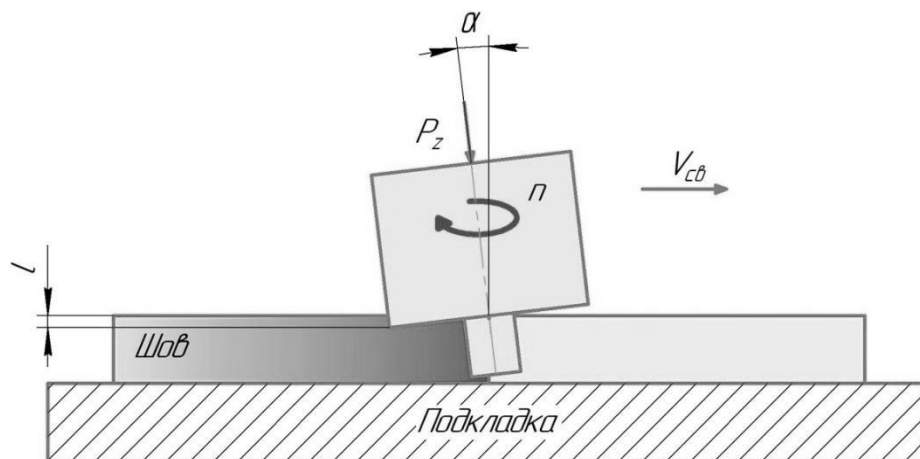


Рис. 1. Схема СТП

Однако сварка меди обычными методами сварки плавлением обычно затруднена из-за ее высокой теплопроводности, которая в 10–100 раз выше, чем у сталей. Следовательно, тепловложение, необходимое для сварки медных сплавов, намного выше, что приводит к довольно низким скоростям сварки. Более высокая теплопроводность и тепловое расширение меди приводят к большей деформации сварного шва, чем сталь.

При дуговой сварке меди и медных сплавов кислород выделяется на границах зерен металла. Это может привести к охрупчиванию сварного шва. Осадочно-твердеющие медные сплавы могут терять свои легирующие элементы из-за окисления во время сварки плавлением, что снижает их прочность. Медные сварные швы часто страдают от неплавления из-за высокой теплопроводности меди, поскольку она снижает концентрацию тепла, необходимого для плавления критической массы металла, и обеспечивает полное заполнение сварочной полости [2].

В настоящее время на кафедре современных методов сварки и неразрушающего контроля конструкций (СМСиКК) ФГБОУ ВО УГАТУ проводятся опытные работы по разработке технологии СТП меди. Из-за отсутствия российских нормативных документов, регламентирующих СТП, одной из ключевых задач является выбор технологии оценки качества полученных соединений.

Целью исследования является практическая проверка эффективности различных методов НК, взятых с зарубежных статей для оценки качества сварных соединений медных сплавов, полученных СТП.

Методика проведения исследования

На момент публикации на переоборудованном под СТП фрезерном станке 6В75 был получен пробный образец медного сплава толщиной 5 мм на стальной подкладке при частоте вращения инструмента $n=900$ об/мин и скорости $v=80$ мм/мин, результат образца представлен на рис. 2.

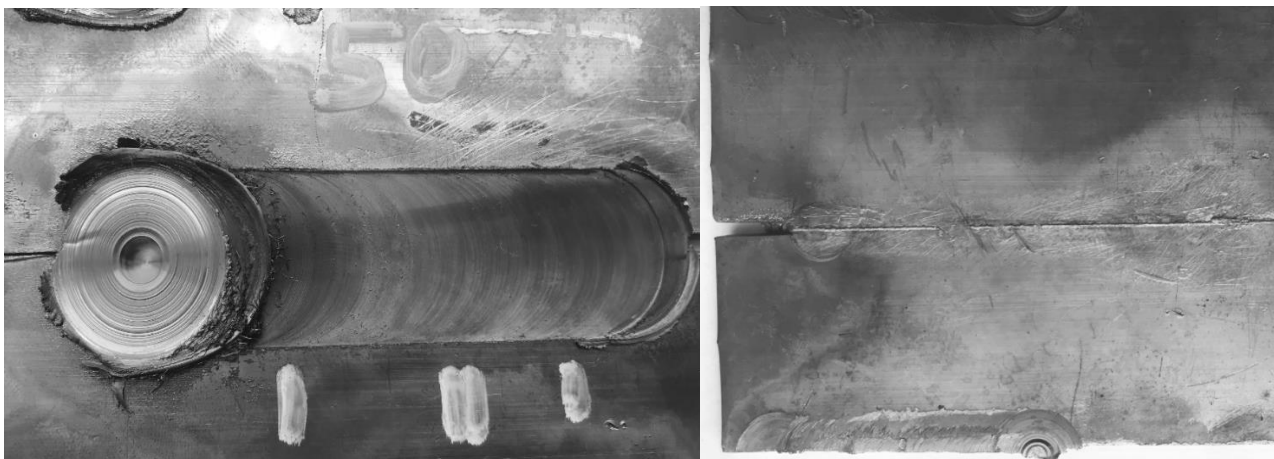
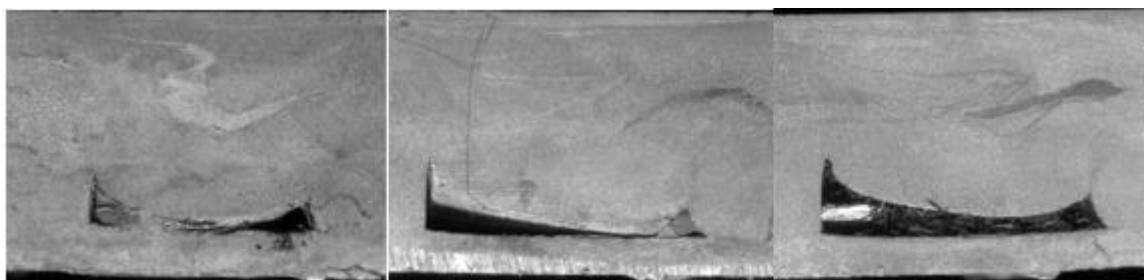


Рис. 2. Образец полученный СТП

Для полученного образца опробованы часть методов контроля качества, выбранных в ходе литературного обзора статей [3,4,5]: ВИК, капиллярный контроль двумя методами: цветная дефектоскопия (ЦМ), люминесцентный контроль (ЛЮМ-10В), радиографический контроль (РК) и цифровая радиография (ЦРК). Ввиду отсутствия требований нормативной документации к размерам сварных швов, выполненных СТП, на этапе ВИК проводилась проверка отсутствия наружных дефектов.

Образец был разрезан на три части для проведения металлографии. Для шлифования использовались зернистые шкурки со следующей последовательностью зернистости: 120, 320, 860, 1200, 1500, 2000. При переходе на более мелкую зернистость шкурки изменялось направление обработки поверхности на 90° . Затем проводилась полировка образцов на специальном полировальном станке, диск которого обтянут бархатом. Полировальный диск смачивался алмазной суспензией. Для травления образцов использовался реактив Марбле. Результаты контроля представлены на рис. 3.



а) б) в)
 Рис. 3. Макрошлифы образца, полученного способом СТП меди 5 мм
 а – начало шва, б – середина шва, в – конец шва

В результате металлографии был выявлен дефект – незаглаженный непровар по всей длине шва. По снимкам микрошлифов было определено что непровар возрастал от начала шва и до его конца. Это объясняется неправильным подбором параметров сварки и формы инструмента.

РК проводился по 1 классу чувствительности ГОСТ 7512 с использованием источника излучения постоянного действия «Raycraft CP-250» на высококонтрастную пленку Agfa D4 в вакуумной упаковке со свинцовыми усиливающими экранами. Режимы просвечивания: фокусное расстояние $f=500$ мм; время экспозиции 18 сек (0,3 мин). Результаты РК представлены на рис. 4.



Рис. 4. Рентген снимок образца, полученного способом СТП меди 5 мм

ЦРК проводился в соответствии с ГОСТ ISO 17636-2 — 2017 с использованием эталоне типа «дуплекс» на комплексе «Цифракон» с применением импульсного аппарата «Арина 7» на режиме: время экспозиции 5 сек, мощность 20%, 1 кадр. Результат ЦРК представлен на рис. 5.

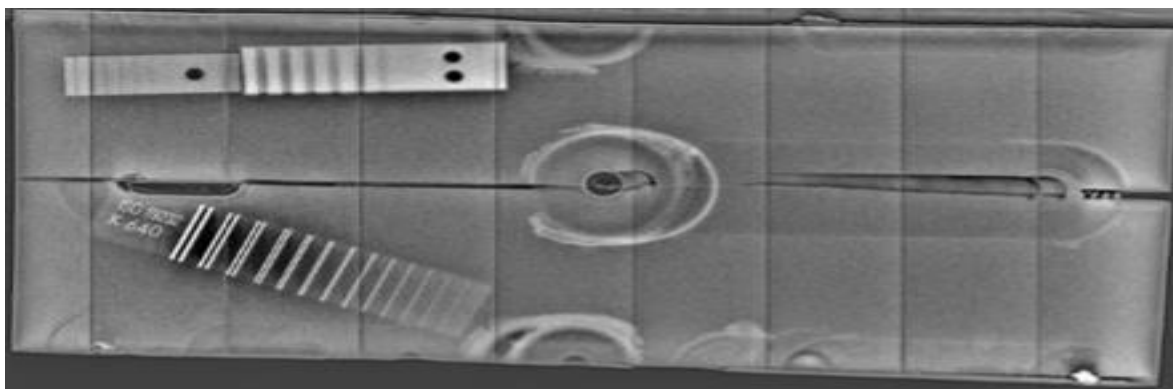


Рис. 5. Цифровой снимок образца, полученного способом СТП меди 5 мм

Для проведения ЦМ использовался набор дефектоскопических материалов «Sherwin» и контрольный образец по 2 классу чувствительности ГОСТ 18442-80 с раскрытием дефекта 2,3 мкм. Контроль проводился в соответствии с инструкцией производителя, указанной на наборе: 1) очистка путем нанесения очистителя DR-60; 2) через 30 секунд после нанесения сушка поверхности сухой тканью; 3) нанесение пенетранта DP-55 на поверхность ровным слоем; 4) через 10 мин. удалить излишки пенетранта с поверхности до исчезновения розового фона с помощью сухой ткани или ткани, смоченной очистителем. 5) сушка поверхности; 6) нанесение проявителя DP-100. Результаты ЦМ представлены на рис. 6.

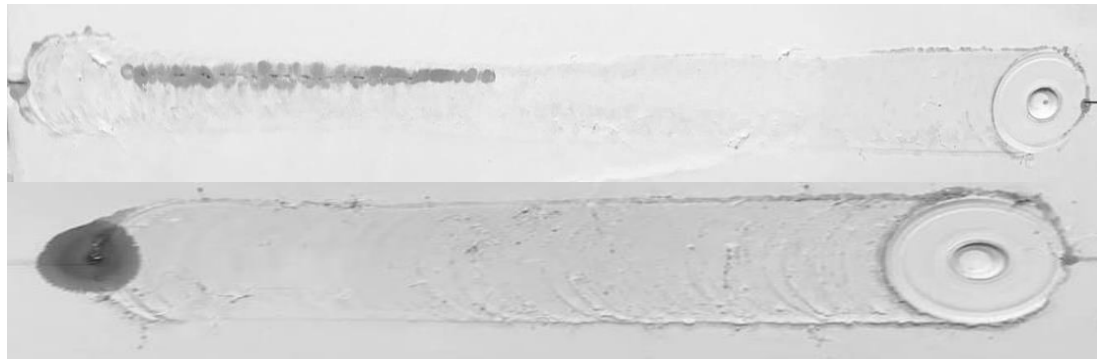


Рис. 6. Результат ЦМ

Для проведения ЛЮМ1-ОВ использовался набор дефектоскопических материалов, рекомендованный для особо ответственных деталей: очиститель ОЖ-1, люминесцентная жидкость ЛЖ-6А, проявитель ПР-1; а также контрольный образец по 1 классу чувствительности ГОСТ 18442-80 с раскрытием дефекта 0,12...0,5 мкм. Контроль проводился в соответствии с инструкцией отраслевого авиационного стандарта ОСТ 1 90282-79: 1) очистка 5 мин в ацетоне; 2) очистка 5 мин. в бензине «Нефрас»; 3) сушка на воздухе 1 час; 3) окунание в люминесцентную жидкость ЛЖ-6А на 15 мин; 4) удаление излишек пенетранта под струей воды с использованием душевой насадки; 5) очистка в жидкости ОЖ-1 40 сек. с непрерывным перемешиванием; 6) проверка отсутствия «фона» путем просмотра очищенного образца в ультрафиолетовом

облучении; 7) сушка не более 5 мин., образец при этом не должен полностью высохнуть; 6) нанесение проявителя ПР-1 с использованием краскопульты давлением 2...4 атм.; 7) сушка не менее 1 часа; 8) осмотр в ультрафиолетовом излучении интенсивностью с использованием фонарика «Микрокон УФ-102». Результаты ЛЮМ1-ОВ представлены на рис. 7.

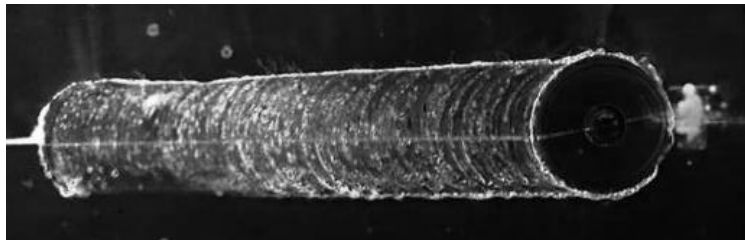


Рис. 7. Результаты ЛЮМ1-ОВ

Выводы

1. ЦМ и ЛЮМ-1ОВ позволяет обнаружить дефекты, выходящие на лицевую поверхность и непровары, выходящие на поверхность со стороны корня. Однако с лицевой стороны контроль затруднителен из-за шероховатости лицевой поверхности шва. Особенно это критично для ЛЮМ-1ОВ, обладающим большей чувствительностью контроля и большими требованиями к подготовке поверхности.

2. РК и ЦРК позволяет достаточно точно определять наличие и расположение непроваров сварных швов, полученных СТП. Данные методы рекомендуются как основные методы обеспечения качества наряду с металлографическими исследованиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штрикман М.М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений. Ч. 3. Промышленное применение процесса СТП. // Сварочное производство. 2007. № 11.
2. K. Nakata. Friction stir welding of copper and copper alloys // Welding International. 2005. № 19 (12). pp. 929-933.
3. Филиппов А.В., Тарасов С.Ю., Колубаев Е.А., Рубцов В.Е. // Определение дефекта в виде заглаженного непровара после сварки трением с перемешиванием при неразрушающем контроле. // Фундаментальные исследования. 2015. №6.
4. Е. В. Кривонос И. К.Черных Е. Н. Матузко Е. В. Васильев. //Анализ дефектов, возникающих при сварке трением с перемешиванием. // Омский научный вестник. 2017. №2.
5. Hossein Taheri, Margaret Kilpatrick, Matthew Norvalls 3, Warren J. Harper, Lucas W. Koester, Timothy Bigelow, and Leonard J. Bond. // Investigation of Nondestructive Testing Methods for Friction Stir Welding. // Metals. 2019. №9.

Муругова О. В.
Murugova O. V.
murugova.oxan@mail.ru
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический
университет», Уфа

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОСЛЕСВАРОЧНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РОТОРА ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ВЖ-172

CONSTRUCTION OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE POST- WELDING STRESS-DEFORMED STATE OF THE ROTOR WELDED JOINTS FROM HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOY VZH-172

Аннотация. В данной работе рассматривается поэтапное построение термомодеформационной модели состояния цилиндрических образцов из жаропрочного железоникелевого сплава ВЖ172 после ротационной сварки трением. Моделирование проводится в два больших этапа – моделирование нестационарного температурного поля во время и после сварки и моделирование деформаций, полученных в ходе температурного анализа. Каждый из этапов содержит в себе по 4 подэтапа: имитация начальной стадии нагрева, имитация квазистационарной по температуре стадии сварки, остывание образцов, дальнейшее остывание после извлечения из сварочной машины.

Abstract. This paper considers the step-by-step construction of a thermal deformation model of the state of cylindrical specimens made of heat-resistant iron-nickel alloy VZh172 after rotational friction welding. Simulation is carried out in two large stages - simulation of a non-stationary temperature field during and after welding and simulation of deformations obtained in the course of temperature analysis. Each of the stages contains 4 substages: imitation of the initial stage of heating, imitation of the welding stage quasi-stationary in temperature, cooling of the samples, further cooling after removal from the welding machine.

Ключевые слова: математическое моделирование, ротационная сварка трением, ВЖ172, напряженно-деформированная состояние, температурные поля.

Keywords: mathematical modeling, rotary friction welding, VZh172, stress-strain state, temperature fields.

Введение

Ротационная сварка трением – сравнительно новый сварочный процесс, предложенный в 1991 году в Технологическом институте сварки (TWI - Technological Welding Institute) в Великобритании. Впервые этот вид сварки был применен в промышленности для сварки алюминиевых сплавов (серия 6000) на предприятии SARA (Швеция) и на судовой верфи Marine Aluminium (Норвегия). Позже РСТ стала применяться в автомобильной промышленности в Австралии, Швеции и Норвегии также для сварки алюминиевых сплавов серии 6000 [2].

На данном этапе развития технологии ротационной сварки трением считаются подходящими для соединения суперсплавов на основе Ni, поскольку

можно избежать дефектов, связанных с затвердеванием, присущих сварке плавлением [3], в данной работе предлагается рассмотреть сплав ВЖ-172.

Рассматриваемый сплав ВЖ-172 предназначен для применения в качестве материала для корпусов камеры сгорания и турбины других нагруженных деталей и узлов статора горячего тракта ГТД, работающих при температуре до 900 °С. Кроме того, сплав ВЖ172 может быть применен в качестве материала дисков сварного ротора КВД и вальцованных лопаток КВД с температурой работы до 750 °С.

На основе данных работы [4] предлагаются следующие режимы сварки (табл. 1):

Таблица 1

Режимы сварки

Технологический вариант	σ_B^{20} , МПа	σ_B^{750} , МПа	КСУ ²⁰ кДж/м ²	$K = \sigma_{св.в.} / \sigma_{о.м.}$
Сварка + закалка + старение	130	850	380	>0,8-0,95

В рамках данной работы предлагается рассмотреть поведение сплава ВЖ-172 при ротационной сварке трением сварки на основе математического моделирования.

Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния зоны термомеханического влияния (ЗТМВ) сварных цилиндрических образцов из сплава ВЖ172 при инерционной сварке трением выполнялось в пакете программ ANSYS/Multiphysics.

Специфика моделирования напряженно-деформируемого состояния (НДС) в ANSYS требует создания двух математических моделей – тепловой и деформационной.

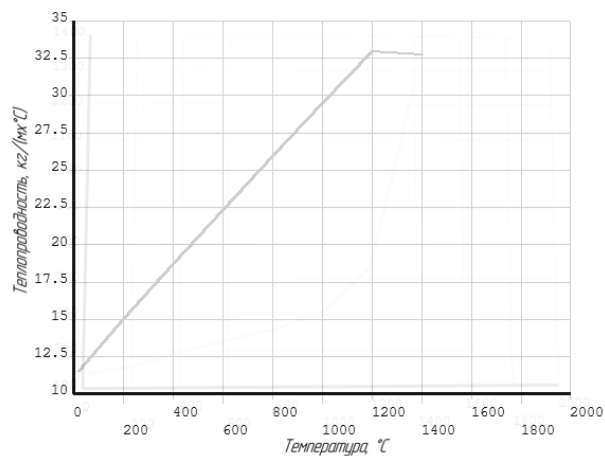
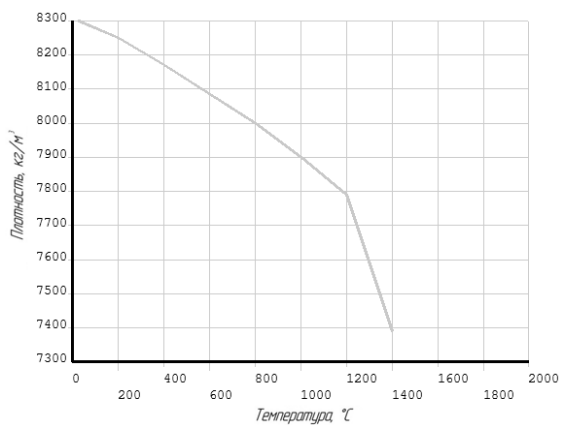
Описание тепловой модели

Для описания температурного поля $T(x, y, z, t)$ в 3D-модели цилиндрических образцов использовали дифференциальное нелинейное уравнение теплопроводности (1):

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_X \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_Y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_Z \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

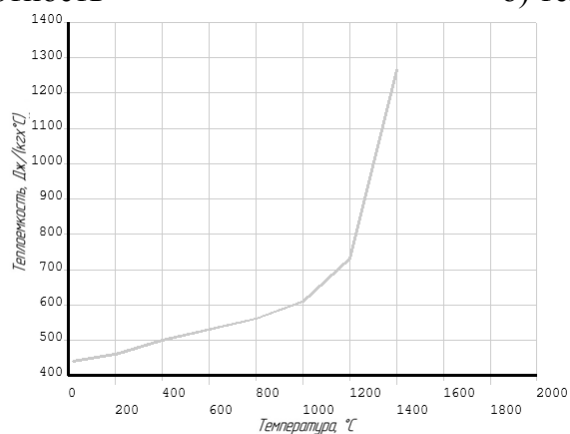
где $\rho(T)$ – плотность, кг/м³; $c(T)$ – теплоемкость, Дж/кг·°С; $\lambda(T)$ – теплопроводность, Вт/м·°С.

Зависимость теплофизических свойств сплава ВЖ-172 от температуры $\rho(T)$, $\lambda(T)$ и $c(T)$ принимали по результатам моделирования в программе OPENCALTHAD по усредненному химическому составу (рис. 1).



а) плотность

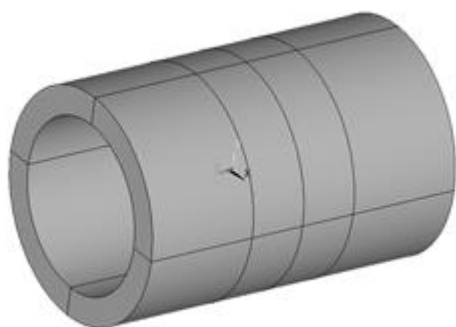
б) теплопроводность



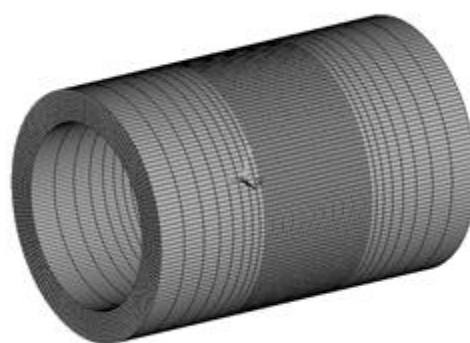
в) теплоемкость

Рис. 1. Теплофизические свойства ВЖ-172, принятые при моделировании

Расчетная 3D-модель и конечно-элементная сетка представлены на рис. 2. Размер заготовки наружным диаметром – 80мм, внутренним диаметром – 60 мм, длина – по 70 мм каждая заготовка, из них 20 мм – вылет.



а)



б)

Рис. 2. Расчетная 3D-модель (а) и конечно-элементная сетка (б)

Конечно-элементная сетка была сделана из элементов разного размера для уменьшения времени расчета (мелкая в ответственных зонах, более крупная в остальных). Размер конечных элементов вблизи стыка – 1 мм и постоянный по ширине вылета 20 мм, размер конечных элементов по торцам – 5 мм. Тип элементов – 8-узловой гексаэдрический (SOLID 70). Количество конечных элементов по толщине – 10 (рис. 3).

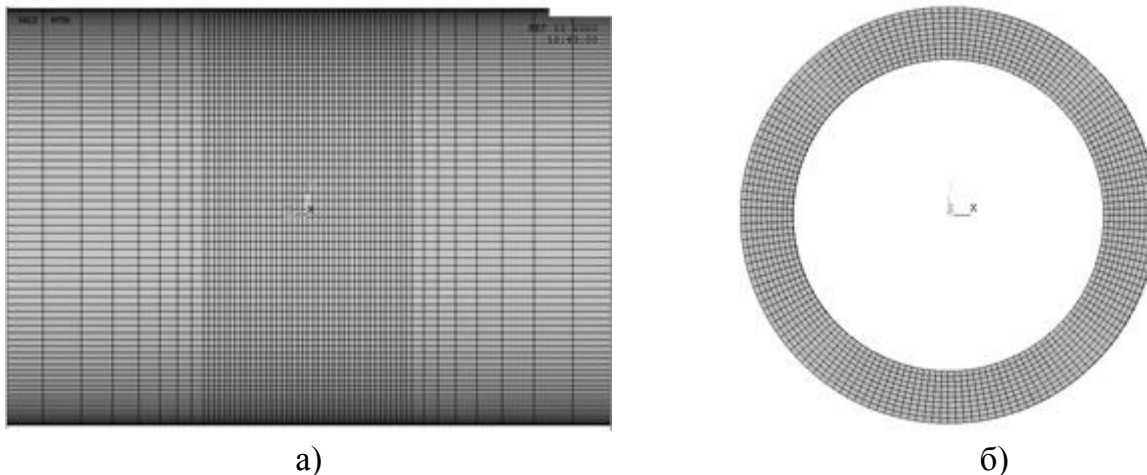


Рис. 3. Локальное распределение конечных элементов в области стыка (а) и распределение конечных элементов по толщине (б)

Граничные условия теплоотдачи задавались с внешних и внутренних поверхностей цилиндрической заготовки.

Коэффициент конвективной теплоотдачи определяли по данным работы [1] по следующей зависимости: $6,16 + 0,04T - 2,857 \cdot 10^{-2} \cdot T^2$.

Начальная температура T и температура T_c при расчетах принималась равной 23°C . При отсутствии экспериментальных данных в расчетах принималась максимальная температура нагрева в диапазоне $1240-1270^\circ\text{C}$, что примерно соответствует $0,9T_{\text{пл}}$ сплава и максимальной ожидаемой температуре в зоне термомеханического влияния (ЗМТВ).

Моделирование температурного поля от ротационной сварки трением будет проводиться в четыре этапа:

Этап 1. Имитация начальной стадии нагрева – нагрев постоянным тепловым потоком (Heat Flux) подводимым через свариваемый стык образцов с постоянной мощностью до температуры $1240-1270^\circ\text{C}$. Мощность теплового потока составляет $6,2 \cdot 10^6$ Вт/м², вводимая энергия – 54,8 кДж. Время этапа 4 сек.

Этап 2. Имитация квазистационарной по температуре стадии сварки. Последовательный подбор мощности теплового потока таким образом, чтобы тепловое поле в свариваемом стыке вышло на квазистационарный режим в интервале температур $1240-1270^\circ\text{C}$, при котором компенсируется потери тепла путем теплопроводности в менее нагретую часть образцов и поверхностную теплоотдачу. На этом этапе формируется распределение температуры вдоль оси

симметрии образцов характерное для процесса сварки с примерно постоянной по времени максимальной температурой нагрева. Мощность источника на этом этапе будет составлять $4,4 \cdot 10^6$ Вт/м², водимая энергия – 19,5 кДж. Время этапа 2 сек.

Этап 3. Остывание образцов до падения T ниже 360°C , так как остаточные напряжения при решении деформационной задачи ниже этой температуры уже не меняются и картину распределения напряжений и деформаций при этой температуре можно принять окончательной и равносильной той, что будет, если образцы остынут до 20°C . Время этапа 30 сек.

Этап 4. Дальнейшее остывание после извлечения из сварочной машины. Этап необходим для общей оценки напряженно-деформированного состояния 3D-модели на этапе высвобождения, поскольку решение тепловой задачи предшествует решению деформационной.

Описание деформационной модели

Для механического анализа 8-узловой гексаэдрический элемент SOLID 70 из термической задачи преобразовывался в соответствующий ему структурный элемент. Элементам SOLID 70 в структурном анализе соответствовал эквивалентный ему элемент SOLID 185, который так же является трехмерным 8-ми узловым элементом, но поддерживает явления пластичности, гиперэластичности, жесткости, ползучести и большие значения напряжений.

Расчет деформаций проводится на основе неизотермической теории течения с применением языка параметрического проектирования APDL. При моделировании обеспечивается соответствие с перечисленными ниже требованиями:

- в механическом анализе должна быть точно такая же конечно-элементная сетка (тип и размер конечных элементов), что и в термическом анализе;

- тип элементов, используемых в термическом анализе, должен быть изменен на соответствующий тип элемента для механического анализа. После проведения термического анализа необходимо ввести механические свойства материала;

- переходная стадия механического анализа должна быть идентична с переходной частью термического анализа, это означает, что точное число шагов по времени и времени одного шага должны совпадать, чтобы избежать смещений по шкале событий и получения ошибочных результатов.

Загрузку временного шага проводится в нестационарном состоянии в соответствии с итерационным методом Ньютона-Рафсона для вычисления перемещений внутри шага (не более 3 итераций на 1 шаг).

Упругопластические свойства были получены с помощью метода OPENCALTHAD.

Моделирование напряженно-деформированного состояния образцов проводится в те же 4 этапа, что тепловая задача для определения тепловых полей при сварке:

Этап 1. Определение временных напряжений при нагреве постоянным тепловым потоком через стык 2 образцов с постоянной мощностью с 0 до 4 сек до температуры 1240-1270°C. Время этапа 4 сек.

Этап 2. Определение временных напряжений на квазистационарном режиме в интервале температур 1240-1270°C. Время этапа 2 сек.

Этап 3. Определение остаточных сварочных напряжений при остывании образца за счет лучистого теплообмена и конвективной теплоотдачи. Время этапа 30 сек.

Этап 4. Получение остаточных сварочных напряжений при высвобождении образцов. Время этапа 10 сек.

Выводы

В ходе проделанной работы была разработана математическая модель послесварочного напряженно-деформированного состояния сварных соединений ротора из жаропрочного никелевого сплава ВЖ-172.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Излучательные свойства твердых материалов: Справочник / Под общ. ред. А.Е. Шейдлина. М.: Энергия, 1974. 471с.
2. Сущность метода ротационной сварки трением / Интертехприбор // <https://www.intertechpribor.ru/blog/tekhnologii/rotatsionnaya-svarka-treniem> [Электронный ресурс, дата обращения: 25.01.2021].
3. Linear and rotary friction welding review. Wenya Li, Achilles Vairis, Michael Preuss & Tiejun Ma / International Materials Reviews №2, 2016. <http://dx.doi.org/10.1080/09506608.2015.1109214>
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего / Автоматическая сварка: ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов». – № 10-11. – 2013. – С. 23-32.