

СТАНКОСТРОЕНИЕ И ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ. ПРОБЛЕМЫ И ТОЧКИ РОСТА

Материалы
XII Всероссийской научно-технической конференции
(г. Уфа, 16 – 17 ноября 2023 г.)



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
УФИМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ**

**СТАНКОСТРОЕНИЕ И ИННОВАЦИОННОЕ
МАШИНОСТРОЕНИЕ.
ПРОБЛЕМЫ И ТОЧКИ РОСТА**

Материалы

*XII Всероссийской научно-технической конференции
(г. Уфа, 16 – 17 ноября 2023 г.)*

Научное электронное издание сетевого доступа

**Уфа
РИЦ УУНиТ
2024**

УДК 621:658.512
ББК 34.42
С76

*Печатается по решению кафедры автоматизации
технологических процессов УУНиТ.
Протокол № 2 от 01.10.2024 г.*

Редакционная коллегия:

канд. хим. наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов

А.В. Баннова (отв. редактор);

старший преподаватель кафедры автоматизации технологических процессов

М.А. Лобанов;

канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов

С.Х. Хадиуллин;

д-р техн. наук, профессор кафедры сварочных, литейных
и аддитивных технологий

А.Ю. Медведев;

д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизации технологических процессов

Р.А. Мунасыпов;

канд. техн. наук, доцент кафедры стандартизации и метрологии

Э.В. Сафин

**Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки
С76 роста:** материалы XII Всероссийской научно-технической конференции
(г. Уфа, 16 – 17 ноября 2023 г.) / отв. ред. А.В. Баннова. [Электронный ресурс] /
Уфимск. ун-т науки и технологий. – Уфа: РИЦ УУНиТ, 2024. – 161 с.
URL: <https://uust.ru/digital-publications/2024/152.pdf> – Загл. с титула экрана.
ISBN 978-5-7477-5941-1

Цель конференции – обсуждение актуальных проблем и тенденций в области
станкостроения и машиностроения, укрепление и развитие профессиональных связей
между отечественными и зарубежными учеными, привлечение талантливой
молодежи к работе над перспективными научными проектами.

Сборник предназначен для студентов, аспирантов, преподавателей, инженеров.
Тексты воспроизводятся с представленных авторами оригиналов.

УДК 621:658.512
ББК 34.42

ISBN 978-5-7477-5941-1

© УУНиТ, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

РОБОТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС СУПЕРФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОФИЛЯ ПЕРА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ <i>Волков Д.И., Курочкин А.В.</i>	6
МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЧЕТКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ <i>Гончарова С.Г., Месягутов И.Ф.</i>	10
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ НА СКОРОСТЬ КОРРОЗИОННОГО ИЗНАШИВАНИЯ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДЕТАЛИ <i>Безъязычный В.Ф., Ежова Г.П.</i>	14
ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МОЩНЫМИ ИОННЫМИ ПУЧКАМИ <i>Полеценко К.Н., Коротаев Д.Н., Иванова Е.В.</i>	18
ОБРАЗОВАНИЕ ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МОЩНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ С ТВЕРДЫМИ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИМИ СПЛАВАМИ <i>Полеценко К.Н., Коротаев Д.Н., Иванова Е.В.</i>	21
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ В ПРОЦЕССЕ ТОЧЕНИЯ <i>Сазанов А.А., Исмагилов Т.Р., Кильметова Л.Р., Хадиуллин С.Х., Черников П.П.</i>	25
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ <i>Карцев Д.Е.</i>	34
ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ПО ОБРАБОТЫВАЕМОСТИ РЕЗАНИЕМ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ <i>Коногорова Л.В., Песин М.В., Макаров В.Ф.</i>	38
ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ НЕФТЕПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ <i>Макаренков Е.С., Песин М.В.</i>	41
ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ОБЪЕМНОГО СТРОГАНИЯ И ФРЕЗЕРОВАНИЯ: СРАВНЕНИЕ УСИЛИЙ РЕЗАНИЯ <i>Маркин А.А., Красников И.П., Старовойтов С.В., Латыпов Р.Р.</i>	44
ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ НА ПРИМЕРЕ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ <i>Месягутов И.Ф., Гончарова С.Г.</i>	50
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ О ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ ЧЕРЕЗ КОНТАКТ «ИНСТРУМЕНТ-ДЕТАЛЬ» ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ <i>Никитин Ю.А.</i>	54

СПОСОБ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРОВ НА ОПЕРАЦИИ ХОНИНГОВАНИЯ	
<i>Огородов В.А.</i>	59
ГОСУДАРСТВЕННАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ПОЛИТИКА В ОБЕСПЕЧЕНИИ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРОВ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ОПК НА ПРИМЕРЕ ПЕРМСКОГО КРАЯ	
<i>Песин М.В.</i>	62
ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	
<i>Песин М.М.</i>	68
ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	
<i>Песина Е.М.</i>	71
АКТУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ СТАНДАРТИЗАЦИИ В СФЕРЕ СТАНКОСТРОЕНИЯ	
<i>Сафин Э.В., Нигматуллина А.И.</i>	73
МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	
<i>Сахаутдинов Т.И., Песин М.В.</i>	77
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА С УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ	
<i>Хабарова А.В., Песин М.В., Макаров В.Ф.</i>	80
ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ ПЕРФОРАЦИИ ЛОПАТОК ТУРБИН ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ	
<i>Хабибуллин М.Р., Фецак С.И.</i>	83
Триботехнические характеристики низкоуглеродистой стали после термической обработки и интенсивной пластической деформации	
<i>Семенов В.И., Чертовских С.В.</i>	87
ДЕКОМПОЗИЦИЯ ПОВОРОТОВ ДВУХЗВЕННЫХ ГУСЕНИЧНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ МЕХАНИЗМОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕОРИИ СЛОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА	
<i>Хуснутдинов Д.З., Полякова Т.В., Юрасова Н.В.</i>	99
АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПУСКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ	
<i>Зарипов А.Р.</i>	103
НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ НА РОБОТИЗИРОВАННОМ КОМПЛЕКСЕ	
<i>Мунасыпов Р.А., Фецак С.И., Аллаяров М.Ш., Красников И.П.</i>	109
ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОКООРДИНАТНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ	
<i>Макаров В.Ф., Песин М.В., Норин А.О.</i>	115

ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЛЕЗВИЙНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ	
<i>Макаров В.Ф., Песин М. В., Волковский А.А.</i>	120
СОКРАЩЕНИЕ РАСХОДА СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПРОТЯЖЕК ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ПРОРЕЗКИ ГЛУБОКИХ ПАЗОВ В ДИСКАХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ	
<i>Макаров В.Ф., Песин М.В., Волков М.В.</i>	128
ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ «ТВЕРДЫМ» ТОЧЕНИЕМ ЗАКАЛЕННОЙ ЦЕМЕНТИРОВАННОЙ СТАЛИ 12Х2Н4А	
<i>Ран М.А., Макаров В.Ф., Песин М.В.</i>	134
СКРУГЛЕНИЕ ОСТРЫХ КРОМОК НАКЛОННЫХ ОХЛАЖДАЮЩИХ ОТВЕРСТИЙ ЛОПАТОК ТУРБИН МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА МНОГООСЕВЫХ СТАНКАХ С ЧПУ	
<i>Макаров В.Ф., Песин М.В., Мяснов М.А.</i>	137
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОДНОПРОХОДНОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ	
<i>Галимов В.Р., Хисамутдинов Э.Р.</i>	141
ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ВВ751П ПОСЛЕ РОТАЦИОННОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМООБРАБОТКОЙ	
<i>Яковлев М.Г., Миниахметов А.А., Фозилов Т.Т., Воробьев Д.С.</i>	145
ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПОР ПРИ НАПЛАВКЕ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ	
<i>Орлов В.К.</i>	150
МОНИТОРИНГ СИЛ ПРОЦЕССА СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ	
<i>Мунасыпов Р.А., Фецак С.И., Данилин А.П.</i>	153

**РОБОТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС СУПЕРФИНИШНОЙ
ОБРАБОТКИ И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОФИЛЯ ПЕРА
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ¹
Волков Д.И., Курочкин А.В.**

Аннотация: Представлена разработка роботизированного комплекса для шлифования абразивными лентами крупногабаритных лопаток ГТД с одновременным контролем получаемой геометрии на бесконтактной координатно-измерительной машине. Предлагаемые в работе решения позволят существенно уменьшить стоимость изготовления крупногабаритных лопаток за счет автоматизации цикла изготовления и контроля геометрии и значительного снижения материалоемкости.

Ключевые слова: роботизированный комплекс, лопатка вентилятора, газотурбинный двигатель, адаптивное шлифование, контроль

Современный путь создания конкурентоспособных экономичных ГТД для самолетов гражданской и транспортной авиации предусматривает разработку, создание и эксплуатацию двигателей с большой степенью двухконтурности, с диаметрами вентиляторов, превышающих два метра, высоким уровнем тяги, весовыми, габаритными и эксплуатационными совершенствами, уменьшенной номенклатурой деталей при одновременном обеспечении большого ресурса, повышенной надежности и экономичности. Эффективным решением актуальных для двигателестроения задач является создание семейства крупногабаритных лопаток вентиляторов ГТД с применением новых технологий, включающих оригинальные решения в области автоматизации процесса их изготовления. К таким технологиям относится процесс ленточного шлифования криволинейных деталей, в том числе лопаток ГТД, который интенсивно развивается и принимается за основу при создании так называемых высоких технологий. Данный метод обработки позволяет выйти на новый уровень производства в авиационном двигателестроении и турбостроении при обработке материалов с особыми физико-механическими свойствами - жаропрочных, коррозионностойких, высокопрочных сплавов, имеющих низкую обрабатываемость другими методами.

В технологических процессах изготовления газотурбинных двигателей, наиболее трудоёмким является изготовление лопаток компрессора. В общих

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по Соглашению от 8 апреля 2022 г. 075-11-2022-024 «Интеллектуальный роботизированный комплекс суперфинишной обработки и контроля качества профиля пера крупногабаритных лопаток газотурбинных двигателей «Интерком»».

трудозатратах изготовление компрессоров высокого и низкого давления, составляет не менее 40-45%. Это обусловлено прежде всего большим количеством изготавливаемых лопаточных колёс, в которых может быть от 10 до 20 ступеней, как на роторе ГТД, так и на статоре. Общее количество лопаток, используемых в различных конструкциях ГТД, составляет до 2,0-2,5 тысяч. При этом в отличие от литых лопаток турбины, лопатки компрессора получают различными методами горячей штамповки, после чего весь наружный контур лопаток обрабатывается с помощью различных способов механической и физико-химической обработки. В связи с этим, трудоёмкость и себестоимость компрессорных узлов ГТД значительно превышает все остальные.

Низкая производительность ручной полировки лопаток компрессоров, включая трудоёмкость полирования, которая составляет от 14% до 37% от общих трудозатрат изготовления лопаток, требуют совершенствования процессов финишной обработки лопаток компрессоров, автоматизации процессов шлифования на основе использования управляющих программ, разрабатываемых на 3Д-моделях изготавливаемых лопаток.

Предлагаемые в проекте решения позволяют существенно уменьшить стоимость изготовления крупногабаритных лопаток за счет автоматизации цикла изготовления и контроля геометрии и значительного снижения материалоемкости. Однако существуют определенные проблемы при реализации процесса ленточного шлифования на предприятиях авиационного двигателестроения при обработке профиля пера лопаток ГТД. Проблемы связаны с отсутствием отечественного технологического оборудования с ЧПУ для многокоординатной размерной обработки. Ленточное шлифование в общем случае не является размерным. Это связано с упругим прогибом ленты и прижимного ролика при контакте с обрабатываемой поверхностью. Кроме того, погрешности обработки вносит размерный износ и изменение режущей способности ленты в процессе ее работы. Проблемы с точностью воспроизведения заданного профиля лопатки также возникают в зонах реверса ленты.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности ленточного шлифования профиля лопатки является применение роботизированных комплексов (рис. 1). Среди достоинств данной технологии можно выделить высокую степень автоматизации, позволяющей существенно снизить долю ручного труда. Сам принцип обработки основан на многократном повторении цикла: измерение, выбор участков с повышенным припуском, обработка этих участков. Среди недостатков присущих данному процессу следует отнести: недостаточная производительность, высокая себестоимость операции.

Реализуемые в работе подходы основаны на научном анализе работы ленты, создании методики съема, в том числе неравномерно распределенного припуска, с достаточной для практических целей размерной точностью, а также разработке конструкции технологического оборудования для реализации рассматриваемой технологии.

В настоящий момент ведутся опытно-конструкторские работы по созданию опытного оборудования для реализации технологии адаптивного шлифования лопаток с длиной профиля пера свыше 200 мм. С этой целью силами ученых РГТУ имени П.А. Соловьева и ПАО «ОДК-Сатурн» осуществляется модернизация 6-и координатного ленточно-шлифовального станка с ЧПУ мод. MTS-1000 6 NC ф. Metabo, разработана конструкция опытной координатно-измерительной бесконтактной машины, разрабатывается робот манипулятор со специализированными спутниками-захватами. Кроме того, ведется совершенствование ключевой технологии адаптивного ленточного шлифования пера лопаток с неравномерным припуском, поскольку данный процесс требует разработки методики предварительной разметки проточной части лопатки по величине припуска, оставленного при фрезеровании вследствие упругих деформаций заготовки; разработку схем снятия припуска, учитывающих «технологическую наследственность» заготовки; методику шлифования, включая характеристику абразивной ленты; режимы шлифования. Разработанный ряд технических решений позволил уменьшить неравномерность съема, снизить величину шероховатости и остаточного гребешка, исключить появление рисок на кромках лопаток.

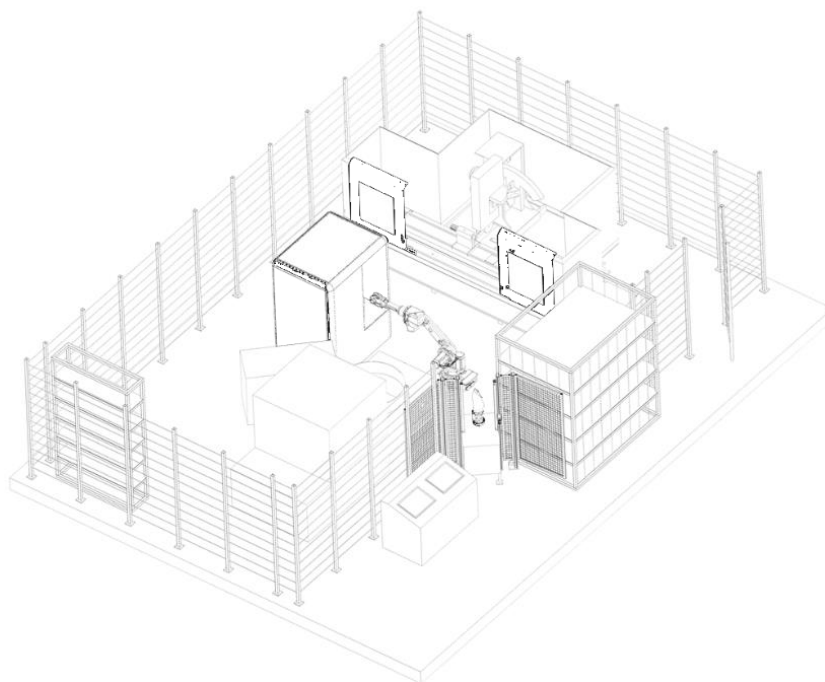


Рис. 1. Компоновка роботизированного комплекса шлифовки лопаток ГТД

Для реализации автоматизированного цикла обработки и контроля профиля пера лопаток разрабатывается специализированное программное обеспечение с нейросетевым интерфейсом для РТК. Применение нейронных сетей в адаптивном процессе финишной и суперфинишной обработки лопаток ГТД показало повышение качества и точности изготовления деталей благодаря использованию полносвязных нейронных сетей, в которых в качестве входа выступают значения отклонений от идеальной геометрии, в качестве выхода получают время воздействия или силы нажатия инструмента на определенной

точке детали. Однако применение как программного обеспечения для моделирования обработки, так и новейшего подхода с использованием нейронных сетей не позволяет выполнять операцию суперфинишной обработки лопаток ГТД за одну итерацию. Процесс обработки деталей является итерационным, с промежуточным контролем состояния заготовки.

Реализация предлагаемого проекта позволит решить вопрос импортозамещения при производстве особо ответственных деталей (лопаток вентилятора) авиационных ГТД и обеспечит наращивание потенциала и компетенций АО «ОДК» в применении передовых производственных технологий, включая: технологии технического зрения, технологии цифровых двойников, облачные вычисления и сбор данных о состоянии технологического оборудования в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коряжкин, А.А. Методология адаптивного управления процессами контактного взаимодействия при ленточном шлифовании лопаток ГТД: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / Коряжкин Андрей Александрович; РГАТА. – Рыбинск, 2014. – 391 с.

2. Швецов, И.В. Диагностирование работоспособности абразивного инструмента / И.В. Швецов, В.Н. Беляков, Д.В. Желнов, О.В. Летенков, О.В. Никуленков // Вестник машиностроения. – 2018. – № 5. – С. 78-82.

3. Сырейщикова, Н.В. Исследование износостойкости рабочего слоя шлифовальной ленты // Н.В. Сырейщикова, Д.Ю. Пименов, В. Каплонек, Х. Надольный // СТИН. – 2020. – № 9. – С. 14-18.

4. Авиационные двигатели и энергетические установки / под ред. А.И. Ланшина – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. – 520с.:ил.

5. Fitzpatrick G.A., Cundy M.J. «Roils-Royse's Wide Chord Fan Blade – The Next Generation» / Seventh World Conference on Titanium. San Diego, USA, June 1992.

6. Young-Sik Choi. Micro Machining Technology using Micro Blasting Machine for Glass Panel for LCD // 6' International Conference "Precision Surface Finishing and Deburring Technology-2000" "PSFDT-2000". SPb., 2000 - P. 362-363.

7. Гальперин В., Карповский В. Быстродействующая система для измерения геометрии лопаток ГТД BLAZERTM. – Станочный парк, № 4 (103), 2013, с.28-29.

ОБ АВТОРАХ

Волков Дмитрий Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой мехатронных систем и процессов формообразования имени С.С. Силина, ФГБОУ ВО "Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева", г. Рыбинск, d_i_volkov@rsatu.ru

Курочкин Антон Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, начальник УНИР, ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», г. Рыбинск, drd@rsatu.r

© Волков Д.И., Курочкин А.В., 2023

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЧЕТКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Гончарова С.Г., Месягутов И.Ф.

Аннотация: Предложена модель для математического описания технологических процессов в пространстве состояния в условиях нечеткой исходной информации. Рассмотрены вопросы формализации сигнальных, параметрических, функциональных, структурных неопределенностей и неопределенностей начальных условий с использованием параметрических нечетких множеств, нечетких отношений, нечетких функций. Показана методика идентификации нечеткой динамической модели, основанная на классических методах идентификации и теории распознавания образов.

Ключевые слова: технологические процессы; идентификация нечеткой динамической модели; параметрические нечеткие множества и нечеткие отношения

Современные технологические процессы как объекты автоматизации и управления формируются под влиянием большого количества факторов, учесть которые не всегда возможно. Кроме того, в условиях высокой конкуренции рынка сроки на технологическую подготовку производства и лабораторные исследования минимальны. Для математических моделей таких процессов характерна неполнота, неточность, неоднозначность, недостоверность знаний. Поэтому метод математического описания технологических процессов должен позволять отражать не только знания о предметной области, но также фиксировать неопределенность.

Анализ моделей показал, что формализация неопределенных знаний и их количественные характеристики должны удовлетворять следующим требованиям. Во-первых, описание случайных величин и случайных процессов должно быть инвариантным к их закону распределения. Во-вторых, выбранный метод математического моделирования должен фиксировать уровень дефицита и недостоверности информации. В-третьих, метод должен быть ориентирован на обработку, как экспериментальной информации, так и экспертных знаний.

Одним из наиболее универсальных способов формального описания областей знаний, насыщенных эмпирическими и эвристическими данными, является аппарат нечеткой логики и нечетких множеств [1], которому свойственна возможность оперировать классами и представлять знания категориями, характерными для человеческого образа мышления, аппроксимировать нелинейные характеристики.

В связи с этим для математического описания технологических процессов как динамических неопределенных объектов управления выберем модель в виде пространства состояний с нечеткими элементами.

Уравнения поведения можно представить в следующем виде

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_1 &= \bar{F}_1(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n, u_1, u_2, \dots, u_m, \bar{\theta}_1^1, \bar{\theta}_2^1, \dots, \bar{\theta}_r^1, \bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_k, t), (\mu_{\bar{s}}(1)); \\ \dot{\bar{x}}_2 &= \bar{F}_2(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n, u_1, u_2, \dots, u_m, \bar{\theta}_1^2, \bar{\theta}_2^2, \dots, \bar{\theta}_r^2, \bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_k, t), (\mu_{\bar{s}}(2)); \\ &\dots \\ \dot{\bar{x}}_n &= \bar{F}_n(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n, u_1, u_2, \dots, u_m, \bar{\theta}_1^n, \bar{\theta}_2^n, \dots, \bar{\theta}_r^n, \bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_k, t), (\mu_{\bar{s}}(n)). \end{aligned}$$

Уравнения наблюдения

$$\begin{aligned} \bar{y}_1 &= \bar{G}_1(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n, \bar{\theta}_{(r+1)}^1, \bar{\theta}_{(r+2)}^1, \dots, \bar{\theta}_\rho^1, u_1, u_2, \dots, u_m, \bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_k, t); \\ \bar{y}_2 &= \bar{G}_2(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n, \bar{\theta}_{(r+1)}^2, \bar{\theta}_{(r+2)}^2, \dots, \bar{\theta}_\rho^2, u_1, u_2, \dots, u_m, \bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_k, t); \\ &\dots \\ \bar{y}_l &= \bar{G}_l(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n, \bar{\theta}_{(r+1)}^l, \bar{\theta}_{(r+2)}^l, \dots, \bar{\theta}_\rho^l, u_1, u_2, \dots, u_m, \bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_k, t). \end{aligned}$$

Начальные условия:

$$\bar{x}_1(0) = \bar{D}_1, \bar{x}_2(0) = \bar{D}_2, \dots, \bar{x}_n(0) = \bar{D}_n, \quad (3)$$

где $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$ – нечеткие переменные состояния,

u_1, u_2, \dots, u_m – управляющие переменные, принимающие четкие значения,

$\bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_k$ – точно неизвестные возмущения со стороны внешней среды,

$\bar{\theta}_1^1, \dots, \bar{\theta}_r^1, \dots, \bar{\theta}_1^n, \dots, \bar{\theta}_r^n, \bar{\theta}_{(r+1)}^1, \dots, \bar{\theta}_\rho^1, \dots, \bar{\theta}_{(r+1)}^1, \dots, \bar{\theta}_\rho^1$ – нечеткие параметры модели,

$\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_l$ – нечеткие выходные переменные,

$\bar{F}_1, \dots, \bar{F}_n, \bar{G}_1, \dots, \bar{G}_l$ – нечеткие функции,

t – время,

$\mu_{\bar{s}}(1), \mu_{\bar{s}}(2), \dots, \mu_{\bar{s}}(n)$ – показатели структурных неопределенностей модели.

В предложенной модели параметрические неопределенности, обусловленные нестационарностью технологических процессов, изменяющимися технологическими условиями, сложностями идентификации, описаны нечеткими множествами с функциями принадлежности в следующем виде

$$\begin{aligned} \mu_{\bar{\theta}_i}(\theta_i) &= \frac{1}{A+B+1}, \quad (4) \\ A &= (b_{1\bar{\theta}_i} \cdot (a_{\bar{\theta}_i} - \theta_i))^{v_{1\bar{\theta}_i}} \cdot \frac{\text{sign}(b_{1\bar{\theta}_i} \cdot (a_{\bar{\theta}_i} - \theta_i)) + 1}{2} \\ B &= (b_{2\bar{\theta}_i} \cdot (\theta_i - a_{\bar{\theta}_i}))^{v_{2\bar{\theta}_i}} \cdot \frac{\text{sign}(b_{2\bar{\theta}_i} \cdot (\theta_i - a_{\bar{\theta}_i})) + 1}{2} \end{aligned}$$

Информацию, характеризующуюся сигнальными неопределенностями, связанными с неполной наблюдаемостью, погрешностями прямого и косвенного измерения физических величин, представлены переменными вектора состояния, возмущениями и выходными переменными в виде параметрических нечетких функций времени, аналогичных уравнению (4). Неопределенности структуры и нечеткие функции связаны с упрощением отображения предметной области реального технологического процесса в формальную область и с вариацией числа переменных состояния.

Идентификация заключается в определении параметров функций принадлежности нечетких множеств и нечетких отношений

$$a_{\bar{\theta}_j}^i, b_{1\bar{\theta}_j}^i, b_{2\bar{\theta}_j}^i, v_{1\bar{\theta}_j}^i, v_{2\bar{\theta}_j}^i$$

и представляет собой следующую процедуру. На первом этапе в лабораторных условиях проводится серия экспериментов с целью определения параметров модели технологического процесса

$\bar{\theta}_1^1, \dots, \bar{\theta}_r^1, \dots, \bar{\theta}_1^n, \dots, \bar{\theta}_r^n, \bar{\theta}_{(r+1)}^1, \dots, \bar{\theta}_\rho^1, \dots, \bar{\theta}_{(r+1)}^1, \dots, \bar{\theta}_\rho^1$. Некоторый коэффициент $\bar{\theta}_j^i$ может принимать множество значений $\{(\theta_j^i)_p^A\}$, $p = 1, \dots, P$, которые образуют эталонный класс А, где P – количество элементов в классе А. Название этого класса соответствует значению $a_{\bar{\theta}_j^i}$, при котором функция принадлежности $\mu_{\bar{\theta}_j^i}(a_{\bar{\theta}_j^i}) = 1$. Значения параметров модели, соответствующие $a_{\bar{\theta}_1^1}, \dots, a_{\bar{\theta}_r^1}, \dots, a_{\bar{\theta}_1^n}, \dots, a_{\bar{\theta}_r^n}, a_{\bar{\theta}_{(r+1)}^1}, \dots, a_{\bar{\theta}_\rho^1}, \dots, a_{\bar{\theta}_{(r+1)}^1}, \dots, a_{\bar{\theta}_\rho^1}$ образуют номинальную (расчетную) модель технологического процесса, по которой осуществляется настройка системы управления.

На следующем этапе технологический процесс исследуется во время производства детали при более широких вариациях технологических условий. Возможные значения $(\theta_j^i)_k^B$, $k = 1, \dots, K$ параметра $\bar{\theta}_j^i$ образуют класс В, где K – количество элементов в классе В. Для построения функций принадлежности $\mu_{\bar{\theta}_j^i}(\theta_j^i)$ нечетких множеств $\bar{\theta}_j^i$ воспользуемся концепцией [2], основанной на решении задачи классификации. При этом степень принадлежности некоторого элемента $(\theta_j^i)_k^B$ классу В можно ассоциировать со степенью близости этого элемента к другим элементам класса В и с плотностью распределения элементов класса возле рассматриваемого элемента $\mu_{\bar{\theta}_j^i}^B((\theta_j^i)_k^B)$. В свою очередь нечеткое множество $(\bar{\theta}_j^i)^B = \{(\theta_j^i)_k^B / \mu_{\bar{\theta}_j^i}^B((\theta_j^i)_k^B)\}$, выражающее степень близости, есть дополнение к нечеткому множеству $(\tilde{\theta}_j^i)^B = \{(\theta_j^i)_k^B / \tilde{\mu}_{\bar{\theta}_j^i}^B((\theta_j^i)_k^B)\}$, выражающему степень удаленности и рассредоточенности элемента $(\theta_j^i)_k^B$ по отношению к элементам класса В.

$$\mu_{\bar{\theta}_j^i}^B((\theta_j^i)_k^B) = 1 - \tilde{\mu}_{\bar{\theta}_j^i}^B((\theta_j^i)_k^B). \quad (5)$$

Мерой степени удаленности и рассредоточенности в задачах распознавания образов, как правило, является среднее расстояние между заданным элементом и элементами класса:

$$d_k^B = \frac{\sum_{q=1}^K |(\theta_j^i)_k^B - (\theta_j^i)_q^B|}{K}. \quad (6)$$

В связи с этим степень вхождения некоторого значения коэффициента модели, полученного в производственных условиях, в класс некоторого номинального значения этого коэффициента, можно оценить по степени близости элементов класса В к элементам эталонного класса А. Для вычисления функций принадлежности $\mu_{\bar{\theta}_j^i}(\theta_j^i)$ в точке $(\theta_j^i)_k$ предлагается формула

$$\mu_{\bar{\theta}_j^i}((\theta_j^i)_k) = 1 - \frac{|(d_k^A - d_{\min}^A) - (d_k^B - d_{\min}^B)|}{|(d_{\max}^A - d_{\min}^A) - (d_{\max}^B - d_{\min}^B)|}, \quad (7)$$

где d_k^A – среднее расстояние между k -м элементом, входящим в класс В и элементами класса А, причем этот элемент не обязательно принадлежит классу

$$A; \quad d_k^A = \frac{\sum_{q=1}^P |(\theta_j^i)_k^B - (\theta_j^i)_q^A|}{P},$$

d_{\min}^A – минимальное расстояние между элементами класса В и класса А,

d_{\max}^A – максимальное расстояние между элементами класса В и класса А,

d_k^B – среднее расстояние между k -м элементом, входящим в класс В и другими элементами этого класса,

d_{\min}^B – минимальное расстояние между элементами класса В,

d_{\max}^B – максимальное расстояние между элементами класса В.

Затем на основе методики [3] выполняется идентификация коэффициентов $a_{\bar{\theta}_j^i}, b_{1\bar{\theta}_j^i}, b_{2\bar{\theta}_j^i}, v_{1\bar{\theta}_j^i}, v_{2\bar{\theta}_j^i}$ нечеткого множества $\bar{\theta}_j^i$.

Полученные параметризованные нечеткие множества позволяют аналитически синтезировать робастные регуляторы с минимизацией неопределенности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление. – М.: БИНОМ, 2013. – 798 с.
2. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / под ред. Егупова Н.Д. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 744 с.
3. Зориктуев В.Ц., Гончарова С.Г., Месягутов И.Ф. Структурная и параметрическая идентификация процесса резания металлов с использованием методов искусственного интеллекта // Оптимальное управление мехатронными станочными системами: сб. науч. тр. – Часть 1. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 1999. – С. 33-40.

ОБ АВТОРАХ

Гончарова Светлана Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа, e-mail: kats_ugatu@mail.ru

Месягутов Игорь Фаритович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа, e-mail: kats_ugatu@mail.ru

© Гончарова С.Г., Месягутов И.Ф., 2023

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ
ОБРАБОТКИ НА СКОРОСТЬ КОРРОЗИОННОГО ИЗНАШИВАНИЯ
ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРОЦЕССЕ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ДЕТАЛИ**
Безъязычный В.Ф., Ежова Г.П.

Аннотация: Представлена зависимость для расчетного определения численного значения скорости коррозии материала поверхностного слоя детали, обработанной при определенных значениях параметров технологических условий обработки (режимов резания, параметров режущей части инструмента, физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов. При получении расчетной зависимости учтены параметры шероховатости исследуемой поверхности, а также степень и глубина наклепа материала поверхностного слоя детали.

Ключевые слова: поверхностный слой материала детали, шероховатость, наклеп, коррозия, технологические условия обработки

Влияние технологических условий обработки на коррозионную стойкость детали является важным аспектом исследований в машиностроении. При анализе этого вопроса необходимо учитывать различные параметры, такие как режимы резания, геометрические параметры режущей части инструмента, а также физико-механические свойства материала заготовки и режущей части инструмента.

Для определения влияния технологических условий обработки на коррозионную стойкость детали, целесообразно провести сравнение скорости коррозии материала детали со скоростью коррозии материала образца, который был обработан при принятых технологических условиях.

В соответствии с проведенными исследованиями, в качестве образца для сравнения был выбран материал из стали 40Х [1]. Эти исследования позволили определить следующие параметры качества поверхностного слоя данного образца: степень наклепа поверхности $U_n = 1,0$, высота неровностей на поверхности $Rz = 0,15$ мкм, а относительная опорная длина профиля поверхности по средней линии t_m составляет 50%. Для оценки скорости коррозии материала детали V_k использовалась зависимость [1]

$$V_k = V_{k_0} \cdot KC,$$

где V_{k_0} – скорость коррозии материала образца, мкм/год; KC – комплексный параметр скорости коррозии материала образца при атмосферной коррозии, который вычисляется по формуле, разработанной авторами исследования [1], при условии, что относительная опорная длина профиля

шероховатости поверхности по средней линии $t_m = 100 - \sqrt{\frac{2 \cdot 10^4 Rz}{S_m}}$, мкм.

$$KC = b_0 \cdot U_H^{b_1} \cdot \sqrt{\frac{770}{S_m}},$$

где U_H – степень наклепа материала поверхностного слоя детали после механической обработки; S_m – шаг неровностей на поверхности детали по средней линии, мкм; b_0 и b_1 – коэффициенты, зависящие от марки и состояния материала [1].

По зависимостям, приведенным в работе [2] определялось значение шага неровностей на обработанной поверхности по средней линии, принимая во внимание вычисление высоты неровностей на обработанной поверхности по формуле

$$Rz = \frac{1}{8r} \left\{ \frac{1}{t\tau_p \left[1 + \frac{1}{B} + \operatorname{tg}(\arctg B - \gamma) \right]} \left[\frac{a_1^{0,125} b_1^{0,7} c_p \theta \rho_1^{0,1} a^{0,43}}{\bar{V} \lambda (\sin \alpha)^{0,165}} \right] \cdot \left[2,85 (\sin \alpha)^{0,115} \bar{V}^{0,57} a^{0,345} \lambda b^{0,3} + 0,6625 \lambda_p \beta \varepsilon a_1^{0,57} \rho_1^{0,075} \right] \cdot \left(\arccos(1 - a_2 B^{-b_2 (1 - \sin \gamma)^{-x}}) + \frac{a_2 B^{1 - b_2 (1 - \sin \gamma)^{-x}}}{\sin \alpha (\cos \gamma + B \sin \gamma)} + \frac{\delta}{\rho_1} \right) \cos \alpha \right\}^2,$$

где τ_p – сопротивление материала обрабатываемой детали пластическому сдвигу, Па; a_1 – толщина сечения среза, м; c_p – удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(м³·К); \bar{V} – скорость резания, м/с; λ и λ_p – коэффициенты теплопроводности материала обрабатываемой детали и режущего инструмента, Вт/(м·К); t – глубина резания, м; α и γ – задний и передний углы резца, градус; β и ε – угол заострения и угол при вершине резца в плане, градус; a – температуропроводность материала обрабатываемой детали, м²/с; ρ_1 – радиус округления режущей кромки инструмента, м; b – длина контакта режущей кромки инструмента с материалом обрабатываемой детали, м; $m = \frac{a_1}{S}$ – коэффициент, зависящий от геометрических параметров режущего инструмента; S – подача, м; c_0 и n_0 – коэффициенты, зависящие от сочетания свойств обрабатываемого и инструментального материалов, а также от соотношения радиуса округления кромки инструмента и толщины сечения среза a_1 ; r – радиус при вершине резца в плане, м; b_1 – ширина сечения среза, м; θ – температура в зоне резания, °С; δ – высота фаски износа по задней поверхности, м; B – безразмерный комплекс процесса резания, [2]; a_1, b_2, x – коэффициент и показатели степени, зависящие от значения безразмерного комплекса B .

Степень наклепа материала на поверхностном слое детали при использовании лезвийных инструментов определяется с помощью следующей формулы:

$$U_H = 1 + N = 1 + \frac{h_H}{125 \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{BЭ}} \right)^{0,8}},$$

где σ_B – предел прочности материала детали на растяжение, выраженный в МПа; $\sigma_{BЭ}$ – предел прочности электротехнической стали на растяжение, МПа; h_H – глубина наклепа в поверхностном слое материала детали при обработке, определяемая по формуле [2].

Указанная методика для определения комплексного параметра скорости коррозии КС позволяет исследовать влияние параметров качества поверхностного слоя (таких как шероховатость, степень и глубина наклепа материала поверхностного слоя), физико-механических свойств материалов, используемых при обработке, а также условий обработки, на коррозионную стойкость. С использованием данной методики были произведены расчеты скорости коррозии обработанной поверхности образцов из стали ЭИ698.

В таблице 1 приведены исходные данные, используемые для выполнения расчетов.

Табл. 1 Исходные данные

Технологический параметр	Значения
Глубина резания t , мм	0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2; 2,5
Подача S , мм/об	0,1; 0,15; 0,2; 0,25
Скорость резания v , м/мин	200; 250; 300; 350; 400
Главный угол резца в плане φ , градус	45; 60; 75; 90
Радиус при вершине резца в плане r , мм	0,5; 1; 2; 3; 4
Радиус округления режущей кромки резца ρ_1 , мкм	10; 20; 30; 50; 70; 100
Вспомогательный угол резца в плане φ_1 , градус	15
Задний угол резца α , градус	10
Передний угол резца γ , градус	15

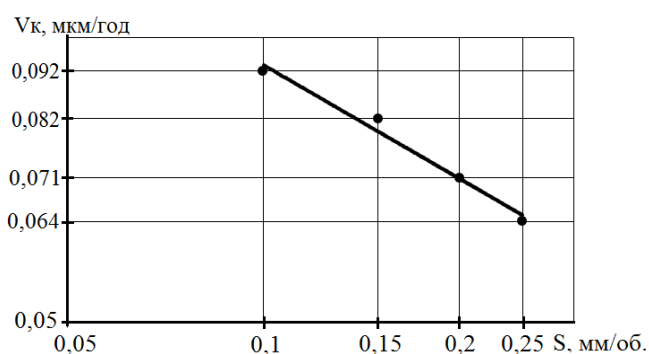


Рис. №1. Зависимость скорости коррозии V_k от подачи S .

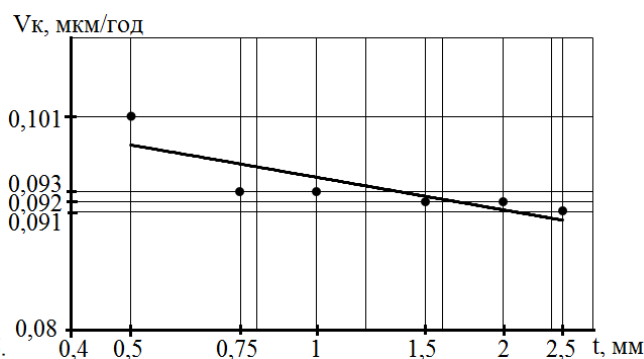


Рис. №2. Зависимость скорости коррозии V_k от глубины резания t .

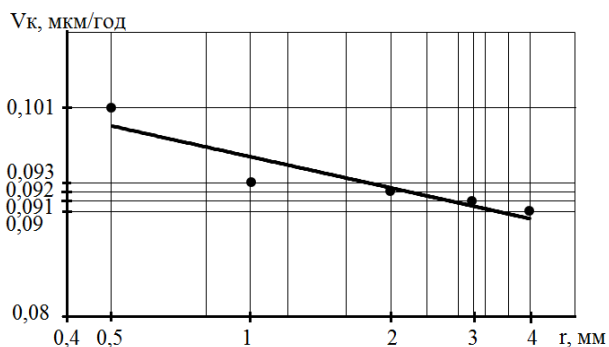


Рис. №3. Зависимость скорости коррозии V_k от радиуса при вершине резца в плане r .

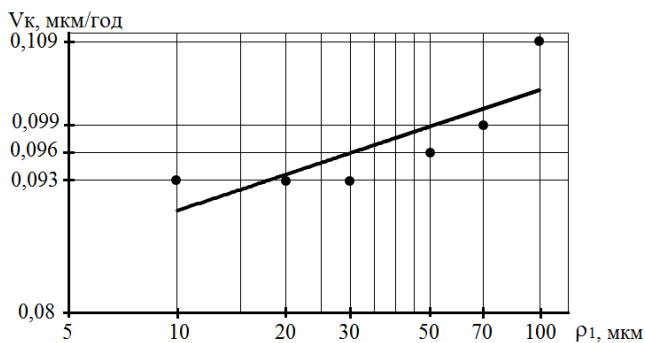


Рис. №4. Зависимость скорости коррозии V_k от радиуса округления при вершине резца ρ_1 .

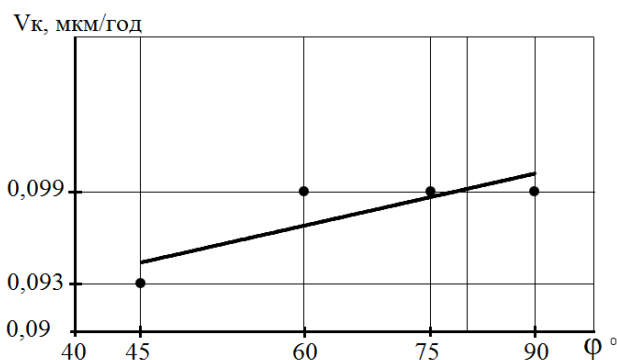


Рис. №5. Зависимость скорости коррозии V_k от главного угла резца в плане φ .

Результаты расчетов, представленные на рисунках 1-5, свидетельствуют о том, что изменение скорости коррозии обработанной поверхности в процессе эксплуатации с учетом переднего и заднего углов резца является незначительным и может не учитываться. На основе данных, представленных на рисунках №1-5, была получена математическая зависимость для определения скорости коррозии подвергнутой обработке поверхности в процессе эксплуатации:

$$V_k = 0,0226 \cdot S^{-0,399} t^{-0,051} r^{-0,05} \rho_1^{0,0597} \varphi^{0,087}, \text{ мкм/год.}$$

Полученная зависимость, отражающая изменение скорости коррозионного изнашивания в зависимости от технологических условий обработки, может быть использована для разработки алгоритмов, которые позволят назначать режимные условия обработки с целью обеспечения требуемой скорости коррозионного изнашивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федонин О.Н. Инженерия поверхности детали с позиции коррозионной стойкости // Справочник. Инженерный журнал. Приложение, № 10, 2001. – С.17 – 19.
2. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2012 – 320 С.

ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МОЩНЫМИ ИОННЫМИ ПУЧКАМИ

Полещенко К.Н., Коротаев Д.Н., Иванова Е.В.

Аннотация: В работе проведено исследование влияния ионно-плазменной обработки на изменение микротвердости и триботехнических характеристик инструментальных твердых сплавов. Установлено, что комплексная модификация ионно-плазменным поверхностным напылением в сочетании с мощными импульсными пучками способствует повышению микротвердости и износостойкости твердых сплавов в условиях резания конструкционных сталей.

Ключевые слова: твердые сплавы, ионно-плазменная обработка, мощные ионные пучки, микротвердость, износостойкость

Введение

В настоящее время анализ процессов упрочнения инструментальных материалов показывает [1, 2], что улучшение физико-механических свойств металлокерамических твердых сплавов может быть достигнуто посредством комплексного модифицирования, сочетающего нанесение ионно-плазменного покрытия и импульсно-пучковую обработку. Модификация свойств материалов при облучении импульсными высокоэнергетическими ионными пучками достигается за счет формирования дефектных, нанокристаллических и аморфных структур [3] вследствие протекания в приповерхностных слоях коллективных сильнонеравновесных процессов термомеханического и диффузионного характера. Однако установление причин изменения свойств в системах «покрытие - твердый сплав» требует дополнительных экспериментальных исследований термомеханических процессов, инициированных импульсными пучками.

Целью данной работы являлось исследование влияния ионно-плазменной обработки и мощных импульсных пучков (МИП) на изменение микротвердости и триботехнических свойств твердых сплавов с покрытиями.

Методика эксперимента

Объектом исследования являлись образцы твердого сплава Т15К6 (WC – 79%, TiC – 15%, Co – 6%) с ионно-плазменными покрытиями из TiN и TiC. Покрытия наносились на твердый сплав методом конденсации с ионной бомбардировкой на серийной установке ННВ-6.6-И1. Облучение образцов производилось на ускорителе мощных ионных пучков (МИП) «Темп» с энергией ионов $E = 300$ кэВ, плотностью тока $j = 50 - 150$ А/см², длительностью импульса $\tau = 50$ нс, при кратности воздействия $n = 1, 3, 5$. Пучок состоял из ионов C^+ (70%) и H^+ (30%). Микротвердость образцов измерялась по методу Виккерса на микротвердомере ПМТ-3 в диапазоне нагрузок на индентор 100-200 г.

Коэффициент трения и величина износа модифицированных твердых сплавов в условиях абразивного изнашивания определялись посредством испытаний на машине трения, работающей по схеме «неподвижный индентор-вращающийся диск». Скорость относительного перемещения составляла 0,3 м/с при нагрузке на индентор 44,23 г. В качестве индентора использовался алмазный шарик с радиусом закругления 230 мкм. Износ оценивался по глубине канавки на микроинтерферометре МИИ-4.

Результаты эксперимента и обсуждение

Облучение МИП приводит к увеличению микротвердости твердого сплава как с покрытием из TiN, так и с покрытием из TiC, причем максимальное упрочнение наблюдается при плотности тока равной 150 А/см².

Как следует из рис. 1 (L – путь резания, h – ширина фаски износа по задней поверхности резца), в условиях высокотемпературного трибомеханического контакта при резании стали 40X нанесение покрытия не обеспечивает существенного повышения, а модификация импульсным ионным пучком даже снижает износостойкость твердых сплавов. В то же время комплексная обработка приводит к повышению эксплуатационных свойств инструментального материала. Наблюдаемые результаты коррелируют с увеличением микротвердости, снижением коэффициента трения (рис. 2, а) и повышением износостойкости модифицированных пучками образцов с покрытием в условиях абразивного изнашивания (рис. 2, б).

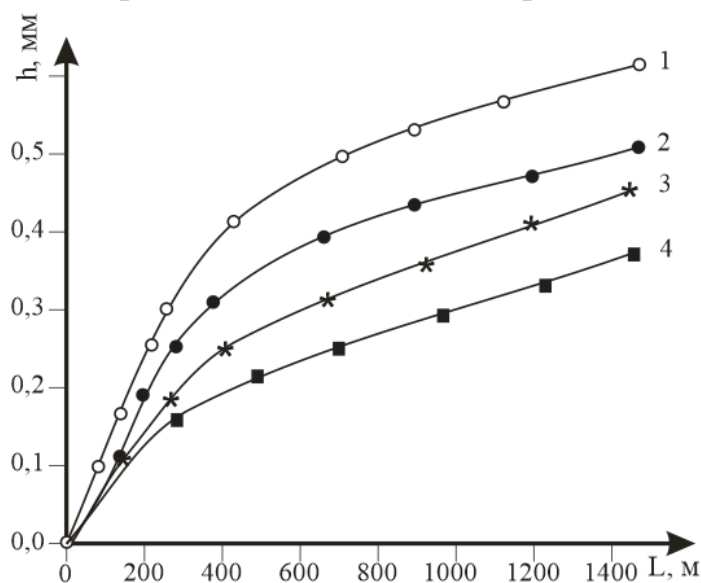


Рис. 1. Кинетические зависимости изнашивания твердого сплава Т15К6 при резании стали 40Х. Скорость резания 200 м/мин, подача $S = 0,07$ мм/об, глубина резания 1 мм: 1 – Т15К6 +МИП ($j = 150$ А/см², $n = 3$); 2 – Т15К6; 3 – Т15К6 + КИБ; 4 – Т15К6 + КИБ + МИП ($j = 150$ А/см², $n = 1$)

Между коэффициентом трения и величиной износа образцов (рис. 2) наблюдается корреляция, при этом износостойкость образцов в условиях абразивного изнашивания определяется, в основном, микротвердостью покрытия.

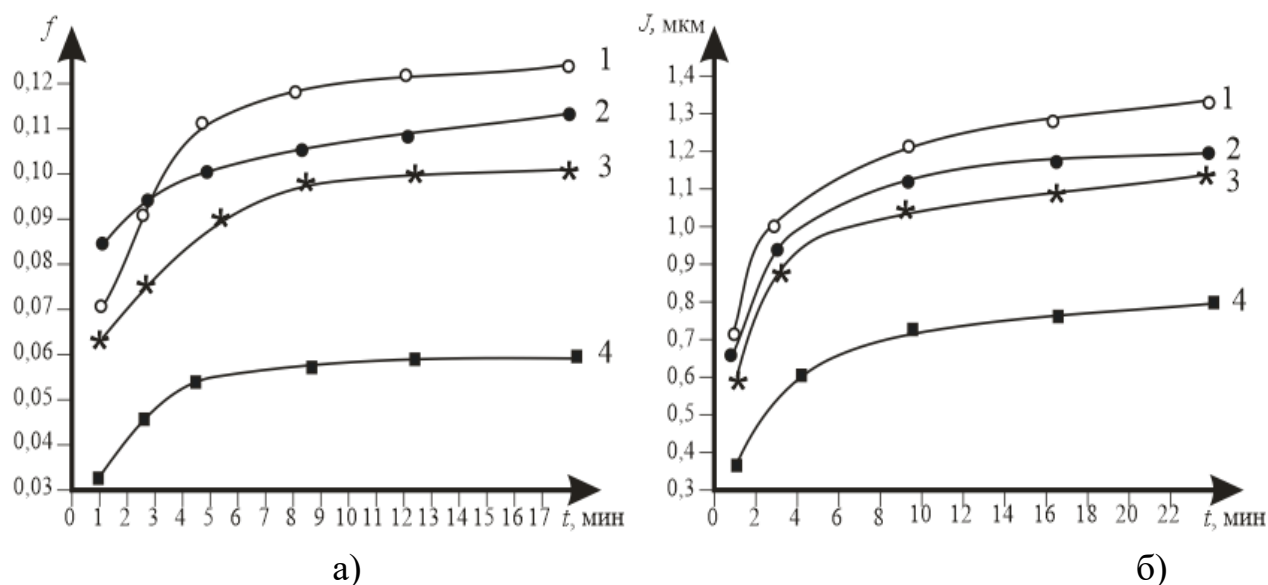


Рис. 2. Изменение триботехнических характеристик твердого сплава Т15К6 с покрытием TiN+МИП (1 – исходный Т15К6; 2 – $j = 50 \text{ А/см}^2$; 3 – $j = 100 \text{ А/см}^2$; 4 – $j = 150 \text{ А/см}^2$): а) зависимость коэффициента трения f твердого сплава Т15К6 от времени испытания t ; б) зависимость глубины канавки износа J от времени испытания t

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Ионно-плазменная обработка приводит к образованию в поверхностных слоях системы TiN/T15K6 ярко выраженных градиентных структур, которые эффективно снижают коэффициент трения и повышают износостойкость модифицированных твердых сплавов. Наиболее эффективным режимом облучения является воздействие мощным ионным пучком с плотностью ионного тока 150 А/см^2 .

2. Комплексная модификация способствует повышению износостойкости твердых сплавов в условиях резания и может быть рекомендована для использования в технологических процессах обработки конструкционных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корусенко П.М., Несов С.Н., Поворознюк С.Н. и др. Структура композитных покрытий на основе нитрида титана, сформированных с использованием конденсации с ионной бомбардировкой // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7. № 1. С. 201–207.

2. Кортаев Д.Н., Полещенко К.Н., Еремин Е.Н. и др. Эффект дальнего действия при формировании наноструктурных топокомпозитов под воздействием комбинированных ионно-плазменных потоков // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16. № 4 (184). С. 187–192.

3. Погребняк А.Д., Кравченко Я.О., Бондар О.В. и др. Структурные особенности и трибологические свойства многослойных покрытий на основе тугоплавких металлов // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2018. Т. 54. № 2. С. 152–172.

ОБ АВТОРАХ

Полещенко Константин Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения, ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», г. Омск, E-mail: k_poleschenko@mail.ru

Коротаев Дмитрий Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры стандартизации, сертификации и управления качеством производства нефтегазового оборудования, ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», г. Москва, E-mail: korotaevd99@mail.ru

Иванова Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры физики, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, E-mail: elenaivanova-01@mail.ru

© Полещенко К.Н., Коротаев Д.Н., Иванова Е.В., 2023

УДК 621.785

ОБРАЗОВАНИЕ ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МОЩНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ С ТВЕРДЫМИ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИМИ СПЛАВАМИ

Коротаев Д.Н., Полещенко К.Н., Иванова Е.В.

Аннотация: Наиболее вероятной формой диссипативных процессов в металлических материалах являются дислокационные ансамбли, функционирование которых проявляется в виде их кооперативного движения. В работе проведено исследование влияния ионно-плазменной обработки и мощных ионных пучков на изменение областей когерентного рассеивания, плотности дислокаций инструментальных твердых сплавов. Установлены режимы обработки мощными ионными пучками, которые обеспечивают максимальную степень упрочнения твердых сплавов на основе карбида вольфрама.

Ключевые слова: твердые сплавы, ионно-плазменная обработка, мощные ионные пучки, диссипативные структуры, плотность дислокаций

Введение

Структура металлической поверхности при обработке мощными ионными пучками (МИП) формируется в неравновесных условиях взаимодействия материала с концентрированным потоком энергии и вещества [1]. При этом измененная поверхностная структура имеет повышенную плотностью дефектов кристаллического строения, которые определяют ее диссипативные свойства [2, 3].

Формирование упрочненных поверхностей (структур) при воздействии МИП зависит от влияния двух конкурирующих процессов: генерации различных дефектов кристаллического строения (дислокационных ансамблей) и их аннигиляции. С термодинамической точки зрения это активационный и диссипативный процессы соответственно и учет функционирования дислокационного диссипативного канала заслуживает полноправного внимания при рассмотрении процессов структурной модификации.

В работе исследовано изменение плотности дислокаций, как диссипативной структуры, при облучении МИП, в связи с тем, что при данном виде воздействия дислокационная структура претерпевает существенную трансформацию и значительно влияет на эксплуатационные свойства инструментальных твердых сплавов. При этом зарождение и движение дислокаций является основным самоорганизующимся процессом диссипации подводимой в систему энергии.

Методика эксперимента и феноменологическая модель

Объектом исследования являлись образцы твёрдого сплава Т15К6 (WC – 79%, TiC – 15%, Co – 6%) с ионно-плазменными покрытиями из TiN. Покрытия наносились на твердый сплав методом конденсации с ионной бомбардировкой на серийной установке ННВ-6.6-И1. Облучение образцов производилось на ускорителе мощных ионных пучков «Темп» с энергией ионов $E = 300$ кэВ, плотностью тока $j = 50 - 150$ А/см², длительностью импульса $\tau = 50$ нс, при краткости воздействия $n = 1, 3, 5$. Пучок состоял из ионов C^+ (70 %) и H^+ (30 %).

Анализ тонкой кристаллической структуры и оценка микродеформаций нитридотитанового покрытия осуществлялись методами рентгенографии. Рентгенограммы снимались на дифрактометре ДРОН-3М в фильтрованном $CuK\alpha$ излучении. Анализ тонкой структуры выполнялся по уширению дифракционных пиков методом аппроксимации в приближении функции типа Коши [4].

Ионно-плазменное воздействие с физической точки зрения представляет собой концентрированный поток энергии и вещества (КПЭ), плотность мощности которого достигает $10^6 \dots 10^{10}$ Вт/см². Феноменологическая модель процесса взаимодействия КПЭ с металлами и образования измененного поверхностного слоя представлена на рис. 1.

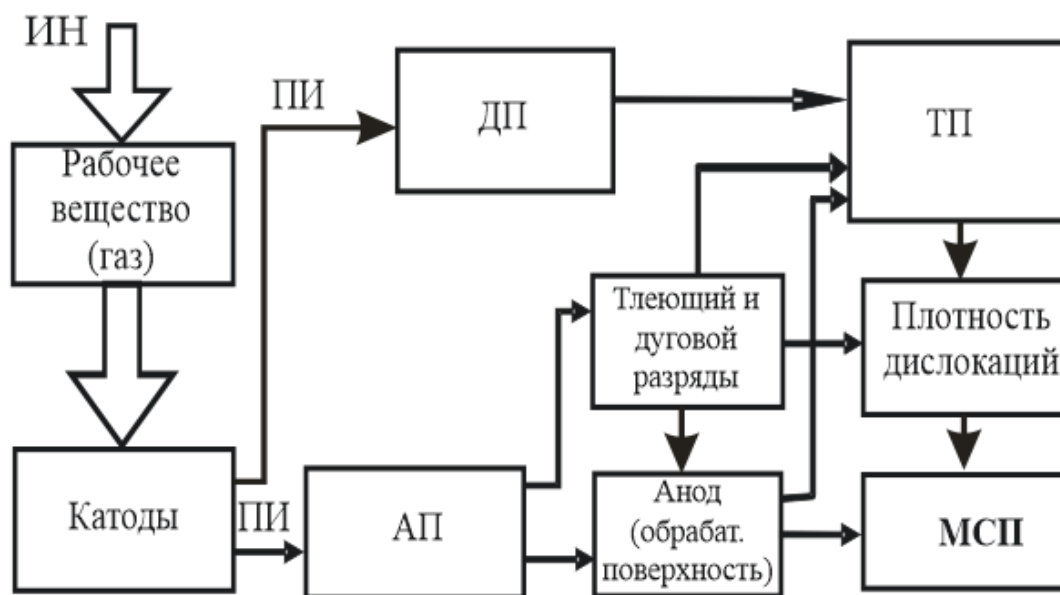


Рис. 1. Модель ионно-плазменной обработки и образования поверхностного слоя: ИН – источники напряжения; ПИ – поток ионов; АП – активационные процессы; ДП – диссипативные процессы; ТП – тепловой поток; МСП – модифицированная структура поверхности

Для исследования особенностей формирования ионно-плазменных покрытий и модифицированных структур поверхности (МСП) выполнен анализ двух конкурирующих процессов: активационных (АП) и диссипативных (ДП). В качестве диссипативной структуры рассмотрено образование дефектов кристаллического строения и фиксация плотности дислокаций после ионно-плазменного воздействия с МИП.

Результаты эксперимента и обсуждение

Анализ тонкой структуры показал, что ионно-плазменная обработка с МИП приводит к увеличению микродеформаций ϵ и уменьшению размеров областей когерентного рассеяния D (ОКР) при нанесении покрытия из TiN.

Зависимость параметров субструктуры твердого сплава на основе карбида вольфрама от числа импульсов воздействия носит экстремальный характер (рис. 2). Наибольшим изменениям структуры соответствует облучение твердого сплава тремя импульсами с плотностью ионного тока $j = 150 \text{ А/см}^2$. При этом размер ОКР уменьшается в 2,2 раза, микроискажения решетки возрастают в 3, 4 раза. Согласно расчетным данным относительной плотности дислокаций, максимальная степень деформационного упрочнения карбида вольфрама при воздействии МИП достигается облучением сплава при режимах: $j = 100 \text{ А/см}^2$, $n = 3$ и $j = 150 \text{ А/см}^2$, $n = 1, 3$. При этом наблюдается увеличение плотности дислокаций в 4,29, 5,37 и 7,25 раз, соответственно.

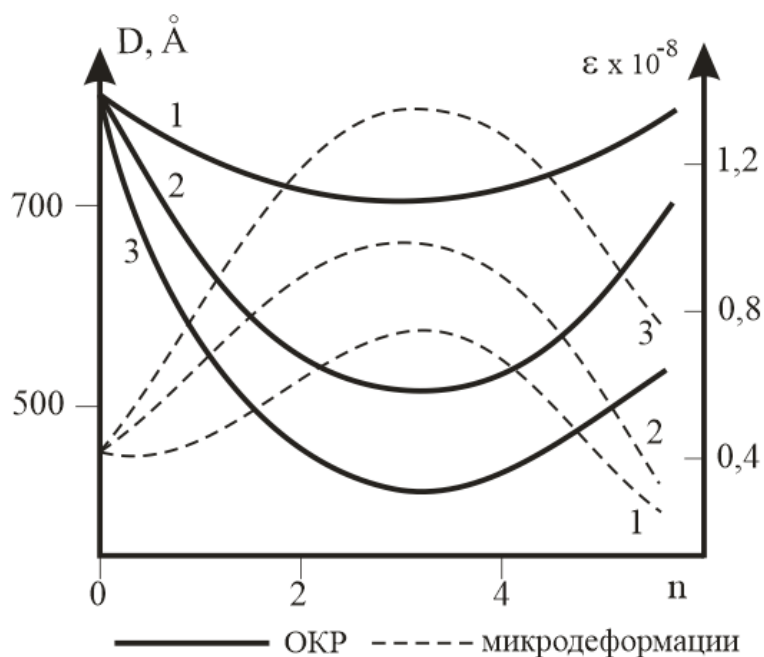


Рис. 2. Зависимости параметров тонкой структуры твердого сплава на основе WC от количества импульсов воздействия МИП: 1 – $j = 50 \text{ A/cm}^2$; 2 – $j = 100 \text{ A/cm}^2$; 3 – $j = 150 \text{ A/cm}^2$

Представленные на рис. 2 зависимости показывают, что при МИП основным структурообразующим процессом является генерация дефектов (активация) и совместное движение дислокационных ансамблей (диссипация), что отражается увеличением степени совершенства твердых сплавов на основе карбида вольфрама.

Таким образом, проведенными исследованиями показано, что модифицирующей обработкой твердых сплавов мощными ионными пучками достигается значительная реорганизация субструктуры твердых сплавов, проявляющаяся в увеличении концентраций дефектов кристаллического строения как диссипативного канала отвода энергии. Полученные результаты продемонстрировали новые возможности модификации структуры материалов инструментального назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сергеев В.П., Федорищева М.В., Сергеев О.В. и др. Влияние ионно-пучковой обработки на структуру и трибомеханические свойства покрытий TiN // Физика и химия обработки материалов. 2008. № 2. С. 10–13.
2. Ким В.А., Аунг Нгве Тэйн, Лысенко В.В. и др. Диссипативные структуры взаимодействия лазерного излучения с конструкционной сталью 45 // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Том 15. № 6. С. 270–275.
3. Балахонов Р.Р., Болеста А.В., Бондарь М.П. и др. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах /отв. ред. В.Е. Панин. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 520 с.

4. Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенография и электронно-оптический анализ. М.: Металлургия, 1970. 368 с.

ОБ АВТОРАХ

Коротаев Дмитрий Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры механики и инженерной графики имени Б.М. Ребрика, ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», E-mail: korotaevd99@mail.ru

Полещенко Константин Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения, ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», г. Омск, E-mail: k_poleschenko@mail.ru

Иванова Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры физики, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, E-mail: elenaivanova-01@mail.ru

© Коротаев Д.Н., Полещенко К.Н., Иванова Е.В., 2023

УДК 621.9.08

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ В ПРОЦЕССЕ ТОЧЕНИЯ

Сазанов А.А., Исмагилов Т.Р., Кильметова Л.Р., Хадиуллин С.Х., Черников П.П.

Аннотация: в работе описаны основные причины возникновения остаточных напряжений в металле при обработке резанием, температурное влияние на их образование, определения температуры в зоне резания, а также зависимость остаточных напряжений от сил резания. Проблематика контроля остаточных напряжений и предлагаемое решение.

Ключевые слова: остаточные напряжения; методы определения остаточных напряжений; обработка резанием; метод естественной термопары; влияние сил резания; методы определения сил резания

Введение

С появлением новых материалов и технологий в различных отраслях машиностроения, включая атомное машиностроение, горнодобывающую промышленность и производство транспортных газо- и нефтепроводов, возникает необходимость учитывать все большее количество физико-механических параметров при оценке прочности и надежности производимой продукции.

Одним из важных факторов, указываемых в конструкторско-технологической документации, является уровень остаточных напряжений 1-го рода по классификации Н.Н. Давиденкова. Исследования и практический опыт

показывают, что остаточные напряжения 1-го рода имеют существенное влияние на надежность, долговечность и эксплуатационные характеристики техники. Они также влияют на характеристики деталей, такие как износостойкость, усталостная прочность и другие. [1,2,3,6]

Остаточные напряжения 1-го рода возникают в конструкциях по разным причинам, таким как деформации при нагреве и охлаждении, неоднородное напряженное состояние материала, взаимодействие компонентов конструкции и особенностями метода обработки материалов, таких как температурно-силовых факторов.

При повышении сил резания увеличиваются остаточные напряжения, наибольший же вклад в показатель остаточных напряжений, как было выявлено в многочисленных исследованиях, вносит подача. Скорость резания же в свою очередь в меньшей степени влияет как на остаточные напряжения, так и на силу резания, но оказывает сильное влияние на температуру в зоне обработки, при повышении скорости вращения обрабатываемой детали, это приводит к увеличению нагрева материала, что способствует возникновению пластической деформации. [2,3,4,6]

Все известные методы определения остаточных напряжений (кроме расчетных) предполагают разрушение детали. так же имеется нюанс того, что нет возможности определить показатель остаточных напряжений в тонких элементах деталей, например, таких, как проточка, фаска и т.д. По мимо этого, если при анализе выясняется, что остаточные напряжения в детали отклонились от требуемых, то вся партия уходит в утиль, что в свою очередь приносит убытки.

Способы контроля температурно-силовых параметров резания являются основополагающими, при прогнозировании и обеспечении необходимого уровня остаточных напряжений.

Механизм образования остаточных напряжений.

Напряжения образуются следующим образом: когда резец перемещается в направлении подачи S , верхние слои вновь образованной поверхности подвергаются пластической деформации растяжения из-за трения между задней поверхностью инструмента и этой поверхностью, в то время как нижние слои металла растягиваются упруго. После прохождения резца верхние слои, подвергшиеся необратимой пластической деформации, препятствуют упругому возвращению внутренних слоев в их прежнее положение. В итоге верхние слои оказываются сжатыми, а внутренние – частично растянутыми (рис. 1).

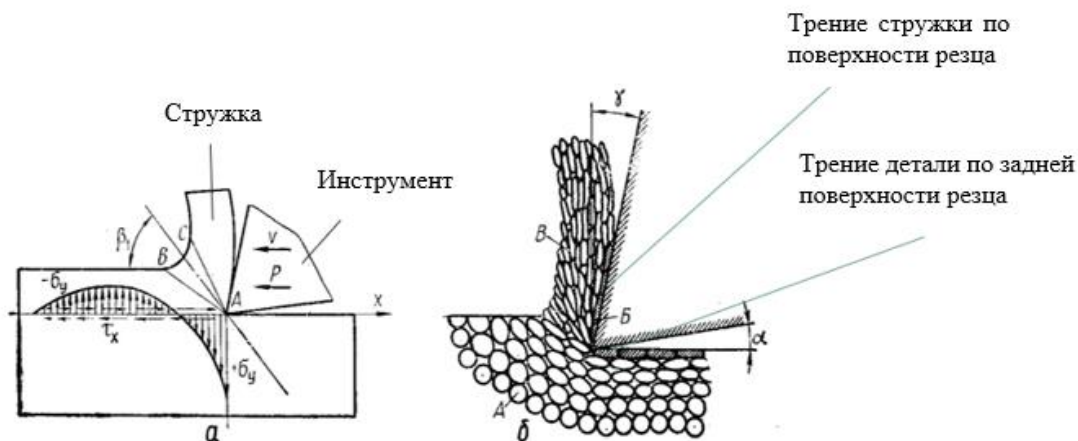


Рис. №1. Схема деформаций металла в зоне резания

$-\delta_y$ и $+\delta_y$ – нормальные напряжения сжатия и растяжения соответственно; кружками А показаны недеформированные зерна.

Контроль остаточных напряжений играет важную роль в обеспечении высокого качества изделий. Из анализа многолетнего опыта эксплуатации изделий и проведения различных экспериментов можно сделать вывод, что остаточные напряжения влияют на множество свойств, например: износостойкость, усталостную прочность, коррозионную стойкость и в особенности на геометрическую точность.

Механизм образования остаточных напряжений при резании обуславливается двумя факторами: силовым и тепловым воздействием инструмента на поверхностный слой детали. Величина остаточных напряжений и глубина их залегания зависят от таких параметров как подача, скорость резания и степени износа инструмента. В данной работе рассматривается влияние теплового фактора на образование остаточных напряжений.

Температурное влияние при резании металлов

Большая температура при точении металла выделяется в области резания, что влияет на модуль упругости поверхностного слоя, сильно снижая его. При этом наружные слои нагреваются сильнее, чем внутренние. Наружные слои стремятся удлиняться, а внутренние препятствуют этому. Наружные слои металла, из-за воздействия внутренних слоёв, могут оказаться пластически сжатыми от высокой температуры. Когда поверхностные слои остывают, они пытаются укоротиться на величину расширения и величину пластических деформаций, чему препятствуют внутренние слои. Поэтому во внутренних слоях возникают напряжения сжатия, а в наружных слоях – напряжения растяжения. На образование остаточных напряжений может влиять скорость резания в зависимости от соотношения теплового и силового воздействия. Чем больше скорость резания, тем больше температура, но тем меньше силовое воздействие. Поэтому при увеличении скорости резания остаточные напряжения растяжения увеличиваются [5].

Можно выделить три источника образования теплоты в области резания (рис. 2): зона основной пластической деформации с тепловой мощностью Q_1 ; зона трения стружки о переднюю поверхность инструмента с тепловой мощностью Q_2 ; зона

трения задней поверхности инструмента о заготовку с тепловой мощностью Q_3 [3].

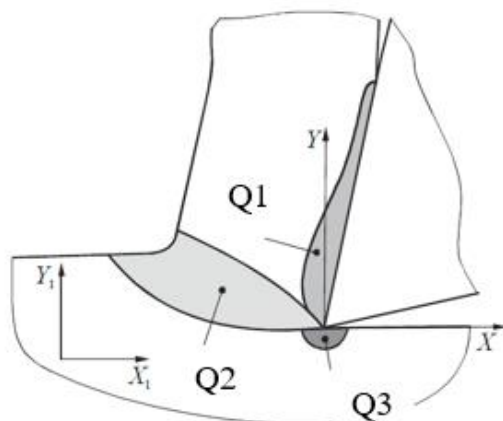


Рис. №2. Источники образования теплоты при резании

Таким образом, общее количество теплоты, выделяющейся при резании:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

П. А. Ребиндером и Г. И. Епифановом с помощью опытов было установлено, что при обработке резанием большая часть механической работы (до 99,5%) уходило в тепло. Однако, формирование растягивающих напряжений под действием температуры может быть только при условии, что при нагреве, внутренние напряжения превзойдут по величине предел текучести данного материала [7]. Например, это можно увидеть на температурной зависимости $\sigma_{\text{терм}}$ и $\sigma_{0,2}$ для сплава на никелевой основе (рис. 3). Начиная с температуры 620°C (что соответствует началу термопластических деформаций $\theta_{\text{т.д}}$), в поверхностном слое будут формироваться остаточные напряжения растяжения. При всех условиях резания, когда контактная температура не превышает $\theta_{\text{т.д}}$, в поверхностном слое будут образовываться сжимающие остаточные напряжения [2].

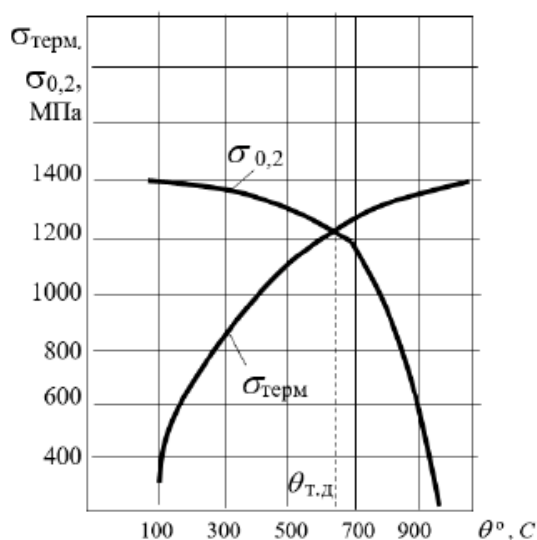


Рис. №3. Температурные зависимости $\sigma_{\text{терм}}$ и $\sigma_{0,2}$ для никелевого сплава ХН77ТЮР [2]

Способы определения температуры в зоне резания

Чтобы определить температуру в зоне резания пользуются методами прямого и косвенного измерения. Из-за низкой точности и сложности их осуществления, косвенные методы менее распространены на практике, поэтому в данной работе рассматриваться не будут.

При прямых методах температуру в зоне резания непосредственно измеряют с помощью искусственных, полуискусственных и естественных термопар. Метод измерения температуры с помощью термопар наиболее удобен и более широко применяется в современных исследованиях.

При методе искусственной термопары в инструменте делается глухое отверстие, которое используется для изолированной термопары (рис. 4). С помощью гальванометра, в цепи, в области касания термопары и инструмента фиксируется температура.

Недостатками являются сложность устройства и невозможность определения наивысшей температуры.

В методе полуискусственной термопары один из элементов используется для определения температуры и не используется при обработке. Этот метод более точный, но не дает возможности изучить закономерности влияния элементов режима резания на наивысшую температуру процесса резания.

Самым оптимальным методом для измерения температуры можно назвать метод естественной термопары. Естественная термопара – это пара металлов, которые контактируют друг с другом при резании металла. При этом возникает разность потенциалов, которая пропорциональна температуре контакта металлов. Если знать термоэлектрические свойства этих металлов, то можно определить конкретную температуру контакта.

Схема измерения температуры резания методом естественной термопары представлена на рисунке 4.

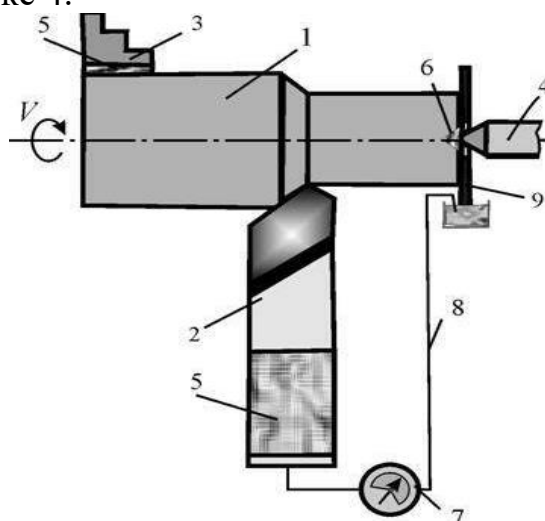


Рис. №4. Измерение температуры резания методом естественной термопары

Заготовка (1) обрабатывается с использованием изолирующих прокладок из эбонита (5) и пробки (6), отделяющих ее от патрона (3) и центра задней бабки (4). Резец (2) изготовлен из быстрорежущей стали или твёрдого сплава и также

изолирован от держателя резца эбонитовыми прокладками. Изготовление резца цельным предназначено для того, чтобы избежать образования паразитных термопар в месте припаивания режущей пластины к корпусу резца. Одна клемма (7) милливольтметра (8) соединена с торцом резца, а вторая – с токоъемником (9). Заготовка изолирована от станка, чтобы исключить воздействие паразитных термопар [7]. Для того, чтобы значения милливольтметра перевести в градусы Цельсия, для начала нужно специальным образом тарировать термопару.

Достоинством данного метода можно назвать легкость его осуществления. Причём данный метод прост не только при точении, но также и при сверлении, фрезеровании, нарезании резьбы метчиком, строгании и других видах обработки.

Среди всех рассмотренных вариантов определения температуры в зоне резания, метод естественно образующейся термопары является наиболее точным и легко осуществляемым. Таким образом, метод естественной термопары более предпочтителен для определения температуры, образующей остаточные напряжения.

Методы измерения сил резания

При анализе процесса резания в механической обработке необходимо учитывать различные силы, действующие между резцом и заготовкой. Эти силы состоят из тангенциальной P_z , радиальной P_y и осевой P_x составляющие силы резания. Во время точения можно рассмотреть всю систему сил как одну равнодействующую R (рис. 5) - силу резания. Точка приложения, которой находится на рабочей части режущей кромки. [10, 11]

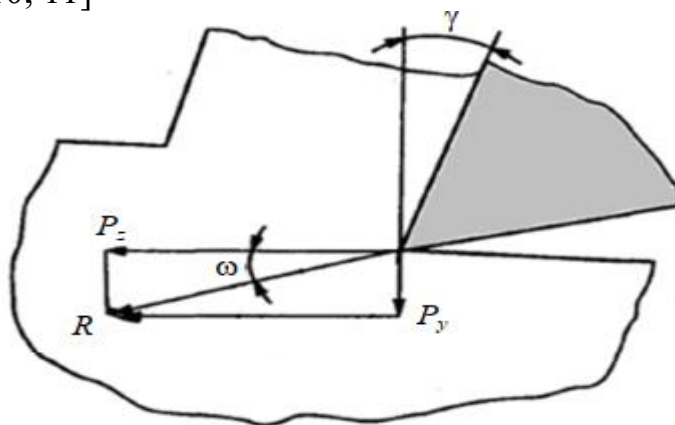


Рис. №5. Схема распределения сил резания в точке приложения режущего инструмента.

В инженерных расчетах для определения силы резания в процессе механической обработки используются эмпирические зависимости между этой силой и параметрами режимов резания. Путем проведения серии экспериментов была выведена специальная формула, которая традиционно используется в справочниках по механической обработке для определения силы резания. Эта формула позволяет оценить силу резания в зависимости от различных режимов обработки, таких как скорость резания, скорость подачи и глубина резания, и может быть применена для разных типов материалов и инструментов:

$$P_i = C_{P_i} t^f s^g V^h K_{qi}$$

где P_i — составляющая силы резания; CP_i — постоянный коэффициент, отражающий влияние условий обработки, поддерживаемых постоянными в ходе эксперимента; t — глубина резания (мм); s — подача (мм/об); V — скорость резания (м/мин); показатели f, g, h характеризуют интенсивность влияния соответствующего элемента режима резания на P_i ; K_{qi} — коэффициент, учитывающий влияние свойств обрабатываемого материала, геометрию инструмента, износа и других факторов, не учитываемых коэффициентом CP_i [11].

Наиболее часто силы резания определяют на основе непосредственного измерения с помощью динамометров. Они подразделяются на гидравлические, механические и электрические. Гидравлические и механические не получили широкого распространения из-за того, что их показания сильно отстают от быстропротекающих процессов. В свою очередь электрические динамометры лишены этого недостатка, так как мало инерционны, и с помощью осциллографа способны записывать изменения быстропротекающих процессов за 10-5 доли секунды, и преобразовывать механический сигнал воздействия сил резания в удобный для обработки электрический.

Существует несколько способов перевода механического сигнала в электрический (рис. 6): емкостной, индуктивный, пьезоэлектрический, магнитоупругий и с помощью тензодатчика,

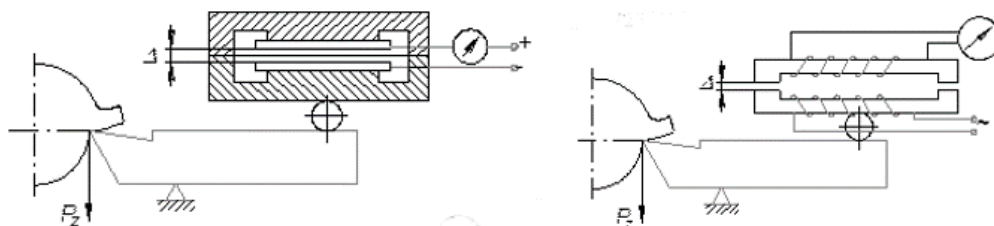


Рис. №6. Пример датчиков: емкостной(слева), индуктивный(справа)

Примером электрических динамометров может служить универсальная динамометрическая установка (рис. 7)

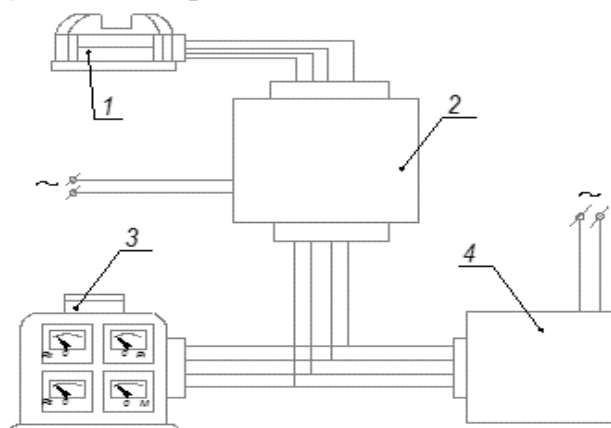


Рис. №7. Схема динамометрической установки: 1– датчик динамометра; 2– усилитель электрических сигналов; 3– приборный щит; 4– осциллограф.

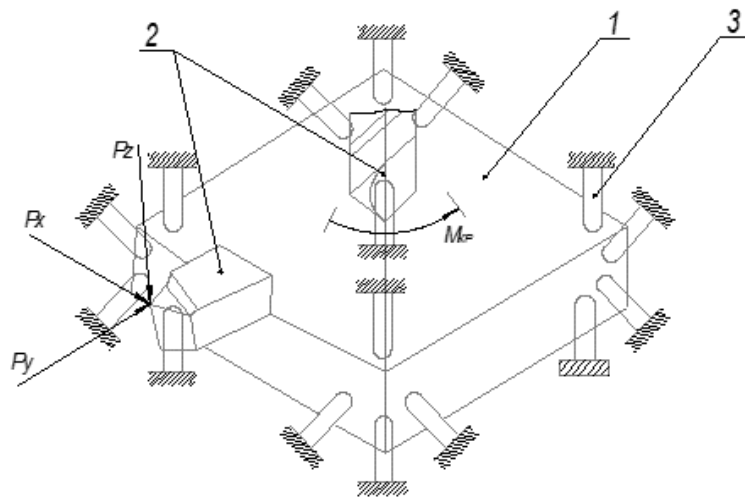


Рис. №8. Схема тензометрического динамометра: 1 – жесткая плита; 2 – держатель инструмента; 3 – опоры (16 штук), представляющие собой тонкостенные втулки на ножках-шарнирах.

Такая конструкция опор обеспечивает восприятие нагрузки только вдоль оси опоры, а их количество и расположение позволяют фиксировать составляющие силы резания P_x , P_y , крутящий момент в горизонтальной плоскости и составляющую P_z в вертикальной плоскости. На втулки-опоры наклеены тензодатчики, соединенные в соответствующие электрические схемы и имеющие выходы на усилитель, приборный щит и осциллограф (см. рис. 7).

Наиболее распространённым динамометром является УДМ-600, который дополнительно устанавливаются на станок, однако его минус состоит в том, что установка подобных датчиков возможна не на все станки, из-за особенностей конструкций. По мимо этого, в условиях производства при выходе датчиков из строя станок необходимо будет также остановить, что приводит к простоям.

Известно, что с возрастанием сил резания, возрастает потребляемая мощность двигателя. Поэтому как непосредственно силу резания, так и производные от нее такие как, мощность, крутящий момент, силы тока главного движения или движения подачи, можно использовать в качестве источника диагностического сигнала (рис. 9) [13].

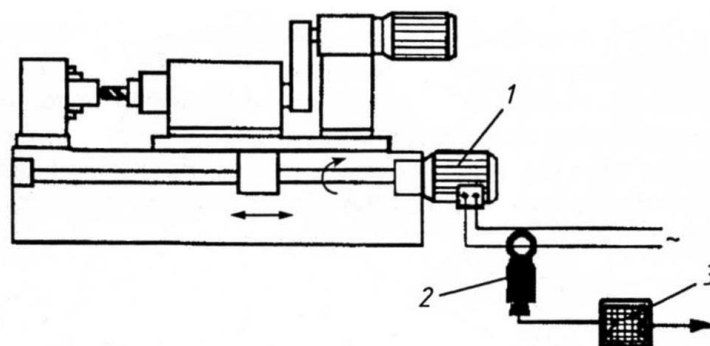


Рис. №9. Схема измерения мощности привода подачи: 1 – двигатель; 2 – датчик тока; 3 – регистратор сигнала.

Действие устройств контроля мощности резания основано на измерениях силы тока и напряжения в двигателе главного движения или движения подачи. Такие устройства весьма просты, дешевы, не требуют изменений в конструкции станка [13].

ВЫВОД

Анализ различных методов контроля выявил необходимость создания способа контроля и регулирования сил резания без использования дополнительного оборудования, которое бы не устанавливалось непосредственно в контакте с изготавливаемой деталью, и не требовало отдельного технического обслуживания, а также без необходимости отдельного контроля поверхностных свойств деталей.

Предлагаемое решение состоит в том, чтобы по показателям электропривода определять параметр силы и температуры, которые можно использовать для контроля и регулирования остаточных напряжений первого рода, через регулирования параметров режима резания.

Цель дальнейших работ это создания системы автоматического прогнозирования и обеспечения возникновения остаточных напряжений, с помощью регулирования подачи и скорости резания, на основе показателей силы резания и температуры, измеряемых по показателям электропривода. Задача дальнейших работ состоит в создании системы телеметрии, для нахождения зависимостей показателей, выдаваемых машиной, от температурно-силовых параметров, и приведение к зависимости остаточных напряжений от внутренних показателей двигателя. В качестве инструмента, с помощью которого будут сниматься силы резания, был взят динамометр УДМ-600, остаточные напряжения будут определяться с помощью механических испытаний, для определения температуры в зоне резания будет применена естественная термопара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башаров Р.Р., Кильметова Л.Р., Старовойтов С.В., Хадиуллин С.Х., Черников П.П. Анализ причин и источников возникновения остаточных напряжений // Вестник УГАТУ, 2018.
2. Кильметова Л.Р., Хадиуллин С.Х., и др. Влияние элементов режимов резания на формирование остаточных напряжений при точении жаропрочных сплавов // Вестник УГАТУ, 2020.
3. Козлов, В.Н. Резание материалов и режущий инструмент: методическое пособие. – Томск: ТПУ, 2014.
4. Кишуров В.М., Криони Н.К., Постнов В.В., Черников П.П. Резание материалов. Режущий инструмент: учебное пособие. – Уфа: Издательство «Машиностроение», 2009.
5. Метелев Б.А., Тудакова Н.М., Куликова Е.А. Основы технологии машиностроения / Нижегород. гос. техн. ун-т. – Нижний Новгород, 2006.
6. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: – Машиностроение, 1976.

7. Макаров В.Ф. Резание материалов: учебное пособие, 2009.
8. В.А. Кривоухов, П.Г. Петруха, и др. Резание конструкционных материалов, режущие инструменты и станки. – М.: Машиностроение, 1974.
9. Кузнецова Елена Владимировна, Вавель Алла Юрьевна. Параметры процесса механической обработки с учетом температурных режимов // Вестник ПНИПУ. Механика. 2013.
10. Ящерицын П.И., Еременко М.Л., Жигалко Н.И. Основы резания материалов и режущий инструмент. – Мн.: Высш. школа, 1981. 560 с.
11. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. – Мн.: Новое знание, 2006. 512 с.
12. Косилова А.Г., Мещерякова Р.К. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2. – М.: Машиностроение, 1986. 656 с.
13. Р.Р. Латыпов, В.В. Постнов, С.Х. Хадиуллин «Методы диагностики состояния режущего инструмента в станочных системах».

ОБ АВТОРАХ

Сазанов А.А. – Магистр 1 курс, УУНиТ, Уфа, aasazan23@gmail.com

Исмагилов Т.Р. – Магистр 2 курс, УУНиТ, Уфа, ismagilov.tagir@bk.ru

Кильметова Л.Р. – Преподаватель, УУНиТ, Уфа, Kilmetovalr@gmail.com

Хадиуллин С.Х. – Кандидат наук, доцент, УУНиТ, Уфа, hadiullin.sh@ugatu.su

Черников П.П. – Кандидат наук, доцент, УУНиТ, Уфа, chernikov.pp@ugatu.su

© Сазанов А.А., Исмагилов Т.Р., Кильметова Л.Р.,
Хадиуллин С.Х., Черников П.П., 2023

УДК 621.3.049.75:678.067.029.46:621.396

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Карцев Д.Е.

Аннотация: Изучены и систематизированы процессы формирования отверстий Ø 0,4-3 мм в печатных платах. Рассмотрены материалы, из которых изготовлены печатные платы, методы получения отверстий в данном материале, дефекты, возникающие при обработке, режимы обработки при сверлении, геометрические параметры режущего инструмента. Также определен материал изготовления микросверл для дальнейших испытаний, разработана конструкторская документация, план выполнения работ на предприятии и типовая методика проведения испытаний режущего инструмента и внедрения в технологический процесс механической обработки ПП.

Ключевые слова: микросверление; сверление; отверстия в печатных платах; обработка фольгированного стеклотекстолита

Основной целью исследований является изучение и систематизация процесса формирования отверстий $\varnothing 0,4-3$ мм в печатных платах (далее ПП), которые производятся на предприятии, а в дальнейшем разработать и внедрить свой режущий инструмент в связи с ограниченным ресурсом импортного инструмента (1200 отверстий) и отсутствием импортозамещения на данный момент.

Были проанализированы композиционные материалы, конструкторско-технологические параметры ПП, их типы и материалы, из которых они изготавливаются, особенности их обработки [1]. На рисунке 1 схематично представлено внутреннее строение фольгированного стеклотекстолита.

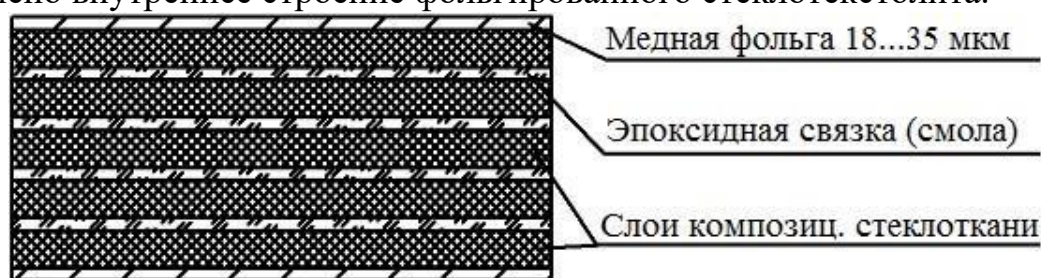


Рис. 1. Строение фольгированного стеклотекстолита.

На предприятии ПП изготавливаются из фольгированных диэлектриков на основе стеклоткани, изготовленной из нитей алюмоборосиликатного стекла, смолы для пропитывания стеклоткани и медной фольги, используемой в качестве металлического покрытия. Используются платы многослойные толщиной 0,5-3 мм.

Анализ работ, посвященных обработке композиционных материалов, показал, что процесс обработки фольгированного стеклотекстолита практически не изучен, имеются лишь исследования авторов в смежных областях. Это обосновывает актуальность исследований, направленных на повышение эффективности механической обработки ПП.

Из проработки основных методов получения отверстий в ПП было установлено, что сверление на станках с помощью сверл в настоящее время остается основным методом получения отверстий в ПП в серийном производстве.

Наряду с выбором базового материала, основными факторами, влияющими на качество обработки отверстий, является выбор оптимальной геометрии режущего инструмента и назначение правильных режимов резания.

Систематизированных материалов, которые позволяли бы назначать оптимальные режимы резания, практически нет. В работе [2] Б.П. Штучный приводит отдельные технологические рекомендации, однако их недостаточно. В общем виде его методика не учитывает влияние многих параметров, например, в формуле для расчета режимов резания отсутствует учет критерия затупления режущего инструмента; в расчете режимов резания упор делается только на

стойкость режущего инструмента, при этом не учитывается оценка других показателей, например температуры в зоне резания [2].

Кроме того, с режимами, подобранными на предприятии, стойкость сверл составляет 1200 отверстий, что является крайне малой по сравнению со стойкостью, которая заложена производителями данных сверл - 12000 отверстий. Режимы обработки будем определять на основе уже полученного опыта из работ с другими зарубежными сверлами, рекомендаций производителя Union Tool, расчетов, отраслевых стандартов.

Режимы резания для сверл диаметром 0,9 мм: частота вращения шпинделя- 35000 мин⁻¹, 40000 мин⁻¹, 60000 мин⁻¹; скорость движения осевой подачи: 1100, 1300, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000, 2200, 2300, 2400, 2500, 2600, 2700 мм/мин. Частота вращения шпинделя выбрана из соображений: 35000 мин⁻¹ – согласно рекомендациям сотрудников предприятия имеющих опыт при сверлении ПП, 40000 мин⁻¹ – согласно рекомендаций ОСТ 107.460092.004.02-86 для сверл диаметром 0,9 мм; 60000 мин⁻¹ – согласно рекомендаций компании Union Tool при сверлении стеклотекстолита сверлами Ø 0,9 мм.

Из оценки основной материал сверл для обработки композиционного стеклотекстолита – карбид вольфрама [3].

Исследования зарубежных сверл компании Union Tool диаметром 0,9 мм. показали, что сверло состоит из двух частей: режущая часть и хвостовик. С помощью долевого шлифа, стала известна твердость: хвостовик HV10=486 (HRC=48.4), режущая часть HV10=1730-1800. Также было обнаружено, что режущая часть запрессовывается в хвостовик особым методом (рис. 2).

Микроструктура - субмикронный сплав с размером зерна меньше одного микрометра, просматривалась на инвертируемом микроскопе Olympus GX51.

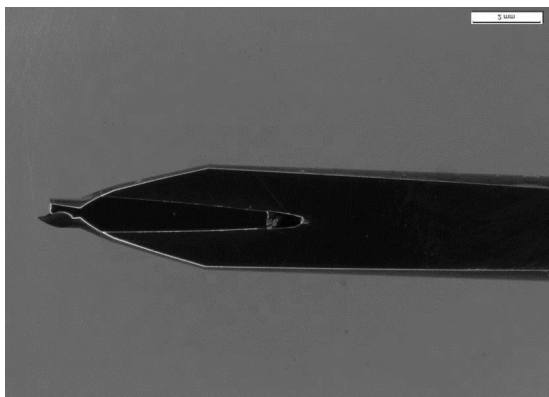


Рис. 2. Общий вид долевого сечения на стереомикроскопе Olympus SZX10 (x16÷63).

На сканирующем электронном микроскопе PhenomTM (метод сканирующей электронной микроскопии “СЭМ”) стал известен химический состав режущей части (табл. 1).

Табл. 1. Химический состав режущей части инструмента

Название элемента	Атомная концентрация, %	Весовая концентрация, %
Со (кобальт)	13,34	4,70
W (вольфрам)	86,66	95,30

Исходя из проведенного анализа покупных микросверл от компании Union Tool и изученной литературы был сделан выбор в пользу двух материалов для изготовления сверл, участвующих в последующих испытаниях в обработке ПП:

– ВК6-ОМ. Хим. состав: WC – 92 %, Co – 6 %, TaC – 2 %; твердость – 1450 HV30; размер зерна – 1,3 мкм;

– НВ10F от компании Voehlerit. Хим. состав: WC – 94 %, Co – 6 %; твердость – 1825 HV30; размер зерна – 0,5...0,8 мкм.

При анализе влияния геометрических параметров режущего инструмента на формирование качественного отверстия необходимо отметить высокий уровень проработки авторами частных задач по влиянию углов резания на обрабатываемость материала и возникновению возможных дефектов при обработке [4, 5]. Однако касательно обработки фольгированного стеклотекстолита описания четкой геометрии режущего инструмента не сформулировано.

Из анализа литературы, измерений покупных сверл от компании Union Tool диаметром 0,6 и 0,9 мм с помощью измерительной машины Walter и каталогов зарубежных фирм были разработаны экспериментальные чертежи сверл диаметром 0,6 и 0,9 мм для проведения испытаний. Сверла имеют особую конструкцию, так называемую Under Cut с увеличенным диаметром режущей кромки (рис. 3). Благодаря этому данные сверла быстрее отводят стружку и тепло и, как следствие, меньше нагреваются в процессе сверления. Это позволяет увеличить производительность и улучшить качество стенок отверстий, уменьшая наволакивание смолы.

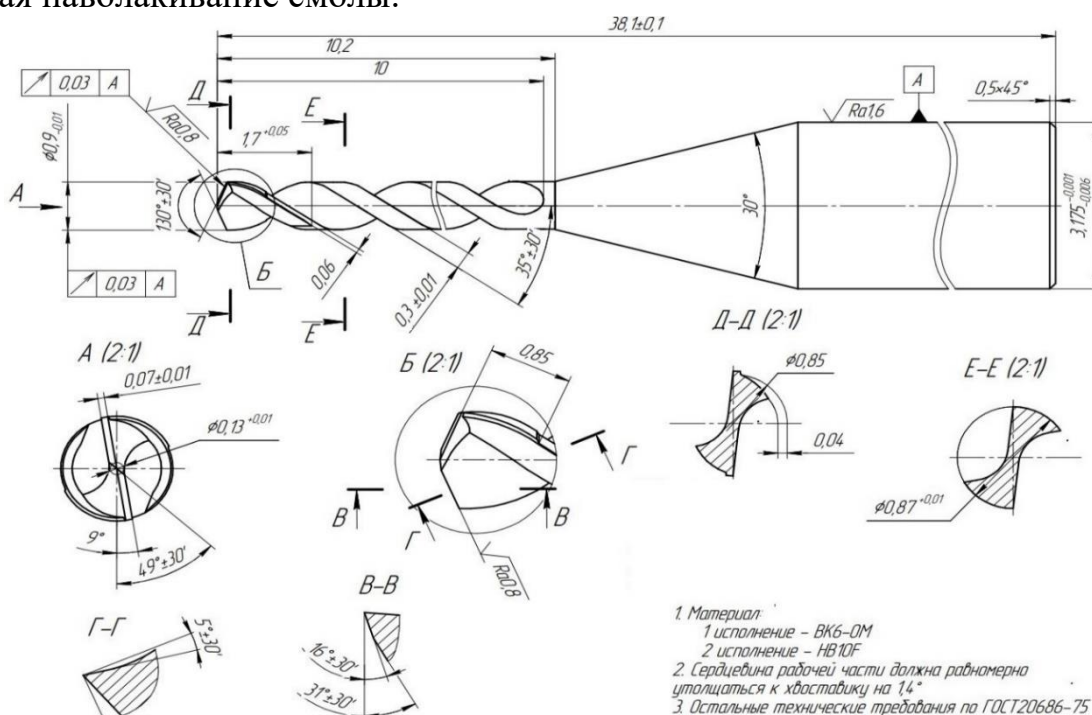


Рис. 3. Экспериментальное сверло диаметром 0,9 мм.

Также был разработан план-график работ по отработке сверл собственного производства для получения отверстий под металлизацию в ПП и типовая

методика проведения испытаний режущего инструмента и внедрения в технологический процесс механической обработки ПП.

Проведенная работа позволит перейти к проведению испытаний согласно план-графику работ и методике испытаний. По мере накопления экспериментальных данных будет выполнена оценка влияния различных параметров на процесс сверления отверстий малого диаметра при изготовлении ПП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведев А. Печатные платы. Конструкции и материалы. Техносфера, 2005. – 304 с.
2. Штучный Б.П. Точение стеклопластиков / Б.П. Штучный // Пути повышения производительности режущего инструмента. – М.: МДНТП, 1963. – С. 103-109.
3. Hasan, Mahadi; Zhao, Jingwei; and Jiang, Zhengyi, "A review of modern advancements in micro drilling techniques", 2017. – pp. 8-10.
4. Буловский, П.И., Петрова, Н.А. Механическая обработка стеклопластиков / П.И. Буловский, Н.А. Петрова. – Л.: Машиностроение, 1969. – 152 с.
5. Дрожжин, В.И., Кравченко, Л.С. Силы резания при сверлении слоистых пластмасс. Резание и инструмент, Харьков. – 1972.

ОБ АВТОРАХ

Карцев Дмитрий Евгеньевич – аспирант, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, kpzdim@gmail.com

© Карцев Д.Е., 2023

УДК 669

ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ПО ОБРАБОТЫВАЕМОСТИ РЕЗАНИЕМ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ Коногорова Л.В., Песин М.В., Макаров В.Ф.

Аннотация: В данной статье исследованы подходы к выбору оптимальных режимов резания ультрамелкозернистых материалов. Данные материалы считаются перспективными и находят эффективное применение в современном машиностроении и медицине. Важность назначения рациональных режимов резания для перспективных материалов сложно переоценить, поскольку правильность выбора оказывает существенное влияние на себестоимость деталей, качество поверхности, долговечность изделий и стойкость металлорежущих инструментов.

Ключевые слова: титановые сплавы, ультрамелкозернистая структура, механическая обработка, точение, фрезерование, режимы резания, расчет физических параметров резания материалов

Совершенствование эффективного технологического процесса в современном машиностроении является ключевой задачей, стоящей перед технологическими службами предприятий.

Одной из основных составляющих технологического процесса является выбор режимов резания. Подбор режимов резания – это процесс, по отношению к которому до сих пор не было сформировано единого подхода, учитывающего многообразие факторов, что делает его трудоемким и постановки, и решения комплексной задачи. В состав основных характеристик режимов резания входят: глубина резания, скорость резания, подача, в список дополнительных: частота вращения шпинделя, масса объекта, припуски. Подбор перечисленных характеристик позволяет получить определенную шероховатость поверхности, обеспечить долговечность обрабатываемого инструмента (резца), а также повлиять на экономическую целесообразность. Более того, качество процесса обработки связывают с устойчивостью вибрационной динамики такого процесса [1]. Существует ряд способов проведения расчета режимов резания при токарной обработке, к ним относятся:

1. Табличный. Данный метод применяется в случае наличия большого опыта расчета режимов резания.

2. Аналитический. Данный метод расчета заключается в определении параметров режима резания по эмпирическим зависимостям.

Помимо выбора способов проведения расчетов режимов резания еще одной их особенностью является соблюдение последовательности выбора значений ранее упомянутых характеристик режимов резания [2]. Данная последовательность имеет следующую поэтапность: в первую очередь выбирается глубина резания, потом подача и скорость резания. Необходимость соблюдения указанной выше последовательности обуславливается степенью воздействия на режущий инструмент. Так, изначально вычисляются значения, которые оказывают минимальное влияние на износ режущего инструмента (резца), а потом те, которые влияют на весь комплекс обработки непосредственно. Помимо этого, подбор перечисленных параметров (характеристик) резания необходимо производить с учетом характеристик станочного оборудования, а именно учитывать – металл резца, его размеры и конструкцию.

Вместе с этим, выбор режима резания сопровождается подбором необходимого типа обработки. При токарной обработке выделяют два типа: черновая обработка, получистовая и чистовая обработки. Черновая предназначена для среза большого количества материала, а чистовая для улучшения качества поверхности. Выбор типа обработки сопровождается выбором режущего инструмента, выбор которого возможен по ряду критериев: по способу обработки, по материалу рабочей части, по исполнению.

Далее рассмотрим существующие результаты в отношении токарной обработки УМЗ материалов. УМЗ материалами принято считать материалы со средним размером зерна менее 1 мкм. Однако, в таких материалах могут присутствовать дополнительные наноструктурные элементы (частицы вторичных фаз, субзерна и т.д), которые в том числе оказывают влияние на

формирование повышенных свойств материала. В современных исследованиях выявлено, что при токарной обработке материалов с УМЗ структурой происходят изменения значений микротвердости поверхности в приповерхностном слое заготовки. Так, исследователи устанавливают, что значения микротвердости становятся выше, чем в теле заготовки [3]. Помимо этого, вместе с повышением микротвердости поверхности исследовалась микроструктура. Так, было выявлено, что при токарной обработке титанового сплава Grade 4 произошли изменения в микроструктуре в приповерхностном слое на глубине 100-200 мкм [4]. Также были выявлены наиболее благоприятные относительно шероховатости поверхности, шума и вибрации, а также остаточных напряжений – режимы резания. Помимо этого, при резании материалов с УМЗ структурой установлено значительное уменьшение износа режущего инструмента. В процессе фрезерования исследователями было выявлено что качество обработанной поверхности ультрамелкозернистой структурой выше, по сравнению с образцами с крупнокристаллической структурой.

ВЫВОДЫ

1. Выбор рационального метода обработки требует соблюдения множества факторов, оказывающих влияние на экономическую целесообразность производства, качество детали и работоспособность станочного оборудования.
2. Необходима разработка комплексной методики механической обработки деталей с УМЗ структурой.
3. При токарной и фрезерной обработке выявлены изменения микротвердости и микроструктуры материалов с УМЗ-структурой.
4. В ходе постановки исследований токарной и фрезерной обработок титана Grade 4 с УМЗ-структурой и титанового сплава с УМЗ-структурой выявлены критерии оценки качества поверхностного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лапшин В.П., Моисеев Д.В. Определение оптимального режима обработки металлов при анализе динамики систем управления резанием // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. 2023. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-optimalnogo-rezhima-obrabotki-metallov-pri-analize-dinamiki-sistem-upravleniya-rezaniem> (дата обращения: 01.08.2023).
2. Михеенко И.С., Смелик А.А., Егоров С.А., Черняк В.В. Анализ влияния режимов резания на шероховатость поверхностного слоя при точении композиционного материала на основе терморасширенного графита // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2021. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vliyanija-rezhimov-rezaniya-na-sherohovatost-poverhnostnogo-sloya-pri-tochenii-kompozitsionnogo-materiala-na-osnove> (дата обращения: 14.07.2023).

3. В.Ф. Макаров, А.И. Гареев, И.Д. Казаков, А.В. Поляков // Механическая обработка ультрамелкозернистого титанового сплава ВТ6. Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии в машиностроении». 2022. С. 376–378.

4. Валиев Р.З., Жилиев А.П. Лэнгдон Т.Д. Объемные наноструктурные материалы. Фундаментальные основы и применения. – СПб.: – Эко-Вектор, 2017. – 479 с.

ОБ АВТОРАХ

Коногорова Луиза Викторовна (Пермь, Россия) – аспирант кафедры Инновационные технологии машиностроения, механико-технологического факультета, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь (e-mail: konogorova98@mail.ru).

Песин Михаил Владимирович (Пермь, Россия) – декан механико-технологического факультета, д.т.н., профессор, ПНИПУ, (e-mail: m.pesin@mail.ru)

Макаров Владимир Федорович (Пермь, Россия) – заместитель заведующего кафедрой Инновационные технологии машиностроения, механико-технологического факультета, д.т.н., профессор, ПНИПУ, (e-mail: makarovv@pstu.ru)

© Коногорова Л.В., Песин М.В., Макаров В.Ф., 2023

УДК 621.785

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ НЕФТЕПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТДЕЛОЧНО- УПРОЧНЯЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Макаренков Е.С., Песин М.В.

Аннотация: Статья раскрывает основные методы упрочнения поверхности ответственных деталей и последующего контроля. Проанализированы методы, применяемые при контроле качества поверхностного слоя насосно-компрессорных труб (НКТ). Отмечено, что при эксплуатации происходит образование микротрещин, что при длительной эксплуатации приводит к разрушению трубы. Рассмотрены вихревой и магнитопорошковый методы неразрушающего контроля с указанием особенностей их применения для различных материалов.

Ключевые слова: электромеханическая обработка, коррозия, износостойкость, упрочнение, долговечность, НКТ, неразрушающий контроль

В процессе добычи нефти и газа в скважинах применяются различные технические средства, компоненты которых соединяются между собой, как правило, с применением конической резьбы, в частности - насосно-компрессорные трубы (НКТ). Применение передовых технологий и увеличение

общей глубины скважин, при одновременном увеличении пластового давления, приводят к ужесточению требований к качеству и надежности конических резьбовых соединений. В тоже время действие широкого спектра и большого разнообразия геолого-технических показателей, непостоянство эксплуатационных условий скважин, требуют применения различных эксплуатационных характеристик надежности резьбы, а также внутреннего и наружного поверхностного слоя труб. Число соединений на одну скважину может достигать нескольких сотен, и от каждого из этих соединений во многом зависит производительность всего набора применяемого оборудования и инструментов.

Именно поэтому, в процессе производства металлопроката, а также в процессе ремонта НКТ, упрочнения поверхности труб, важным этапом, позволяющим увеличить срок эксплуатации, является неразрушающий контроль (НК) [1, 2]. При повышении надежности нефтепромыслового оборудования стоит задача моделирования процессов упрочняющей обработки ответственных деталей. К преимуществам электромеханической обработки (ЭМО) относится также повышение предела выносливости на 30-100%, ее технологическая простота и возможность закалки длинномерных деталей [3, 4]. Примером использования ЭМО для упрочнения деталей является упрочнение наружной цилиндрической поверхности, показано на рис. 1.



Рис. 2. Использование ЭМО для упрочнения наружной цилиндрической поверхности ответственных деталей

В процессе производства широко применяются различные методы неразрушающего контроля (НК) поверхности:

- вихревой метод - метод неразрушающего контроля, в основе которого лежит изучение взаимодействия электромагнитного поля вихревого излучателя с магнитным полем вихревых токов, наводимых в объекте контроля.

К преимуществам данного метода относится бесконтактность, высокая степень чувствительности и оперативность контроля, низкие требования к качеству подготовки поверхности детали.

К недостаткам данного метода относится возможность обнаружения дефектов в изделиях из ферромагнитных материалов, трудности в определении геометрии у выявленных дефектов, существенное влияние на результаты контроля разброса электромагнитных свойств объекта.

• Магнитопорошковый метод - это неразрушающий метод, применяемый для выявления трещин на поверхности в ферромагнитных материалах, например, в углеродистой стали. Для выполнения данного исследования сначала анализируемый соединительный шов подвергается сильному намагничиванию с применением электромагнита, после чего на его поверхность наносят небольшие частички магнитного материала, например, железа или магнитного оксида железа. Магнитный порошок притягивается к краям всех поверхностных микротрещин, что делает их заметными невооруженным взглядом.

В процессе дальнейшей эксплуатации происходит развитие микротрещин, что приводит к разрушению трубы задолго до расчетного срока эксплуатации изделия и крупным последствиям.

Этапы моделирования упрочняющей ЭМО и проверки качества поверхностного слоя является важными составляющими научного исследования ответственных деталей нефтепромышленного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосенко Ю.К., Шкатов П.Н., Ефимов А.Г. Вихретоковый контроль. Учебное пособие. М.: Спектр, 2011. 224 с.

2. Ефимов А.Г., Шубочкин А.Е., Мартянов Е.В. Высокопроизводительный контроль твердости на трубах с гладкостным покрытием// Экспозиция Нефть Газ. 2015. № 6 (45). С. 99-102.

3. Федорова Л.В., Федоров С.К., Славин А.В., Иванова Ю.С., Ткаченко Ю.В., Борисенко О.В. Структура и микротвердость резьбы насосно-компрессорных труб после финишной электромеханической поверхностной закалки. Металловедение и термическая обработка металлов, 2020, №2 (776), с.58–64.

4. Песин М.В., Макаров В.Ф., Халтурин О.А., Павлович А.А., Мельников А.С., Макаренко Е.С. Повышение надежности нефтепромышленного и бурового оборудования путем комплексного конструкторско-технологического обеспечения изготовления и сборки резьбовых соединений. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2021. Т. 23. № 3. С. 91-100.

ОБ АВТОРАХ

Макаренко Евгений Сергеевич (Пермь) – аспирант кафедры «Инновационные технологии машиностроения» механико-технологического факультета, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (e-mail: 124makarenkove@mail.ru)

Песин Михаил Владимирович (Пермь) – д.т.н., профессор, декан механико-технологического факультета, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, e-mail: m.pesin@mail.ru

© Макаренков Е.С., Песин М.В., 2023

УДК 621.9

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ОБЪЕМНОГО СТРОГАНИЯ И ФРЕЗЕРОВАНИЯ: СРАВНЕНИЕ УСИЛИЙ РЕЗАНИЯ

Маркин А.А., Красников И.П., Старовойтов С.В., Латыпов Р.Р.

Аннотация: Приведены экспериментальные значения режимов резания. Осуществлена теоретическое сравнение обработки строганием и фрезерованием при обеспечении аналогичных характеристик качества поверхности. Проведено расчётное моделирование данных процессов с целью сравнения усилий резания со значениями, полученными в ходе теоретических данных и их достоверности. Предложены расчетные схемы для оценки силы прогиба заготовки при строгании и фрезеровании на основе метода конечных элементов.

Ключевые слова: Стругание, лопатка

Введение

Для примера деталей со сложной и нежесткой формы были выбраны детали типа лопатки газотурбинного двигателя. В следствии сложного процесса эксплуатации из-за внешних воздействий к ним предъявляют высокие требования эксплуатации, а именно – высокая геометрическая точность и низкая шероховатость. Для этого необходимо уметь прогнозировать и управлять упругими деформациями заготовки в процессе механической обработки за счет контроля силового фактора.

Проведем сравнительный анализ альтернативу традиционному методу обработки фрезерованием – метод строгания сложно-фасонных поверхностей [1].

Расчетное сравнение силы резания при обработке лопаток строганием и фрезерованием

При анализе для практических целей силу резания P удобно раскладывать на взаимно-перпендикулярные составляющие P_z , P_y и P_x [3].

Составляющая P_z направлена вдоль направления главного рабочего движения. Величина P_z зачастую незначительно меньше полной силы P . Приблизительное значение $P_z \approx 0.9P$ [1].

Нормальная сила P_y оказывает наибольшее влияние на точность и шероховатость обработки, потому как она отталкивает инструмент от обрабатываемой заготовки. Её соотношение $P_y \approx 0.45P$.

Сила, действующая в горизонтальной плоскости, перпендикулярно P_z , (главному рабочему движению) обозначается P_x . Её соотношение к главной составляющей силы резания $P_x \approx 0.35P$.

Расчетная схема действия силы резания при строгании приведена на рисунке 1.

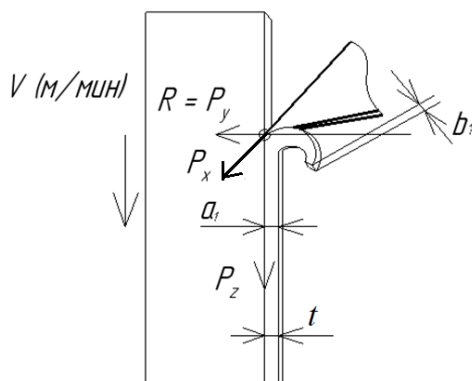


Рис. № 1 – Схема для расчета сил при обработке методом объемного строгания

(t – глубина снимаемого слоя металла за проход)

Во многих исследованиях [2, 3] расчет силы резания, для точения, как для наиболее близкого к строганию процесса, ведется по формуле:

$$P = 10 \cdot C_p \cdot a_1^x \cdot b_1^y \cdot v^z \cdot K_p, \quad (1)$$

где C_p – постоянная; x, y, z – показатели степеней; b_1 – ширина среза;

v – скорость резания; a_1 – толщина среза; K_p – поправочный коэффициент, учитывающий условия резания.

Скоростью резания для строгания будет являться подача инструмента на станке. Поправочный коэффициент K_p , использующийся в формуле (1), был принят на основе данных исследований, в которых рассмотрено влияние температурного фактора, а также скорости пластической деформации на механические свойства. Дальнейшие расчеты приведены для материала ВТ6, который чаще всего используется для изготовления компрессорных лопаток ГТД.

В последующих расчетах формула усилия прогиба (R) равно нормальной составляет (P_y) для строгания приобретает вид:

$$R = P_y = 0.45 \cdot P = 0.45 \cdot 10 \cdot K_p \cdot C_p \cdot a_1^x \cdot b_1^y \cdot v^z, \text{ Н} \quad (2)$$

где C_p – постоянная силы резания; K_p – поправочный коэффициент;

a_1 , мм – толщина среза; b_1 , мм – ширина среза; v , м/мин – скорость резания.

Тангенциальная сила $P_z \approx 0.9P$ при строгании является наиболее важной, так как она производит основную работу резания. Сила $P_y \approx 0.45P$, отталкивает инструмент от заготовки. Горизонтальная составляющая силы резания $P_x \approx 0.35P$ – это то усилие, которое прикладывается к столу станка для осуществления рабочей подачи. Из всего вышесказанного можно сделать вывод о том, что на точность обработки наибольшее влияние оказывает векторная сумма усилий P_y и P_z [2].

На рисунке 2 приведена для сравнения расчетная схема резания при фрезеровании.

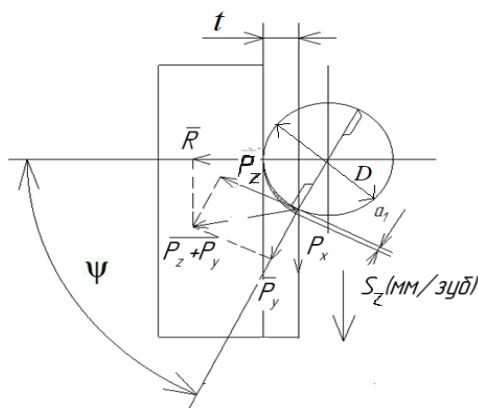


Рис. № 2 – Схема для расчета сил при фрезеровании концевой фрезой

В отличие от строгания величина прогиба детали на основе приведенной расчетной схемы приобретает вид [1]:

$$R = P_z \cdot \sin\psi + P_y \cdot \cos\psi, \text{ Н} \quad (3)$$

где $\psi = \arccos\left(1 - \frac{2 \cdot t}{D}\right)$, рад – угол контакта фрезы; t , мм – глубина резания;

D , мм – диаметр фрезы; $a_1 = S_z \cdot \sin\left(\frac{\psi}{\pi}\right)$, мм – максимальная толщина среза для выбранной подачи (S_z) на зуб.

Максимальная сила резания при фрезеровании в начальный момент времени для обработки материала ВТ6 определяется по формуле [1]:

$$P = C_p \cdot (S_z \cdot \sin\psi)^x \cdot b_1^y \cdot v^z, \text{ Н} \quad (4)$$

где C_p – постоянная силы резания; x, y, z – показатели степеней; a_1 , мм – толщина среза; b_1 , мм – ширина среза; v , м/мин – скорость резания.

В последующих расчетах после преобразования формула сила резания для фрезерования приобретает вид [1]:

$$P = 10 \cdot K_{тр} \cdot C_p \cdot (S_z \cdot \sin\psi)^x \cdot b_1^y \cdot v^z, \text{ Н} \quad (5)$$

где C_p – постоянная силы резания; $K_{тр}$ – коэффициент, характеризующий инструмент; x, y, z – показатели степеней; a_1 , мм – толщина среза; b_1 , мм – ширина среза; v , м/мин – скорость резания.

Были найдены составляющие сил P_z , P_y и P_x для строгания и фрезерования. Для фрезерования и строгания, исходя из описанных выше формул, а также результатов вычислений, были получены теоретические значения силы, прогибающей заготовку

На рисунке 3 показано сравнение расчетных значений силы резания в направлении наименьшей жесткости заготовки от глубины резания при строгании и фрезеровании при одинаковой подаче на зуб ($S_z=0,1$ мм/зуб).



Рис. № 3 – График зависимости сил резания, действующих на прогиб детали от глубины резания слоя металла: □ – строгание ○ – фрезерование

На графике (Рис. 3) видно, что до глубины резания $t \leq 0,2$ мм, характерный для чистовой обработки, составляющая силы резания направленная на прогиб заготовки при строгании меньше, чем при аналогичной обработке фрезерованием. Однако при полуставовой обработке с глубиной резания более 0,2 мм предпочтительной, с точки зрения величины силы отгиба заготовки, является фрезерная обработка.

Сравнение силы резания при обработке лопаток объемным строганием и фрезерованием методом конечных элементов

При объемном строгании главное отличие от метода построчного фрезерования заключается в отсутствии вращательного формообразующего движения (вращения инструмента). При реализации метода объемного строгания необходимо учитывать угол атаки инструмента $90^{\circ} \pm 0,5^{\circ}$ (λ) пример изменения поддержания угла атаки инструмента осуществляется поворотом детали. Если рассматривать более укрупненно отдельные участки обработки лопатки газотурбинного двигателя (ГТД) направление сил, оказывающих влияния на прогиб детали представлено на рисунке 4.

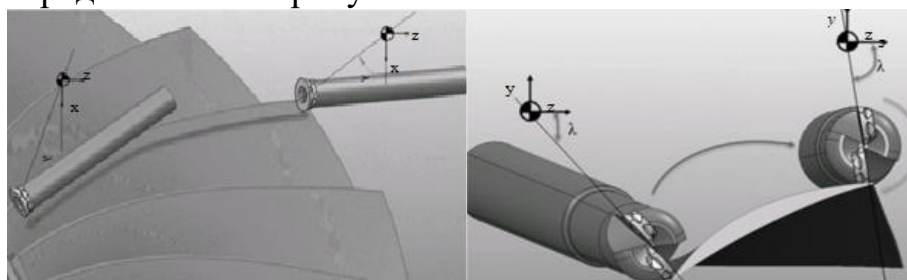


Рисунок № 4 – Объемное строгание продольными и поперечными строками

Для оценки конкретных условий обработки с точки зрения силового взаимодействия инструмента и заготовки более предпочтительным решением является анализ методом конечных элементов.

В данной статье приведены результаты моделирования двух механических процессов фрезерования и строгания использовалась круглая твердосплавная пластина R300-12400E-PL S30T с PVD покрытием TiAlN и имеющая следующие геометрические характеристики: $\gamma = 8^{\circ}$, $\alpha = 15^{\circ}$, $r = 6$ мм.

В качестве программного обеспечения для моделирования процессов резания методом конечных элементов использовался пакет прикладных программ Deform 3D. В начале был смоделирован процесс попутного фрезерования, результаты которого представлены на рисунке 5.

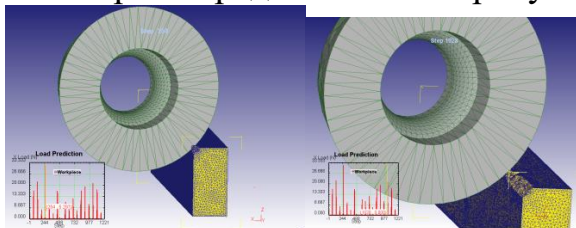


Рис. № 5 – Моделирование процесса фрезерования в Deform 3D

Опираясь на производственный опыт использования данной режущей пластины, были смоделированы наиболее часто используемые режимы резания в части варьирования подачи: 0.1 мм/зуб, 0.2 мм/зуб, 0.4 мм/зуб. График зависимости прогибающей силы резания от подачи на зуб представлен на рисунке 6.

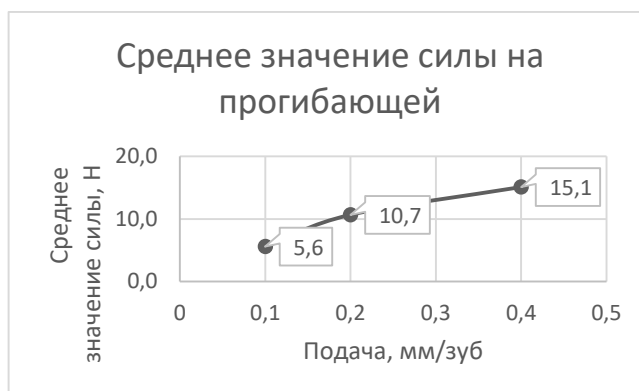


Рис. № 6 – График зависимости прогибающей силы резания от подачи на зуб при фрезеровании

Из рисунка 6 видно, что увеличение подачи на зуб приводит к нелинейному увеличению отгибающей силы резания, что по характеру соответствует эмпирической зависимости вида (5), представленной в ряде исследований [7] и говорит об адекватности полученной конечно-элементной

Далее был смоделирован процесс строгания, представленный на рисунке 7.

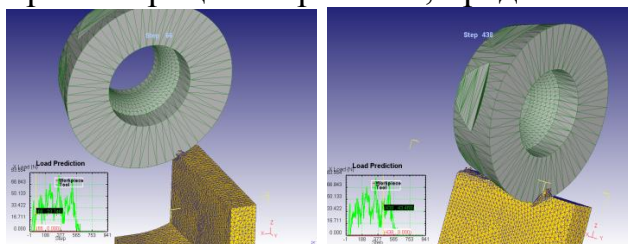


Рис. № 7 – Моделирование процесса строгания в Deform 3D

На основе данных, полученных при моделировании двух процессов, был построен график сравнения прогибающей силы резания при одинаковой подаче на зуб (S_z) и глубинах резания (t), представленный на рисунке 7.



Рис. № 8 – График зависимости прогибающей силы резания от глубины резания при одинаковой подаче на зуб ($S_z=0,3$ мм/зуб): □ – строгание ○ – фрезерование

Численный эксперимент при фрезеровании проводился с подачей $S_z=0,3$ мм/зуб, то величина прогибающей силы резания при строгании на всем диапазоне рассматриваемых глубин резания (от 0,125 мм до 0,5 мм) составляла меньшую величину.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен новый способ обработки лопаток газотурбинного двигателя – строгание;
2. Проведено теоретическое сравнение усилий резания при строгании и фрезеровании аналогичных припусков на основе эмпирических зависимостей.
3. Предложены расчетные схемы для оценки силы прогиба заготовки при строгании и фрезеровании на основе метода конечных элементов.
4. На основе предложенных расчетных схем проведен численный эксперимент с целью теоретического сравнения усилия прогиба при фрезеровании и строгании.
5. Было выявлено, что при строгании с глубиной резания до 0,2 мм величина прогибающей силы резания при строгании на 30-40% меньше, чем при фрезеровании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старовойтов, С.В. Повышение эффективности лезвийной обработки компрессорных лопаток за счет объемного строгания / С.В. Старовойтов, И.П. Красников, М.Д. Гайлиш // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2023. – № 1. – С. 121-127. – EDN SKOGIR.
2. Постнов, В. Оценка эффективности эксплуатации твердосплавного инструмента на основе прогнозирования его режущей способности / В. Постнов, С.В. Старовойтов, С.Х. Хадиуллин // СТИН. – 2013. – № 5. – С. 15-19. – EDN RPDNYH.
3. Расчетно-экспериментальный метод компенсации погрешности механообработки лопаток газотурбинных двигателей на мехатронном станочном оборудовании / В.В. Постнов, Е.Н. Малахов, С.В. Старовойтов [и др.] // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2012. – Т. 16, № 7(52). – С. 145-153. – EDN PWZUHP.

ОБ АВТОРАХ

Маркин Александр Александрович – магистрант, УУНиТ, alexandr-markin2000@yandex.ru;

Красников Илья Петрович – аспирант, ассистент каф. АТП, УУНиТ, interpro@list.ru;

Старовойтов Семён Владимирович – к.т.н., начальник отдела по инновационной деятельности, Технопарк АТ, starovoitov.s@tp-at.ru;

Латыпов Рашид Рафгатович – к.т.н., доцент каф. АТП, УУНиТ.

© Маркин А.А., Красников И.П., Старовойтов С.В., Латыпов Р.Р., 2023

УДК 621.865.8

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ НА ПРИМЕРЕ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ Месягутов И.Ф., Гончарова С.Г.

Аннотация: Статья посвящена использованию нечетких конечных автоматов в задачах управления техническими объектами вместо классических нечетких регуляторов. Качество управления улучшается за счет нелинейных и динамических свойств предлагаемого регулятора.

Ключевые слова: системы автоматического управления; проектирование систем управления; нечеткая логика; нечеткий регулятор; конечные автоматы

Нечеткая логика широко применяется в задачах управления и принятия решений. Нечеткий логический вывод позволяет получать приемлемые результаты при синтезе алгоритмов управления в условиях неопределенности [1].

На первом этапе нечеткого логического вывода, фаззификации, устанавливаются отношения между реальным миром и абстрактными понятиями: значениями физических величин и терминами лингвистических переменных. Эти отношения описываются функциями принадлежности, значения которых, с одной стороны, представляют непрерывные, многозначные логические переменные, изменяющиеся от 0 до 1, с другой – степень уверенности (неопределенности) в принадлежности текущих значений физических величин определенному диапазону их изменения.

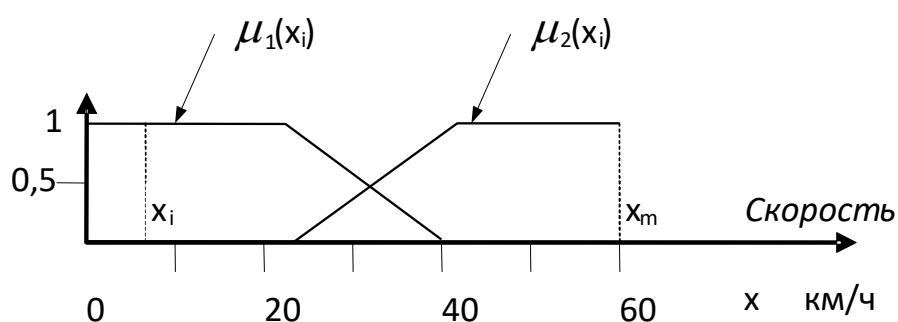


Рис. № 1. Функции принадлежности термов лингвистической переменной Скорость

На рис. 1 обозначено:

x_i - текущее значение физической величины скорости x (км/ч);

x_m - максимальное значение физической величины скорости x (км/ч);

$\mu_1(x_i)$, $\mu_2(x_i)$ - функции принадлежности первого и второго термина лингвистической переменной Скорость.

Характерно, что значения функций принадлежности на некоторых участках изменяются от 0 до 1, а области их определений пересекаются. Первое обстоятельство свидетельствует об изменении степени уверенности в принадлежности x_i к определенному диапазону изменения скорости (подмножеству X), второе – о возможности альтернативы в выборе термов лингвистической переменной Скорость.

При любых формах функций принадлежности эти два обстоятельства являются необходимыми условиями корректной фаззификации и возможности дальнейшего нечеткого вывода.

Следующий этап, нечеткий логический вывод основан на базе правил, в которых по определенной композиции исходных суждений (посылок) формируется новое суждение (вывод).

Однако синтез алгоритмов управления на основе нечеткой логики в большинстве случаев не имеет формальных методов обеспечения требований к качеству и устойчивости систем управления [2]. А в системах логического управления часто возникают проблемы обеспечения логической последовательности команд.

Для компенсации указанных недостатков предлагается модифицированная методика синтеза алгоритмов управления на основе нечеткой логики. Изменения касаются нескольких стадий нечеткого логического вывода.

1. Логические операции посылок каждого правила вывода опишем формально, посредством логических операций конъюнкции ($\mu_{AB} = \text{con}(\mu_A, \mu_B) = \min(\mu_A, \mu_B)$) и дизъюнкции ($\mu_{AB} = \text{dis}(\mu_A, \mu_B) = \max(\mu_A, \mu_B)$), где μ_A , μ_B – функции принадлежности термов исходных лингвистических переменных.

2. Значение результирующей функции принадлежности термов исходных лингвистических переменных каждого правила представим входной переменной конечного автомата [3]. При этом число входных переменных автомата равно общему количеству термов всех исходных лингвистических

переменных. Каждое состояние конечного автомата соответствует конкретному терму выходной лингвистической переменной. Структура автомата представлена двумя модулями (Функция переходов, Память состояний) на рис. 2.

3. Правила традиционного нечеткого логического вывода представляются так: «Если такой-то терм одной исходной лингвистической переменной и такой-то терм другой исходной лингвистической переменной, то такой терм выходной лингвистической переменной». Применение конечного автомата, в памяти которого сохраняется терм выходной лингвистической переменной, позволяет использовать этот терм на следующем шаге нечеткого логического вывода. Правило предлагаемого нечеткого логического вывода учитывает результат применения предшествующего правила, т.е. предшествующий вывод и формулируется так: «Если такой-то терм одной исходной лингвистической переменной и такой-то терм другой исходной лингвистической переменной и предшествующий терм выходной лингвистической переменной, то такой следующий терм выходной лингвистической переменной».

Формальная структура предлагаемого нечеткого логического вывода приведена на рис. 2.

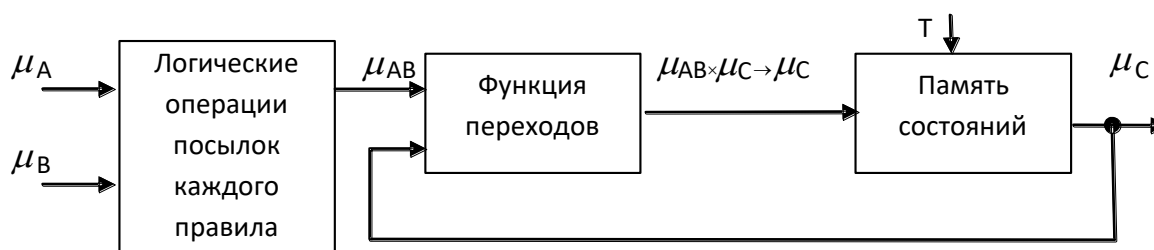


Рис. № 2. Структура модифицированного нечеткого логического вывода

На рис. 2 обозначено:

μ_A – множество функций принадлежности термов исходной лингвистической переменной A;

μ_B – множество функций принадлежности термов исходной лингвистической переменной B;

μ_C – множество функций принадлежности термов выходной лингвистической переменной C, множество состояний автомата;

μ_{AB} – множество результирующих функций принадлежности термов исходных лингвистических переменных;

$\mu_{AB} \times \mu_C \rightarrow \mu_C$ – множество отображений на множество функций принадлежности термов выходной лингвистической переменной C декартового произведения множества результирующих функций принадлежности термов исходных лингвистических переменных и множества функций принадлежности термов выходной лингвистической переменной C;

T – дискреты времени для динамических систем или внешние события для логических систем, сигналы, инициирующие изменение состояний автомата.

Функцию переходов автомата $\mu_{AB \times \mu_C \rightarrow \mu_C}$ представим в табл. 1 (внутри таблицы представлены состояния автомата, следующие за состояниями, которые находятся на соответствующей строке, слева от рамки), как один из примеров формализации базы правил, при условии:

$$\mu^i_{AB} \in \mu_{AB}, i = [1, n]; \mu^j_C \in \mu_C, j = [1, m].$$

Табл. 1

	μ^1_{AB}	μ^2_{AB}	μ^i_{AB}	μ^n_{AB}
μ^1_C	μ^1_C	μ^2_C	•	μ^2_C
μ^2_C	μ^1_C	μ^1_C	•	μ^m_C
μ^j_C	•	•	•	•
μ^m_C	μ^2_C	μ^m_C	•	μ^1_C

Переходы в каждое последующее состояние автомата опишем системой логических условий:

$$\begin{aligned} \mu^1_C &= \text{dis}(\text{con}(\mu^1_C, \mu^1_{AB}); \text{con}(\mu^2_C, \mu^1_{AB}); \text{con}(\mu^2_C, \mu^2_{AB}); \text{con}(\mu^m_C, \mu^n_{AB})) \\ \mu^2_C &= \text{dis}(\text{con}(\mu^1_C, \mu^2_{AB}); \text{con}(\mu^1_C, \mu^n_{AB}); \text{con}(\mu^m_C, \mu^1_{AB})) \\ &\dots\dots\dots \\ \mu^m_C &= \text{dis}(\text{con}(\mu^m_C, \mu^2_{AB}); \text{con}(\mu^2_C, \mu^n_{AB})) \end{aligned}$$

Покажем на примере управления мобильным роботом при «заносе» необходимость применения модифицированного нечеткого логического вывода.

Множество функций принадлежности термов выходной лингвистической переменной, как правило, содержат 3-5 элементов, предположим $C = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\}$, для управления рулем:

- C₁ – повернуть руль сильно влево;
- C₂ – повернуть руль немного влево;
- C₃ – руль прямо;
- C₄ – повернуть руль немного вправо;
- C₅ – повернуть руль сильно вправо.

Перед «заносом» руль находится в состоянии C₃, происходит «занос» влево - руль в состоянии C₂. На следующем шаге управления «занос» продолжается, но руль переводится в состояние C₃. Если не перевести руль в состояние C₃, то начнется «занос» вправо и может начаться развитие колебательного процесса, который приведет к аварии. Следовательно, при выводе робота из «заноса», выборе следующего воздействия на руль, необходимо учитывать предшествующее воздействие.

Остальные этапы, композиции и дефаззификации осуществляются по известным методикам [1].

Модифицированный нечеткий логический вывод – это процесс вывода с учетом его предыстории, что позволяет логически повышать устойчивость

динамических систем управления и формировать логическую последовательность команд в системах логического управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончарова, С.Г., Месягутов, И.Ф. Разработка программного обеспечения систем автоматизации на базе программируемых контроллеров Allen-Bradley. – Уфа: УГАТУ, 2014. – 93 с.
2. Певзнер, Л.Д. Практикум по математическим основам теории систем. – СПб.: Лань, 2013. – 400 с.
3. Карпов, Ю.Г. Теория автоматов. – СПб.: Питер, 2003. – 208 с.

ОБ АВТОРАХ

Месягутов Игорь Фаритович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа, e-mail: kats_ugatu@mail.ru

Гончарова Светлана Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа, e-mail: kats_ugatu@mail.ru

© Месягутов И.Ф., Гончарова С.Г., 2023

УДК 621.9.01

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ О ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ ЧЕРЕЗ КОНТАКТ «ИНСТРУМЕНТ-ДЕТАЛЬ» ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ

Никитин Ю.А.

Аннотация: Рассматривается метод измерения износа режущего инструмента для систем оперативной диагностики и управления температурно-силовым режимом обработки резанием в мехатронных станочных модулях, основанный на информации о переменном токе, пропускаемом через контакт «инструмент-деталь». Представлены разработанные алгоритмы диагностики состояния режущего инструмента при использовании данного метода.

Ключевые слова: электропроводимость, переменный ток, системы оперативной диагностики

Важной проблемой автоматизированного производства является разработка станочных систем, позволяющих интенсифицировать процесс механообработки [1]. Высокая производительность при обработке деталей с одновременным формированием требуемых характеристик поверхностного слоя деталей для получения необходимых эксплуатационных свойств узлов и изделий невозможно без информации о текущем износе инструмента и управления его интенсивностью [2]. Контроль состояния режущего инструмента, определение момента наступления критического износа инструмента требуют создания

надежно работающих в условиях производства чувствительных датчиков износа инструмента.

Исследование физических аспектов формирования электрической проводимости (ЭП) контакта "инструмент-деталь" (КИД) позволили обосновать новые способы измерения износа инструмента, удовлетворяющие требованиям точности и быстродействия измерения, и определить возможности использования информационных параметров ЭП КИД при пропускании переменного тока через КИД для осуществления контроля и управления температурно-силовым режимом обработки резанием [3].

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 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.

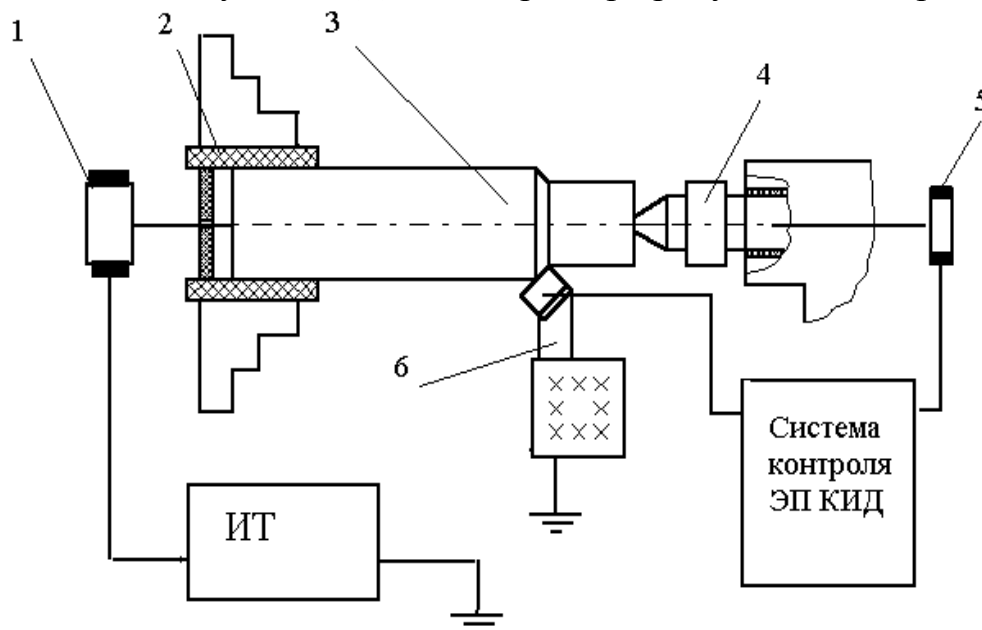


Рис. 1. Схема установки для измерения ЭП КИД:

- 1 – силовой токосъем, 2 – изоляция, 3 – заготовка, 4 – задний центр,
5 – измерительный токосъем, 6 – режущий инструмент,
ИТ – источник переменного тока

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. Однако в случае применения источника постоянного тока [4] контролируемое контактное падение напряжения является интегральной характеристикой проводимости тока через

КИД (по передней поверхности инструмента и стружки, по задней поверхности инструмента и детали), что приводит к значительным трудностям при разработке алгоритмов диагностики и управления процессом механообработки по информации об ЭП КИД.

В процессе проведенных исследований [5] 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 [6].

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 [7]. В качестве такого источника тока был выбран преобразователь, в основе которого содержится резонансный LC-контур (рис. 2) [8]. При коммутации силового ключа S1 в LC1-контуре возникает колебательный процесс, при котором ток, пропускаемый через контакт инструмент-деталь, носит синусоидальный характер. Амплитуда тока через Rкид поддерживается на заданном уровне системой стабилизации (на рис.2 не показано).

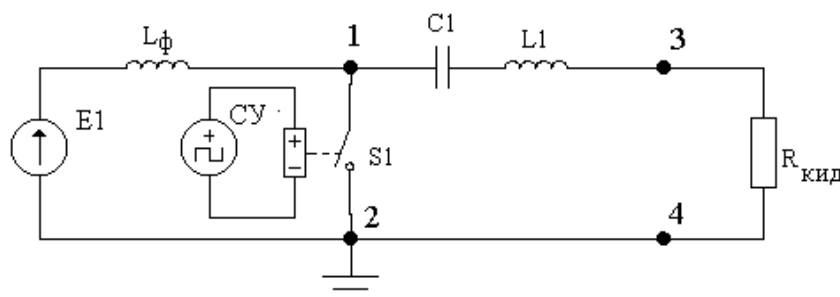


Рис. 2. Функциональная схема силовой части источника импульсного тока

Достоинство данного устройства по сравнению с рассмотренным в [4], заключается в возможности получения достаточно большого амплитудного значения тока через КИД при малой длительности импульса тока (ограничения связаны с типом применяемого тиристорного ключа S1) 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.

На рис. 3 и рис. 4 приведены осциллограммы сигналов контактного падения напряжения на КИД при пропуске 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.

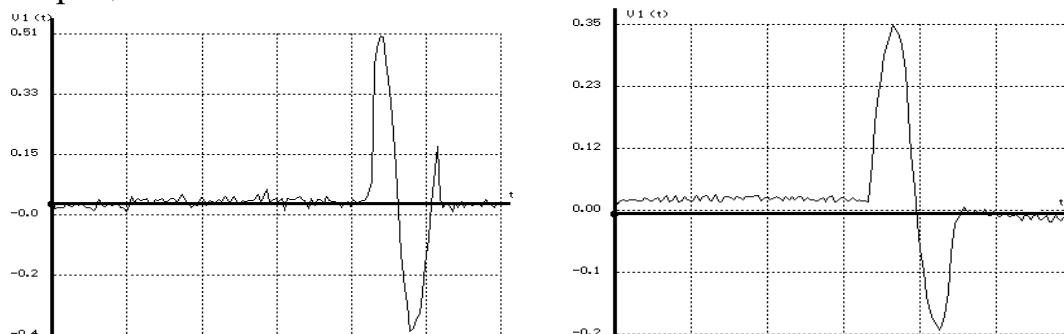


Рис. 3. Сигнал, соответствующий разрыву контакта “инструмент - деталь” (слева) и сигнал, соответствующий моменту касания острого резца (справа).

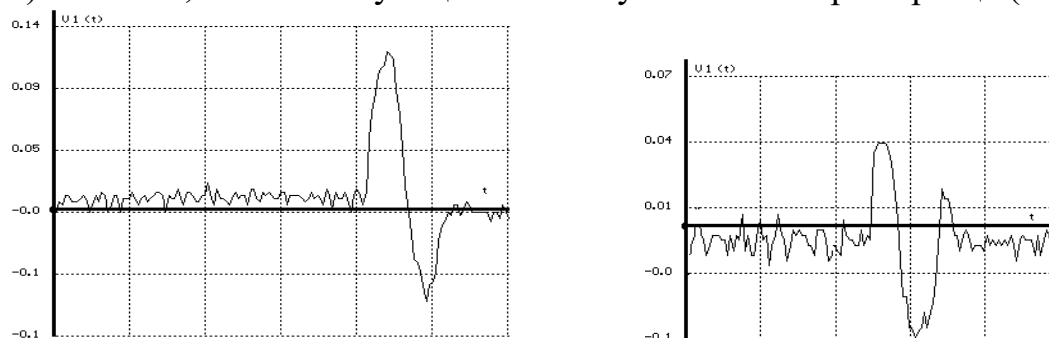


Рис. 4. Сигнал, соответствующий износу резца 0,2 мм (слева) и сигнал критического состояния при возможной поломке или выкрашивании (справа).

Из осциллограмм (рис.3, рис.4) видно, как изменяется амплитуда и форма сигналов во времени 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. На основе данной информации разработаны алгоритмы, реализованные в цифровой системе диагностики состояния РИ в процессе резания труднообрабатываемых материалов.

ВЫВОДЫ

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. В дальнейшем при использовании соответствующих методов (например, теории распознавания

образов или Вельвет анализа [9,10]) данные об ЭП КИД на переменном токе позволят разрабатывать эффективные системы оперативной диагностики состояния режущего инструмента при резании труднообрабатываемых материалов.

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 «ТНТ», 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. 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.
4. 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.
5. Никитин В.А., Хузин И.С. Диагностика станочных систем механообработки//Проблемы механики и управления: сб. научных трудов УНЦ РАН. Уфа. 1994, С. 117-123
6. 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.
7. 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.
8. Никитин Ю.А. Транзисторные преобразователи постоянного напряжения класса E.//Канд. диссертация. – МАИ, 1990. – 225 с.
9. Зориктуев В.Ц., Никитин Ю.А., Сидоров А.С. Мониторинг и прогнозирование износа режущего инструмента /1/ СТИН. 2007. № 10. С.31-34.
10. Zoriktuev V.T., Nikitin Y.A., Sidorov A.S. Monitoring and prediction of cutting-tool wear // Russian Engineering Research. 2008. Т. 28. С. 88-91.

ОБ АВТОРЕ

Никитин Юрий Александрович – уч. звание: к.т.н., доцент, доцент, ФГБОУ ВО УУНиТ, каф. Автоматизация технологических процессов, email: nikyu@yandex.ru

© Никитин Ю.А., 2023

СПОСОБ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРОВ НА ОПЕРАЦИИ ХОНИНГОВАНИЯ

Огородов В.А.

Аннотация: В работе приведены результаты исследования способа закрепления ступенчатых тонкостенных цилиндров на операции хонингования, заключающегося в обжиге тонкостенного цилиндра эластичной манжетой с приложением к нему растягивающего усилия, в среде конечно-элементного моделирования DEFORM-3D Ver. 6.1 (SP 2). Проведен сравнительный анализ предлагаемого способа с известными способами, который показал, что применение нового способ закрепления позволяет снизить в 1,2–1,5 раза неравномерность деформации ступенчатого тонкостенного цилиндра от действия усилий закрепления и радиальных сил, имитирующих усилия разжима брусков, создавая тем самым условия для повышения точности обрабатываемого отверстия.

Ключевые слова: хонингование, тонкостенный цилиндр, точность отверстия, способ закрепления, неравномерность деформации, эластичная манжета, осевое растягивающее усилие, радиальные силы

Повышение геометрической точности поверхностей сопряжения трущихся пар остается актуальной задачей машиностроения и в настоящее время. При хонинговании, являющейся окончательной операцией обработки тонкостенных цилиндров, показатели точности отверстия зависят от способа их закрепления [1 – 4].

Исследованиями в области хонингования тонкостенных цилиндров [5] установлено, что наилучшими с точки зрения геометрической точности обработанного отверстия являются закрепление эластичной манжетой, закрепление с применением растягивающего усилия, а также закрепления цилиндра эластичной манжетой с одновременным его сжатием осевым усилием при условии выполнения заданного соотношения между силами закрепления [6]

$$T = \frac{2\pi R^2 p}{\mu},$$

где T – осевое сжимающее усилие; p – давление обжима цилиндра по наружной поверхности; R – радиус срединной поверхности цилиндра; μ – коэффициент Пуассона.

Общим между тремя этими способами является то, что усилие закрепления противодействует деформации тонкостенного цилиндра от усилий разжима брусков, как бы делая его «толстостенным». В работе [2] для увеличения этого противодействия предложено армировать эластичную манжету стальными пластинами.

Поскольку растягивающее усилие закрепления тонкостенного цилиндра, как и обжим эластичной манжетой, уменьшают диаметр обрабатываемого

отверстия [5], была выдвинута гипотеза, что совмещение обжима тонкостенного цилиндра эластичной манжетой с приложением растягивающего усилия должно усилить эффект противодействия деформации цилиндра при разжиге брусков, тем самым обеспечить условия повышения геометрической точности обработки отверстия тонкостенных цилиндров на операции хонингования.

Целью данной работы является исследование способа закрепления ступенчатого тонкостенного цилиндра эластичной манжетой с приложением к нему растягивающего усилия.

Изучение свойств предлагаемого способа производилось по методике, изложенной в работах [3, 5, 6], заключающейся в расчете неравномерности деформации типового образца в зажимном приспособлении от усилий закрепления при действии на него системы радиальных сил, имитирующих радиальную подачу хонинговальных брусков.

Напряженно-деформированное состояние тонкостенного типового образца рассчитывалось в среде конечно-элементного моделирования DEFORM-3D Ver. 6.1 (SP 2).

В качестве типового образца был для уменьшения объема вычислений принят ступенчатый тонкостенный цилиндр с ребром жесткости в его среднем поперечном сечении.

Относительные размеры образца (отношение минимальной толщины стенки образца к радиусу срединной поверхности, а также его длины к диаметру отверстия) приняты соответствующими размерам реальных гидроцилиндров летательных аппаратов.

При назначении минимальной частоты сетки конечных элементов, на которую был разбит типовой образец, исходили из требования расположения не менее трех узлов на одной линейной образующей образца.

Действие на образец 4-х брусков хонинговальной головки имитировалось системой из 12 равных по величине сосредоточенных радиальных сил, по три силы для каждого бруска. Длина хонинговальных брусков принята равной 50 мм, что составляет рекомендуемые 0,75 от длины цилиндра [1, 7]. Бруски располагались по середине образца, поскольку наиболее сложно добиться геометрической точности отверстия именно в его среднем сечении. Крайние положения брусков не рассматривались, поскольку точности отверстия у краев отверстия при хонинговании добиваются регулированием величины выбега брусков [1, 2, 7].

Расстояние между точками приложения сил выбрано таким, чтобы исключить влияние каждой из этих сил на деформацию образца в точках приложения других сил.

Величина радиальных сил при исследованиях варьировалась в пределах от 25 Н до 150 Н, которые приводят к деформации тонкостенного цилиндра, соответствующей радиальным подачам хонинговальных брусков, назначаемых для устранения исходного отклонения формы обрабатываемого отверстия [1, 2, 7].

Для оценки свойств изучаемого способа закрепления тонкостенного цилиндра (эластичной манжетой с приложением растягивающего усилия) этот

способ сравнивался с другими, получившими на практике хонингования наиболее широкое применение, способами закрепления тонкостенных цилиндров: закрепление по наружной поверхности эластичной манжетой, зажим по торцам, зажим по торцам с одновременным обжатием эластичной манжетой.

Для обеспечения сравнимости результатов расчетов величины деформации образца при его закреплении эластичной манжетой осевым сжимающим усилием была использована приведенная выше зависимость, определяющая условие, при котором соблюдается равенство по абсолютной величине при разных знаках радиальной деформации тонкостенного цилиндра, известной из теории цилиндрических оболочек [6].

Величина p принята равной давлению сжатого воздуха в цеховой сети машиностроительных предприятий – 0,4 МПа. Соответственно величина сжимающего усилия T составила 2537 Н.

Неравномерность деформации Δw типового образца вычислялась как разница между максимальной и минимальной величинами радиальной деформациями в направлении $+X$ в точках приложения радиальных сил.

Изучение влияния радиальных сил q , изменяемых в диапазоне от 25 Н до 150 Н, на неравномерность деформации образца показал, что закрепление тонкостенного цилиндра эластичной манжетой с приложением растягивающего усилия при усилиях q более 40 Н уменьшает неравномерность образца по сравнению использованием для закрепления только растягивающего усилия примерно в 1,5 раза, а по сравнению с зажимом только эластичной манжетой или совмещенным способом – в 1,15-1,2 раза.

Следовательно, применение предлагаемого способа создает условия для повышения точности обработки отверстий при хонинговании до 1,5 раза.

Примечательно, что все эти три способа объединяет использование эластичной манжеты для закрепления образца. Это свидетельствует о доминирующем влиянии обжима тонкостенных участков образца наружным давлением p на достижение минимума изучаемой неравномерности деформации образца.

Наличие минимума неравномерности деформации образца Δw обусловлено достижением баланса между деформациями заготовки от усилий закрепления и от действия системы радиальных сил. Это создает наилучшие условия обеспечения высокой точности обрабатываемого отверстия в тонкостенном цилиндре при хонинговании

Поскольку величина осевого растягивающего усилия $-T$ не связана с величиной давления p какими-либо закономерностями, была изучена чувствительность неравномерности деформации образца к вариациям соотношения между усилиями p и $-T$, в частности: при постоянной величине $-T$ изменялась величина давления p ; при неизменном давлении p варьировалась величина растягивающего усилия $-T$.

Выполненные исследования показали, что изменение величины растягивающего усилия в меньшей степени влияет на неравномерность деформации, чем давление обжима тонкостенного цилиндра эластичной манжетой.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что применение для закрепления типового образца растягивающего усилия совместно с его обжатием образца эластичной манжетой в 1,2–1,5 раза снижает неравномерность его деформации по сравнению с известными способами закрепления. Поэтому применение этого способа создает условия для повышения точности хонингования отверстий в ступенчатых тонкостенных цилиндрах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудояров Р.Г. Особенности алмазного хонингования при изготовлении точных отверстий деталей авиационных агрегатов. Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2002, № 2, с. 49–51.
2. Лысенко Н.К. Шилова Ю.А. Технологическое обеспечение хонингования отверстий цилиндров малой жесткости. Самарский науч. центр РАН. 2011, т. 13, № 4 (3), с. 1104–1105.
3. Огородов В.А. Обеспечение точности при хонинговании отверстий тонкостенных цилиндров // Вестник УГАТУ / Научный журнал Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2020. Т. 24, № 3(89). с. 27–35.
4. Огородов В.А. Обеспечение точности хонингования тонкостенных цилиндров. Металлообработка, 2020, № 4, с. 24–32.
5. Огородов В.А., Криони Н.К. Повышение точности хонингования тонкостенных цилиндров. Известия высших учебных заведений. Авиационная техника, 2020, № 4, с. 163–168.
6. Огородов В.А. Повышение точности хонингования отверстий ступенчатых тонкостенных цилиндров. Вестник машиностроения, 2021, № 4, с. 49–54.
7. Хонингование. Волгоград, Издательство ВолгГАСУ, 2013, 245 с.

ОБ АВТОРЕ

Огородов Владимир Алексеевич – к.т.н, доцент ФГБОУ ВО УУНиТ,
г. Уфа, ogorodov_v@list.ru

© Огородов В.А., 2023

УДК 62-05

ГОСУДАРСТВЕННАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ПОЛИТИКА В ОБЕСПЕЧЕНИИ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРОВ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ОПК НА ПРИМЕРЕ ПЕРМСКОГО КРАЯ

Песин М.В.

Аннотация: Подготовки в вузах и последующее трудоустройство выпускников на предприятия оборонно-промышленного комплекса (ОПК) носит системный характер, постоянно совершенствуется. Так сотрудниками предприятий ОПК становятся, как и выпускники вузов, так и колледжей и техникумов. Одной из основных задач органов местного самоуправления

является создание условий и обеспечение муниципальных образовательных учебных организаций (МОУ) условиями для формирования начальных инженерных компетенций у обучающихся. Исследование деятельности органов местного самоуправления, направленной на привлечение учащихся в инженерные классы, показывает, что необходимым условием роста мотивации и улучшение успеваемости обучающихся и дальнейшее их поступление в технический вуз. И, как следствие, работодатель принимает на работу выпускника с уже выстроенной индивидуальной траекторией развития, направленной на постоянное улучшение профессиональных качеств специалиста предприятия.

Ключевые слова: инженерные кадры, промышленные предприятия, ОПК, инженерное образование

Повышенное внимание директоров по персоналу и начальников отдела к уровню подготовки молодых кадров в вузе и эффективной организации их работы на предприятиях оборонно-промышленного комплекса (ОПК) наблюдается постоянно, начиная с первого курса и до момента выпуска. В данной работе на примере инженерных классов, системной профориентационной работы вуза рассмотрена роль органов власти города Перми и Пермского края.

Система местного самоуправления в Пермском крае представлена 46 муниципальными образованиями 2-го уровня. В настоящее время в Пермском крае 26 городских округов, 17 муниципальных округов и 3 муниципальных района, которые состоят из 41 сельского поселения.

Актуальность. Создания инженерных классов актуально для авиакосмической отрасли, нефтяного машиностроения, станкостроения, автомобилестроения и других сфер народного хозяйства и направлена на обеспечение инженерными кадрами предприятий ОПК.

Статистические данные. Региональная система образования представлена 783 образовательными организациями общего (включая дошкольное, начальное, основное и среднее общее), дополнительного и среднего профессионального образования, а также 10 образовательными организациями высшего образования.

В 2019-2020 годах в Пермском крае в рамках реализации национального проекта «Образование» созданы: детский технопарк «Кванториум. Фотоника», 2 мобильных технопарка «Кванториум», центр цифрового образования детей IT-клуб, центр выявления и поддержки одаренных детей «Академия первых», Центр опережающей профессиональной подготовки, Центр оценки профессионального мастерства педагогов, 21 центр «Точка роста».

Системой образования предусмотрен комплекс мероприятий по привлечению молодых специалистов в организации ОПК и закреплению их в этих организациях:

1. Подпунктами «г», «д» пункта 19 Основ государственной политики в области развития оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу;

2. Утвержденных Указом Президента Российской Федерации от 23 февраля 2017 № 91;

3. Пунктами 65, 66 Плана мероприятий по реализации в 2021 - 2024 годах Основ государственной политики в области развития оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации на период до 2025 года, утвержденного распоряжением Правительства Российской Федерации от 30 сентября 2021 г. № 2750-р;

Предусмотрена также популяризация и повышение привлекательности работы в организациях ОПК путем развития технического творчества школьников, обеспечивающая углубленную подготовку школьников по базовым естественнонаучным дисциплинам, а также создавать условия для профориентации школьников для их последующего трудоустройства в организации оборонно-промышленного комплекса (далее – ОПК).

Основная идея инновационной образовательной программы на федеральном, региональном и локальном уровнях. Необходимость реализации Инновационной программы обусловлена его актуальностью на различных уровнях, в частности:

- федеральный уровень актуальности Программы определяется посланием Президента РФ В.В. Путина Федеральному собранию, в котором четко указывается на необходимость привлечения материальных и кадровых ресурсов для обеспечения высокого уровня образования населения, в том числе, через инженерные общеобразовательные организации.

Создание инженерных классов соответствуют:

Национальным целям развития России до 2030 года (п.Б – Возможности для самореализации и развития талантов, п.Д – Достойный, эффективный труд и успешное предпринимательство),

задачам Стратегии научно-технологического развития России (п.А – создать возможности для выявления талантливой молодежи и построения успешной карьеры в области науки, технологий и инноваций, обеспечив тем самым развитие интеллектуального потенциала страны),

ключевым показателям эффективности Национального проекта «Образование» (Доля детей в возрасте от 5 до 18 лет, охваченных дополнительным образованием),

задачам Федерального проекта «Кадры для цифровой экономики» Национального проекта «Цифровая экономика РФ» (Обеспечение доступности для населения обучения по программам дополнительного образования для получения новых востребованных на рынке труда цифровых компетенций),

приоритетам государственной политики в сфере реализации Государственной программы Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности на 2013 – 2025 годы» (поддержание научно-исследовательского, технического, производственно-технологического и кадрового потенциалов на уровне, обеспечивающем эффективную авиационную деятельность в Российской Федерации);

- региональный уровень актуальности Программы предусматривает решение проблем регионов РФ в области ранней профориентации

подрастающего поколения для сокращения кадрового дефицита субъектов по инженерным и техническим специальностям. Подобный дефицит подтверждается данными социологических исследований. Кроме того, проект может быть распространен среди других регионов Российской Федерации для развития ранней профориентации молодежи;

- локальный уровень актуальности Проекта определяется запросом учащихся и родителей (законных представителей) на дополнительное образование в области физико-математического и инженерно-технического цикла, что может быть подтверждено высоким спросом на внеурочную деятельность и дополнительное образование данной направленности, которое реализуется в общеобразовательной организации.

Актуальность темы исследования заключается в исследовании роли органов местного самоуправления в обеспечении молодыми инженерными кадрами предприятий ОПК Российской Федерации на примере Пермского края. Осуществление стабильного пополнения новыми сотрудниками предприятий ОПК в рамках правового поля является одной из важных государственных задач. Основной приток кадров на инженерные специальности осуществляется за счет технических вузов.

Степень разработанности проблемы. В данной части работы отмечены такие значимые работы как:

Конституция Российской Федерации и поправки к ней;

Федеральные законы «О промышленной политике в Российской Федерации», «О государственном оборонном заказе», «Об обороне»;

Указы Президента "О повышении эффективности мер государственной поддержки работников организаций оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации" и "Вопросы Министерства обороны Российской Федерации";

Постановления Правительства РФ "Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Развитие оборонно-промышленного комплекса" и «О государственном плане подготовки кадров со средним профессиональным и высшим образованием для организаций оборонно-промышленного комплекса на 2021 - 2030 годы», О целевом обучении по образовательным программам среднего профессионального и высшего образования, «О Министерстве промышленности и торговли Российской Федерации», "О проведении эксперимента по разработке, апробации и внедрению новой образовательной технологии конструирования образовательных программ среднего профессионального образования в рамках федерального проекта "Профессионалитет";

Приказ об утверждении Порядка реализации государственного плана подготовки кадров со средним профессиональным и высшим образованием для организаций оборонно-промышленного комплекса на 2021 - 2030 годы;

Концепция промышленной политики Пермского края;

Интервью с губернатором Пермского края Дмитрием Махониным об инициировании разработка совместной программы предприятий ОПК по обеспечению их кадрами;

Статистический материал с Перечнем образовательно-производственных центров (кластеров)–участников Федерального проекта «Профессионалитет» в 2022 году.

Национальный проект «Образование» и паспорт национального проекта «Национальный проект «Образование»».

Современные тенденции кадрового обеспечения предприятий оборонно-промышленного комплекса России: проблемы системы подготовки кадров и пути решения;

Объектом исследования является образовательная деятельность направленная на кадровое обеспечения предприятий ОПК Российской Федерации на примере Пермского края.

Предметом исследования является деятельность администрации муниципальных образований по реализации кадровой политики по привлечению молодежи на обучение в вузы и последующее их трудоустройство на предприятия ОПК.

Цель исследования: создание комплексной системы подготовки инженерных кадров в муниципальных образовательных учреждениях для предприятий ОПК путем формирования эффективной профильной образовательной среды, на примере Пермского края.

Задачи исследования состоят в следующем:

- реализация практико-ориентированного обучения с погружением обучающихся инженерных классов в технологическую и инженерную среду;

- применение и развитие современных педагогических технологий, цифровых сервисов и инструментов обучения, методов организации проектной и исследовательской деятельности обучающихся с использованием лабораторных комплексов и высокотехнологичного оборудования;

- привлечение обучающихся общеобразовательных организаций к выполнению совместных научно-технических проектов в области инженерных систем с базовым региональным вузом и индустриальным партнером в Российской Федерации на примере Пермского края;

- поиск и отбор талантливых и мотивированных обучающихся, оказание им поддержки в профессиональном развитии.

Участники реализации Программы:

1. ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» Механико-технологический факультет и другие подразделения вуза.

2. МАОУ «Инженерная школа» г. Пермь.

3. КГАПОУ «Пермский авиационный техникум им. А.Д. Швецова».

4. ПАО НПО «Искра».

5. КГАУ «Центр опережающей профессиональной подготовки Пермского края».

6. ЧОУ ДПО «Центр инновационного развития человеческого потенциала и управления знаниями (Детский технопарк «Кванториум Фотоника»).

7. МАУ ДО «Детско-юношеская спортивно-техническая школа «Нортон – Юниор» г. Пермь.

Методологические основы исследования. К наиболее значимым работам, в которых в предшествующий период рассматривались аспекты данной проблемы, выделяются: Латышенко Д.К., Казаков П.И., Ерыгина Л.В., Сердюк Р.С., Завимко В.С., Фирулев О.В., Ерыгин Ю.В., Шипигин Ю.А., Каштанова Е.В., Сувалова Т.В., Волобуев Н.А., Грошев И.В., Логинов Е.Л., Эриашвили Н.Д.

Однако, представленные учеными материалы правового регулирования кадрового обеспечения предприятий оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации не в полной мере раскрывают область научных исследований, поэтому на примере Пермского края, где десятки предприятий работают в сфере ОПК проведены научные исследования. Важно обеспечить комплекс мероприятий, практических рекомендаций, направленных на устойчивый рост кадрового обеспечения предприятий ОПК Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 31.12.2014 г. № 488-ФЗ «О промышленной политике в Российской Федерации» [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/docs/all/101573/> (дата обращения: 19.01.2023).
2. Федеральный закон от 29.12.2012 г. № 275-ФЗ «О государственном оборонном заказе» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/36643> (дата обращения: 19.01.2023).
3. Федеральный закон от 28.06.2022 г. № 210-ФЗ О внесении изменений в статьи 8 и 12 Федерального закона «О государственном оборонном заказе» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47970> (дата обращения: 19.01.2023).
4. Федерального закона № 275 от 29.12.2012 года «О государственном оборонном заказе» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/36643> (дата обращения: 19.01.2023).
5. <http://www.kremlin.ru/acts/bank/36643> (дата обращения: 19.01.2023).
6. Федеральный закон № 61 от 31.05.1996 года «Об обороне» [Электронный ресурс]. URL: <https://31.mchs.gov.ru/deyatelnost/napravleniya-deyatelnosti/grazhdanskaya-zashchita/organizaciya-meropriyatiy-grazhdanskoj-oborony/normativno-pravovye-akty/zakony-rossiyskoj-federacii/federalnyy-zakon-ob-oborone-61-fz-ot-31-maya-1996-g-s-izmeneniyami-ot-30-dekabrya-1999-g> (дата обращения: 19.01.2023).
7. Указ Президента Российской Федерации от 28 августа 2018 г. № 501 [Электронный ресурс]. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?searchres=&bpas=cd00000&intelsearch=%F2%E5%F5%ED%EE%EF%EE%EB%E8%F1+%DD%F0%E0&sort=7> (дата обращения: 22.01.2023).
8. Указ Президента Российской Федерации от 18.07.2022 № 468 "О внесении изменений в Указ Президента Российской Федерации от 14 октября 2012 г. № 1380 "О повышении эффективности мер государственной поддержки работников организаций оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации".

Федерации" [Электронный ресурс]. URL: <http://actual.pravo.gov.ru/text.html#pnum=0001202207180008> (дата обращения: 22.01.2023).

9. Постановление Правительства РФ от 16 мая 2016 г. N 425-8 "Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Развитие оборонно-промышленного комплекса" (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/71405638/> (дата обращения: 22.01.2023).

10. Указ Президента РФ от 16.08.2004 N 1082 (ред. от 04.05.2022) "Вопросы Министерства обороны Российской Федерации" [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_48879/30bf9f5c18f73b5301757685ab73524242a992fc/ (дата обращения: 22.01.2023).

11. Постановление Правительства Российской Федерации от 30.12.2020 № 2369. О государственном плане подготовки кадров со средним профессиональным и высшим образованием для организаций оборонно-промышленного комплекса на 2021 - 2030 годы. [Электронный ресурс]. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102642585&rdk=&backlink=1> (дата обращения: 22.01.2023).

12. Постановлению Правительства РФ от 13 октября 2020 г. № 1681 О целевом обучении по образовательным программам среднего профессионального и высшего образования. [Электронный ресурс]. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=102642585&backlink=1&&nd=102880776> (дата обращения: 22.01.2023).

ОБ АВТОРЕ

Песин Михаил Владимирович (Пермь) – д.т.н., профессор, декан механико-технологического факультета, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, e-mail: m.pesin@mail.ru

© Песин М.В., 2023

УДК 529.7

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ Песин М.М.

Аннотация: Статья раскрывает роль предприятий машиностроительного комплекса в повышении надежности деталей БПЛА. Отмечен анализ рынка

БПЛА по данным Ассоциации «АЭРОНЕКСТ». Рассмотрены точки технологического роста в использовании современных технологий изготовления деталей и формировании кадрового потенциала для инженерных специальностей.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, анализ рынка, спрос, дроны, беспилотная технология

Роль беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в современной государственной экономике ежегодно растёт. Ранее правительство Российской Федерации утвердило стратегию развития беспилотной авиации до 2030 года и на перспективу до 2035 года. Согласно документу, создание базового заказчика в России в период 2023-2027 годов позволит консолидировать спрос и предложение на беспилотные авиационные системы и решить проблемы ограниченных заказов и мелкосерийного производства [1-3].

При этом по мере развития рынка БПЛА роль отдельно взятого предприятия в решении проблемы надежности изделий становится на первый план. Широкое использование данной техники позволяет получить достаточно большой статистический набор основных поломок и недостатков в конструкции и технологии изготовления деталей.

Решением этой проблемы является комплексный подход в анализе и последующих рекомендациях по совершенствованию конструкторско-технологических решений для обеспечения долговечности деталей БПЛА [4].

В Российской Федерации создана Ассоциация "АЭРОНЕКСТ", которая ведет деятельность по анализу важнейших для авиационной деятельности технологические и рыночные трендов, содействует инновационной деятельности и отраслевой кооперации для появления новейших технологий и конструкторских решений [5]. На данный момент она объединила более 110 предприятий в области беспилотия.

Анализ отчета Ассоциации «АЭРОНЕКСТ», по итогам 2022 года показал следующие результаты.

В целом, по полученной от участников рынка информации, 2022 год завершился со следующими сводными показателями:

- + 12% средний рост объемов оказанных услуг с применением БАС;
- + 20% средний рост количества произведенных БАС гражданского назначения;
- + 200% средний рост количества произведенных БАС специального назначения;
- + 27% средний рост численности работников предприятий индустрии БАС.

Структура выручки компаний с учетом выполнения НИОКР, продажи готовых БАС и ПО выглядит следующим образом:

- 31% – выручка от коммерческих услуг с применением БАС;
- 25% – выручка от выполнения НИР и ОКР;
- 22% – выручка от продажи БАС гражданского назначения;
- 17% – выручка от продажи БАС специального назначения;

- 5% – реализация ПО.

Точками роста индустрия БАС называет два фактора:

- Модернизация процедуры контрольных просмотров цифровых геопространственных данных: технологическое и нормативное обеспечение обновленной процедуры приведет к 5-кратному росту рынка услуг и производства БАС с максимальной взлетной массой 30 кг и менее и составит по прагматичной оценке не менее 50 млрд рублей в год (по самым смелым оценкам различных экспертов до 250 млрд);

- Уведомительный порядок выполнения полетов БВС в классе G, возможный только при стандартизации технологий автоматического уклонения от столкновений беспилотных и пилотируемых ВС. Технологическое и нормативное обеспечение интеграции БВС и ПВС в классе G, где выполняется 90% полетов БВС, обеспечит рост рынка, оцениваемый более чем в 10 раз.

Все цифры и выводы, безусловно, будут уточняться по прошествии 1 квартала 2023 года, а пока лишь предварительные обобщенные результаты проведенного опроса.

В заключении следует отметить, то, что на данный момент предприятиям-изготовителям БПЛА требуется усилить взаимодействие с высшими учебными заведениями с целью совершенствования, существующие технологий изготовления, так и расширения возможностей по привлечению к проектной деятельности студентов. Использование научной базы, имеющейся в вузах, приведет к существенному повышению надежности выпускаемого оборудования и развитию кадрового потенциала машиностроительных предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 21.06.2023 N 1630-р «Об утверждении Стратегии развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года и плана мероприятий по ее реализации».

2. "Перечень поручений по итогам участия Президента в мероприятиях по вопросам развития беспилотных авиационных систем" (утв. Президентом РФ 13.06.2023 N Пр-1176).

3. Перечень поручений по вопросам развития беспилотных авиационных систем. Дата публикации: 30 декабря 2022 года.

4. Шиболденков В.А., Куликова М.Е., Савченко П.П. Обзор применения технологии летательных дронов в производственных целях (на примере наукоёмкой промышленности) // Московский экономический журнал. 2023. № 3. URL: <https://qje.su/nauki-o-zemle/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-3-2023-39/>

5. Аналитика рынка БАС по итогам 2022 года. Ассоциация «АЭРОНЕКСТ», 2022. 34 с.

ОБ АВТОРЕ

Песин Марк Михайлович (Пермь) – студент механико-технологического факультета, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, e-mail: m.pesin@mail.ru

© Песин М.М., 2023

УДК 338.45:621

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Песина Е.М.

Аннотация: В статье представлена информация о специфике PR-коммуникаций в сфере промышленности. Четко спланированная и организованная PR-деятельность способствует установлению и поддержанию взаимовыгодных отношений между организацией и общественностью, от мнений и поведения которой зависят успех и финансовая стабильность организации. PR в сфере промышленности – достаточно новое явление на российском рынке, поэтому многие промышленные предприятия не придают большого значения созданию в своей организационной структуре специализированного отдела по связям с общественностью.

Ключевые слова: промышленный PR, репутация, промышленность, внутрикорпоративный PR, СМИ, PR-деятельность, коммуникации

Обеспечение технологического суверенитета России неотъемлемо связано с развитием инновационной деятельности на промышленных предприятиях. Особую роль отводится информационному обеспечению полученных достижений. Так, машиностроение как значимый и доходный сектор экономики, постоянно находится в центре внимания государства и общественности. Чем крупнее участник промышленного рынка, тем больше внимания ему приходится уделять защите своих активов и поддержке репутации. Крупные промышленные предприятия чаще других субъектов экономики выходят с продукцией на международную арену, демонстрируя тенденции экономического, культурного и политического развития представляемой ими страны.

Из чего можно сделать вывод о том, что в условиях современной рыночной экономики перед любым промышленным предприятием рано или поздно возникает необходимость выделить в структуре своего управления деятельность по связям с общественностью, отделив её от смежных видов деятельности, таких как маркетинг, управление персоналом, реклама и прочих. Всеобщее признание института PR является ответной реакцией на вызов времени, усложнение процессов общественной жизни.

Достаточное количество видов PR-деятельности, имеющееся на промышленном предприятии, имеет исторические корни и вызвано глобальными

изменениями в общественно-экономическом развитии, связанными с переходом от ремесленного производства к мануфактуризации, что послужило причиной для возникновения ряда серьезных коммуникационных проблем. Данная концепция возникновения промышленного PR была предложена Л.Н. Федотовой в своем труде «Паблик рилейшнз и общественное мнение», где были выявлены предпосылки становления и развития PR на предприятиях в сфере промышленности.

Л.Н. Федотова выделяет четыре основных аспекта проблем:

- использование промышленным предприятием большого количества природных ресурсов, осознаваемых как общее благо, вызвало необходимость специальной деятельности, как по объяснению этого факта, так и по предотвращению возможных напряжений в обществе;

- формирование социального статуса владельца и руководителя промышленного предприятия потребовало специальной работы над созданием положительного имиджа новой для общества социальной фигуры;

- рост численности занятых в производственном процессе и специализация работников на отдельных атомарных операциях, наряду с повышением производительности труда, привели к необходимости создания вертикальных и горизонтальных каналов коммуникации внутри предприятия, а также потребовали особой работы по формированию корпоративной идентичности;

- повышение производительности труда привело к резкому росту количества товаров, массовое производство повлекло за собой конкуренцию.

Таким образом, можно утверждать, что в сфере промышленности возникли совершенно объективные предпосылки к возникновению, развитию и общественному признанию такого особого вида деятельности, как Public Relations. Опираясь на перечисленные выше аспекты коммуникационных проблем, можно сформулировать также основные направления PR-деятельности на промышленном предприятии. Наиболее типичными видами общественности, важными для промышленных предприятий, являются: СМИ, деловая среда, общественные организации, население, государственные организации, инвесторы, персонал и партнеры.

Основная проблема, которая имеется у многих компаний, работающих на рынке B2B, заключается в том, что у нее отсутствует общая концепция и план развития. Поэтому все маркетинговые и PR-коммуникации носят хаотичный характер и в основном направлены на решение локальных проблем. Большая часть прибыли поступает от давних постоянных клиентов, с новыми клиентами, которых удалось привлечь рекламной кампанией, работа практически не ведется. Процент повторных сделок очень низкий. Главным решением проблемы является, прежде всего, разработка четкого маркетингового плана развития и продвижения продукции компании, а также смещение акцента с рекламных кампаний на PR, причем как внешний, так и внутренний. Помимо этого, сегодня именно имидж предприятия и его репутация становятся важнейшими инструментами в реализации задач по завоеванию рынка.

Несмотря на то, что на данный момент в основном PR в промышленности носит хаотичный характер и пока не так много примеров того, как успешно

организована работа PR-отдела на российских промышленных предприятиях, имеются положительные тенденции в развитии этой деятельности. Отечественные предприятия начинают осознавать необходимость совершенствования PR-технологий по продвижению инновационной продукции на рынок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Введенская М.В. Предпосылки возникновения и развития PR в промышленности / М.В. Введенская / Экономика и менеджмент инновационных технологий. – 2016. – № 4 [Электронный ресурс] URL: <http://ekonomika.snauka.ru> (дата обращения: 19.07.2023)
2. Шляхова С.С. PR пермского периода: региональные коммуникации и территориальная идентичность в исторической ретроспективе: монография / С.С. Шляхова, Ю.Ю. Лекторова, А.Ю. Прудников. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2018. URL: <http://elibr.pstu.ru/Record/RUPNRPUelib6803> (дата обращения: 20.07.2023)
3. Всеобщая история рекламы: Учебник для бакалавров / О.О. Савельева, Н.В. Трубникова. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и Ко», 2019. – 452 с.: ил.

ОБ АВТОРЕ

Песина Елизавета Михайловна (Пермь) – студентка кафедры «Реклама и связи с общественностью» гуманитарного факультета, группы СО-21-1Б, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (e-mail: elizaveta.pesina03@gmail.com)

© Песина Е.М., 2023

УДК 006.032

АКТУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ СТАНДАРТИЗАЦИИ В СФЕРЕ СТАНКОСТРОЕНИЯ

Сафин Э.В., Нигматуллина А.И.

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы стандартизации в сфере станкостроения. Рассмотрены задачи, структура Международной организации по стандартизации ИСО, выполнен краткий анализ деятельности технического комитета Международной организации по стандартизации ИСО/ТС 39 «Станки» и его подкомитетов за весь период функционирования. Выявлены наиболее актуальные аспекты международной стандартизации в сфере станкостроения. Рассмотрен вопрос участия отечественного ТК 070 «Станки» в работах по международной стандартизации в сфере станкостроения.

Ключевые слова: стандартизация, станкостроение, ИСО, технический комитет

Совершенствование технологий и проникновение инноваций во все сферы экономики требуют модернизации системы стандартизации.

Международная организация по стандартизации ИСО является независимой неправительственной международной организацией, которая занимается выпуском стандартов. Членами ИСО являются национальные органы по стандартизации, которые представляют интересы своей страны в ИСО. На данный момент в работе в ИСО участвуют 169 стран. Разработка стандартов ИСО осуществляется техническими комитетами. В настоящее время в составе ИСО более 250 технических комитетов.

В 1947 году был сформирован технический комитет по стандартизации ISO/TC 39 «Станки», отвечающий за разработку и утверждение стандартов в сфере станкостроения.

Областью деятельности данного технического комитета является стандартизация всех станков для обработки металла, дерева и пластмасс, работающих путем удаления материала или под давлением [2].

ISO/TC 39 обеспечивает станкостроительную промышленность, как производителей, так и пользователей, современными стандартами: для тестирования станков; для определения размеров компонентов; для обеспечения безопасности станков и так далее.

В структуру технического комитета ISO/TC 39 входят 5 подкомитетов [2]:

- 1) ISO/TC 39/SC 2 Test conditions for metal cutting machine tools («Условия испытаний металлорежущих станков»);
- 2) ISO/TC 39/SC 4 Woodworking machines («Деревообрабатывающие станки»);
- 3) ISO/TC 39/SC 6 Noise of machine tools («Шумы от станков»);
- 4) ISO/TC 39/SC 8 Work holding spindles and chucks («Шпиндели и зажимные устройства»);
- 5) ISO/TC 39/SC 10 Safety («Безопасность»).

Согласно информационному сайту iso.org всего техническим комитетом ISO/TC 39 опубликован 161 стандарт (из них 45 стандартов находятся в прямой ответственности ISO/TC 39) и 24 проектов стандартов на данный момент находятся в разработке. Количество опубликованных стандартов и проектов стандартов представлены в таблице 1.

Табл. 1

Подкомитеты ИСО/ТС 39	Опубликованные стандарты ИСО/ТС 39	Проекты стандартов ИСО/ТС 39
ISO/TC 39/SC 2	72	7
ISO/TC 39/SC 4	19	13
ISO/TC 39/SC 6	3	-
ISO/TC 39/SC 8	11	-
ISO/TC 39/SC 10	11	4
Итого:	116	24

Краткий анализ деятельности подкомитетов ИСО/ТС 39:

ISO/TC 39/SC 2 «Условия испытаний металлорежущих станков» организован в 1985 году. За последние 4 года работы подкомитет опубликовал 15 стандартов, что является хорошим результатом за короткое время.

ISO/TC 39/SC 4 «Деревообрабатывающие станки» сформирован в 1980 году и до 2019 года опубликовал 7 стандартов, а за последние годы подкомитет смог опубликовать 10 стандартов.

ISO/TC 39/SC 6 «Шумы от станков» сформирован в 1980 году. За всё время своей деятельности подкомитет разработал 3 стандарта, за последние 10 лет не занимался разработкой новых стандартов.

ISO/TC 39/SC 8 «Шпиндели и зажимные устройства» сформирован в 1982 году. За последние 4 года нет новых опубликованных стандартов, за всё время работы подкомитетом было разработано 11 стандартов.

ISO/TC 39/SC 10 «Безопасность» сформирован в 2003 году. За последние 4 года работы подкомитет опубликовал 2 стандарта, а с 2010 по 2019 года разработал – 9.

Количество опубликованных стандартов подкомитетами по годам приведены в таблице 2 [2].

Таким образом, результаты работы подкомитетов показывают, что на международном уровне сложилось понимание, что наиболее актуальными вопросами стандартизации в сфере станкостроения на сегодняшний день являются:

- условия испытаний металлорежущих станков;
- деревообрабатывающие станки;
- безопасность.

Табл. 2

Подкомитеты ИСО/ТС 39	1970- 1979	1980- 1989	1990- 1999	2000- 2009	2010- 2019	2020- 2023
ISO/TC 39/SC 2	3	5	7	20	22	15
ISO/TC 39/SC 4	-	2	-	-	7	10
ISO/TC 39/SC 6	-	-	1	2	-	-
ISO/TC 39/SC 8	-	-	-	10	1	-
ISO/TC 39/SC 10	-	-	-	-	9	2
Итого:	3	7	8	32	39	27

Динамика разработки стандартов подкомитетами ISO/TC 39 приведена на рисунке 1.

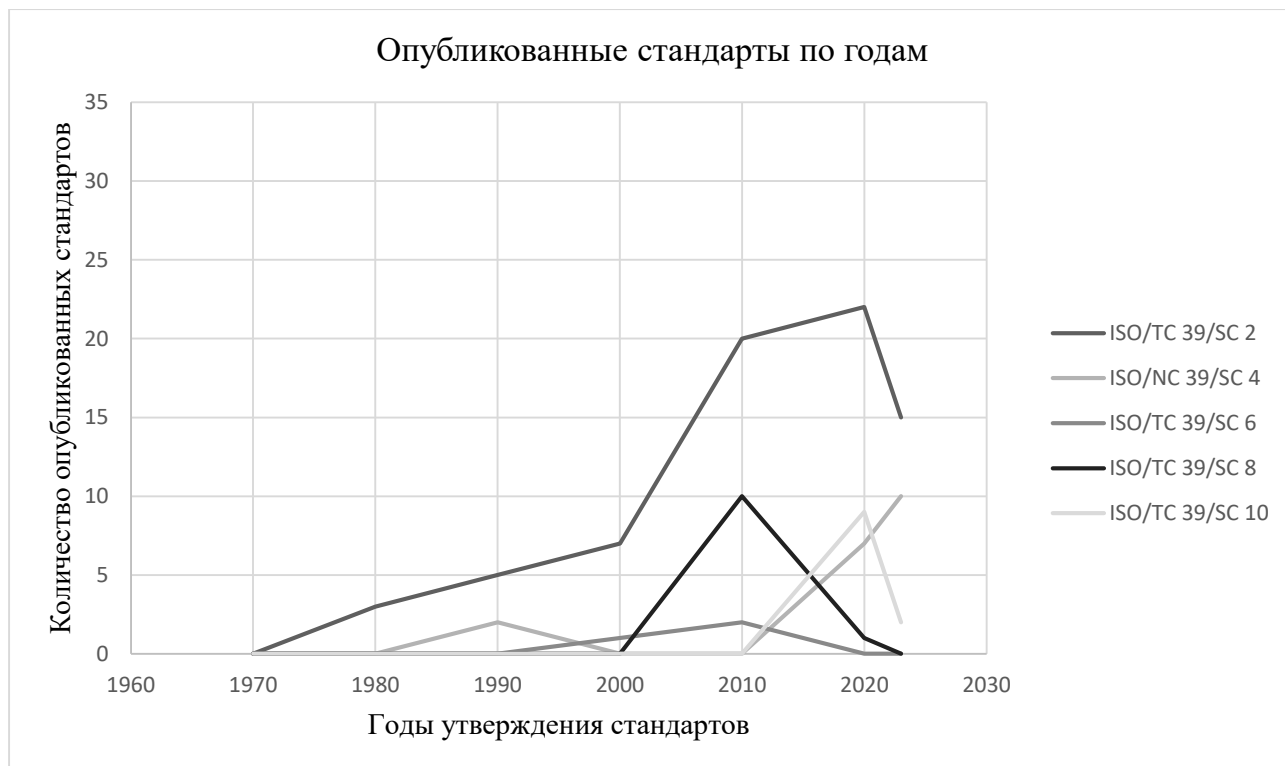


Рис. 1. Динамика разработки стандартов подкомитетами ИСО/ТС 39 по годам

В последние годы практически не издавались стандарты, разрабатываемые подкомитетами ISO/TC 39/SC 6 «Шумы от станков» и ISO/TC 39/SC 8 «Шпиндели и зажимные устройства», которые касаются вопросов технической совместимости и взаимозаменяемости.

В целом международные стандарты ИСО служат основой для разработки аналогичных межгосударственных (ГОСТ) и национальных стандартов Российской Федерации (ГОСТ Р) в сфере станкостроения. Актуальным является вопрос активного участия ТК 070 в работах технического комитета Международной организации по стандартизации ISO/TC 39 «Станки» и технического комитета Международной электротехнической комиссии IEC/TC 44 «Безопасность машинного оборудования – электротехнические комитеты» в целях повышения конкурентоспособности отечественной промышленности на мировом рынке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 29.06.2015 № 162-ФЗ (ред. от 30.12.2020) «О стандартизации в Российской Федерации»;
2. Международная организация по стандартизации: сайт. – Женева, Швейцария, 2023. – URL: <https://www.iso.org/> (дата обращения: 12.10.2023);

ОБ АВТОРАХ

Сафин Эдуард Вилардович – заведующий кафедрой стандартизации и метрологии ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа, safin.ev@ugatu.su.

Нигматуллина Айгузель Ильгизевна – инженер кафедры стандартизации и метрологии, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа, nigmatullina.ayguzel@mail.ru.

© Сафин Э.В., Нигматуллина А.И., 2023

УДК 621.373.31

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ Сахаутдинов Т.И., Песин М.В.

Аннотация: В статье показана методика контроля качества поверхности резьбы, полученной после токарной операции. Предоставлены итоги стендовых и промысловых испытаний изделий с применением технологии упрочнения резьбовых соединений из стали 40ХН2МА методом ионно-плазменного азотирования. Отмечено, что поверхность резьбового соединения приобрела антикоррозионные и антифрикционные свойства.

Ключевые слова: резьбовое соединение, упрочнение, буровое оборудование, бурильная колонна, ионно-плазменное азотирование, электромеханическая обработка, ЭМО, азотирование, технологическая наследственность

Научные исследования показали, что резьбовое соединение является наиболее нагруженным элементом в бурильной колонне и в большинстве случаев является причиной возникновения разрушений оборудования и аварий при эксплуатации.

Повышение надежности резьбового соединения представляется весьма актуальным с точки зрения обеспечения промышленной безопасности при бурении скважин. Как показал анализ отечественных научных публикаций большинство разрушений резьбовых соединений бурильной колонны связано с усталостью материала деталей. Усталостное разрушение резьбовых соединений вызвано знакопеременными нагрузками, такими как растяжение, сжатие, изгиб, гидростатическое давление и вибрация, возникающими в бурильной колонне во время буровых работ.

Также резьбовые соединения выходят из строя в результате изнашивания контактных поверхностей. Износ вершин профиля резьбы уменьшает их площадь контакта, что приводит к снижению герметичности соединения. Одной из основных причин износа резьбовых соединений является его частое развинчивание и свинчивание.

Резьбовые соединения работают в агрессивной среде бурового раствора, что приводит к коррозионному разрушению. Коррозия под воздействием агрессивных сред усиливается эрозией металла, так как буровые растворы содержат песок. Промыву способствуют неточности изготовления и нарушения технологии сборки резьбового соединения, приводящие к увеличению зазоров.

Нарезание резьбы является самой ответственной технологической операцией. Погрешности в процессе резбонарезания могут сочетаться с неточностями инструмента и его установки, геометрическими ошибками настройки станка и установки заготовки в станке. Совокупность этих ошибок приводит к неточности формы и отклонению параметров профиля резьбы.

Разрушения резьбовых соединений может привести к авариям и преждевременным отказам оборудования. Одной из важных причин является низкое качество исходного материала (прочность, твердость, упругость, вязкость, коррозионная стойкость и т.д.).

На рис. 1. показаны детали бурового оборудования после промышленных испытаний: а) необработанная резьба, б) обработанная резьба с помощью предлагаемой технологии. Применение магнитопорошкового метода дефектоскопии на обработанной резьбе показано на рис 2.



а)



б)

Рис. 1. Детали бурового оборудования после промышленных испытаний:
а) необработанная резьба,
б) обработанная резьба с помощью предлагаемой технологии

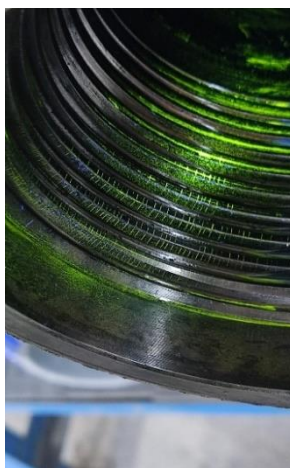


Рис. 2. Применение магнитопорошкового метода дефектоскопии на обработанной резьбе

Широко известный метод ионно-плазменного азотирования применяется на пермских промышленных предприятиях, таких как ООО «Пермская компания нефтяного машиностроения», АО «Элкам-нефтемаш», АО «ПНИТИ» и др. Проведенные стендовые и промысловые испытания показали, что применение технологии упрочнения резьбовых соединений деталей бурового оборудования из стали 40ХН2МА методом ионно-плазменного азотирования, что поверхность резьбового соединения приобрела антикоррозионные и антифрикционные свойства.

Предлагаемая технология значительно повысила износостойкость поверхностного слоя резьбовых соединений по сравнению с необработанными резьбовыми соединениями. К недостаткам предложенной технологии упрочнения можно отнести: на обработанной поверхности резьбы после эксплуатации образовались мелкие продольные и поперечные трещины.

Наряду с методом ионно-плазменного азотирования применяется электромеханическая обработка рабочих поверхностей резьб бурового оборудования.

К недостаткам предложенной технологии упрочнения можно отнести следующее:

на обработанной поверхности резьбы после эксплуатации образовались мелкие продольные и поперечные трещины.

Руководящими документами определено применение магнитопорошкового и ультразвукового методов неразрушающего контроля (НК) резьбовых соединений с целью определения годности детали бурового оборудования.

В заключении следует отметить следующее:

возможность применения технологии ионно-плазменного азотирования для деталей, работающих в агрессивных средах и при наличии механических примесей;

альтернативным методом для упрочнения резьбовой поверхности является электромеханическая обработка;

для оценки качества проведенного упрочнения резьбовой поверхности можно использовать магнитно-порошковый контроль.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М.В. Песин, А.В. Федосеева. Анализ причин разрушения резьбы нефтепромыслового и бурового оборудования в осложненных условиях эксплуатации // Научные технологии в машиностроении. – Уфа, 2015. – С. 21-24.

2. А.П. Корчагин, В.В. Климов, Н.В. Барина, А.О. Мурашов. Разрушение ниппелей буровых труб в процессе эксплуатации // № 11 ноябрь 2016. Территория нефтегаз.

ОБ АВТОРАХ

Сахаутдинов Тимур Ильдусович (Пермь) – аспирант кафедры инновационные технологии машиностроения механико-технологического факультета, Пермский национальный исследовательский политехнический университет.

Песин Михаил Владимирович (Пермь) – декан механико-технологического факультета, д.т.н., доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: m.pesin@mail.ru

© Сахаутдинов Т.И., Песин М.В., 2023

УДК 621.992.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА С УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ Хабарова А.В., Песин М.В., Макаров В.Ф.

Аннотация: В данной статье проведена аналитика важности и актуальности проблемы получения реалистичного моделирования механической обработки титановых сплавов с ультрамелкозернистой структурой.

Ключевые слова: ультрамелкозернистые материалы, титан, токарная обработка, моделирование

За последние десять лет возрос интерес к производству и обработке ультрамелкозернистых материалов (УМЗ). УМЗ материалы обладают высокой прочностью и хорошей пластичностью при статическом нагружении. Разработка технологии механической обработки УМЗ-металлов требует точных уравнений, способных описывать и прогнозировать их поведение. Однако механические свойства УМЗ материалов при разных температурах и скоростях деформации

пока не были достаточно исследованы. Определяющие уравнения, описывающие пластическую деформацию таких материалов, имеют важное значение для компьютерного моделирования механических процессов формовки. [6]

Моделирование токарной обработки образцов из титанового сплава с ультрамелкозернистой структурой является важным инструментом для оптимизации процесса обработки и повышения качества готовых изделий.

Ультрамелкозернистая структура титанового сплава достигается путем применения специальных техник обработки, таких как электроискровое спекание (SPD), равноканальная угловая экструзия (ECAP) или прокатывание с высоким давлением (HPT). Эти методы позволяют улучшить механические свойства материала, такие как прочность, усталостная прочность, пластичность и ударная вязкость.

Однако, для работы с такими ультрамелкозернистыми образцами требуется тщательное планирование и оптимизация процесса токарной обработки. Моделирование позволяет предсказать и оптимизировать различные параметры процесса, такие как скорость резания, глубина резания, подача инструмента и скорость вращения шпинделя, для достижения максимальной эффективности и качества обработки.

Одной из основных задач моделирования является определение оптимального режима резания. Это включает в себя выбор оптимальной скорости резания, глубины резания и подачи инструмента. Моделирование процесса позволяет предсказать изменения в напряжениях, температуре и деформации материала в процессе обработки и идентифицировать оптимальные значения этих параметров для минимизации деформации и повышения качества поверхности.

Другим важным аспектом моделирования токарной обработки образцов из титанового сплава с ультрамелкозернистой структурой является оценка напряжений и деформаций во время процесса. Такие модели могут помочь установить определенные лимиты напряжений и деформаций, которые не должны превышать, чтобы избежать деформаций, трещин и иных нежелательных повреждений.

Моделирование токарной обработки образцов из титанового сплава с ультрамелкозернистой структурой является важным инструментом для оптимизации и повышения качества процесса обработки. Он помогает идентифицировать оптимальные параметры режима резания, предсказывать изменения в напряжениях и деформациях и обеспечивать более эффективную и безопасную обработку титановых образцов с ультрамелкозернистой структурой.

Для корректного численного моделирования динамической деформации и изменения формы требуется использование точно определенных физических параметров в этих уравнениях. Некоторые авторы, например Мейерс и коллеги [1, 2], а также Зерилли и Армстронг [3], представили модели, которые включают зависимость от размеров зерен металлических сплавов. Хан и соавторы [4] модифицировали модель Джонсона-Кука [5], включив зависимость от размера зерна. Моделирование механических свойств титановых сплавов в крупно- и

ультрамелкозернистом состоянии требует разных значений входных параметров.

Однако описание механического поведения ультрамелкозернистых титановых сплавов при динамическом нагружении является актуальной задачей. Ожидаемые значения статического предела текучести в крупно- и ультрамелкозернистых титановых сплавах зависят от размера зерна, что можно использовать для отношения Холла-Петча.

Получение реалистичных прогнозов упрочнения, поведения материала при растяжении при широком диапазоне скоростей деформации и исследование механической обработки остается актуальной проблемой [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meyers, M.A.; Mishra, A.; Benson, D.J.: Mechanical properties of nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*, 51 (2006), 427–556.
2. Meyers, M.A., Vohringer, O., Lubarda, V.A.: The onset of twinning in metals: a constitutive description. *Acta mater.* 49 (2001), 4025–4039.
3. Zerilli, F.J., Armstrong, R.W.: Dislocation-mechanics-based relations for material dynamics calculations. *J. Appl. Phys.* 61 (1987), 1816-1825.
4. Khan, A.S.; Suh, Y.S.; Kazmi, R.: Quasi-static and dynamic loading responses and constitutive modeling of titanium alloys. *Int. J. of Plasticity* 20 (2004), 2233–224.
5. Johnson, G.R.; Cook, W. H.: A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proc. of the 7th Int. Symp. on Ballistics*. Hague, Netherlands. 1983, 541-547.
6. N. Herzig, L.W. Meyer, D. Musch, T. Halle, V.A. Skripnyak, E.G. Skripnyak, S.V. Razorenov, L. Krüger Modelling of the Mechanical Behaviour of UltraFine Grained Titanium Alloys at High Strain Rates, 3 rd International Conference on High Speed Forming – 2008, 141-150.

ОБ АВТОРАХ

Хабарова Анастасия Вячеславовна (Пермь) – аспирантка кафедры «Инновационные технологии машиностроения» механико-технологического факультета, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (e-mail: habarovanastya98@yandex.ru)

Песин Михаил Владимирович (Пермь) – д.т.н., профессор кафедры «Инновационные технологии машиностроения», декан механико-технологического факультета, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (e-mail: m.pesin@mail.ru)

Макаров Владимир Федорович (Пермь) – заместитель заведующего кафедрой Инновационные технологии машиностроения, механико-технологического факультета, д.т.н., профессор, ПНИПУ, (e-mail: makarovv@pstu.ru)

© Хабарова А.В., Песин М.В., Макаров В.Ф., 2023

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ ПЕРФОРАЦИИ ЛОПАТОК ТУРБИН ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Хабибуллин М.Р., Фецак С.И.

Аннотация: Рассмотрены требования, предъявляемые к рабочим лопаткам турбин высокого давления. Проведен анализ современных способов охлаждения лопаток. Изучены теоретические основы электроэрозионной обработки и область применения. Рассмотрен метод электроэрозионной обработки для прожига отверстий перфорации лопаток. Описаны основные дефекты, возникающие при электроэрозионной обработке.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, рабочая лопатка, турбина высокого давления, обрабатываемость, дефектный слой, отверстия, охлаждение лопаток, отверстия перфорации

Проведен анализ используемых в аэрокосмической сфере жаропрочных сплавов на основе никеля, молибдена, вольфрама, титана. Как показывает анализ литературы [1, 2], далеко не все используемые авиационные сплавы могут использоваться ввиду особых требований, предъявляемых к лопаткам турбин высокого давления (ТВД): способность выдерживать длительное воздействие растягивающих напряжений до 140 МПа, нагрев материала до 980°C; помимо этого требуется сохранение прочности и пластичности при низких (криогенных) температурах и высокое сопротивление эрозии и коррозии. Не менее важным является технологичность сплава и изделия в целом. В настоящий момент в аэрокосмической сфере широко применяются жаропрочные сплавы на никелевой основе с добавлением легирующих элементов, что обусловлено их высокой жаропрочностью и коррозионной стойкостью [2].

Скорость коррозии поверхностного материала лопатки растет вместе с температурой. В современных ТВД лопатки первой ступени нагреваются до 1200°C. Остро стоит вопрос естественного охлаждения лопаток, в связи с чем был разработан ряд решений [2, 3]:

1. Конвективное охлаждение, при котором по выполненным на этапе литья внутренним каналам лопатки производится прокачка воздуха, снижающего температуру лопаток на 220–260°C при рабочей температуре газа до 1200°C.

2. Пленочное охлаждение, применяемое вместе с конвективным охлаждением. Заключается в создании вокруг лопатки потоком холодного воздуха заградительной пленки, препятствующей теплоотдаче от горячего газа. Однако недостатком этого типа охлаждения является быстрое разрушение пленки и снижение конструктивной прочности лопатки отверстиями.

3. При пористом охлаждении отверстия в профиле лопатки имеют размер 0,2...1,0 мм, обладают сеточной или перфорационной структурой. Проходя через

перфорацию, воздух одновременно забирает тепло от профиля лопатки и формирует защитный слой, аналогичный пленочному. При этом на пористое охлаждение расходуется существенно меньше воздуха, чем при конвективном и пленочном типах охлаждения.

Наибольшее распространение на текущем технологическом уровне имеет конвективно-пленочное охлаждение, создаваемое отверстиями перфорации в профиле лопатки. Применение перфорации существенно повышает стабильность и уменьшает турбулентность пленочного охлаждения лопатки и совершенно необходимо для развития ТВД нового поколения, работающих на температурах свыше 1500 °С, что показано в статьях [4, 5].

Лопатки с перфорацией из сплава ЖС32-ВИ обладают низкой обрабатываемостью (0,1 по отношению к конструкционной стали) [6]. Также технически нереализуемым классическими методами сверления являются глубокие отверстия диаметром менее 1 мм, в то время как эффективность отвода тепла с профиля лопатки растет с увеличением плотности отверстий и уменьшением их диаметра.

По выше озвученным причинам для сверления (прожига) отверстий в профиле лопатки ТВД представляется рациональным использование высокоэффективного технологического процесса электроэрозионной обработки (ЭЭО).

Метод электроэрозионной (ЭЭ) размерной обработки – это совокупность процессов, сопровождающих электрический разряд в жидкой диэлектрической среде, совместное протекание которых приводит к изменению геометрических свойств (формы, размеров) твердого электропроводного тела. На рис. 1 изображена схема протекания физико-химических процессов в зоне ЭЭО. При этом электродами выступают инструмент (проволока, пресс-форма) и обрабатываемая заготовка.

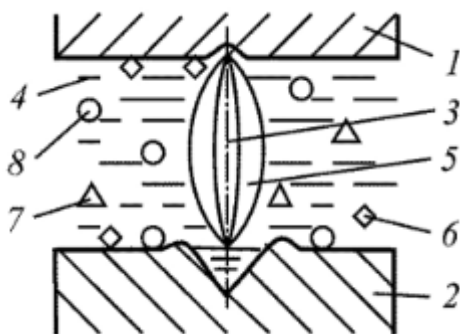


Рис. 1. Эрозия электродов при воздействии электрического разряда [7]:

1, 2 – электроды; 3 - канал разряда; 4 – рабочая среда (диэлектрик); 5 – газовый пузырь; 6 – пузырек пара; 7 – твердая частица; 8 – продукты пиролиза

Основанный на многократном наложении единичных эрозионных лунок механизм снятия припуска является специфической особенностью метода ЭЭО. ЭЭО в первую очередь применяется для обработки деталей из твердых сплавов и жаропрочных сталей с низкой обрабатываемостью и технологичностью, как детали со сложной геометрией или небольшими отверстиями глубины,

превосходящей диаметр более чем в 20 раз – отверстия перфорации лопаток ТВД.

Прожиг отверстий в профиле лопатки производится в несколько заходов. Эскиз обрабатываемой лопатки приведен на рис. 2.

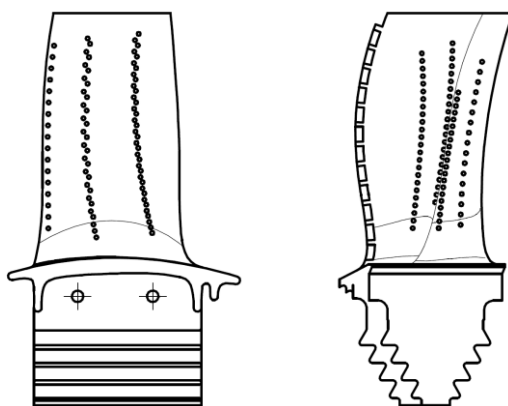


Рис. 2. Отверстия перфорации в наружном и внутреннем профилях рабочей лопатки

Для ЭЭО при любых режимах работы оборудования и типов обработки характерно появление измененного (дефектного) слоя в результате термического воздействия. В некоторых случаях в дефектном слое образуются микропоры, микротрещины и раковины, которые могут простираться за пределы дефектного слоя.

Глубина и характеристики дефектного слоя связаны со множеством факторов, в первую очередь от энергии импульсов и их длительности, в меньшей степени от рабочей среды и обрабатываемости материала заготовки. На рис. 3 приведена фотография дефектного слоя, полученная при металлографическом анализе микрошлифа.

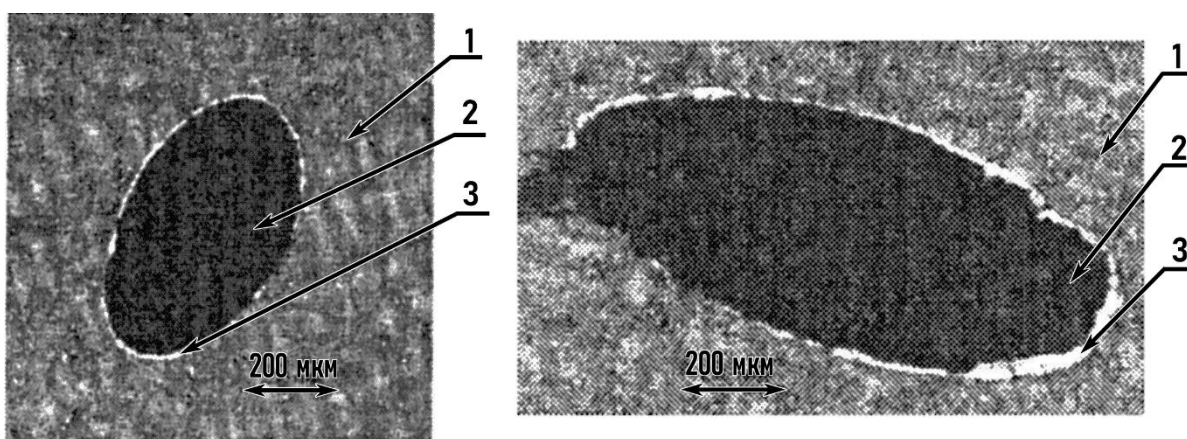


Рис. 3. Изображения отверстий перфорации с дефектным слоем:
1 – профиль пера лопатки; 2 – отверстие перфорации; 3 – дефектный слой

Вторым источником дефектов при ЭЭО является неконтролируемость прожига заготовки. Согласно технологии отверстия в профиле лопатки прожигаются сквозные отверстия до внутренних воздушных каналов. Однако в ряде случаев

отверстия перфорации могут быть прожжены электродом не на всю глубину внутреннего профиля сечения, либо электрод начинает внедряться в противоположную стенку лопатки

Таким образом необходимо детально проанализировать влияние технологических факторов на возникновение дефектов, изучить примеры применения технологии ЭЭО на предприятиях, подобрать оборудование и рассчитать режимы обработки, минимизирующие появление дефектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тугоплавкие металлы: применение и свойства тугоплавких металлов: курс лекций / В.С. Челноков, И.В. Блинков, В.Н. Аникин, А.О. Волхонский. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. – 114 с.

2. Полетаев В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.

3. Сайтов Э.Н. Эффективность различных систем воздушного охлаждения лопаток газотурбинной установки / Э.Н. Сайтов, Я.О. Николаева, А.М. Бикбулатов // Вестник науки и образования. – 2019. – № 3. – С. 5–9.

4. Тихонов А.С. Анализ использования профилированных отверстий перфорации для повышения качества пленочного охлаждения спинки сопловых лопаток турбин / А.С. Тихонов, Н.Ю. Самохвалов // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т.16, № 5. – С 20–27.

5. Влияние перфорации и теплозащитных покрытий на эффективность охлаждения турбинной лопатки / В.А. Трушин [и др.] // Вестник УГАТУ. – 2019. – Т.23, № 1. – С. 82–96.

6. Елисеев Ю.С. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / Ю.С. Елисеев, Б.П. Саушкин; под ред. Б.П. Саушкина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 437 с.

7. Жидков И.С. Электрофизические методы обработки материалов: учебное пособие / И.С. Жидков, А.И. Кухаренко, С.О. Чолах. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 195 с.

ОБ АВТОРАХ

Хабибуллин Марат Ринатович – магистр, ФГБОУ ВО «Уфимского университета науки и технологий», г. Уфа, habibullin.2001@yandex.ru

Фецак Сергей Игоревич – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уфимского университета науки и технологий», г. Уфа, format_invest@mail.ru

© Хабибуллин М.Р., Фецак С.И., 2023

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Семенов В.И., Чертовских С.В.

Аннотация: Представлены результаты исследований триботехнических характеристик стали 20 в трех состояниях: исходном (горячекатаном), после термической обработки (улучшение) и после улучшения с последующей интенсивной пластической деформацией (ИПД) методом равноканального углового прессования (РКУП). Установлено, что после обработки сталь 20 находится в разном структурном состоянии и обладает различными прочностными характеристиками, а также имеет существенную разницу по содержанию кислорода в поверхностном слое. Все это в совокупности оказывает влияние на ее триботехнические характеристики в контакте с инструментальной сталью. Наименьшие значения прочности адгезионных связей, коэффициента трения и величины износа демонстрирует материал после улучшения с последующей ИПД методом РКУП.

Ключевые слова: низкоуглеродистая сталь; интенсивная пластическая деформация; структура материала; прочность адгезионных связей на срез; коэффициент трения; интенсивность изнашивания

Введение

Известно, что с увеличением твердости материалов снижается их износ и коэффициент трения [1]. Твердость сплавов в основном повышают за счет термической обработки [2, 3]. Однако для многих низколегированных сплавов, а также чистых металлов термическая обработка с целью повышения твердости является малоэффективной. Для таких материалов используются различные виды химико-термической [4-6] и поверхностной пластической обработки [5-7], которые позволяют повысить прочность поверхности обрабатываемых материалов. Такие методы используют лишь в качестве финишной обработки, т.к. их недостатком является сравнительно небольшая глубина упрочненного поверхностного слоя.

Оценка влияния структурного и фазового составов инструментальной углеродистой стали на ее триботехнические характеристики отражена в работах [5, 6, 8-10], в которых исследования на трение и износ проводились на материалах с различными видами термической обработки, в результате которых произошли изменения микроструктуры и фазового состава материалов.

В настоящее время получили широкое распространение технологии упрочнения металлических материалов (при сохранении высокой технологической пластичности) методами ИПД. Одним из наиболее эффективных методов является РКУП, позволяющее получать высокопрочные объемные заготовки из металлических материалов за несколько циклов деформирования за счет измельчения зеренной структуры до субмикроструктурных и нано-размеров [11-13]. Что позволяет значительно

расширить область применения таких относительно дешевых сплавов, как низкоуглеродистые стали. В связи с этим трибологические исследования низкоуглеродистой стали, находящейся в разном структурно-фазовом состоянии после термической и РКУП обработок, представляют большой научный и практический интерес.

Материалы и методики исследования

В качестве объекта исследования выбрана низкоуглеродистая сталь с содержанием углерода (в весовых процентах) до 0,2%. За исходное состояние приняты образцы после горячей прокатки. Размеры образцов – диаметр 20 мм, длина 100 мм.

Для снятия напряжений и получения однородной структуры была проведена следующая термообработка: выдержка в течение 1 часа при температуре 880° С с последующей закалкой в воде, затем проведен отпуск при температуре 600° С в течение 1,5 часа. Для деформационного упрочнения исходного материала методом ИПД была выбрана схема РКУП [14], представленная на рис. 1. РКУП проводили на установке с углом пересечения каналов 120° при температуре 400° С с поворотом заготовки вокруг продольной оси на 90° после каждого цикла (количество циклов – 4).

При этом для расчета накопленной степени деформации использовали формулу [15, 16]:

$$\varepsilon = N \cdot \frac{2ctg(\varphi/2)}{\sqrt{3}}, \quad (1)$$

где N – число циклов деформационной обработки; φ - угол пересечения каналов.

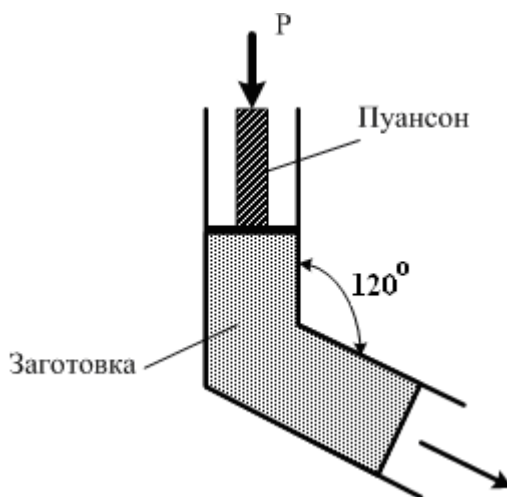


Рис. 1. Схема РКУП

Исследования структуры проводили с использованием оптической металлографии при разных увеличениях. Размер зерен определяли методом секущей линии [17].

Для триботехнических исследований были использованы: метод оценки прочности адгезионных связей на срез τ_n и определения молекулярной составляющей коэффициента трения f_m [18] (рис. 2, а); метод оценки

коэффициента трения f и интенсивности изнашивания J по схеме «блок-диск» [19] (рис. 2, б).

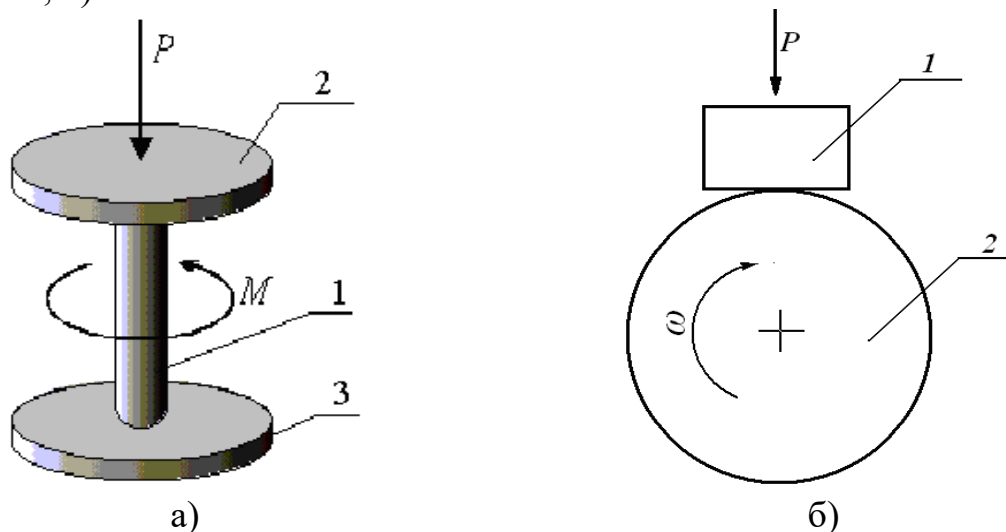


Рис. 2. Схемы проведения трибологических испытаний: а) 1 – индентор; 2 и 3 – испытуемые образцы; б) 1 – испытуемый образец; 2 – вращающийся стальной диск

Для оценки прочности адгезионных связей на срез и молекулярной составляющей коэффициента трения испытуемые образцы были изготовлены в виде дисков диаметром 20 мм и толщиной 5 мм, сферический индентор с радиусом сферы 2,5 мм – из инструментальной быстрорежущей стали состава Fe-6W-5Mo. Испытания по определению прочности адгезионных связей на срез проводили при температурах 20; 200 и 400° С на одношариковом адгезиометре по схеме, которая представлена на рис. 2, а [18]. Исходная шероховатость R_a контактных поверхностей испытуемых образцов и индентора составляла 0,06 – 0,16 мкм.

Прочность адгезионных связей на срез τ_n (МПа) определяли из соотношения:

$$\tau_n = 0,75 \cdot \frac{M}{\pi \cdot \left(\frac{d_{1,2}}{2}\right)^3}, \quad (2)$$

где $d_{1,2}$ – диаметры отпечатков на испытуемых образцах, мм; M – момент при вращении индентора, Н·мм.

Адгезионную (молекулярную) составляющая коэффициента трения определяли как:

$$f_M = \tau_n / p_r, \quad (3)$$

где p_r – нормальное давление на контакте, МПа

$$p_r = \frac{P}{\pi \cdot \left(\frac{d_{1,2}}{2}\right)^2}, \quad (4)$$

где P – сила сжатия образцов, Н. В условиях проведенных испытаний $P = \text{Const} = 2400$ Н.

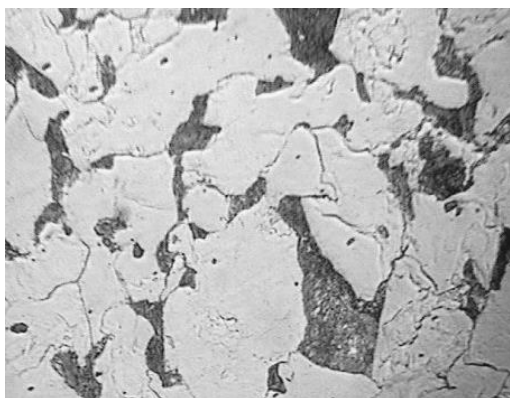
Для испытаний по схеме «блок-диск» (рис. 2, б) использовали образцы в форме куба с гранью 12,7 мм. Диски диаметром 70 мм и толщиной 20 мм были изготовлены из инструментальной быстрорежущей стали состава Fe-6W-5Mo. Всего было изготовлено для испытаний три одинаковых диска по числу испытываемых образцов. Исходная шероховатость Ra блоков и дисков была в пределах 0,06–0,16 мкм. В процессе испытаний проводили термометрирование испытываемого образца с фиксацией изменения температуры. Испытания проводили при комнатной температуре на трибометре «Timken» при скорости вращения диска 1000 мин⁻¹ и нормальной нагрузке 5Н в течение 15 мин. При этом путь трения составил 3300 м. Для определения величины интенсивности изнашивания до и после испытания каждый образец взвешивали. После испытаний определяли геометрическую площадь контакта. После чего вычисляли величину интенсивности изнашивания по формуле:

$$J = Q / (q \cdot S_c \cdot L), \quad (4)$$

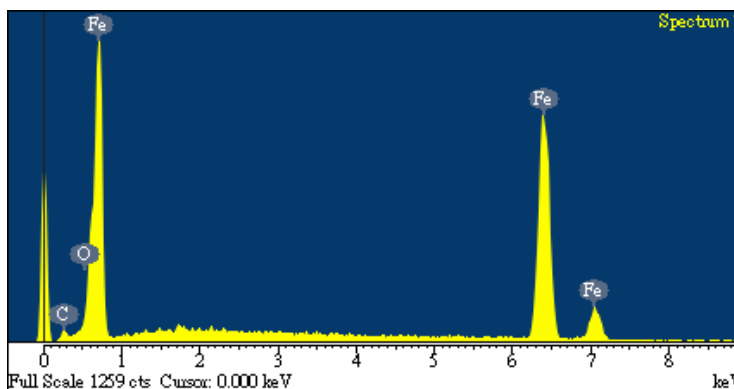
где Q – потеря массы образца, Н; q – плотность материала образца, Н/см³; S_c – геометрическая площадь контакта, см²; L – путь трения, см.

Износом дисков, изготовленных из инструментальной быстрорежущей стали состава Fe-6W-5Mo и закаленных до твердости HRC 58...65, пренебрегали из-за его малой величины по сравнению с износом испытываемых образцов.

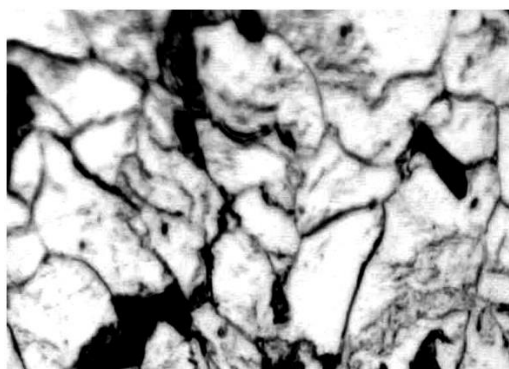
Для проведения химического анализа поверхности трения испытываемых образцов был использован сканирующий микроскоп S-3SOON с приставкой для EDS. Измерения микротвердости Н_μ осуществляли на приборе Micromet-5101 при нагрузке 1,96 Н с выдержкой под нагрузкой в течение 15 с. Оценку микротвердости, а также химический анализ поверхности трения на содержание кислорода проводили перед трибологическими испытаниями и после них.



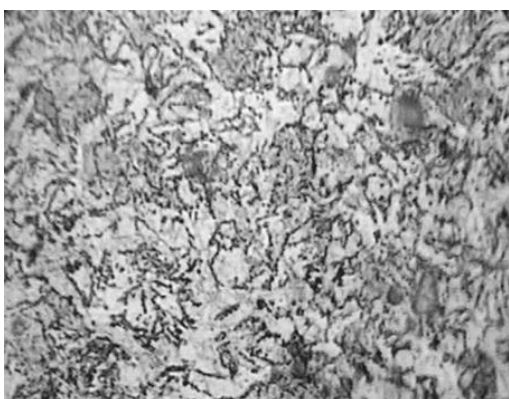
а)



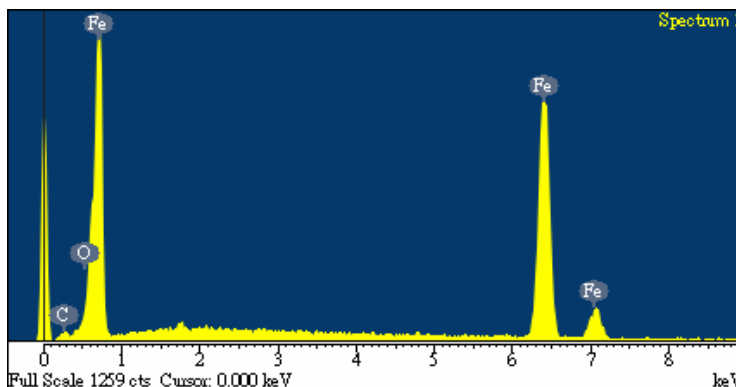
г)



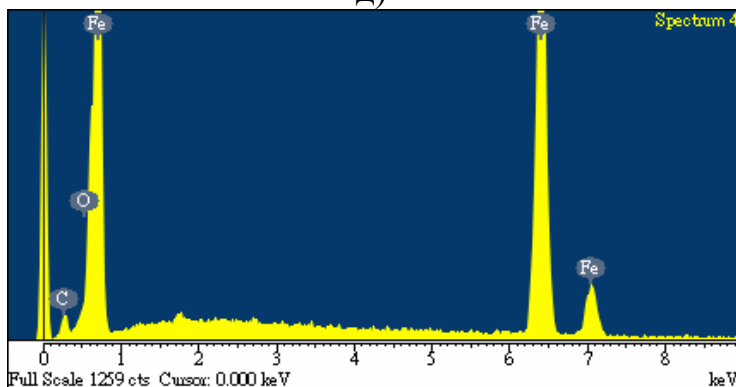
б)



в)



д)



е)

Рис. 3. Микроструктура стали 20: а) в исходном состоянии, средний размер зерен 70 мкм (x 500); б) после термической обработки, средний размер зерен 50 мкм (x 500); в) после термической обработки и 4-х циклов РКУП, средний размер зерен 0,5 мкм (x 1000); SEM – EDS спектры: г) в исходном состоянии; д) после термообработки; е) после термообработки и 4-х циклов РКУП

Результаты исследований

Измерение микротвердости и содержания кислорода на поверхности образцов. На основании измерения микротвердости и химического анализа контактных поверхностей на содержание кислорода было установлено, что после триботехнических испытаний микротвердость поверхностей трения и содержание в них кислорода возрастают. Причем, наименьшие величины исследуемых параметров соответствуют исходному состоянию материала, а наибольшие – материалу, подвергнутому термической обработке с последующей интенсивной пластической деформацией методом РКУП. Средние значения результатов измерений представлены в табл. 1.

Табл. 1. Анализ поверхности образцов из стали 20 в различном структурном состоянии

Вид обработки	Средний размер зерна, мкм	Микротвердость, МПа		Содержание кислорода, атом. %	
		До испытания	После испытания	До испытания	После испытания
Горячекатаная	70	241	283	1,31	1,73
Термическая обработка	50	265	307	1,51	1,82
Термическая обработка + 4 цикла РКУП	0,5	319	352	3,42	3,64

Согласно приведенным данным (табл. 1), существенное влияние на повышение микротвердости и содержание кислорода на поверхности низкоуглеродистой стали оказывает структурное состояние материала: чем меньше средний размер зерен, тем вышеуказанные параметры. Исходное состояние (горячекатаное) представляет собой крупнозернистую ферритно-перлитную смесь (на рис. 3, а: феррит – светлые участки, перлит и карбидные частицы – темные участки). После термической обработки (закалка в воде с температуры 880°С и последующий отпуск при температуре 600°С) наблюдается уменьшение исходной карбидной неоднородности с некоторым уменьшением среднего размера зерен (рис. 3, б). После циклической ИПД методом РКУП карбидная фаза частично сфероидизируется и наблюдаются участки в виде карбидной сетки, декорирующей границы зерен феррита (рис. 3, в). Измельчение зеренной структуры приводит к увеличению суммарной длины границ зерен, характеризующихся повышенной плотностью дефектов и энергией активации. В работе [13] отмечается увеличение скорости диффузии в ультрамелкозернистых (УМЗ) материалах, которые способствуют снижению энергии. Таким образом, предполагаем, что на поверхности УМЗ материалов более интенсивно формируются оксиды за счет более высокой скорости диффузии химических элементов из окружающей среды, в частности, кислорода. Как видно (рис. 3, е), после РКУП происходит существенное увеличение кислорода в поверхностном слое исследуемого материала. Аналогичные наблюдения были сделаны на магниевом сплаве AZ91D [20] и на технически чистом титане [21]. По всей вероятности, это является общим свойством ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов, границы зерен которых способствуют более активной адсорбции кислорода поверхностью металла с образованием соединений с компонентами сплавов в виде оксидов. В табл. 1 приведены численные значения содержания кислорода на поверхности образцов до и после испытаний. Причем после трибологических испытаний содержание кислорода на поверхности всех образцов увеличилось по сравнению с тем, что было

получено перед испытаниями. Эти данные находят некоторое подтверждение в результатах, полученных другими исследователями [6, 10, 22 и др.] и объясняются структурными изменениями на поверхности под действием нормальных давлений, сил трения и фрикционного разогрева, обусловленного скоростью относительного скольжения при проведении испытаний.

Трибологические испытания по схеме «блок-диск». При проведении триботехнических испытаний фрикционной пары «низкоуглеродистая сталь – инструментальная сталь» по схеме «блок-диск» установлен различный характер изменения коэффициента трения во времени. На рис. 4 представлены графики изменения коэффициента трения в зависимости от времени.

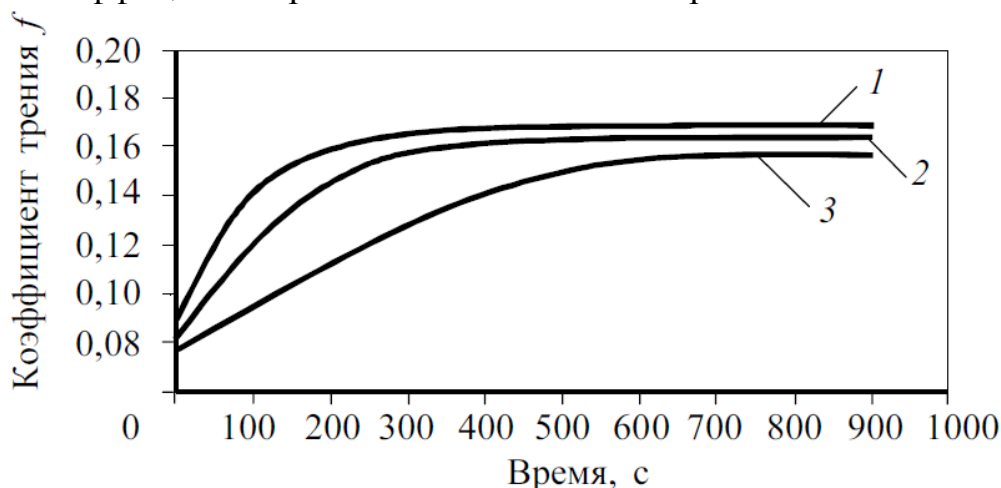


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от времени испытания контактной пары «низкоуглеродистая сталь – инструментальная сталь состава Fe-6W-5Mo»: 1 – исходный материал (крупнозернистый горячекатаный); 2 – материал после термической обработки; 3 – материал с УМЗ структурой после термической обработки и РКУП

Из рис. 4 видно, что наименьшие значения коэффициента трения в рассмотренных контактных парах имеет материал с УМЗ структурой после термической обработки с последующей ИПД методом РКУП. По всей вероятности, условия трения становятся более благоприятными за счет повышения твердости и прочности низкоуглеродистой стали, а также равномерного распределения частиц перлита и большего содержания кислорода в виде оксидов и карбидных частиц на поверхности. Такие условия трения, в какой-то степени, могут быть сравнимы с трением в подшипнике скольжения [23]. В результате снижается общее значение коэффициент трения. Таким образом, мы наблюдаем комплексное формирование «третьего тела» [24], состоящего из оксидов, мелкодисперсных частиц перлита и карбидов.

Кроме того, этот вариант – РКУП после термической обработки – обеспечивает более плавный выход на установившийся режим трения, что способствует уменьшению интенсивности изнашивания. На рис. 5 в виде гистограммы представлены результаты оценки интенсивности изнашивания.

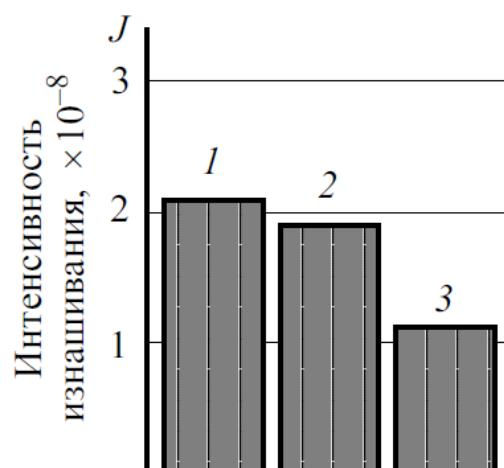


Рис. 5. Интенсивность изнашивания низкоуглеродистой стали в зависимости от структурного состояния исследуемого материала: 1 – исходный материал (крупнозернистый, горячекатаный); 2 – материал после термической обработки; 3 – материал с УМЗ структурой после термической обработки и РКУП

Оценка прочности адгезионных связей на срез. Результаты исследований триботехнических характеристик по определению прочности адгезионных связей на срез τ_n в зависимости от давления p_r на фрикционном контакте при различных температурах представлены на рис. 6.

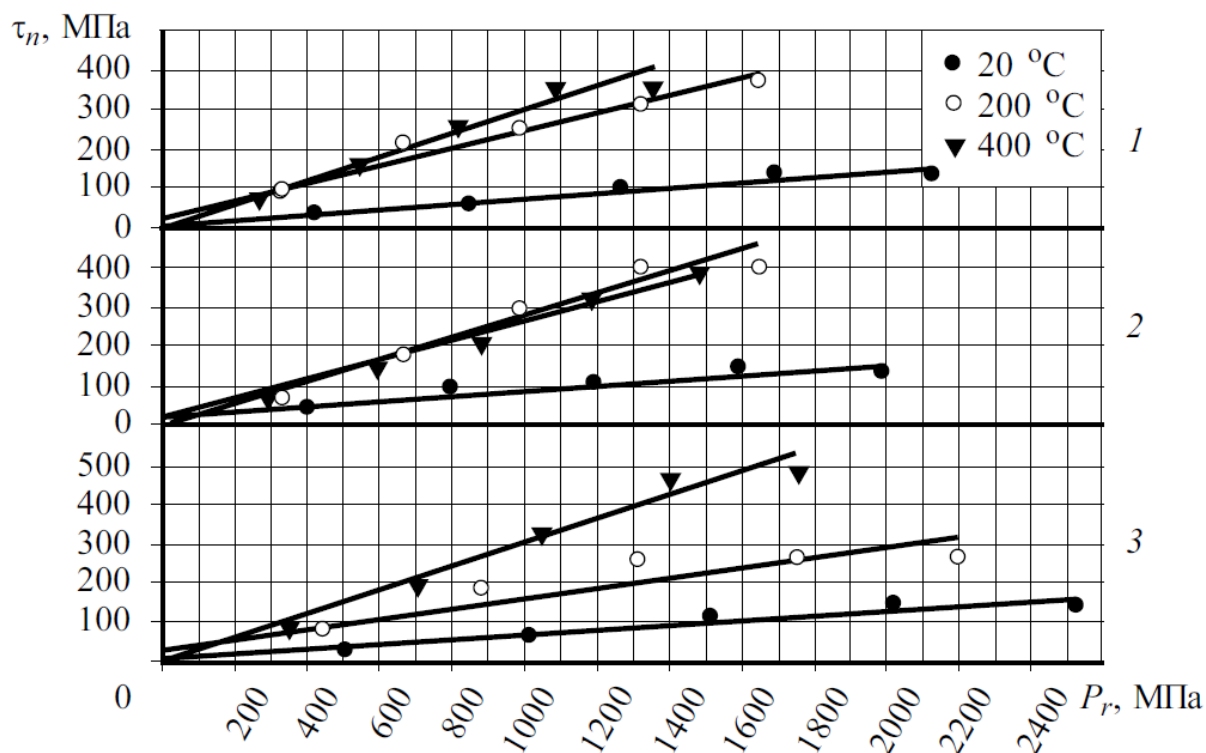


Рис. 6. Зависимость прочности адгезионных связей на срез от нормальной нагрузки в трибосопряжении «низкоуглеродистая сталь – инструментальная сталь состава Fe-6W-5Mo» при различных температурах и видах обработки исследуемого материала: 1 – исходный материал (крупнозернистый, горячекатаный); 2 – материал после термической обработки; 3 – материал с УМЗ структурой после термической обработки и РКУП

Эти исследования подтвердили линейный характер зависимости $\tau_n = f(p_r)$ как в условиях упругого контакта, так и при наличии пластических деформаций при различных температурах θ . На рис. 6 показано изменение прочности адгезионных связей в зависимости от нормального давления. Из этих зависимостей следует, что молекулярная составляющая коэффициента трения (f_M), которая определяется из выражения (3), увеличивается с ростом температуры. Значение f_M определяется как тангенс угла наклона к оси абсцисс (т.е. как отношение прочности адгезионных связей на срез (τ_n) к нормальному давлению (p_r)).

Полученная температурная зависимость молекулярной составляющей коэффициента трения (f_M) для исследуемых пар трения представлена на рис. 7. Кривые на рис. 7 построены в результате обработки данных, представленных на рис. 6 и после расчета f_M .

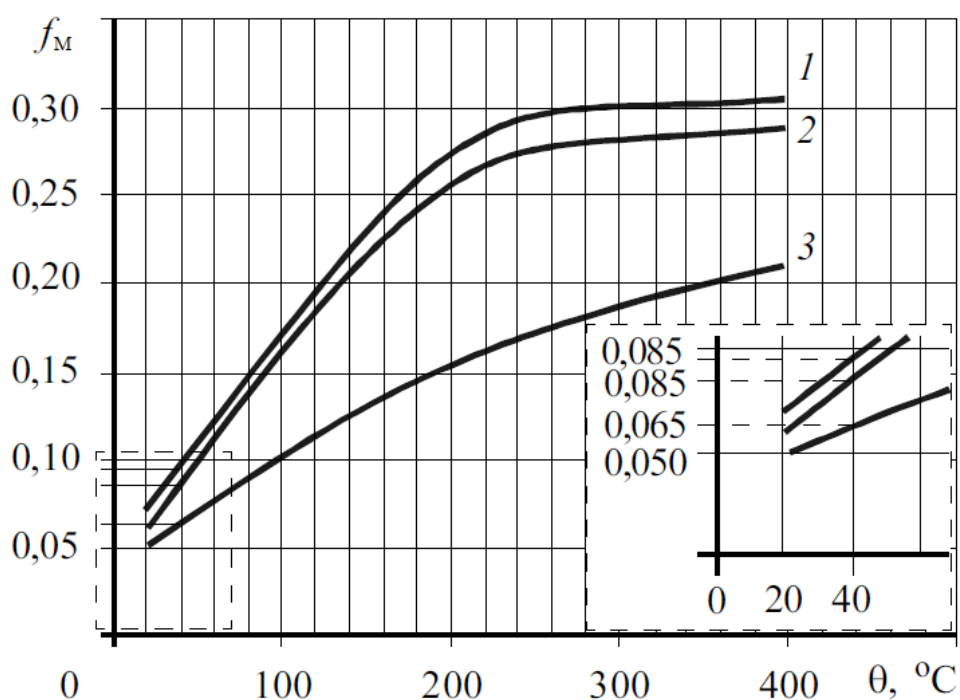


Рис. 7. Зависимость молекулярной составляющей коэффициента трения от температуры контакта: 1 – исходный материал (крупнозернистый, горячекатаный); 2 – материал после термической обработки; 3 – материал с УМЗ структурой после термической обработки и РКУП

Экспериментальные зависимости параметров адгезионного взаимодействия от давления и температуры, характерные для тяжело нагруженных трибологических сопряжений, а также для контакта инструментального и обрабатываемого материалов в условиях механической обработки приведены на рис. 6 и рис. 7.

Установлено, что повышение прочности адгезионных связей сопровождается опережающим ростом нормальных давлений p_r на контакте. При этом наибольший эффект наблюдается на образцах с УМЗ структурой после РКУП. По всей вероятности, это связано с более высоким упрочнением

материала в результате деформационной обработки по сравнению с двумя другими состояниями материала. Известно, что с повышением температуры несущая способность контакта постепенно снижается [18], в результате чего молекулярная составляющая коэффициента трения f_M увеличивается (рис. 7).

Однако из представленных зависимостей видно, что на образцах из низкоуглеродистой стали, подвергнутой термообработке с последующим ИПД методом РКУП, в контакте с инструментальной сталью значения молекулярной составляющей коэффициента трения значительно более низкие во всем исследованном диапазоне температур по сравнению с двумя другими состояниями. Данные, полученные на исходном образце и на образце после термообработки (без последующей ИПД), отличаются незначительно как по величине, так и по характеру изменения f_M . Очевидно, это обусловлено малым отличием в среднем размере зерен образцов в исходном и термообработанном состояниях, а также очень близким содержанием кислорода (см. табл. 1). Исходя из отмеченного выше, предполагаем, что молекулярная составляющая коэффициента трения напрямую связана со структурным состоянием поверхности и с содержанием кислорода, так как оксидные пленки, обладая высокой твердостью, препятствуют непосредственному контакту образца с диском в одном случае и сферическим индентором – в другом.

Сравнительная оценка результатов трибологических исследований при использовании двух альтернативных методик. Сравнивая результаты, представленные на рис. 4 и рис. 7, можно отметить их схожесть на восходящем участке (левая часть графиков) и предположить, что наибольший вклад в общее изменение интегральной величины коэффициента трения вносит его молекулярная составляющая. По всей вероятности, это связано со склонностью низкоуглеродистых сталей, к которым относится объект исследования, к деформационному упрочнению за счет измельчения зеренной структуры. Более пологий участок на кривой, соответствующей исследуемому образцу с УМЗ структурой после обработки по ИПД технологии методом РКУП, свидетельствует о большей несущей способности поверхности, однако данный исследуемый материал требует большего времени на приработку в узлах трения.

Из динамики изменения температуры при термометрировании в процессе испытаний по схеме «блок-диск» установлено, что максимальный разогрев образца при выбранных условиях испытаний и размерах испытуемых образцов и дисков составил примерно $40 \pm 1,5 \dots 2,0^\circ \text{C}$. Эта была достигнута через 50 сек. после начала трибологических испытаний и в дальнейшем практически не менялась до завершения испытаний.

Известно, что в соответствии с механико-молекулярной теорией трения [25] интегральная величина коэффициента трения (f) складывается из деформационной (f_D) и молекулярной (f_M) составляющих. Деформационная составляющая коэффициента трения формируется силами сопротивления деформационного «валика», движущегося впереди внедрившихся неровностей в поверхность более мягкого из контактирующих и скользящих относительно друг друга тел. Величина деформационной составляющей коэффициента трения f_D

зависит от количества внедрившихся неровностей и их относительного внедрения и может быть определена аналитически [25] или экспериментально как:

$$f_{\text{д}} = f - f_{\text{м}}. \quad (5)$$

Для сопоставления результатов испытаний, представленных на рис. 4 и рис. 7 выполнили отсечку данных на рис. 4, соответствующих времени стабилизации температуры фрикционного разогрева (50 сек.) и максимальному значению температуры через 50 сек. (40° С) с экстраполяцией этих данных на кривые, представленные на рис. 7. Используя выражение (5), произвели расчет деформационной составляющей коэффициента трения.

Результаты определения интегральной величины коэффициента трения (f) и его молекулярной составляющей ($f_{\text{м}}$), полученные в сопоставимых условиях на основании экспериментальных данных (рис. 4 и рис. 7), показали, что значения деформационной составляющей коэффициента трения ($f_{\text{д}}$) лежат в районе $0,020 \pm 10\%$ независимо от вида обработки и структурного состояния испытуемых образцов. Таким образом, установлено, что в выбранных условиях испытаний наибольшее влияние на коэффициент трения (f) оказывает молекулярная составляющая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На примере низкоуглеродистой стали показано, что интенсивная пластическая деформация методом многоциклового равноканального углового прессования позволяет эффективно повысить прочность низкоуглеродистой стали за счет измельчения зеренной структуры, что оказывает значительное влияние на снижение общего коэффициента трения и его молекулярной составляющей.

2. Повышенное содержание кислорода на поверхности материала после ИПД по сравнению с исходным и термообработанным состояниями способствует большей пассивации поверхности за счет формирования оксидных пленок, которые, наряду с деформационным упрочнением, также способствуют уменьшению значения коэффициента трения в рассмотренном диапазоне температур и повышению износостойкости.

3. Поверхность исследуемого материала после ИПД обработки методом РКУП обладает большей несущей способностью и требует большего времени на приработку в узлах трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др., под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.

2. Футорянский, Ю.В. Эффективные методы упрочнения стальных изделий. – Куйбышев: Куйбыш. кн. изд-во, 1978. – 87 с.

3. Киршенбаум, В.Я. Механотермическое формирование поверхностей трения. – М.: Машиностроение, 1987. – 230 с.

4. Громаковский, Д.Г., Кузнецов, Н.Д. и др. Повышение долговечности узлов трения путем применения карбонофторидов // Вестник Машиностроения, 1987. – № 8.
5. Белый, А.В., Карпенко, Г.Д., Мышкин, Н.К. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. – М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.
6. Гаркунов, Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1989. – 327 с.
7. Одинцов, Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 327 с.
8. Счастливец, В.М., Перлит в углеродистых сталях / В.М. Счастливец, Д.А. Мирзаев, И.Л. Яковлева и др. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – ISBN 5-7691-1713-3.
9. Счастливец, В.М., Зельдович, В.И., Мирзаев, Д.А. и др. Развитие идей академика В.Д. Садовского. Сборник трудов. – Екатеринбург, 2008. – ISBN 5-900474-58-5.
10. Рыбакова, Л.М., Куксенова, Л.И. Структура и износостойкость металла. – М.: Машиностроение, 1982. – 212 с.
11. Валиев, Р.З., Александров, И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
12. Рааб, Г.И., Валиев, Р.З. Равноканальное угловое прессование длинномерных заготовок // Цветная металлургия, 2000. – № 5. – С. 50-53.
13. Равноканальное угловое прессование металлических материалов: достижения и направления развития (Тематическая подборка статей под редакцией В.М. Сегала, С.В. Добаткина и Р.З. Валиева) // Металлы, 2004. – № 1. – С. 5-19, № 2. – С. 5-63.
14. Valiev, R.Z., Estrin, Y., Horita, Z., Langdon, T.G., Zehetbauer, M.J., Zhu, Y.T. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation // JOM. – V. 58. – № 4 (2006). – P. 33-39.
15. Сегал В.М., Резников В.И., Дробышевский А.Е., Копылов В.И. Пластическая обработка металлов простым сдвигом // Известия АН СССР. Металлы. 1981. № 1. С. 115–123.
16. Сегал, В.М., Резников, В.И., Копылов, В.И. и др. Процессы пластического структурообразования металлов. – Минск: Наука и техника, 1994. – 232 с.
17. Салтыков, С.А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1976. – 273 с.
18. Шустер, Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. – Уфа: Гилем, 1999. – 198 с.
19. Матвиевский, Р.М., Лапши, В.Л., Буяновский, И.А. и др. Смазочные материалы. Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 217 с.
20. Semenov, V.I., Jeng, Y. - R., Huang, S. - J., Dao, Y. - Zh., Hwang, S. - J., Shuster, L. Sh., Chertovskikh, S.V., Lin P. -Ch. Tribological Properties of the AZ91D

Magnesium Alloy, Hardened with Silicone Carbide and by Severe Plastic Deformation // Journal of Friction and Wear, 2009. – V. 30, №. 3. – P. 194-198.

21. Huang, S.J., Chertovskikh, S.V., Semenov, V.I., Shuster, L. Sh. Friction and wear of commercially pure titanium with different microstructure from the view point of thermodynamic analysis // Materials Science Forum, 2016. – V. 863. – P. 50-56.

22. Ахматов, А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.

23. Semenov, A.P. Antifriction and antiseizure sliding bearings. Proc. III Int. Symposium of tribo-fatigue ISTF 2000. October 22-26, 2000. Beijing China Human University Press, China. – 2000. – P. 629-632.

24. Крагельский, И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.

25. Крагельский, И.В., Добычин, М.Н., Комбалов, В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

© Семенов В.И., Чертовских С.В., 2023

УДК 621

ДЕКОМПОЗИЦИЯ ПОВОРОТОВ ДВУХЗВЕННЫХ ГУСЕНИЧНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ МЕХАНИЗМОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕОРИИ СЛОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА

Хуснутдинов Д.З., Полякова Т.В., Юрасова Н.В.

Аннотация: Представлена декомпозиция поворотов двухзвенных гусеничных транспортных механизмов для исследования поворотов двухзвенной гусеничной машины и выполнены численные эксперименты этой модели. Представлены результаты расчетов по исследуемой модели, используя теорию сложного движения тела при соответствии реальному объекту в условиях эксплуатации двухзвенных гусеничных транспортных машин.

Ключевые слова: движение поворотов звеньев двухзвенных гусеничных машин; теория сложного движения тела, компьютерная модель реального объекта

При моделировании поворотов двухзвенных гусеничных транспортных механизмов используем метод декомпозиции объекта в разных системах отчета. При повороте гусеничной машины осуществляется изменением углового положения переднего и заднего звеньев относительно друг друга с помощью поворотно-цепного устройства (ПСУ).

Рассмотрим на примере двухзвенного гусеничного транспортера (ДГТ) «Витязь». Поворот первого звена транспортера относительно инерциальной системы отсчета ХОУ и шарнир поворотно-цепного устройства совмещен с нулем данной системы отсчета. Второе звено – совершает поворот относительно системы отсчета, которая заделана и совмещена с первым звеном. На рисунке 1

представлена схема горизонтального складывания механизма двухзвенного гусеничного транспортера относительно инерциальной системы отсчета.

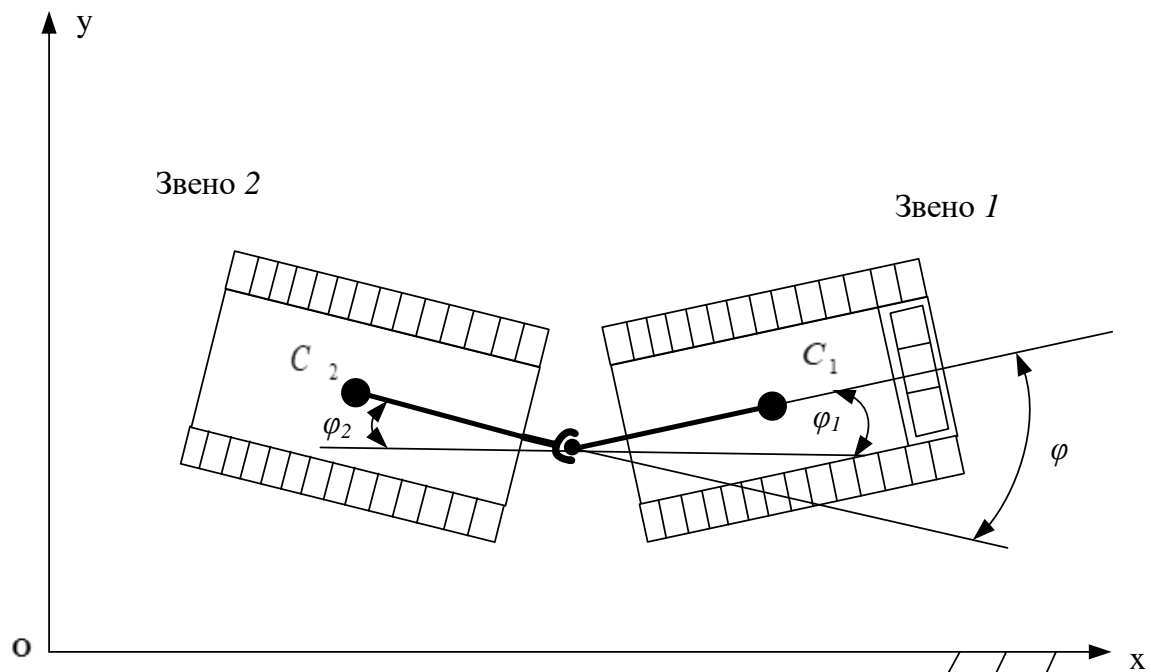


Рис 1. Схема горизонтального складывания двухзвенного механизма гусеничного транспортера: φ_1 – угол поворота звена 1 относительно инерционной системы отсчета, φ_2 – угол поворота звена 2 относительно своей системы отсчета

Абсолютное движение поворота звеньев транспортера относительно друг друга представляет собой

$$\varphi' = \varphi_1 + \varphi_2, \quad (1)$$

где φ_1 – угол поворота звена 1 относительно инерционной системы отсчета ХОУ; φ_2 – угол поворота звена 2 относительно своей системы отсчета.

Уравнение, описывающее движение первого звена, запишется в следующем виде

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_1}{dt} &= \omega_1 \\ \frac{d\omega_1}{dt} &= \frac{1}{J_1} (M_{\pi} - k'\omega' - k_{\text{тр}1}\omega_1), \end{aligned} \quad (2)$$

где ω_1 – угловая скорость поворота звена 1 относительно инерционной системы отсчета ХОУ;

k' – коэффициент трения;

$k_{\text{тр}1}$ – коэффициент трения звена 1;

ω' – угловая скорость;

$M_{\text{п}}$ – момент потенциала;

J_1 – момент инерции звена 1.

Система уравнений, описывающих движения второго звена

$$\frac{d\varphi_2}{dt} = \omega_2$$

$$\frac{d^2\varphi_2}{dt^2} = \frac{1}{J_2} (J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + k_{\text{тр}1}\omega_2 - k_{\text{тр}2}\omega_2), \quad (3)$$

где ω_2 – угловая скорость поворота звена 2 относительно своей системы отсчета;

$k'_{\text{тр}2}$ – коэффициент трения звена 2;

J_1 – момент инерции звена 2.

На основе полученных уравнений построим структурную схему (рис. 2).

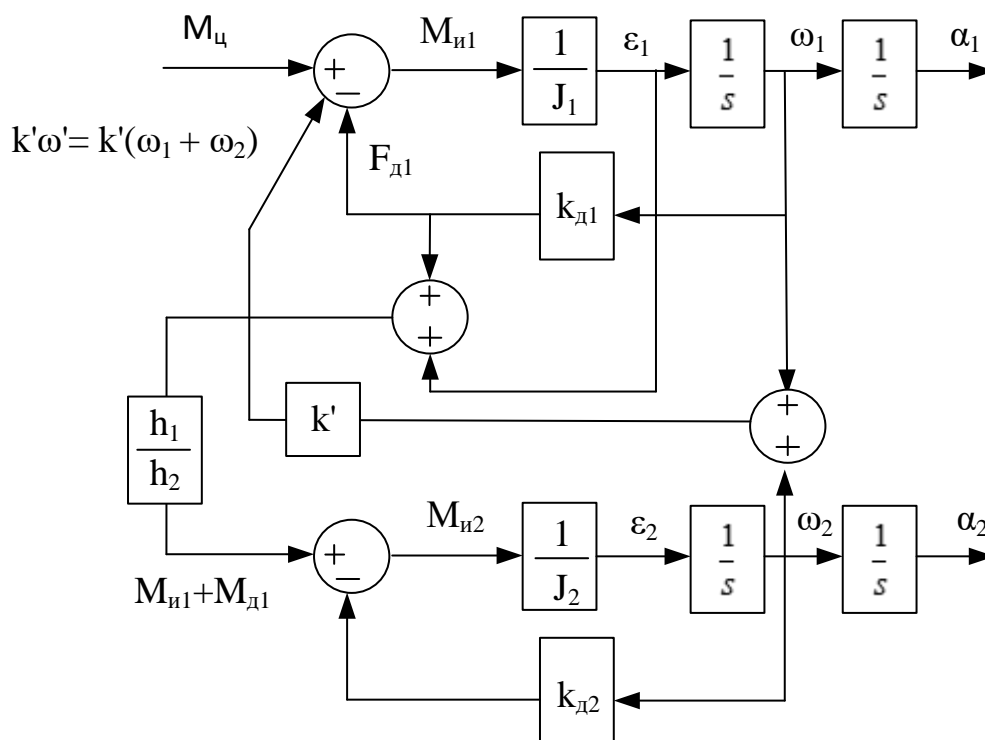


Рис. 2. Структурная схема объекта

В реальном объекте поворотнo-сцепное устройство машины выполнено так, что его составляющие расположены под определенным углом относительно друг друга и моменты сил, действующих на звенья, не одинаковые; при эксплуатации двухзвенного гусеничного транспорта: массы звеньев могут быть переменными – при перевозке груза или пассажиров; коэффициенты трения могут быть разные – в зависимости от поверхности грунта (при заносах, горных местностях и пр.) [1, 2, 3].

Полученная модель позволяет визуализировать любой переменный параметр рассматриваемого объекта – это перемена значений потенциала, сил сопротивления, ускорения, скорости, положения и прочее, а также удобно проанализировать ошибку управления системой и сигналы перекрестных связей.

На рисунках 3–6 представлены результаты исследования модели: 1 – кривые, когда сепаратные подсистемы являются «идентичными», т.е. при движении

параметры первого и второго звена одинаковые (масса, коэффициенты передачи потенциалов и пр.); 2 – кривые при различной массе звеньев транспортера; 3 – кривые показывают случай, когда моменты сил, действующих на звенья транспортера, имеют разные значения из-за разных значений плеч сил. Это показывает реальный случай при движении двухзвенного гусеничного транспортера

Таким образом, полученная методика исследований позволяет учитывать динамику обоих звеньев транспортного механизма. Полученная структура динамической системы аналогична случаю с неидеальным источником энергии в электротехнике и позволяет имитировать работу двух приемников энергии с одним источником энергии более приближенно к реальным процессам.

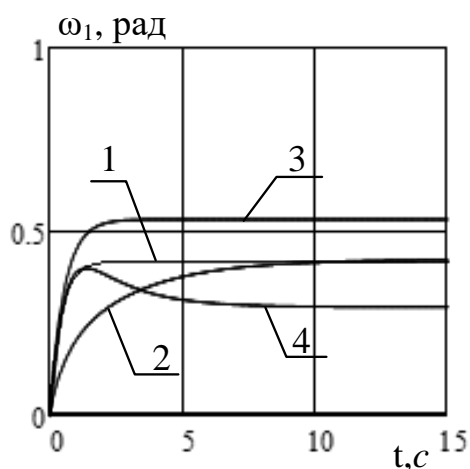


Рис. 3. Кривые скоростей первого тела относительно абсолютной точки отчета

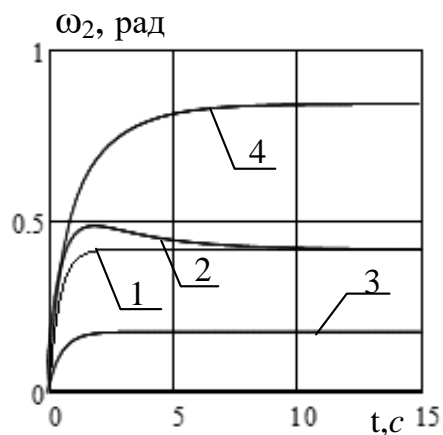


Рис. 4. Кривые скоростей второго тела относительно абсолютной точки отчета

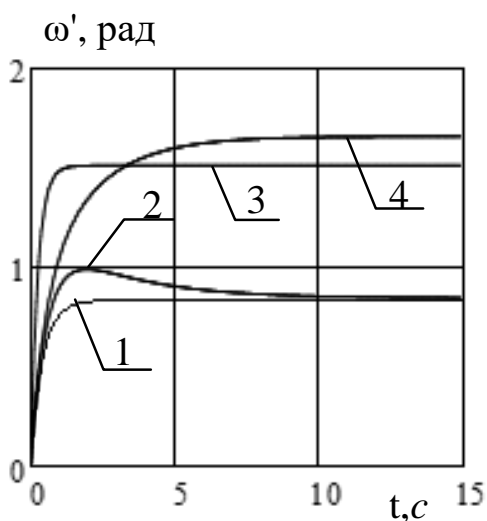


Рис. 5. Кривые скоростей второго тела относительно первого

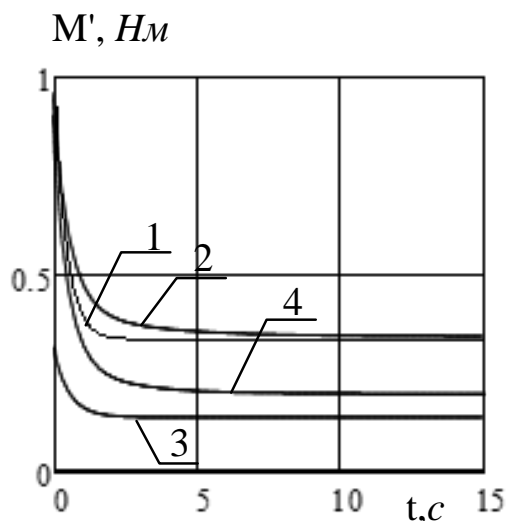


Рис. 6. Сила, действующая на второе тело

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мунасыпов Р.А., Юрасова Н.В., Некрасова М.Ю.** Моделирование рулевого механизма двухзвенного гусеничного транспортера «Витязь», как нелинейного объекта управления // *Материалы Всероссийских научно-технических конференций / Инновационное и цифровое машиностроение*, 2021. С. 186–191.

2. **Юрасова Н.В.** Исследование нелинейностей системы управления рулевого привода двухзвенного гусеничного транспортера «Витязь» с электрической обратной связью // *Сборник статей по материалам второй Всероссийской научно-практической конференции / наука: актуальные проблемы, достижения и инновации*, 2021. С. 85–87.

3. **Васильев В.И., Ильясов Б.Г., Мунасыпов Р.А.** Развитие структурных методов исследования сложных динамических систем // *Автоматика и телемеханика*. 2013. № 3. С. 192-214.

ОБ АВТОРАХ

Хуснутдинов Дим Зинфирович – к.т.н., доцент, филиал УУНиТ в г.Ишимбае, e-mail: dz_khusnutdinov@mail.ru

Полякова Татьяна Владимировна – преподаватель, ГАПОУ Ишимбайский нефтяной колледж, e-mail: tatyana_polyakova2017@mail.ru

Юрасова Наталья Владимировна – старший преподаватель, филиал УУНиТ в г. Ишимбае, e-mail: elan_ugatu@mail.ru

© Хуснутдинов Д.З., Полякова Т.В., Юрасова Н.В., 2023

УДК 621.65

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПУСКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

Зарипов А.Р.

Аннотация: В статье представлен сравнительный анализ различных методов пуска электродвигателей, применяемых в насосных агрегатах. Исследование проведено с целью выбора оптимального метода пуска, обладающего наиболее высокой эффективностью и экономичностью, а также минимальным воздействием на оборудование и электрическую сеть. В статье рассмотрены традиционные методы пуска, такие как прямой пуск и пуск через автотрансформатор, а также современные методы, включая плавный пуск и пуск с использованием частотного преобразователя. Результаты исследования позволят выбрать оптимальный метод пуска электродвигателя для конкретного насосного агрегата, что приведет к повышению эффективности работы системы и снижению затрат на электроэнергию.

Ключевые слова: методы пуска, электродвигатели, насосные агрегаты, плавный, прямой, звезда-треугольник, автотрансформатор, частотный, сравнительный анализ

Введение

Электродвигатели являются одним из основных типов привода для насосных агрегатов, которые широко используются в различных отраслях промышленности и бытовой сфере. Правильный выбор метода пуска электродвигателя имеет большое значение для обеспечения его надежной и безопасной работы, а также для эффективного использования электроэнергии. Существует несколько методов пуска, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. Однако, выбор оптимального метода пуска электродвигателя для конкретного насосного агрегата является сложной задачей, требующей учета множества факторов, таких как энергопотребление, нагрузочная способность и особенности эксплуатации системы.

Способы пуска электродвигателя насоса

Существуют несколько способов пуска электродвигателя насоса:

1. Прямой пуск от сети (DOL)
2. Пуск “звезда-треугольник” (Y/Δ)
3. Пуск электродвигателя через автотрансформатор
4. Плавный пуск
5. Частотный пуск

Методы пуска электродвигателя для насосных агрегатов могут различаться в зависимости от требований и характеристик системы, в которой будет использоваться насосный агрегат. Ниже представлен сравнительный анализ наиболее распространенных методов пуска электродвигателей для насосных агрегатов.

Прямой пуск

Этот метод является самым простым и наиболее распространенным способом пуска электродвигателя. При прямом пуске сетевое напряжение подается непосредственно на обмотки статора электродвигателя. Стоит отметить, что данный метод может вызывать большие токовые пульсации и механические удары при запуске, что может привести к повреждению насосного оборудования. Поэтому прямой пуск обычно используется для насосов с небольшой мощностью.

Сами по себе прямые пуски сопровождаются динамическими ударами не только в электродвигателях, питающей электросети и коммутационной аппаратуре, но и в механической части насосного агрегата и в гидросистеме. Для небольших электродвигателей пусковой момент будет составлять от 150% до 300% от номинального, тогда как пусковой ток будет составлять от 300% до 800% от номинального значения или даже выше.

Распространенным путем решения этих проблем является пуск двигателя через специальное пусковое устройство, устанавливаемое между двигателем и питающей сетью, ограничивающее пусковой ток с 6-ти кратного до 2-3-х

кратного, включаемое на время пуска, а затем шунтируемое с помощью отдельного коммутационного аппарата.

Преимущества прямого пуска от сети:

1. Простота и надежность. Прямой пуск не требует дополнительных устройств и регуляторов, что упрощает конструкцию и повышает надежность системы.

2. Экономичность. Прямой пуск является одним из самых дешевых способов запуска электродвигателя.

3. Высокая мощность. Прямой пуск позволяет запускать электродвигатель с высокой мощностью, что делает его применимым для насосных станций больших мощностей.

Недостатки прямого пуска от сети:

1. Высокие токи пуска. При прямом пуске от сети на электродвигатель действует высокий ток пуска, который может привести к перегрузке сети и повреждению оборудования.

2. Низкий коэффициент мощности. При прямом пуске от сети коэффициент мощности электродвигателя может быть низким, что приводит к ухудшению энергоэффективности системы.

3. Ограниченные возможности регулирования. Прямой пуск не позволяет регулировать скорость вращения электродвигателя, что может быть необходимо для оптимальной работы насосной станции.

В целом, прямой пуск от сети является простым и надежным способом запуска насосных электродвигателей, который подходит для систем с небольшой мощностью и без необходимости регулирования скорости вращения. Однако, при использовании этого способа необходимо учитывать его недостатки и возможные риски для оборудования и сети.

Пуск звезда-треугольник

Пуск электродвигателя переключением со звезды на треугольник (Y/Δ) – это более мягкий способ пуска, который используется для двигателей с более высокой мощностью. Суть метода заключается в том, что перед пуском электродвигатель соединяется в звезду (Y), что позволяет снизить напряжение на каждой обмотке в 1,73 раза. После запуска электродвигателя, соединение обмоток переключается в треугольник (Δ), что повышает напряжение на каждой обмотке и позволяет работать насосной станции с полной мощностью. Пуск Y/Δ обычно применяется для насосов средней мощности.

Преимущества пуска “звезда-треугольник”:

1. Снижение тока пуска. При использовании этого способа ток пуска снижается в 3-4 раза, что снижает нагрузку на сеть и уменьшает риск перегрузки.

2. Уменьшение износа оборудования. Снижение тока пуска позволяет уменьшить износ оборудования и продлить его срок службы.

3. Экономия энергии. Снижение тока пуска и уменьшение нагрузки на сеть позволяют снизить энергопотребление и сэкономить на электроэнергии.

Недостатки пуска “звезда-треугольник”:

1. Ограниченные возможности регулирования. Пуск “звезда-треугольник” не позволяет регулировать скорость вращения электродвигателя, что может быть необходимо для оптимальной работы насосной станции.

2. Необходимость дополнительного оборудования. Для использования этого способа необходимо установить специальное оборудование, которое позволит переключать соединение обмоток.

3. Высокая стоимость. Установка дополнительного оборудования и проведение работ по изменению соединения обмоток может быть дорогим.

В целом, пуск “звезда-треугольник” является более эффективным и экономичным способом запуска насосных электродвигателей, чем прямой пуск от сети. Однако, его использование может быть ограничено возможностями регулирования скорости вращения и высокой стоимостью оборудования.

Плавный пуск

Плавный пуск: Метод плавного пуска использует специальные устройства, такие как устройства плавного пуска (УПП). УПП – электротехническое устройство, применяемое в электродвигателях, которое обеспечивает плавный пуск, плавный разгон до номинального режима работы или плавную остановку. Использование устройства плавного пуска расширяет сферу применения электрических двигателей (например, строительство (насос для цемента, мельницы), системы водоснабжения (погружные насосы) и др.), уменьшает значения пусковых токов до двух-трех номинальных значений, обеспечивает плавный старт без рывков и отсутствие ударных механических нагрузок в момент пуска, как следствие, позволяет увеличить эксплуатационный срок машины. Снижение тока пуска позволяет снизить энергопотребление и сэкономить на электроэнергии.

Недостатки плавного пуска:

1. Необходимость дополнительного оборудования. Необходимо установить специальное устройство, которое позволит плавно увеличивать напряжение на обмотках электродвигателя.

2. Ограниченные возможности использования. Плавный пуск может быть ограничен возможностями электродвигателя и насосной станции.

3. Перегрев УПП при частых запусках, который может происходить из-за неправильно выбранной мощности данного устройства

4. Разрушение подшипников при некотором времени работы двигателя на резонансных частотах из-за плохого центрирования вращающегося механизма

В целом, плавный пуск является одним из наиболее эффективных и экономичных способов запуска насосных электродвигателей, который позволяет снизить ток пуска, уменьшить нагрузку на сеть и уменьшить износ оборудования. Однако, его использование может быть ограничено необходимостью дополнительного оборудования и ограниченными возможностями использования.

Автотрансформаторный пуск

Этот метод использует автотрансформатор, который позволяет плавно изменять напряжение на обмотках статора. Автотрансформатор позволяет снизить пусковой ток и механическое напряжение насосного агрегата, что увеличивает его срок службы и улучшает энергоэффективность. Однако автотрансформаторы требуют дополнительных затрат на оборудование и обслуживание.

Суть метода заключается в том, что перед пуском электродвигатель соединяется через автотрансформатор, который позволяет снизить напряжение на каждой обмотке. После запуска электродвигателя, напряжение на обмотках постепенно повышается до полного значения, что позволяет работать насосной станции с полной мощностью.

Преимущества пуска с автотрансформатором:

1. Снижение тока пуска. При использовании этого способа ток пуска снижается в 2-3 раза, что снижает нагрузку на сеть и уменьшает риск перегрузки.
2. Уменьшение износа оборудования. Снижение тока пуска позволяет уменьшить износ оборудования и продлить его срок службы.
3. Регулирование напряжения. Использование автотрансформатора позволяет регулировать напряжение на обмотках электродвигателя, что может быть необходимо для оптимальной работы насосной станции.
4. Экономия энергии. Снижение тока пуска и уменьшение нагрузки на сеть позволяют снизить энергопотребление и сэкономить на электроэнергии.

Недостатки пуска с автотрансформатором:

1. Высокая стоимость. Установка автотрансформатора может быть дорогим, особенно для больших мощностей.
2. Необходимость дополнительного оборудования. Для использования этого способа необходимо установить специальное оборудование, которое позволит регулировать напряжение на обмотках.
3. Ограниченные возможности регулирования. Пуск с автотрансформатором не позволяет регулировать скорость вращения электродвигателя, что может быть необходимо для оптимальной работы насосной станции.

В целом, пуск с автотрансформатором является эффективным и экономичным способом запуска насосных электродвигателей, который позволяет снизить ток пуска и уменьшить нагрузку на сеть. Однако, его использование может быть ограничено высокой стоимостью оборудования и ограниченными возможностями регулирования скорости вращения.

Частотный пуск

Использование этого метода является одним из наиболее эффективных способов запуска насосных электродвигателей. Он позволяет снизить ток пуска, уменьшить нагрузку на сеть, а также регулировать скорость вращения электродвигателя.

Суть метода заключается в использовании частотного преобразователя, который позволяет изменять частоту питающего напряжения на обмотках

электродвигателя в процессе пуска. При этом напряжение на обмотках остается постоянным, что позволяет работать насосной станции с полной мощностью.

Преимущества частотного пуска:

1. Снижение тока пуска. При использовании этого способа ток пуска снижается до 2-3% от номинального значения, что снижает нагрузку на сеть и уменьшает риск перегрузки.

2. Регулирование скорости вращения. Частотный преобразователь позволяет регулировать скорость вращения электродвигателя, что может быть необходимо для оптимальной работы насосной станции.

3. Уменьшение износа оборудования. Снижение тока пуска и регулирование скорости вращения позволяют уменьшить износ оборудования и продлить его срок службы.

4. Экономия энергии. Снижение тока пуска и регулирование скорости вращения позволяют снизить энергопотребление и сэкономить на электроэнергии.

Недостатки частотного пуска:

1. Высокая стоимость. Установка частотного преобразователя может быть дорогим, особенно для больших мощностей.

2. Необходимость дополнительного оборудования. Для использования этого способа необходимо установить специальное оборудование, которое позволит регулировать частоту питающего напряжения.

3. Ограниченные возможности использования. Частотный пуск может быть ограничен возможностями электродвигателя и насосной станции.

В целом, частотный пуск является одним из наиболее эффективных и экономичных способов запуска насосных электродвигателей, который позволяет снизить ток пуска, уменьшить нагрузку на сеть и регулировать скорость вращения. Однако, его использование может быть ограничено высокой стоимостью оборудования и ограниченными возможностями использования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из проведенного сравнительного анализа методов пуска электродвигателей для насосных агрегатов можно сделать вывод о том, что в большинстве случаев, плавный пуск является наиболее эффективным и экономичным решением. Он позволяет снизить нагрузку на оборудование при запуске, уменьшить потребление энергии и увеличить срок службы насосов и электродвигателей. Кроме того, системы плавного пуска легко устанавливаются и настраиваются, что делает их доступными для широкого круга потребителей. Но в зависимости от требований и характеристик системы, каждый метод пуска электродвигателя может иметь свои преимущества и недостатки. Необходимо тщательно изучить условия эксплуатации и потребности системы перед выбором определенного метода пуска насосного агрегата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плавный пуск высоковольтного электродвигателя насоса с помощью параметрического пускового устройства / В.Д. Колотило, В.В. Паболков, В.А. Барский [и др.] // Энергосбережение и водоподготовка. – 2008. – № 3(53). – С. 33-34. – EDN JUAEDX.
2. Красноборов, М.И. Влияние пусковых токов большой величины на работу электродвигателя / М.И. Красноборов // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всероссийской науч. В 2-х томах, Пермь, 09–11 июня 2021 года. Том 2. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2021. – С. 113-117. – EDN EFYPRB.
3. Абрамов В.Н., Баранов А.А., Кузнецов В.С. Плавный пуск электродвигателей: принципы работы, технические решения, экономические выгоды // Электричество. – 2018. – № 5. – С. 34-39.
4. Григорьев А.В., Кузнецов В.С., Петров А.А. Оптимизация работы насосных станций с помощью плавного пуска электродвигателей // Насосы и насосное оборудование. – 2017. – № 4. – С. 20-25.
5. Шестаков А.С., Михайлов И.В., Кузнецов В.С. Влияние плавного пуска на надежность и долговечность оборудования в насосных станциях // Насосы и насосное оборудование. – 2017. – № 2. – С. 12-17.
6. Коротков И.А., Семенов А.В., Чернышев Д.А. Сравнительный анализ эффективности различных методов запуска насосных электродвигателей // Энергетика и энергосбережение. – 2018. – № 3. – С. 14-19.

ОБ АВТОРЕ

Зарипов Альберт Рифович – доцент кафедры Автоматизации технологических процессов Уфимского университета науки и технологий.

© Зарипов А.Р., 2023

УДК 621.9.06:004.415.25

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ НА РОБОТИЗИРОВАННОМ КОМПЛЕКСЕ

Мунасыпов Р.А., Фецак С.И., Алляров М.Ш., Красников И.П.

Аннотация: В статье рассматривается роботизированный центр по производству ортезов и протезных форм, проблемы создания управляющей программы в системе SprutCAM с точки зрения точности и скорости выполнения. Большое количество точек на траектории робота, безусловно, позволяет более точно обрабатывать продукт. Большое количество кадров может значительно замедлить фактическую обработку продукта, независимо от подачи,

указанной в программе, поскольку обработка каждой точки требует определенного ресурса. Изменяя количество кадров в сторону уменьшения за счет улучшения математической точности, фактическая точность обработки не ухудшилась, время обработки соответствовало расчетному времени

Ключевые слова: промышленный робот, позиционер, шпиндель с воздушным охлаждением, система пылеудаления, магазин для хранения инструмента, управляющая программа, математическая точность, линейное отклонение, интерполяция траектории

В настоящее время изготовление протезов и ортезов осуществляется непосредственно с участием человека. В свою очередь данная процедура сопровождается дискомфортом для человека и представляет собой трудоемкий процесс. Применение робототехнического комплекса (РТК) [1, 2] для изготовления форм протезов и ортезов позволяет свести участие пациента к минимуму, повысить точность и производительность изготовления этих изделий.

Исходя из технологических требований к разрабатываемому РТК были решены задачи выбора необходимого оборудования и программного обеспечения, разработка компоновки, обеспечение требований безопасности и экологичности.

Компоновка спроектированного РТК, представленная на рисунке 1, состоит из промышленного робота КУКА модели KR60HA, позиционера модели KP1-НС, мотор-шпинделя с воздушным охлаждением, системы пылеудаления модели Extor-2100, инструментального магазина на пять инструментов, технологического приспособления для установки и закрепления заготовки.

Для соответствия требованиям техники безопасности данный комплекс оснащен электромеханическим замком и лучевыми барьерами, которые исключают нахождения человека в комплексе во время его работы.

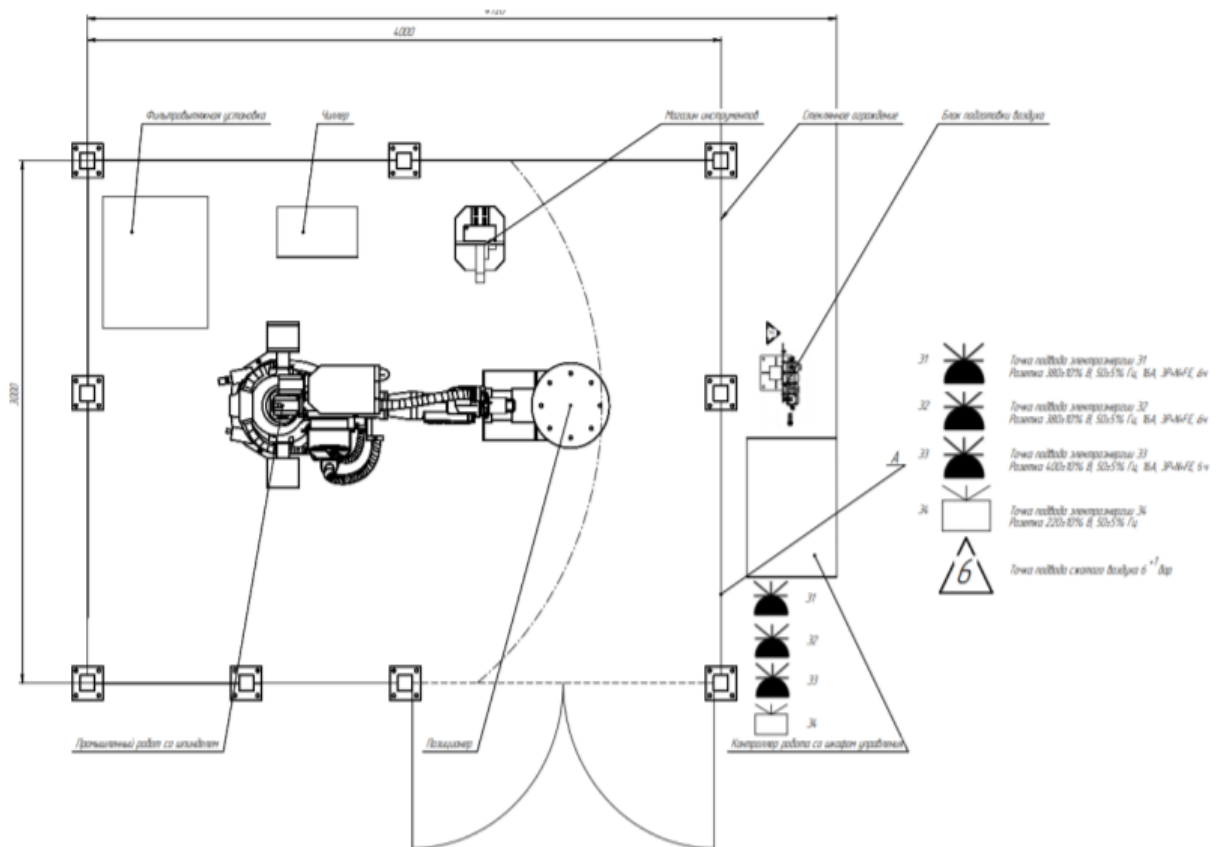


Рис. 1. Планировка робототехнического комплекса

Обработка изделий на разработанном РТК производилась на технологических режимах:

- материал заготовок: пенополистерол;
- материал фрезы: твердый сплав ВК8;
- диаметр фрезы: 20 мм;
- скорость резания: 4000 мин^{-1} ;
- подача: 8000 мм/мин (на прямолинейных участках достигала 30000 мм/мин);
- глубина резания: 70 мм;
- припуск на чистовую обработку: 10 мм.

Процесс обработки и готовый результат представлены на рисунках 2 и 3.

Для создание управляющей программы обработки изделий с помощью роботизированного комплекса использовали специализированный пакет для программирования роботов компании SprutCAM (Россия) – SprutCAM Robot с модулем для 2D-5D фрезерной обработки [3, 4].

На начальном этапе работы в виртуальной среде SprutCAM Robot создается 3D-ячейка робототехнического комплекса и производится его настройка (рис. 4).

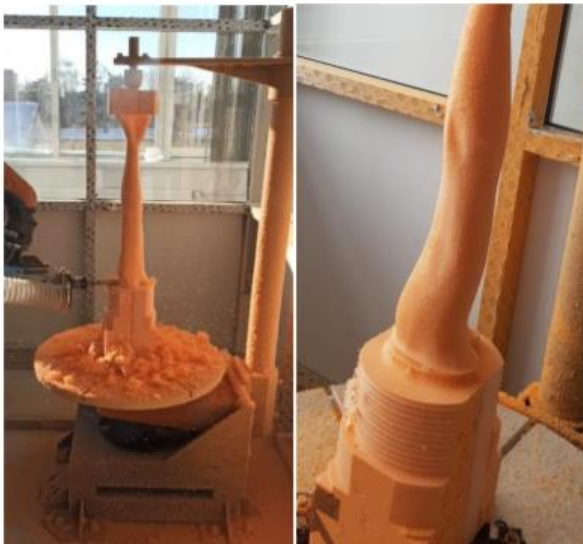


Рис. 2. Процесс и результат обработки изделия

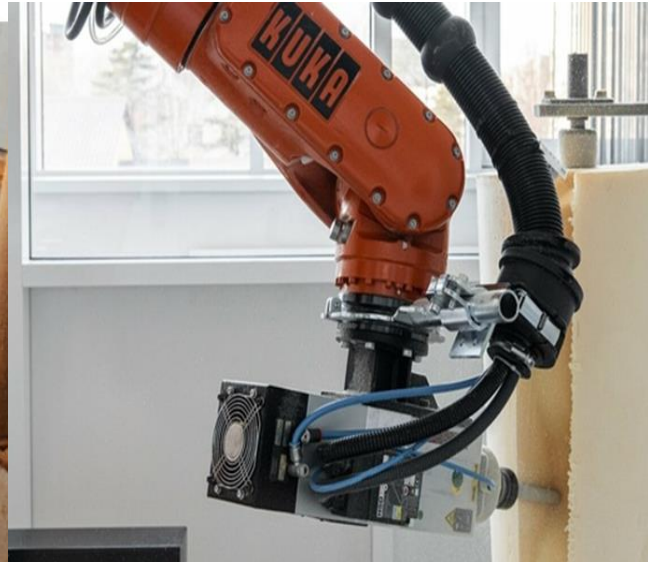


Рис. 3. Процесс обработки изделия

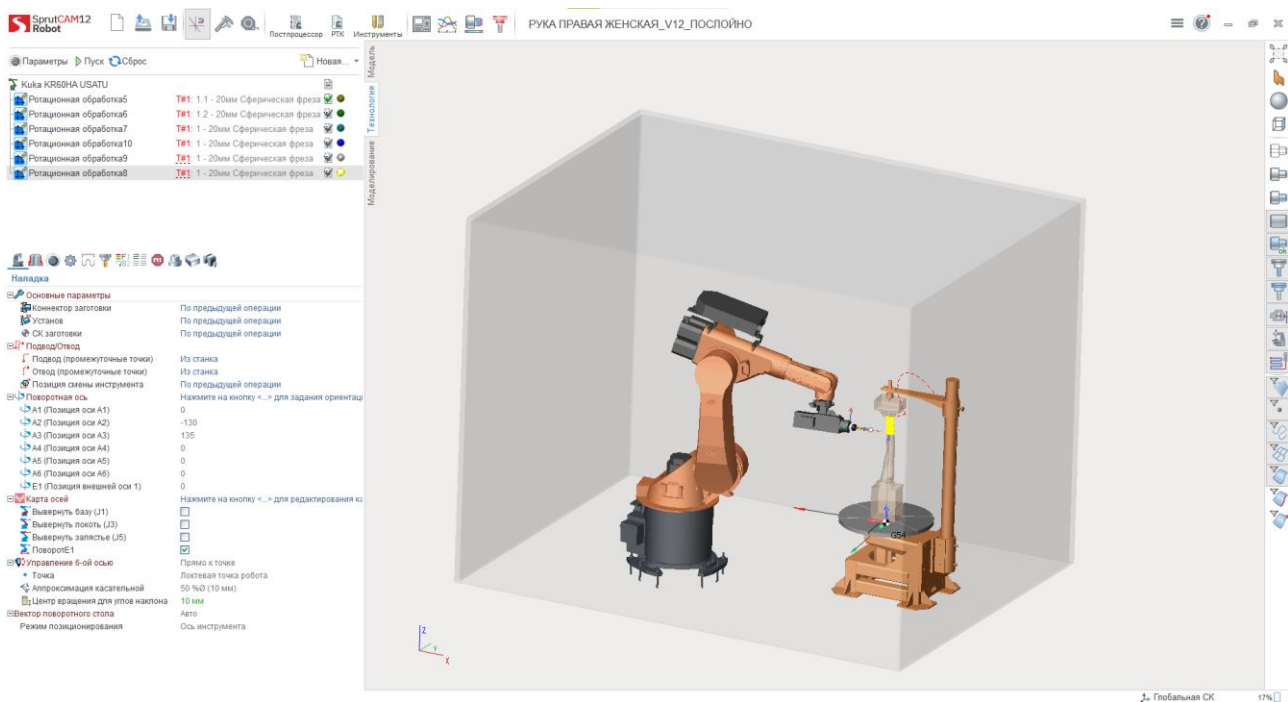


Рис. 4. Робототехнический комплекс в среде SprutCAM

Создание управляющей программы для каждой отдельной детали включает в себя следующие основные этапы:

- загрузка в модель исходной заготовки, привязка её к комплексу;
- выбор инструмента обработки;

- выбор стратегии обработки;
- задание режимов обработки;
- моделирование обработки;
- проверка на отсутствии соударения частей робота с частями комплекса, отсутствии сингулярности (рис. 5);
- получение управляющей программы траектории движения робота;
- проверка управляющей программы обработки на промышленном роботе.

Важным моментом при создании управляющей программы для робота является оптимальная настройка параметров обработки в SprutCAM. Сочетание параметров задаваемой математической точности, максимального линейного отклонения определяют количество кадров (точек) в управляющей программе обработки. Обрабатываемые изделия являются изделиями сложной геометрической формы и состоят из множества прямых участков и множества радиусов поворота (рис. 6).

Большое количество точек в траектории робота безусловно позволяет более точно произвести обработку изделия. Однако необходимо учитывать, что чрезмерно большое количество кадров может существенно замедлить фактическую обработку изделия вне зависимости от задаваемой в программе подачи, так как отработка каждой точки требует определённого ресурса. Контроллер робота может физически не успевать обрабатывать точки.

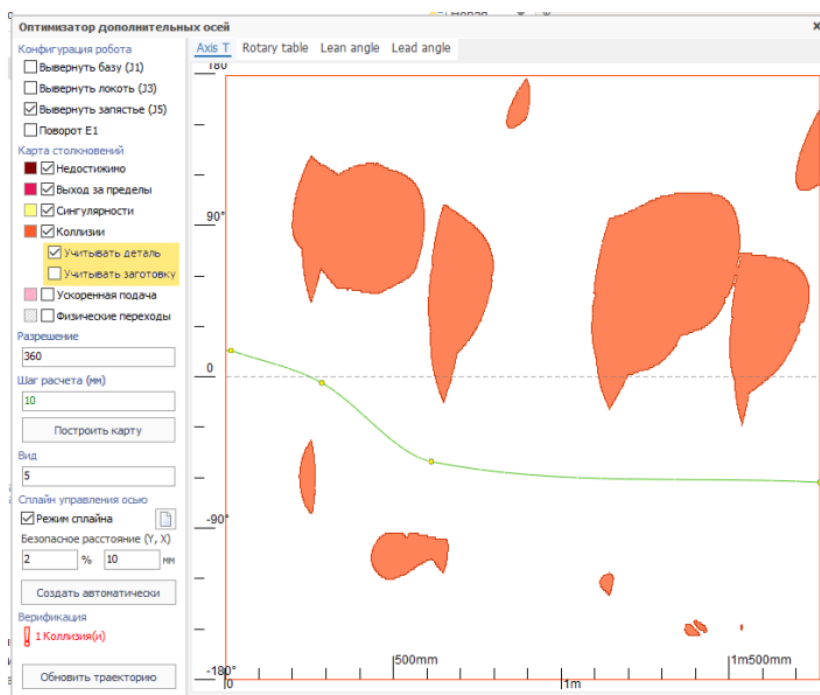


Рис. 5. Проверка зон сингулярности и на соударения
Рис. 6. Пример изделия (Торс)

В ходе выполнения работы рассматривались сочетания параметров точности, максимального линейного отклонения, интерполяции траектории. К примеру, для детали типа «Торс» задавая параметр точности 0,2 мм и максимальное линейное отклонение 0,2 мм (рис. 7) было получено 44218 кадров

управляющей программы. При этом фактическое время обработки изделия превышало расчетное время обработки.

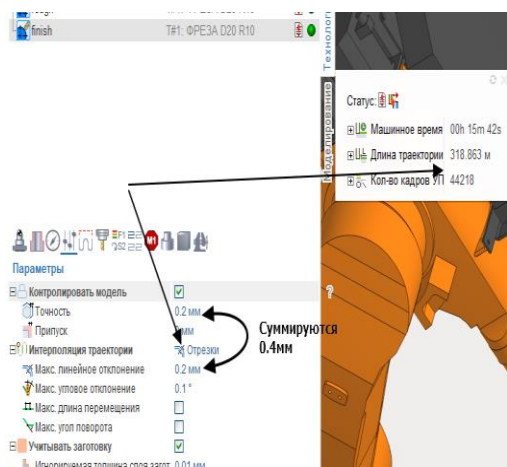


Рис. 7. Задаваемые параметры обработки изделия в SprutCAM

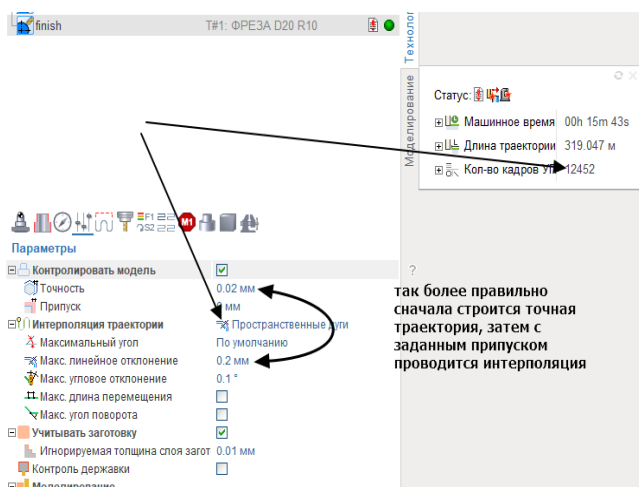


Рис. 8. Более точный математический расчет траектории робота

Принимая во внимание полученное большое количество кадров, была скорректирована точность до 0,02 мм, а максимальное линейное отклонение было оставлено без изменения – 0,2 мм. То есть был сделан акцент на более точный математический расчет траектории робота (рис.8).

Затем с заданным припуском проводилась интерполяция. SprutCAM определяет количество кадров в программе. В данном случае количество кадров сократилось до 12452.

В ходе практических экспериментов было подтверждено, что при изменении количества кадров в сторону уменьшения за счет улучшения математической точности фактическая точность обработки не ухудшилась, время обработки соответствовало расчетному времени.

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).
3. Стремнев А.Ю. Работа в системе SprutCAM [Видеозапись: электронный ресурс]: электронное учебное пособие для студентов высших учебных заведений: видеокурс / Стремнев А.Ю.; Белгородский гос. технологический ун-т им. В.Г. Шухова. – Белгород: БГТУ, 2014. – 1 электрон. опт. диск (DVD) : зв., цв.; 12 см.

4. Конов Н. Программирование промышленных роботов в SprutCAM. САПР и графика, 2016, № 5, стр. 18-21.

ОБ АВТОРАХ

Мунасыпов Рустэм Анварович – докт. техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО УУНиТ, г. Уфа

Фецак Сергей Игоревич – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО УУНиТ, г.Уфа

Аллаяров Марат Шамоатович – директор ООО ИЦ АПР, г.Уфа

Красников Илья Петрович – ассистент, ФГБОУ ВО УУНиТ, г.Уфа

© Мунасыпов Р.А., Фецак С.И., Аллаяров М.Ш., Красников И.П., 2023

УДК 621.9.025

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОКООРДИНАТНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ

Макаров В.Ф., Песин М.В., Норин А.О.

Аннотация: В статье приведены результаты применения многокоординатного пятиосевого профишлифовального обрабатывающего центра с ЧПУ модели MFP-050.65.65 фирмы Magerle (Швейцария), который позволил сократить в пять раз число операций, универсальных станков, специальных приспособлений и режущих инструментов путем увеличения количества обрабатываемых поверхностей с одной установки обрабатываемых сопловых лопаток авиационного газотурбинного двигателя. Одновременно решена важная задача по повышению точности проходных сечений соплового аппарата турбины при совместном использовании системы ЧПУ станка и специального программного обеспечения для коррекции погрешностей литейных поверхностей деталей в процессе их установки, разворота и глубинного шлифования базовых поверхностей.

Ключевые слова: сопловые лопатки турбины, проходное сечение, глубинное шлифование, обрабатываемые поверхности, шлифовальные круги, количество проходов погрешности литья лопаток

В настоящее время в нашей стране в связи с санкциями резко возросла потребность в изготовлении большого парка отечественных магистральных пассажирских самолетов на замену импортных. Правительством РФ поставлены задачи изготовить к 2030 году не менее 339 современных отечественных гражданских самолетов, таких как ТУ-214, Sukhoi Superjet 100 New и МС-21-310. В свою очередь это потребует от авиационных моторостроительных предприятий ускоренного производства большого количества современных отечественных газотурбинных двигателей, таких как ПС-90А, ПД-8, ПД-14 и др. с характеристиками, не уступающими мировым аналогам газотурбинной техники [1].

Решение этой проблемы на предприятиях моторостроения возможно путем применения новых технологических решений, которые обеспечат существенный рост производительности изготовления при стабильно высоких параметрах качества и конкурентноспособности газотурбинных двигателей. Одним из наиболее трудоемких узлов газотурбинного двигателя является узел газовой турбины, состоящий из дисков, рабочих и сопловых лопаток, входящих в сопловые аппараты из труднообрабатываемых жаропрочных сплавов на никелевой основе [2]. Из всех деталей газовой турбины наиболее сложными по геометрии и конструкции являются лопатки сопловых аппаратов, предназначенных для правильного направления газового потока на рабочие лопатки турбины для создания необходимого крутящего момента и вращения ротора газотурбинного двигателя. Обработка разнонаправленных поверхностей таких сложных деталей проводится обычно методом шлифования на различных универсальных плоскошлифовальных станках типа ЗГ72 Ф или на модернизированных токарно - лобовых станках типа МК163 М с применением различных шлифовальных кругов из электрокорунда белого на керамической или бакелитовой связке зачастую без применения СОЖ. При этом, помимо низкой производительности обработки, зачастую не обеспечивается требуемая точность и шероховатость, появляются трещины и шлифовочные прижоги на обработанных поверхностях.

Кроме того, при сборке шлифованных сопловых лопаток в сопловой аппарат не выполняется требование по обеспечению необходимой площади проходных сечений между лопатками для расчетного прохождения газового потока в турбине. Это приводит к изменению рабочих режимов ГТД, к увеличению расхода топлива, снижению мощности, тяги и КПД газотурбинного двигателя. Установлено, что это может быть также связано с появлением отклонений геометрии пера лопаток по сравнению с эталоном, возникающих в отливках лопаток при их остывании после литья.

В результате анализа литературных данных и опыта предприятий [3,4,] предложен новый наиболее эффективный технологический процесс по пятиосевой профилированной многокоординатной обработке всех поверхностей сопловой лопатки с одной установки на шлифовальном обрабатывающем центре модели MFP-050.65.65 с ЧПУ Siemens Sinumerik 840D фирмы «Magerle AG» (Швейцария).

Современная конструкция станка и концепция системы управления обеспечивают высокую производительность и точность обработки.

Многokратное повышение производительности, качества и точности на станке обеспечивается выполнением обработки всех плоских и круговых разнонаправленных поверхностей сопловых лопаток методом высокопроизводительного глубинного шлифования с применением высокопористых шлифовальных кругов, непрерывной правки алмазными роликами, автоматической балансировки кругов и обильной высоконапорной подачи СОЖ. Система ЧПУ станка увеличивает число оборотов круга по мере уменьшения его диаметра при непрерывной правке с целью поддержания постоянной скорости резания. [5,6]. Для глубинного шлифования выбраны

вместо импортных шлифовальных кругов фирмы «Tyrolit» (Австрия) отечественные высокопористые керамические круги фирмы ООО «Волгашлиф Плюс» 1 300x30x76,2 25A F60 G14V, не уступающие по стойкости и производительности, но дешевле в 5 раз. Предварительно определены рациональные режимы глубинного шлифования, обеспечивающих требуемую шероховатость $Ra=0,32-0,63$ мкм, благоприятные сжимающие напряжения и отсутствие шлифовочных прижогов и трещин: скорость круга $V=20$ м/с, подача $S=150-200$ мм/мин, непрерывная правка $0,4-0,8$ мкм/об., СОЖ 6-8% Blaser 4000CF под давлением 6 бар. Обработка базовых поверхностей с припуском 1-2 мм выполняется за 5 проходов с уменьшением глубины резания от 1 до 0,02 мм. Контроль точности геометрии сопловых лопаток осуществляется бесконтактной оптической измерительной системой ATOS III, которая позволяет получать оцифрованные модели сопловых лопаток в формате *.stl с точностью $\pm 0,02$ мм. В результате анализа технических характеристик и возможностей этого станка и системы ЧПУ принято решение, что неизбежное искажение геометрии отливок лопаток, полученных в процессе литья по выплавляемым моделям, можно уменьшить за счет коррекции геометрии установочных базовых поверхностей сопловых лопаток турбин ГТД при их обработке методом глубинного шлифования. Для того чтобы провести корректирующую механическую обработку, необходимо правильно установить и развернуть вместе с приспособлением сопловую лопатку на предварительно рассчитанный угол, т.е. придать сопловой лопатке правильное положение относительно выбранной системы координат [7,8]. Для получения величин этой коррекции разработано специальное программное обеспечение (СПО). Данное СПО позволяет с помощью оцифровки учесть величину отклонения фактических литейных поверхностей профиля пера лопаток от конструкторской модели и рассчитать угол разворота и смещения лопатки с приспособлением и окончательную получившуюся площадь проходного сечения. Для разворота лопатки с приспособлением на расчетный угол из СПО выбирается файл и вводится в стойку ЧПУ станка. Введя коррекцию, после установки лопатки в станочное приспособление и разворота ее на рассчитанный угол специальным программным обеспечением, в процессе последующего глубинного шлифования базовых установочных поверхностей искажение положения профиля лопатки в пространстве уменьшается и при сборке обработанных лопаток в корпусе соплового аппарата турбины обеспечивается требуемое значение площади проходного сечения турбины газотурбинного двигателя [9]. Экспериментальные исследования применения новой технологии обработки сопловых лопаток на станке фирмы «Magerle AG» показали, что, после обработки площадь проходного сечения соплового аппарата значительно приблизилось к номинальному значению [10,11]. Результаты работы внедрены и применяются при изготовлении 7 различных наименований сопловых лопаток ТВД из жаропрочного литейного сплава на основе никеля в АО «ОДК-Авиадвигатель» (г. Пермь).

ВЫВОДЫ

1. В результате внедрения новой технологии изготовления сопловых лопаток с применением многокоординатных профишлифовальных станков и последующей более эффективной сборки сопловых аппаратов производительность изготовления этих деталей и сборки сопловых аппаратов газотурбинных двигателей увеличилась в 3 раза. При этом обеспечено более высокое по сравнению с серийным производством качество поверхностного слоя лопаток: шероховатость поверхности снизилась до $Ra=0,3-0,4$ мкм, получены благоприятные сжимающие остаточные напряжения, обеспечена микротвердость в пределах нормы, создана благоприятная без прижогов и трещин микроструктура поверхностного слоя.

2. Исключены дополнительные переборки лопаток при селективной сборке сопловых аппаратов, что значительно сократило время простоя сборочных участков для подгонки площади проходного сечения соплового аппарата до требуемого значения. В результате внедрения обработки сопловых лопаток на 5-ти осевом многокоординатном профишлифовальном станке MFP-050.65.65 фирмы Mägerle с ЧПУ сокращены затраты (около 4 млн. руб. в год) на ежегодное изготовление не менее четырех дополнительных ступелей и барабанов, необходимых для шлифования плоских и круговых поверхностей сопловых лопаток по старой серийной технологии на плоскошлифовальных и модернизированных токарно-лобовых станках.

3. По новой технологии обработано 26 комплектов сопловых аппаратов и более 1000 сопловых лопаток с внесением в систему ЧПУ станка коррекции найденных при оцифровке отклонений профиля пера сопловых лопаток путем разворотов и смещений лопаток в приспособлении на рассчитанную величину и последующим глубинным шлифованием базовых поверхностей, что позволило гарантировано обеспечивать требуемую площадь проходного сечения соплового аппарата в пределах заданного допуска. Оформлен патент на изобретение № 2648174.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов Д.А. ПД-14 создается практически всеми авиадвигателестроителями России [электронный ресурс] / Д.А. Козлов. – Режим доступа: <http://www.aviaport.ru/news/2012/04/16/233024.html>. Дата обращения: 15.10.2014.
2. Иноземцев, А.А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Том 2. Компрессоры. Камеры сгорания. Форсажные камеры. Турбины. Выходные устройства/ А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий - М.: Машиностроение, 2008. – 365 с.
3. Макаров В.Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов: учебное пособие. – СПб.: Издательство “Лань”, 2013. – 320 с.
4. Noichl H. CBN Grinding of Nickel Alloys in the Aerospace Industry. // Intertech 2000. – Vancouver, 2000. July, p. 17-21.

5. Полетаев В.А., Цветков Е.В., Волков Д.И. Автоматизированное производство лопаток ГТД: Библиотека технолога. М.: Инновационное машиностроение, 2016. – 262 с.
6. Макаров В.Ф. Повышение эффективности профильного глубинного шлифования лопаток турбин на многокоординатных станках с ЧПУ / Макаров В.Ф., Никитин С.П. // Научно-технические технологии машиностроения, 2018. – № 4(82) – С. 21...28.
7. Макаров, В.Ф. Повышение точности проходного сечения сопловых лопаток турбин: [текст] / В.Ф. Макаров, Р.А. Туранский, А.В. Григорьева // материалы науч.-практ. конф. – Брянск, 2015. С. – 291-293.
8. Макаров, В.Ф., Норин А.О. Автоматизированный расчет величин смещений сопловых лопаток турбины с обеспечением заданного проходного сечения соплового аппарата. Материалы VIII МНТК «Научно-технические технологии на современном этапе развития машиностроения», 19-21 мая; Москва, МАДИ, 2016.
9. Макаров, В.Ф., Норин А.О., Туранский Р.А. Разработка метода корректирующего управления процессом глубинного шлифования базовых поверхностей сопловых лопаток на многоосевом станке с ЧПУ. МНТК «Современные высокоэффективные технологии и оборудование в машиностроении (МТЕТ-2016)» 6-8 октября 2016, СПб гос. политех. ун-т Петра Великого, 2016. – С. 23-27
10. Макаров, В.Ф., Никитин С.П.; Норин А.О. Повышение качества и производительности при профильном глубинном шлифовании турбинных лопаток. Научно-технические технологии в машиностроении. 2016. № 5(59). – С. 29-31.
11. Макаров В.Ф. Повышение качества и производительности при профильном глубинном шлифовании турбинных лопаток. / Макаров В.Ф., Никитин С.П. // Научно-технические технологии машиностроения, 2016. – № 5(59). – С. 17...24.

ОБ АВТОРАХ

Владимир Федорович Макаров – Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: makarovv@pstu.ru

Михаил Владимирович Песин – Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: m.pesin@mail.ru,

Норин Александр Олегович – Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: makarovv@pstu.ru

© Макаров В.Ф., Песин М.В., Норин А.О., 2023

**ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЛЕЗВИЙНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ**

Макаров В.Ф., Песин М.В., Волковский А.А.

Аннотация: В работе решена актуальная задача повышения производительности и качества обработки новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углепластика при обработке деталей ракетно-космической и авиационной техники. Механическая обработка данных изделий создает ряд проблем, связанных с обеспечением необходимой шероховатости, отсутствием дефектов обработанной поверхности и обеспечением высокой прочности окончательно обработанной детали. В статье представлены результаты исследования применения высокопроизводительной технологии последовательной лезвийно-абразивной обработки изделий из ПКМ на основе углеволокна. Определена рациональная геометрия лезвийного режущего инструмента для предварительной черновой обработки ПКМ. Представлены результаты экспериментальных исследований чистовой абразивной обработки ПКМ жесткими шлифовальными кругами из электрокорунда белого, карбида кремния зеленого и эльбора. Представлены зависимости шероховатости поверхностного слоя от режимов шлифования. Определены рациональные характеристики шлифовальных кругов и режимы обработки. Впервые рассмотрены вопросы влияния дефектов механической обработки на прочность ПКМ. Доказано повышение прочности на растяжение и разрыв деталей из ПКМ, изготовленных по новой технологии последовательной лезвийно-абразивной обработки, на 20...30% по сравнению с традиционной лезвийной обработкой.

Ключевые слова: последовательная лезвийно-абразивная обработка, полимерные композиционные материалы, абразивная обработка ПКМ, шлифование, фрезерование ПКМ, механическая обработка

Быстро растущие темпы развития машиностроительной отрасли в Российской Федерации влекут за собой необходимость быстрой разработки и внедрения инновационных технологий в производственные процессы предприятий. Сегодня наиболее актуальным является вопрос освоения технологий механической обработки новых перспективных конструкционных материалов. Наибольшее развитие в данном направлении получают композиционные материалы на полимерной основе [1, 2]. Полимерные композиционные материалы представляют собой двухсоставной элемент, заключающий в себе полимерную матрицу и армирующие волокна, соединенные между собой на основе адгезионного сцепления при высокотемпературном прессовании. Комбинация вышеуказанных материалов позволяет обеспечить совокупность низкой массы и высокой прочности изделия, что влияет на

повышение энергосиловых характеристик машин, путем замещения традиционных материалов и сплавов композитами [3].

Наиболее передовыми направлениями в машиностроительной отрасли, где композиты на полимерной матрице получили широкое применение, является авиастроение в конструкции нового магистрального лайнера МС-21, новых авиадвигателей ПД8, ПД-14 и ПД-35, автомобилестроение в виде разработок кузовов, бамперов и других деталей из углепластика, в конструкциях изделий военно-промышленного комплекса, обечаек и корпусов ракетно-космической техники.

В свою очередь, ввиду особых анизотропных свойств полимерных композитных материалов (ПКМ) при механической обработке этих материалов возникает много проблем с обеспечением качества поверхностного слоя и образования дефектов. Оказалось, что прочности адгезионных связей между углеволокном и полимерной матрицей недостаточно при механической обработке. Происходит разрушение поверхностного слоя с образованием дефектов. К основным типам дефектов относятся деламинация крайних слоев, ворсистость обработанной поверхности, термодеструкция и образование продольных и поперечных микротрещин в матрице композита [4–6].

При исследовании причин возникновения и разработки методики устранения вышеуказанных дефектов определены основополагающие факторы, которые оказывают непосредственное влияние на качество обработанной поверхности. К ним относятся: геометрия режущего инструмента, твердость режущего инструмента и режимы механической обработки [6].

По результатам литературного анализа установлено, что обеспечение показателей качества поверхностного слоя при лезвийной обработке достигается путем применения высокоскоростного резания, применения методики термомеханического воздействия на композиционный материал, разработки специальной геометрии режущего инструмента и применения сверхтвердых режущих материалов. Однако каждая из представленных технологий не исключает образование дефектного поверхностного слоя и сопровождается трещинами в матрице, деламинацией и другими отклонениями от требований конструкторской документации.

В качестве одного из эффективных методов механической обработки ПКМ предложена абразивная обработка гибким инструментом. Однако применение гибких лепестковых шлифовальных кругов является безразмерной обработкой и не может применяться в серийных технологических процессах ввиду отсутствия контроля над снимаемым припуском и, как следствие, над производительностью процесса.

На основании проведенного анализа механической обработки ПКМ различными лезвийными инструментами выдвинута гипотеза, что обработка жестким абразивным инструментом, позволит обеспечить наилучшую шероховатость обработанной поверхности $Ra = 0,4 \dots 0,8$ мкм и точность IT6, IT7, исключит образование дефектов, характерных для лезвийной обработки, однако, этот метод механической обработки является практически не исследован [7–9].

Повышение качества поверхностного слоя при абразивной обработке может быть обеспечено за счет применения высоких скоростей резания 35...50 м/с, что в 10–15 раз выше скоростей резания при лезвийной обработке, а также более острой и более твердой режущей кромки абразивных зерен шлифовального круга. В результате, абразивное зерно оказывает более высокое режущее воздействие на тонкие волокна углепластика, т.к. с высокой скоростью перерезает весьма твердое углеволокно ПКМ, не деформируя, не вытягивая и не ломая его, что, происходит при лезвийной обработке [8].

В тоже время, стоит отметить, что применение абразивной обработки не позволяет снимать большие припуски с заготовки, требуется проведение большого числа проходов, что влияет на снижение производительности механической обработки. Отсюда следует, что обеспечение высокой производительности технологического процесса механической обработки может быть достигнуто путем применения последовательной лезвийно-абразивной обработки. Эффективность данной технологии возникает в результате снятия большого припуска на черновом этапе обработки лезвийным инструментом и последующей финишной обработкой жестким шлифовальным кругом с целью устранения дефектов и повышения качества поверхностного слоя и прочности деталей из ПКМ. Эта гипотеза была проверена и подтверждена при последующих экспериментальных исследованиях.

При проведении экспериментальных исследований лезвийной и абразивной обработки ПКМ из углепластика выполнен сравнительный анализ качества поверхностного слоя по параметру шероховатости R_a , полученного в результате фрезерования плоской поверхности ПКМ тремя видами специальных разработанных видов фрез для обработки композитов и шлифовальных кругов из различных абразивных материалов и характеристик инструмента, а также по виду и количеству дефектов обработанного поверхностного слоя. В работе для получения эмпирической математической модели зависимости шероховатости обработанной поверхности от режимов резания использовался метод обработки данных полного факторного эксперимента вида 2^3 .

В качестве переменных факторов приняты: глубина резания t , мм; частота вращения шпинделя n об/мин (диаметр фрезы 10 мм); минутная подача S , мм/мин. Уровни варьирования факторов представлены в табл. 2. В качестве переменных факторов, влияющих на качество поверхностного слоя при абразивной обработке, определены: глубина шлифования на один двойной ход t , мм; скорость подачи стола S , м/мин; зернистость F шлифовального круга. Уровни варьирования представлены в табл. 1.

Табл. 1. Уровни варьирования факторов

Вид обработки	Лезвийная обработка (фрезерование)			Абразивная обработка (плоское шлифование)		
	X1 n , об/мин	X2 S , мм/мин	X3 t , мм	X1 F	X2 t , мм	X3 S , м/мин
Характеристика						

Основной уровень	1250	100	2	63	0,15	7,5
Интервал варьирования	990	35	1	17	0,1	2,5
Верхний уровень	2240	135	3	80	0,25	10
Нижний уровень	260	65	1	46	0,05	5

В качестве обрабатываемого материала принимался углепластик ВКУ-39 с укладкой слоев 0/45/90/-45. Станочное оборудование и средства технического оснащения представлены (СТО) в табл. 3. Станочное оборудование модернизировано дополнительно системой вытяжки отработанных продуктов в виде пыли при резании ПКМ с целью обеспечения дополнительной защиты здоровья оператора. Общий вид проведения экспериментальных исследований при шлифовании на плоскошлифовальном станке типа 3Г71 представлены на рис 1.

Табл. 2. Средства технического оснащения экспериментального исследования

Оборудование и СТО	Наименование	Назначение
Универсально-фрезерный станок	JET 1452TSDRO	Предварительная обработка ПКМ фрезерованием
Фреза роутер для обработки ПКМ, диаметр 10 мм	Концевая Роутер	
	Концевая прямозубая Z = 6	
Плоскошлифовальный станок	JETJPSG 1224H	Финишная обработка ПКМ плоским шлифованием
Режущий инструмент 300×76×40мм	25AF46G14V 35 2250 25AF46K 7 V 35 2250 64CF60 K 7 V35 2250 25AF60 K 7 V 35 2250 64CF80 K 7 V35 2250 1A1-100/80 K5 V35	
Пирометр	BoschUniversalTemp	Измерение температуры в верхних слоях заготовки
Профилометр	MarSurf PS10	Оценка качества обработанной поверхности по параметру шероховатости Ra, мкм
Цифровой микроскоп	BM-200 LCD	Визуальная оценка наличия и вида дефектного слоя

Выбор параметров исследования обосновывается физико-механическими свойствами связующего материала композита, который представляет собой эпоксидную смолу. Последняя, относится к классу термореактивных полимеров, поэтому необходимо вести контроль температуры с целью снижения вероятности достижения температуры разложения смолы. Параметр шероховатости R_a определен с учетом комплексности предоставляемой информации о качестве обработанной поверхности, в том числе и наличии дефектного слоя.



а

б

в

Рис. 1. Общий вид проведения экспериментальных исследований:

а) общий вид проведения исследований на фрезерном станке; б) на плоскошлифовальном станке б – измерение температуры резания пирометром при шлифовании

В результате проведенных сравнительных экспериментальных исследований фрезерования различными концевыми фрезами установлено, что наилучшие показатели шероховатости поверхностного слоя по сравнению со стандартной концевой фрезой и специальной фрезой - роутером обеспечивает применение твердосплавной концевой прямозубой фрезы. Данный инструмент позволяет снизить шероховатость поверхностного слоя с $R_a = 1,303$ мкм до $R_a = 0,537$ мкм при равных режимах обработки.

При визуальном анализе поверхностного слоя под микроскопом обнаружено наличие дефектов, т.е. обработка фрезерованием лучшим инструментом сопровождается образованием продольных и поперечных трещин в связующей матрице заготовки, появлением деламинации и ворсистости крайних слоев

Причинами образования этих дефектов является особый механизм процесса стружкообразования, при котором происходит хрупкое разрушение матрицы под действием силы давления передней поверхности режущих лезвий фрезы, последующая упругая деформация (сжатие) твердых армирующих волокон, и, наконец, разрушению адгезионных связей матрицы и волокон, изгибу и вырыву волокон из матрицы, обрыву, поломки части волокон и частичному их разрушению.

Также нужно отметить, что в поперечном сечении заготовки в местах трещинообразования возникает выступы и волнистость поверхности, достигающей превышение от 0,05 мм, до 0,15 мм.

Эффективность устранения этих дефектов поверхностного слоя и полученную шероховатость обработанной поверхности исследованы путем сравнительной чистовой обработки различными абразивными шлифовальными кругами из электрокорунда белого, карбида кремния зеленого и эльбора.

Наиболее лучшие показатели по отсутствию дефектов и полученной шероховатости обработанной поверхности получены при применении высокопористых шлифовальных кругов из электрокорунда белого 25AF46 G14 V35 2250. Стабильность процесса плоского шлифования и сохранения режущей способности обеспечивается при глубине резания до 0,15 мм, что подтверждается оценкой износа абразивного круга. Высокая пористость и малая твердость, и рациональная зернистость этого круга создает условия стабильного его самозатачивания при шлифовании ПКМ. При этом температура верхних слоев заготовки не превышает 70° С, что намного ниже допустимой температуры термодекструкции ПКМ.

Повышение качества поверхностного слоя достигнуто при повышении количества проходов. Первый проход при глубине резания 0,05 мм и скорости подачи стола 5 м/мин позволяет устранить ворсистость крайних слоев заготовки, полученную ранее. Однако ввиду глубины и протяженности трещин в матрице композита, повышение качества обработанной поверхности требует увеличение количества проходов от 3 до 5 до полного исключения дефектов. Путем многопроходного движения инструмента достигается точность поверхности IT6-7.

По результатам экспериментальных исследований, получены математические модели зависимости шероховатости поверхностного слоя от режимов лезвийной обработки фрезерованием (1) и абразивной обработки плоским шлифованием (2).

$$Ra = 0,2731 + 0,000132n + 0,003835S + 0,0655t - 0,00000202nS - 0,000078nt - 0,00008St + 0,00000086nSt \quad (1)$$

$$Ra = 0,2731 + 0,000132n + 0,003835S + 0,0655t - 0,00000202nS - 0,000078nt - 0,00008St + 0,00000086nSt \quad (2)$$

Данные математические модели прошли проверку и получили положительную оценку однородности выборочной дисперсии по критерию Кохрена Gr, значимости выборочных коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента tr и адекватности математической модели по критерию Фишера Fr.

В связи с образованием дефектов в поверхностном слое ПКМ при лезвийной обработке возникает вопрос о влиянии этих дефектов на эксплуатационные показатели изделий из ПКМ - прочность, сопротивление усталости, износостойкость и др. Поэтому следующим важным этапом экспериментального исследования является проведение сравнительных испытаний на прочность изделий из ПКМ, обработанных традиционным лезвийным инструментом и изготовленных методом последовательной лезвийно-абразивной обработки. Испытания проводились на универсальной разрывной электромеханической машине Instron 5965, оснащенной лазерными

датчиками фиксации деформаций в материале образцов при растяжении путем последовательного нагружения образца на растяжение до 70 Кн с расшивкой и записью данных линейного удлинения на компьютере. В качестве заготовок приняты четыре образца, обработанных по новой технологии последовательной лезвийно-абразивной обработки (№ 1–4), а также четыре образца, обработанных наилучшим среди исследованных лезвийным инструментом (№ 5–8) на установленных ранее рациональных режимах резания согласно математической модели. Автоматически проводилась запись нагрузки и величины растяжения образца при его разрыве.

В результате анализа полученных данных установлено, что применения последовательной комбинированной лезвийно-абразивной обработки приводит к повышению прочности ПКМ на разрыв и разрушение в среднем на 25% по сравнению с лезвийной обработкой фрезерованием за счет снижения шероховатости поверхности, снижения величины дефектов в поверхностном слое в виде трещин, разрывов и деламинации крайних слоев обработанной заготовки. На основании этих результатов можно утверждать, что и сопротивление усталости при знакопеременных нагрузках изделий из ПКМ также существенно повысится, что является весьма важным фактором для повышения надежности и долговечности работы изделий авиационной и ракетно-космической техники.

ВЫВОДЫ

1. На основании проведенных исследований впервые установлено, что применение новой технологии последовательной лезвийно-абразивной обработки изделий из ПКМ приводит к существенному снижению величины дефектов в поверхностном слое в виде трещин, разрывов и деламинации крайних слоев обработанной заготовки, что обеспечивает гарантированное повышение прочности на разрыв и разрушение изделий на 20-25% по сравнению применяемой на практике обычной лезвийной обработкой фрезерованием.

2. Новая технология последовательной лезвийно-абразивной обработки изделий из ПКМ может быть реализована при соблюдении следующих требований:

– в качестве предварительного лезвийного режущего инструмента необходимо применение твердосплавной прямозубой фрезы с целью снижения величины деламинации крайних слоев заготовки;

– режимы предварительной лезвийной обработки должны быть определены с учетом требований конструкторской документации и производительности производственного процесса. Рекомендуются следующие режимы резания при фрезеровании: скорость резания 65-70 м/мин, подача $S = 65$ мм/мин и глубина резания 1мм;

– для окончательной операции финишной обработки и устранения ранее образованных дефектов поверхностного слоя в ПКМ рекомендуется применение высокопористых шлифовальных кругов с зернистости не выше F60. Рекомендуется следующая характеристика шлифовального круга 25A F46 G14 V35 2250;

– в зависимости от требований по величине и площади дефектов обработанной поверхности рекомендуется варьирование количества проходов при финишной обработке при соблюдении режимов резания: скорость подачи стола 5 м/мин и глубина шлифования $t = 0,05$ мм;

– контроль шероховатости поверхности проводить в совокупности с визуальным осмотром при помощи цифрового микроскопа с целью определения величины и площади дефектов на обработанной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Макаров В.Ф.** Исследование проблем механической обработки современных высокопрочных композиционных материалов, используемых для производства деталей авиационной и ракетнокосмической техники // Вестник ПНИПУ. 2015. Т. 17. № 2. С. 30–41.

2. **Ярославцев В.М.** Высокоэффективные технологии обработки изделий из композиционных материалов: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.

3. **Ярославцев В.М.** Обработка резанием полимерных композиционных материалов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 180 с.

4. **Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов.** Сумы: Изд-во ИТД. «Университетская книга», 2013. 97 с.

5. **Козулько Н.В.** Механизация абразивной обработки деталей из полимерных композиционных материалов // Вестник Донского государственного технического университета. 2018. Т. 18. № 2. С. 179–189.

6. **Дударев А.С.** Конструкции алмазного инструмента для сверления и фрезерования полимерных композиционных материалов. СТИН. 2013. № 6. С. 9–15.

7. **Макаров В.Ф., Волковский А.А., Сабирзянов А.И.** Повышение производительности и качества обработки композиционных материалов на основе выбора и рационального применения абразивного инструмента // Научно-технические технологии в машиностроении. 2020. № 9. С. 40–48.

8. **Волковский А.А., Макаров В.Ф.** Оценка качества обработанной поверхности при плоском шлифовании ПКМ // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2023. Т. 25, № 1. С. 73–82. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.1.08

9. **Волковский А.А., Макаров В.Ф.** Сравнительный анализ качества обработанной поверхности при прерывистом и традиционном шлифовании полимерных композиционных материалов на основе углеволокна // Научно-технические технологии в машиностроении. 2023. № 2. С. 15–25. DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-2-15-25>

10. **Volkovskiy A.A., Makarov V.F.** The study of grinding polymer composite material // Proceedings of the 7 th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). ICIE: International Conference on Industrial Engineering. Челябинск, 2022. С. 548–555.

ОБ АВТОРАХ

Владимир Федорович Макаров – д.т.н. Пермский национальный исследовательский политехнический университет, makarovv@pstu.ru

Михаил Владимирович Песин – д.т.н. Пермский национальный исследовательский политехнический университет, m.pesin@mail.ru

Артем Александрович Волковский – аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, VolkovskiiWork@mail.ru

© Макаров В.Ф., Песин М.В., Волковский А.А., 2023

УДК 621

СОКРАЩЕНИЕ РАСХОДА СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПРОТЯЖЕК ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ПРОРЕЗКИ ГЛУБОКИХ ПАЗОВ В ДИСКАХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Макаров В.Ф., Песин М.В., Волков М.В.

Аннотация: Рассмотрена эффективность применения новой технологии обработки елочных пазов в дисках турбин на основе операций предварительной вырезки "домика" методом гидроабразивной обработки (ГАО) в сравнении с методами фрезерования, глубинного шлифования и электроэрозионной обработки. Установлено, что применение метода ГАО является наиболее эффективным способом прорезки глубоких елочных пазов в дисках газовых турбин из жаропрочных никелевых сплавов. Экономический эффект достигается за счет сокращения затрат на изготовление большого числа предварительных прорезных протяжек из порошковых быстрорежущих сталей повышенной производительности.

Ключевые слова: протягивание, протяжки, глубокие пазы, диски турбин, газотурбинные двигатели, гидроабразивная обработка, точность профиля, профильный проектор, расход протяжек

Решение проблемы ускоренного производства большого количества современных отечественных газотурбинных двигателей на предприятиях моторостроения возможно путем применения новых технологических решений, которые обеспечат существенный рост производительности изготовления при стабильно высоких параметрах качества и повышения уровня конкурентоспособности газотурбинных двигателей, включая сокращение затрат производства и снижение себестоимости изделий [1]. Наибольшая трудоемкость при обработке деталей ГТД проявляется при изготовлении деталей газовых турбин из жаропрочных никелевых сплавов, особенно дисков и лопаток турбин, имеющих сложные профильные поверхности елочных соединений

По результатам проведенного анализа литературы и опыта предприятия в стране и за рубежом установлено, что основным, иногда единственным, методом

обработки сложных особо точных глубоких елочных пазов в дисках турбин является процесс протягивания. Трудоемкость операций протягивания составляет на отдельных деталях 40-50% от общей трудоемкости механической обработки [2].

На большинстве моторостроительных предприятиях протягивание елочных пазов в дисках турбин осуществляется в несколько переходов на универсальных горизонтально-протяжных станках типа 7А540 в диапазоне скоростей резания от 1,5 до 6,0 м/мин и длиной хода протяжного блока с многосекционными протяжками 2 метра [6,7].

Протяжные блоки станков комплектуются набором последовательно устанавливаемых многосекционных протяжек из быстрорежущих сталей для предварительной прорезки паза в виде "домика и для формирования елочного профиля паза комплектом окончательных протяжек. Скорость протягивания предварительных протяжек не превышает 4 м/мин, а на чистовых секциях скорость протягивания обычно снижается до 1-2 м/мин.

В связи с увеличением объема производства новых отечественных газотурбинных двигателей возникли проблемы значительного увеличения производства сложных высокоточных протяжек из порошковых быстрорежущих сталей повышенной производительности, особенно для протягивания елочных пазов в дисках газовых турбин. Эти проблемы связаны с прекращением поставок из-за рубежа заготовок протяжек из прежних применяемых быстрорежущих порошковых сталей, поиском новых поставщиков, испытанием новых марок быстрорежущих сталей, в том числе и для протягивания новых более высокопрочных никелевых сплавов. Изготовлением таких сложных профильных многосекционных протяжек занимаются традиционно только инструментальные цехи моторостроительных предприятий. Поэтому проблемы при изготовлении и эксплуатации протяжек часто приводят к простоям как основного, так и инструментального производства. При этом неизбежно сдерживаются заданные высокие темпы роста производства газотурбинных двигателей, значительно растут затраты на изготовление комплектов многосекционных елочных протяжек.

Для уменьшения затрат на подготовку производства и снижения конечной цены изделия на ряде предприятий моторостроения проведены работы по поиску более эффективного в плане меньших затрат на протяжки способу прорезки елочных пазов. В основном предлагается применить различные совмещенные методы обработки: предварительную вырезку "домика" пазов проводить различными производительными методами вырезки, а окончательную обработку - методом чистового профильного протягивания, что позволит существенно на 50% сократить время и затраты на изготовление, настройку и переточку большого числа предварительных многосекционных прорезных протяжек из дорогостоящих быстрорежущих сталей

В качестве методов предварительной прорезки домика пазов предлагается использовать известные в моторостроении методы глубинного шлифования, фрезерования, электроэрозионной и гидроабразивной обработки [3,4,5,8,9]. При этом основная работа (80%) по удалению металла дисков из пазов глубиной

около 20 мм ложится на вырезку домика, а на чистовую профильную протяжку с припуском 1,5-3 мм остается только 20% работы. Качество поверхностного слоя и точность формирования елочных пазов обеспечивается теми же окончательными профильными протяжками, которые своими первыми режущими зубьями врезаются в предварительно сформированный домик паза.

Для проведения сравнительных исследований эффективности применения новой совмещенной технологии изготовления елочных пазов в дисках турбин на АО «ОДК - Пермские моторы» проведены предварительные расчеты трудоемкости и затрат производства, которые могут возникнуть при сравнительных испытаниях следующих совмещенных вариантов обработки елочных пазов в дисках турбин:

1. Предварительное глубинное шлифование домика + финишное протягивание
2. Предварительная электроэрозионная прорезка домика + финишное протягивание
3. Предварительное фрезерование домика + финишное
4. Предварительная гидроабразивная вырезка домика + финишное протягивание
5. Сравнение проводится с базовым серийным вариантом предварительного и окончательного протягивания елочных пазов.

Для расчетов оборудование, инструменты и режимы обработки принимались из имеющихся на предприятии станков, оснастки и производственного опыта. По результатам исследований проводился сравнительный анализ расчетов трудоемкости и затрат на предварительную вырезку всех 110 "домиков" одного диска и выбран четвертый вариант как наименее трудоемкий и менее затратный способ предварительной прорезки паза.

Для проведения экспериментов подготовлены призматические образцы 150x150 x 36 мм из жаропрочного деформируемого никелевого сплава ЭИ698-ВД, применяемые на производстве для контроля и сдачи протяжек с отверстиями для крепления на станке. и разработан эскиз паза - "домика" для предварительной вырезки паза с расчетом размеров для свободного вписывания в контур елочного профиля и предотвращения разрушения окончательных елочных протяжек. При разработке эскиза "домика" ориентировались на 7 стадию предварительного протягивания по существующей технологии с оставленным припуском 2-5 мм на окончательную обработку елочного профиля пазов чистовыми секциями протяжек. На каждом образце обрабатывалось по восемь пазов. Затем проводился контроль пазов и последующая чистовая обработка окончательными протяжками.

Контроль точности предварительно обработанного "домика» и окончательно протянутого елочного профиля на образцах проводился с помощью применяемого на предприятии компьютерного профильного проектора ST-1000 с автоматической обработкой и записью результатов по специальной программе контроля. Параметры качества поверхностного слоя елочного паза не исследовались, так как предполагалось, что качество

поверхностного слоя пазов после чистового протягивания окончательными протяжками остается на прежнем уровне.

В результате расчета трудоемкость предварительного протягивания 110 пазов с учетом установки, снятия, настройки восьми протяжек в двух блоках составила 373 мин. Стоимость предварительного комплекта протяжек 600000 руб. Стойкость этих протяжек 2 диска турбины. Число переточек протяжек 4-5.

При глубинном шлифовании домика общее время обработки одного паза за пять проходов с подачей 50 мм/мин составит 16 мин. общее время обработки 110 пазов с учетом времени поворота диска для обработки следующего паза составит 1815 мин, или 32 часа.

Для электроэрозионной вырезки пазов общее время вырезки одного паза (длина реза составляла 68 мм) за 3 и 4 прохода составляет соответственно 53 минуты и 63 минуты. Общее время вырезки за 7 проходов составляет 88 минут. Шероховатость поверхности удовлетворяет требованиям чертежа после электроэрозионной вырезки за 3 прохода. Точность обработки - ± 3 мкм. Общее время обработки всех 110 пазов за три прохода составило 1070,5 мин, или 18 часов.

Для фрезерования пазов общее штучное время обработки 110 пазов одного диска при длине прохода 60 мм с подачей 10 мм/мин при 2 проходах, переустановках и настройках инструментов составило 1452,5 мин или 24 часа.

При гидроабразивной вырезке "домика" пазов время на обработку одного паза длиной контура 46,25 мм 1,5 мин, с учетом настройки, установки, поворота время прорезки всех 110 пазов составит 211,5 мин. При этом расход абразива на 1 диск составит 63450г или 65,5 кг. Потребление воды в абразивно-жидкостном режущем устройстве 3,4 л/мин. При уменьшении скорости подачи головки до 14 мм/мин общее время прорезки пазов составит 524 мин.

В результате анализа установлено, что применение вместо операции предварительного протягивания домика других методов обработки приводит к существенному росту трудоемкости: при глубинном шлифовании в 3,35 раза; при фрезеровании 3,73 раза; при ЭЭО в 2,87 раза, при ГАО при подаче 14мм/мин в 1,5 раза, а при подаче головки 30мм/мин время вырезки даже меньше в 1,5 раза.

В результате анализа сравнительных данных эффективности различных вариантов обработки принято решение провести экспериментальные исследования новой технологии обработки елочных пазов в дисках турбин путем предварительной вырезки домика методом гидроабразивной обработки на гидроабразивная установке DeKartW1313L при давлении жидкости 4075 атм, подаче головки 30 мм/мин с гранатовым песком и последующем окончательном протягивании профильными чистовыми протяжками .

Проверка полученного при гидроабразивной обработке профиля на компьютерном проекторе показала, что профиль вырезанного паза с учетом измеренного увода профиля находится в поле допуска перед чистовым елочным профилем окончательной протяжки, что говорит о пригодности вырезанного гидроабразивным методом паза к окончательному протягиванию.

На фотографии предварительно обработанных пазов в образцах видно, что пазы после вырезки на гидроабразивной установке получились достаточно

ровными, имеют небольшие зарезы по углам донышка паза и на клиновой части, но в пределах допуска на окончательный профиль. По результатам измерений пазов после вырезки на гидроабразивной установке в ОТК предприятия полученные образцы пазов признаны годными и получено разрешение к проведению окончательного протягивания елочных пазов.

Для проведения окончательного протягивания елочных пазов, предварительно вырезанных на гидроабразивной установке, предприятием предоставлен новый более жесткий горизонтально-протяжной станок фирмы Hoffmann RAWMX 25x6300 с ЧПУ и длиной хода 10 метров. Образцы с предварительно обработанными пазами устанавливались на штифтах по специальным отверстиям на станине станка и прочно закреплялись.

При протягивании окончательного елочного профиля использовался весь комплект предварительных и окончательных протяжек для безопасности эксперимента и предотвращения разрушения окончательных протяжек. Первые шесть предварительных протяжек прошли по воздуху в прорезанном предварительно "домике" не снимая стружки, а работать начала только седьмая предварительная протяжка своими последними чистовыми зубьями и все последующие окончательные чистовые елочные протяжки. Преимущество станка RAWMX 25x6300 фирмы HOFFMANN с ЧПУ заключается еще в том, что все секции предварительных и окончательных протяжек вошли в один длинный протяжной блок. В результате протягивание осуществлялось за один ход протяжного блока вместо четырех проходов на универсальном станке 7А540. Протянутые образцы с елочными пазами поступили в ОТК предприятия и прошли тщательную проверку соответствия качества и точности полученных елочных пазов согласно заводским инструкциям.

По результатам электронного контроля установлено, что все основные размеры профиля елочных пазов получены в пределах допуска и являются годными по ТУ. Предложено провести дальнейшую экспериментальную работу на конкретных серийных дисках турбин, чтобы принять решение о внедрении новой технологии в серийное производство.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ существующих альтернативных технологий выявил наиболее целесообразное решение – применение предварительной гидроабразивной обработки (ГАО) домика и последующая окончательная обработка протягиванием.
2. Установлено, что процесс гидроабразивной резки может быть использован для предварительной вырезки домика елочного паза. Применение гидроабразивной резки для является перспективным, этот вид обработки имеет наименьшую трудоемкость из всех рассмотренных способов, а также существенно может удешевить производство елочных пазов по существующему технологическому процессу.
3. Основным преимуществом ГАО является независимость от физико-механических свойств жаропрочных никелевых сплавов.

4. Современное оборудование для ГАО обеспечивает высокую точность обработки с относительно высокой производительностью.
5. Внедрение ГАО позволяет обеспечить высокую технологическую гибкость (особенно при освоении новых изделий с относительно невысокими затратами).
6. Высокая производительность ГАО до 300 мм²/мин со скоростью 30 мм/мин обеспечивает высокую скорость вырезки пазов в дисках турбин, не уступающей процессу протягивания.
7. Внедрение предварительной гидроабразивной обработки (ГАО) домика и последующей окончательной обработка протягиванием позволит существенно сократить расход предварительных протяжек и с учетом резко возрастающим производством газотурбинных двигателей существенное снижение себестоимости изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иноземцев А.А. Авиационный двигатель ПС-90А: А.А. Иноземцев и др. – М.: Либра-К, 2007. – 320 с.
2. Макаров В.Ф. Оптимизация протягивания труднообрабатываемых материалов: монография / В.Ф. Макаров. – Старый Оскол: ТНТ, 2014. – 437 с.
3. Шманев В.А. и др. Струйная гидроабразивная обработка деталей ГТД / В.А. Шманев, А.П. Шулепов, А.В. Мцветков. – М.: Машиностроение, 1995. - 144 с.
4. Балюра П.Г. Протягивание пазов / П.Г. Балюра. – Машиностроение, 1964. – 171 с.
5. Пронкин Н.Ф. Протягивание труднообрабатываемых материалов / Н.Ф. Пронкин. – М.: Машиностроение, 1978. – 119 с.
6. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / С.С. Силин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1984. – 64 с.
7. И350.188-2007 – Инструкция по замеру елочных пазов у дисков авиационных двигателей АО «ОДК-Пермские моторы», 2007 г.
8. Гидроабразивная резка [Электронный ресурс] (<https://stanko-arena.ru/article/gidroabraziv-rezka.html>)

ОБ АВТОРАХ

Владимир Федорович Макаров – д.т.н. Пермский национальный исследовательский политехнический университет, makarovv@pstu.ru,

Михаил Владимирович Песин – д.т.н. Пермский национальный исследовательский политехнический университет, m.pesin@mail.ru

Максим Владимирович Волков – аспирант Пермский национальный исследовательский политехнический университет, m.pesin@mail.ru

© Макаров В.Ф., Песин М.В., Волков М.В., 2023

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ «ТВЕРДЫМ» ТОЧЕНИЕМ ЗАКАЛЕННОЙ ЦЕМЕНТИРОВАННОЙ СТАЛИ 12Х2Н4А

Ран М.А., Макаров В.Ф., Песин М.В.

Аннотация: В статье приведены результаты исследования влияния геометрии режущего инструмента и режимов резания на физические явления в зоне резания при твердом точении закаленной цементированной стали, в частности на температуру резания путем математического моделирования. В работе приведен анализ исследований ученых и специалистов для выявления возможности применения «твердого» точения при обработке закаленных сталей взамен финишного шлифования твердосплавным инструментом с покрытием. Рассмотрены варианты покрытий твердосплавного инструмента и режимов обработки. Сравниваются возможности применения различных сочетаний покрытий, методы нанесения покрытий, достижимые технологические показатели при обработке данным инструментом, достоинства и недостатки. Сделаны выводы и даны рекомендации о возможности применения «твердого» точения закаленной цементированной стали для предприятия АО «Редуктор-ПМ».

Ключевые слова: «твердое» точение, шероховатость, покрытия, режимы резания

Процесс твердого точения является альтернативой процессу финишного шлифования, который часто применяется в качестве финишной обработки закаленных сталей. Метод твердого точения позволяет получить качество обработанной поверхности не хуже, чем при шлифовании, а также значительно сократить время обработки (примерно в 3-5 раз) и затраты. Твердое точение рекомендуется применять при обработке деталей с твердостью 47...67 HRC [1]. Данный метод обработки отличается более высокой эффективностью обработки по сравнению с шлифованием, при этом расходуется всего 1/5 энергии, необходимой для обычного шлифования. Это связано с использованием большей глубины резания и более высоких скоростей вращения заготовки, в результате чего скорость удаления металла обычно в 3-4 раза выше, чем при шлифовании.

Суть процесса заключается в том, что благодаря специально подобранным геометрическим параметрам и материалу режущего инструмента, режимам резания, характеристикам применяемого оборудования, металл в зоне контакта нагревается до высокой температуры примерно 1500 °С. В результате при твердом точении образующаяся стружка плавится и процесс резания облегчается, при этом обработка производится без применения СОТС. Тепло, которое образуется в процессе обработки, переходит полностью в стружку. При этом твердость детали уменьшается не более чем на 3 единицы, а твердость стружки понижается значительно до 40...45 HRC.

На сегодняшний день нет работ, посвященных исследованию процесса «твердого» точения закаленной цементированной стали с помощью моделирования процесса и вывода математических зависимостей температуры в зоне резания от геометрии инструмента и режимов резания

Установлено, что наилучшим инструментом при реализации процесса твердого точения считается применение пластин из кубического нитрида бора (CBN). Но, несмотря на все достоинства данного инструмента, он имеет существенный недостаток – высокая цена.

Решением данной проблемы является применение пластин с твердосплавной основой, на которую наносят теплостойкие и износостойкие покрытия, позволяющие осуществить процесс твердого точения.

В результате анализа научных работ установлено что, шероховатость поверхности $Ra \leq 0,42$ мкм можно получить при обработке стали AISI 4340 с твердостью 50 HRC с применением твердосплавной пластины с покрытием ZrCN. Покрытие ZrCN чрезвычайно устойчиво к высоким температурам [2].

Ряд авторов при обработке закаленной стали AISI 4340 сравнивает возможность применения твердосплавных пластин без покрытия, с покрытием TiC/TiCN/TiN и TiCN/TiC/Al₂O₃. Серия экспериментов проводится на четырех различных скоростях резания (100, 150, 200, 250 м/мин). В результате проведения опытов получено, что повышение скорости резания приводит к увеличению износа пластины, снижению производительности инструмента и качества обрабатываемой поверхности. Пластина без покрытия быстро изнашивается при скорости 250 м/мин, в то время как пластины с покрытиями показали более высокие результаты. Различие между покрытиями TiC/TiCN/TiN и TiCN/TiC/Al₂O₃ незначительна [3].

В качестве еще одного варианта покрытия рекомендуется многослойное CVD покрытие TiN/MT TiCN/ Al₂O₃ на подложке из цементированного карбида. Общая толщина покрытия составляет 8 мкм (толщина слоя TiN – 2 мкм, TiCN – 2 мкм, Al₂O₃ – 4 мкм). Покрытие состоит из CVD слоя TiN для низкого коэффициента трения и термостойкости с умеренной температурой, TiCN для термостойкости и высокой износостойкости и наружного слоя Al₂O₃ для защиты от кратерного износа и термостойкости [4].

При сравнении износа пластин при твердом точении с покрытиями PVD TiAlN (толщина 2 мкм) и CVD TiCN/ Al₂O₃/TiN (толщина 16 мкм), нанесенных на цементированный карбид, получены следующие данные: покрытие PVD TiAlN показала наилучшие результаты при обработке стали AISI 4340 [5].

Таким образом, в работе установлена возможность применения процесса «твердого» точения твердосплавным инструментом с покрытием. Рассмотрены актуальные на варианты покрытий твердосплавного инструмента для реализации процесса «твердого» точения, которые позволяют добиться шероховатости поверхности не хуже, чем при финишном шлифовании. Выбор покрытия осуществляется в соответствии с условиями обработки, в каждом конкретном случае.

В ходе проведения работы разработаны:

1. Математическая модель зависимости температуры в зоне резания от геометрии режущего инструмента;
2. Математическая модель зависимости температуры в зоне резания от режимов резания;
3. Определены рациональные геометрия режущего инструмента, вид покрытия и режимы резания, обеспечивающие минимальную температуру в зоне резания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альтернатива шлифованию – твердое точение при обработке деталей из закаленной стали // Умное производство. – 2013. – № 1.
2. Dipti Kanta Das, Ashok Kumar Sahoo, Ratnakar Das, B. C. Routara Investigations on hard turning using coated carbide insert: Grey based Taguchi and regression methodology // Procedia Materials Science 6. – 2014. – С. 1351-1358.
3. Anshuman J. Das, Pawan Kumar, Ashish Agarawal, Akhtar Khan Performance Evaluation of Uncoated and Coated Carbide Tools During Hard Machining of AISI 4340 Steel // Processing and Characterization of Materials. – 2021. – С. 349-356.
4. R. Suresh, S. Basavarajappa, V.N. Gaitonde Experimental studies on the performance of multilayer coated carbide tool in hard turning of high strength low alloy steel // Materials Research Society 2015. – 2015. – С. 3056-3064.
5. Denis Boing & Adilson José de Oliveira & Rolf Bertrand Schroeter Evaluation of wear mechanisms of PVD and CVD coatings deposited on cemented carbide substrates applied to hard turning // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – С. 5441-5451.

ОБ АВТОРАХ

Ран М.А. – аспирант каф. ИТМ, ФГАОУ ВО «ПНИПУ», г. Пермь, e-mail: ranmasha06@yandex.ru.

Макаров В.Ф. – д.т.н., профессор кафедры ИТМ ФГАОУ ВО «ПНИПУ», г. Пермь, e-mail: makarovv@pstu.ru

Песин М.В. – д.т.н., профессор, декан механико-технологического факультета ФГАОУ ВО «ПНИПУ», г. Пермь, e-mail: m.pesin@mail.ru

© Ран М.А., Макаров В.Ф., Песин М.В., 2023

**СКРУГЛЕНИЕ ОСТРЫХ КРОМОК НАКЛОННЫХ
ОХЛАЖДАЮЩИХ ОТВЕРСТИЙ ЛОПАТОК ТУРБИН
МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ
НА МНОГООСЕВЫХ СТАНКАХ С ЧПУ**

Макаров В.Ф., Песин М.В., Мяснов М.А.

Аннотация: Работа поставлена с целью повышения производительности, качества и точности скругления острых кромок многочисленных охлаждающих отверстий в лопатках турбин газотурбинных двигателей для современного растущего пассажирского авиационного транспорта на основе разработки новой технологии электроэрозионного фрезерования на современных многоосевых станках с ЧПУ с применением вращающегося электрода.

Ключевые слова: лопатки турбины, острые кромки, радиус скругления, электроэрозионное фрезерование, качество поверхности, программирование, траектория электрода

В РФ сегодня поставлены задачи перед авиационными моторостроительными предприятиями по ускоренному производству большого количества современных отечественных газотурбинных двигателей, таких как ПС-90А, ПД-8, ПД-14 и др. с характеристиками, не уступающими мировым аналогам газотурбинной техники [1]. Решение этой проблемы на предприятиях моторостроения возможно путем применения новых технологических решений, которые обеспечат существенный рост производительности изготовления при стабильно высоких параметрах качества и конкурентоспособности газотурбинных двигателей. Одним из наиболее трудоемких узлов газотурбинного двигателя является узел газовой турбины, состоящий из дисков, рабочих и сопловых лопаток из труднообрабатываемых жаропрочных сплавов на никелевой основе [2].

Лопатки ТВД в эксплуатации испытывают высокие силовые и тепловые нагрузки, поэтому они отливаются по выплавляемым моделям из жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС6У-ВИ, ЧС-70. Для охлаждения профиля пера и полок лопатки используются малые отверстия диаметром 0,5-0,8 мм, через которые подается сжатый воздух. Кромки охлаждающих отверстий являются концентраторами напряжений, для исключения этого фактора выходные кромки скругляются радиусом до 0,3 мм образуя сложнопрофильный диффузор, данное требование оформлено в КД. Выполнен сравнительный анализ современного оборудования и технологий, предлагаемых различными фирмами для перфорации наклонных охлаждающих отверстий в рабочих и сопловых лопатках турбины. Предложено провести исследование возможности внедрения многоосевой технологии скругления острых кромок охлаждающих наклонных отверстий перфорации турбинных лопаток по методу высокоскоростной электроэрозионной обработкой трубчатым электродом на станках с ЧПУ, что даст возможность устранить опасность разрушения кромок и гарантированно

обеспечить требуемую величину расхода охлаждающего воздуха, проходящего через отверстия лопаток.

На данный момент скругление кромок выполняется на электроэрозионном станке Winbro методом электроэрозионного фрезерования (ЭЭФ). Обработка производится по специальной управляющей программе (УП), разработанной специалистом-представителем из «WINBRO GROUP» Winbro HSD6-III. По существующей технологии сначала проводится обработка отверстий по заданным размерам на окончательно сформированном перье, а затем наносится теплозащитное покрытие, состоящее из нескольких слоёв с окончательной толщиной до $0,2 \div 0,3$ мм. При этом выявлена закономерность – при контроле продувом расход воздуха находится в пределах допуска, а после покрытия снижается ниже нормативных значений. Исследования показывают, что наносимое покрытие уменьшает диаметр отверстий, вследствие чего уменьшается расход продуваемого через них воздуха.

Другой немаловажной проблемой является обеспечение заданного координатного расположения отверстий относительно базовых точек лопатки для максимального достижения эффекта охлаждения.

В последнее время ставится задача формирования отверстия на выходе более сложной формы, а не цилиндрической формы для увеличения эффекта охлаждения.

Для решения этих проблем и перспективных задач и поставлена настоящая научно-исследовательская работа. На первом этапе работы выполнен литературный анализ работ и опыта предприятий по решению данных проблем. Установлено, что наиболее перспективными являются следующие методы скругления кромок: экструзионное шлифование, электрохимическая обработка, лазерная обработка, фрезерование механическое и электроэрозионное фрезерование. Последний вид обработки выбран как наиболее более реальный.

В качестве станков для решения этих проблем выбраны станки компании Winbro Group Technologies Ltd модели HSD6-III, которые представляют собой представляют собой уникальное оборудование, способное выполнять операции скоростного электроэрозионного сверления отверстий диаметром до 3 мм в лопатках, секторах лопаток СА. Особенностью станков является наличие семи одновременно управляемых координат. Кроме этого, имеется возможность выполнения обработки рядов отверстий мультиэлектродом. Наличие магазина инструментов, а также инструментов с возможностью автоматической замены электродов в процессе обработки позволяет сократить вспомогательное время выполнения операции и значительно повысить качество обработки.

При анализе геометрии выходных кромок отверстий в лопатках установлено, что геометрия скругленных кромок в лопатках выстраивается по множеству дуг скругления вдоль теоретического ребра пересечения стенки отверстия с профилем пера лопатки. Сложность описания геометрии скругления лопатки состоит в том, что поверхность лопатки является криволинейной. Векторы нормали теоретического ребра расположены под различными углами. Для расчета скругления необходимо иметь точное описание прилегающей к отверстию поверхности.

На данном станке УП частично параметризирована, т.е. координаты обработки рассчитываются станком автоматически. Однако программа имеет упрощенный алгоритм расчета координат, в результате чего форма обработанных кромок имеет отклонения от заданной формы и больше похожа на фаску.

При проектировании математической модели предлагаемого диффузора на кромке лопатки выяснилось, что этот конструктивный элемент для обработки является низкотехнологичным, так как имеет сложную геометрию, которую затруднительно получить простыми технологическими движениями. Размер обрабатываемых элементов варьируется в пределах от 0,05 до 0,8 мм. Материал заготовки относится к группе труднообрабатываемых материалов. Эти свойства накладывают ограничения на применение традиционных методов механической обработки, ввиду низкого срока службы обрабатывающего инструмента и его дороговизны. На данный момент скругление кромок выполняется на электроэрозионном станке Winbro HSD6-III по специальной управляющей программе (УП). Для разработки УП на обработку скруглений отверстий на станке WINBRO необходимо, иметь постпроцессор на данный станок. Постпроцессора не существует, более того, система, которая управляет работой данного оборудования, полноценной системой ЧПУ не является, что усложняет разработку постпроцессора, на данный станок. Реальный объект имеет пространственные отклонения профиля относительно теоретической модели, до 0,05 мм на сторону. Таким образом, даже качественно спроектированная УП по теоретической модели должна иметь возможность автоматической коррекции координат согласно реальному объекту. Оборудование должно позволять сканирование реального объекта и передачу данных сканирования в систему ЧПУ.

Так же стоит отметить сложность написания управляющих программ для ЭЭФ станков. В процессе обработки необходимо поддерживать постоянный зазор между деталью и инструментом электродом (ЭИ). Оценить величину зазора прямыми измерениями практически невозможно ввиду сложнопрогнозируемого размерного износа ЭИ. На данный момент в ЭЭФ системах зазор и износ контролируется по множеству косвенных параметров. Размерный износ ЭИ непосредственно влияет на точность обрабатываемой геометрии. Поэтому в управляющей программе или в системе ЧПУ должны быть предусмотрены функции вычисления и компенсации размерного износа ЭИ.2.2. Кромки охлаждающих отверстий являются концентраторами напряжений, для исключения этого фактора выходные кромки скругляются радиусом до 0,3 мм, данное требование оформлено в КД (рис. 1).



Рис. 1. Геометрия и вид фактического скругления кромок отверстий лопаток турбин

Станок может последовательно выполнять операции прошивки охлаждающих отверстий в лопатке и формирования диффузоров или скруглений кромок отверстий. Однако существует проблема подготовки УП для данного оборудования. С этой целью в работе проведены теоретические исследования методов получения траектории движения электрода-инструмента для обработки диффузора скругленной кромки наклонных отверстий. На основании анализа геометрии разработана математическая модель геометрии скругления кромки наклонного отверстия. При разработке приняты допущения, о том, что вектора нормалей расходятся радиально от оси отверстия и область вокруг отверстия является относительно плоской. Разработан алгоритм построения траектории инструмента для обработки скругленной кромки отверстия. На основе математической модели и алгоритма спроектирован прототип управляющей программы на языке Visual Basic с использованием пакета Microsoft Excel в среде разработчика. Программа содержит в себе унифицированные операторы и структуры. Результаты работы программы были экспортированы в САПР «КОМПАС-3D» и САМ «NX Обработка». В САМ «NX Обработка» проведена симуляция обработки с выводом геометрии обработанной поверхности в виде фасетного тела. По результатам установлено, что программа достаточно точно рассчитывает геометрию скругления и траекторию движения инструмента. При адаптации программы на многоосевой электроэрозионный станок необходимо добавить блок расчета износа инструмента и блок корректировки координаты высоты в соответствии износу. Стоит учесть и реальную форму электрода при создании корректора.

ВЫВОДЫ

На основании теоретических разработок спроектирован программный продукт, благодаря которому может быть автоматически рассчитана траектория движения инструмента при обработке скругления кромки наклонного отверстия. Выходные данные разработанной программы пригодны для экспорта в САМ системы. Программа, после доработки, может быть интегрирована в систему

ЧПУ для последовательного расчета точек во время обработки. Для установки программного продукта на конкретный станок необходимо изменить названия операторов согласно выбранной системы ЧПУ. Для получения наилучшего качества обработки необходимо добавить блоки корректировки, согласно реальной геометрии инструмента и блок разделения обрабатываемого материала на слои.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. – Пермь, 2006. – 1195 с.
2. Вероман В.Ю., Дедков В.М., Казанцев Е.А. Способ электрохимического скругления кромок отверстия // Патент СССР № 367996, 1973. Бюл. № 9.
3. Токмакова Т.В. Исследование влияния факторов электроэрозионного фрезерования на его технические показатели и технологические возможности при обработке деталей ГТД: автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.07.05 / Рос. гос. технол. ун-т им. К.Э. Циолковского (МАТИ). – Москва, 2004. – 24 с.
4. Бойцов А.Г., Токмакова Т.В., Денисов Л.В. Особенности и технологические возможности некоторых схем электроэрозионного фрезерования // Труды ГОСНИТИ. 2010. Т. 106. С. 97-99.

ОБ АВТОРАХ

Владимир Федорович Макаров – д.т.н., профессор каф. ИТМ, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: makarovv@pstu.ru

Михаил Владимирович Песин – д.т.н., профессор каф. ИТМ, декан МТФ, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: m.pesin@mail.ru,

Михаил Андреевич Мяснов – аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: makarovv@pstu.ru

© Макаров В.Ф., Песин М.В., Мяснов М.А., 2023

УДК 621.791

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОДНОПРОХОДНОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Галимов В.Р., Хисамутдинов Э.Р.

Аннотация: Работа посвящена вопросу автоматической сварки тонкостенных конструкций из жаропрочных никелевых сплавов плавящимся электродом в один проход. Рассматриваются вопросы применения сварки с

разделкой кромок для толщин 2-3 мм при сварке в один проход. Приведены результаты сравнения со сваркой неплавящимся электродом для толщины 3мм. Обосновано применение разделки кромок при сварке толщины 2мм плавящимся электродом.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, сварка плавящимся электродом, импульсно-дуговая MIG-сварка

Сварка узлов горячей части газотурбинных установок сопряжена с рядом трудностей, обусловленных как конструктивными особенностями узлов, так и технологическими свойствами свариваемых сплавов. Основным материалом, используемым в узлах турбин, являются жаропрочные сплавы на основе никеля. Характерными представителями гетерогенных никелевых сплавов, обладающих наилучшими показателями жаропрочности, являются сплавы типа ЭП718 (ХН45МВТЮБР) и ЭП648 (ХН50ВМТЮБ), а диапазон свариваемых толщин варьируется от 0,8 до 5мм.

Традиционно для сварки узлов газотурбинных установок применяются способы ручной и автоматической сварки неплавящимся электродом (TIG-сварка или GTAW), а для особо ответственных соединений стараются применять электронно-лучевую сварку (ЭЛС)[1]. Имеются работы, где рассматривается применение взамен TIG-сварки плазменной [2] и лазерной сварки[3]. Однако доступность швов под сварку в реальных конструкциях не всегда возможно обеспечить для данных способов сварки. Также имеются работы, посвященные освоению сварки плавящимся электродом в импульсном режиме (импульсная MIG-сварка или P-GMAW)[4], где демонстрируются преимущества данного способа над традиционной TIG-сваркой.

Ранее были получены положительные результаты в рамках отработки технологии импульсной MIG-сварки сплава ЭП718 толщиной 4...5 мм [5-6]. Разработанная технология обеспечила уменьшение количества проходов по сравнению с ручной TIG-сваркой и в то же время снижение погонной энергии на проход до двух раз. Изменение количества вводимого тепла и распределения его между основным и присадочным металлом также привело к значительному снижению доли основного металла в сварном шве, а также уменьшению размеров самого шва и зоны термического влияния (ЗТВ). Данные процессы обеспечили снижение остаточных напряжений в конструкции после сварки и повышение стойкости швов против образования горячих трещин. Также была разработана технология сварки в один проход сплава ЭП718 толщиной 3мм [7]. Полученная технология позволила снизить погонную энергию по сравнению с автоматической сваркой неплавящимся электродом с подачей присадочной проволоки и также уменьшить размеры шва и оклошовной зоны.

Сварка плавящимся электродом показывает хорошие результаты при сварке толщин 3...5 мм. Однако для обеспечения полученных свойств требуется наличие разделки кромок, необходимое для снижения требований к проплавляющей способности дуги, а также заполнению её электродным металлом. В отечественной и зарубежной нормативной документации не распространено применение разделки кромок для сварки соединений толщиной

менее 3 мм, что усложняет внедрение импульсной MIG-сварки для никелевых сплавов толщиной 2 мм и менее.

Методы исследования. В данной работе рассматривается влияние разделки кромок и зазора в месте сварки на параметры режима импульсной MIG-сварки образцов толщиной 2 мм, размеры получаемых сварных соединений и тепловложение в металл. Рассматриваются варианты сборки под сварку без скоса кромок (стандартный тип соединения для малых толщин С4 по ГОСТ14771) и с симметричным скосом двух кромок без притупления. Зазор для сборки без скоса кромок подбирался равным 0,5 мм, 1,0 мм и 1,5 мм, со скосом кромок – только 0,5 мм.

Предварительно режимы подбирались на основании расчета необходимого для заполнения зазора и разделки количества металла. Эксперимент производился на пластинах 100x50x2 мм для внесения поправок в расчетные данные. Сварка осуществлялась на роботизированном сварочном комплексе на базе манипулятора ABB IRB1600 и сварочного источника питания Esab AristoMig5000i, данные о параметрах режима записывались системой регистрации параметров Esab WeldCloud и осциллографом Fnirsi1013D. Эффективный КПД процесса сварки уточнялся методом калориметрирования с использованием калориметра с водой. Полученные образцы подвергались контролю визуальным осмотром и капиллярному контролю, а также подвергались измерениям для определения размеров усиления.

Затем полученные экспериментальные данные использовались в расчете по схеме движущегося линейного источника для определения размера изотерм при моделировании процесса. Результаты расчета сравнивались с расчетными данными для TIG-сварки, а результаты измерений со стандартными данными для сварки без разделки кромок.

Результаты сравнения показали, что переход от MIG-сварки без разделки кромок к сварке с симметричной разделкой позволяет уменьшить погонную энергию до 80% при одинаковой тепловой мощности дуги. В то же время сварка в разделку позволяет уменьшить ширину шва до 3...3,5 мм вместо 5...6 мм. Переход от TIG-сварки без разделки к MIG-сварке с разделкой кромок позволяет также уменьшить погонную энергию на 50-70%, уменьшить ширину шва на 20- 30%, а также уменьшить ширину сварочной ванны на 20-25%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение однопроходной MIG-сварки жаропрочных сплавов толщиной 3мм и менее актуально для авиадвигателестроения. Полученный результат является предварительным этапом в отработке технологии сварки узлов из ЭП648 толщиной 2мм для отечественных авиационных предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях // Сварочное производство. 1997. № 4.
2. Sahu, Ajit. (2020). Effect of Pre-weld Solution Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of Micro-Plasma Arc Welded Inconel 718.
3. Naffakh-Moosavy, Homam & Aboutalebi, Mohamad Reza & Seyedein, Seyed & Goodarzi, Massoud & Khodabakhshi, Meisam & Mapelli, C. & Barella, Silvia. (2014). Modern fiber laser beam welding of the newly-designed precipitation-strengthened nickel-base superalloys. Optics & Laser Technology. 57. 12–20. 10.1016/j.optlastec.2013.09.030.
4. A Benoit, S Jobez, P Paillard, V Klosek & T Baudin. Study of Inconel 718 weldability using MIG CMT process. Science and Technology of Welding and Joining, 16:6, 477-482, DOI: 10.1179/1362171811Y.0000000031
5. Структура и свойства сварных соединений сплава ЭП718, полученных роботизированной сваркой плавящимся электродом // Р.В. Никифоров [и др.] // Вестник УГАТУ, 2021. Т. 25, № 4 (94). С. 10–18. ISSN 1992-6502. https://elibrary.ru/title_about.asp?id=8564. doi 10.54708/19926502_2021_2549410
6. Разработка технологии роботизированной сварки плавящимся электродом соединений из сплава ХН45МВТЮБР. Сварка и диагностика. – Москва: НАКС Медиа, 2020. – № 4. – С. 46-49. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43846869>
7. Медведев А.Ю., Галимов В.Р., Никифоров Р.В., Туров А.В. Применение роботизированной сварки плавящимся электродом для сварки узлов газотурбинных двигателей толщиной 3 мм// Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2023. n2. С. 45-50.

ОБ АВТОРАХ

Галимов Виталий Рустемович – ст. преподаватель кафедры Сварочных. литейных и аддитивных технологий, Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, galimov.vr@mail.ru

Хисамутдинов Эдуард Рустемович – инженер кафедры Сварочных. литейных и аддитивных технологий, Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, birulk@yandex.ru

© Галимов В.Р., Хисамутдинов Э.Р., 2023

ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ВВ751П ПОСЛЕ РОТАЦИОННОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМООБРАБОТКОЙ

Яковлев М.Г., Миниахметов А.А., Фозилов Т.Т., Воробьев Д.С.

Филиал акционерного общества «Объединённая двигателестроительная корпорация» «Научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей», Москва, Россия

e-mail: A.Miniakhmetov@uecrus.com

e-mail: maxx81@list.ru

e-mail: fozbourne@yandex.ru

e-mail: d.vorobyev@uecrus.com

Аннотация: В данной статье приведены исследования, посвящённые ротационной сварке трением (РСТ) жаропрочного никелевого сплава ВВ751П. В рамках отработки новой технологии РСТ выполнены сварки на уникальной отечественной установке типа ПСТИ конструктивно подобных элементов (КПЭ) ротора КВД перспективного двигателя из гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов. Проведена термическая обработка сплавов для улучшения механических характеристик деталей.

В данном труде обсуждаются основные этапы проделанной работы по отработке технологии ротационной сварки трением жаропрочного никелевого сплава ВВ751П. Также исследованы механические характеристики сваренных образцов с разными термическими обработками.

Ключевые слова: ротационная сварка трением, микроструктура, сварной шов, зона термомеханического влияния, механические характеристики жаропрочных никелевых сплавов

В современном двигателестроении возрастают требования к массе, жесткости и ресурсу ГТД, в частности, к роторам КВД. В связи с этим в новых ГТД исключают болтовые соединения и переходят к гранулируемым жаропрочным сплавам, которые считаются трудно или несвариваемыми другими способами сварок, в том числе и электронно-лучевой, в виду высокой склонности к образованию трещин. Из-за потребности в альтернативных видах сварки в Европе и США была разработана технология ротационной сварки трением (РСТ) ротора ГТД, позволяющая получать оптимальное неразъемное сварное соединение [1,2].

РСТ имеет ряд преимуществ перед сваркой плавлением за счет более прочных и бездефектных соединений с более низкими температурами и зонами термического влияния (ЗТВ), возможность получения разнородных сварных соединений и материалов [3-5].

Ключевую роль в физико-механических свойствах материала ВВ751П при РСТ играет правильно подобранный режим термической обработки (ТО), который позволяет снять остаточные напряжения после сварки, а также улучшить микроструктуру сварного шва до уровня основного материала (ОМ).

В данной статье основной целью является повышение механических характеристик сварного соединения при помощи термообработки после РСТ. Благодаря правильно подобранной термической обработке упрочняющая γ' -фаза приобретает правильную форму (кубоидную).

В ходе исследований был выполнен анализ образцов при разных режимах ТО.

В рамках исследований были сварены кольца диаметром 200 мм из заготовок ВВ751П.

После этого из сваренных колец были вырезаны стержни для механических испытаний и темплеты для металлографических исследований. Часть образцов исследовались без термической обработки (А-1), часть по режиму закалка (А-2), часть по режиму закалка + старение (А-3).

После исследования микроструктуры образца А-1 установлено: структура ОМ состоит из полиэдрических зерен, внутри которых на фоне γ -основы наблюдаются выделения плотноупакованной упрочняющей γ' -фазы правильной кубоидной формы (рис. 1а). В структуре ЗТВ также наблюдаются выделения упрочняющей γ' -фазы правильной кубоидной формы (рис. 1б). В структуре сварного шва упрочняющая γ' -фаза полностью растворена в γ -основе (рис. 1в).

После исследования микроструктуры образца А-2 установлено: структура ОМ однородная, состоит из полиэдрических зерен, внутри которых на фоне γ -основы наблюдаются выделения плотноупакованной упрочняющей γ' -фазы правильной кубоидной формы, по границам зерен – частицы избыточной γ -фазы неправильной формы (рис. 2а). Структура ЗТВ однородная, наблюдается частичное растворение упрочняющей γ' -фазы в γ -основе, по границам зерен – крупные частицы избыточной γ' -фазы неправильной формы (рис. 2б). В структуре сварного шва упрочняющая γ' -фаза полностью растворена в γ -основе (рис. 2в).

После исследования микроструктуры образца А-3 установлено: структура ОМ (рис. 3а), ЗТВ (рис. 3б) и сварного шва (рис. 3в) одинаковая, состоит из полиэдрических зерен, внутри которых на фоне γ -основы наблюдаются выделения плотноупакованной упрочняющей γ' -фазы правильной кубоидной формы.

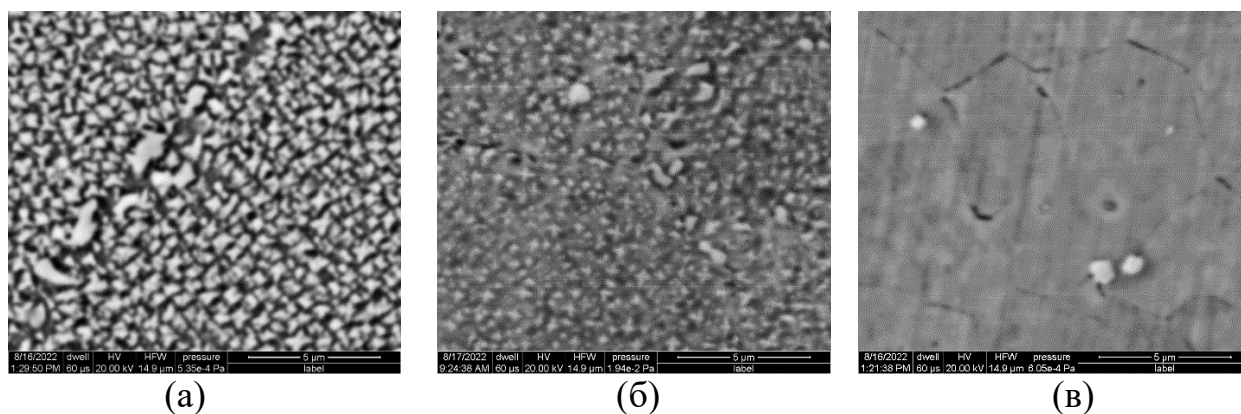


Рис. 1. Микроструктура образца А-1 из сплава ВВ751П после сварки без термической обработки: (а) – основной материал (ОМ); (б) - зона термического влияния (ЗТВ); (в) – сварной шов.

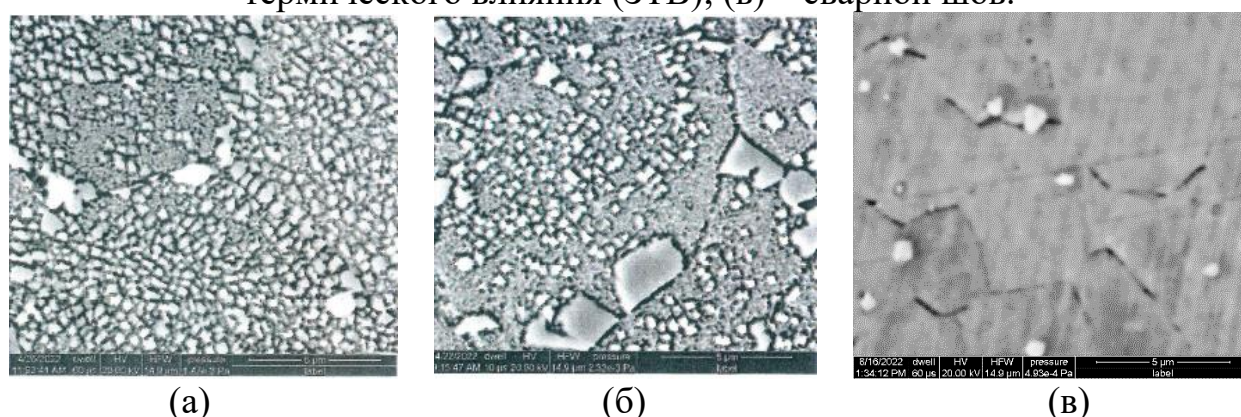


Рис. 2. Микроструктура образца А-2 из сплава ВВ751П после сварки с последующей термической обработкой – закалка: (а) – основной материал (ОМ); (б) - зона термического влияния (ЗТВ); (в) – сварной шов.

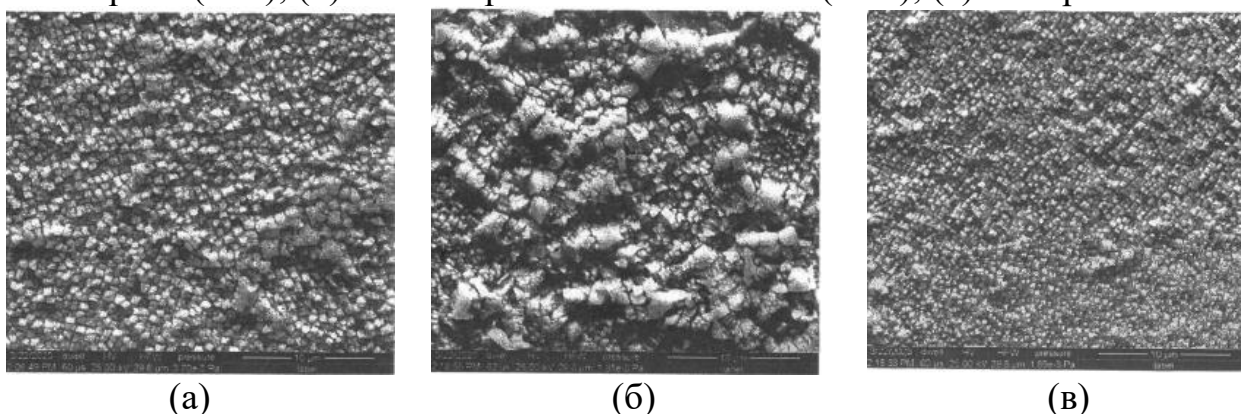


Рис. 3. Микроструктура образца А-3 из сплава ВВ751П после сварки с последующей термической обработкой – закалка + старение: (а) – основной материал (ОМ); (б) - зона термического влияния (ЗТВ); (в) – сварной шов.

После проведения испытаний образцов А-1, А-2 и А-3 на механические характеристики были получены результаты, приведенные в таблицах 1, 2, 3.

Табл. 1. Испытания на длительную прочность образцов при температуре 650 °С.

Шифр образца	σ , МПа	τ_p , час	Результаты испытаний
А-1	1078	0,01	Разрушен по сварному шву
А-2	1078	62	Разрушен по сварному шву
А-3	1078	100	Снят, без разрушения

Табл. 2. Испытание на растяжение при температуре 650 °С.

Шифр образца	σ_B , МПа
А-1	1178
А-2	1357
А-3	1460

Табл. 3. Испытание на растяжение при температуре 20 °С.

Шифр образца	σ_B , МПа
А-1	1360
А-2	1540
А-3	1600

Подготовка образцов проводилась на токарном и фрезерном станках. Сварка проведена на уникальной отечественной установке РСТ ПСТИ-400, вырезка образцов выполнена на электроэрозионном станке. Термическая обработка проводилась в печи с воздушной атмосферой. Металлографические исследования проводились на растровом электронном микроскопе. Механические испытания проводились на универсальной разрывной машине.

Выводы. В ходе проведенной научно-исследовательской работы установлено, что при помощи РСТ возможно получение сварного соединения без дефектов во всех зонах. Однако после сварки происходит растворение γ' -фазы в сварном шве, что значительно снижает механические характеристики детали.

После проведенных испытаний и термической обработки по режиму закалка получены следующие результаты: 1) в ЗТВ и сварном шве отсутствует упрочняющая γ' -фаза, либо имеет сыпьеобразную неправильную форму; 2) механические характеристики выше, чем у образца без термической обработки; 3) структура сварного шва без дефектов.

После проведенных испытаний и термической обработки по режиму закалка + старение получены следующие результаты: 1) структура ОМ, ЗТВ и сварного шва одинаковая, плотноупакованная упрочняющая γ' -фазы имеет правильную кубоидную форму; 2) механические характеристики на уровне основного материала; 3) структура сварного шва без дефектов.

Таким образом, благодаря термической обработке микроструктура сварного соединения приближена к микроструктуре основного материала, упрочняющая γ' -фаза имеет правильную форму и равномерно распределена на всей периферии сварного шва, также механические характеристики приближены к значениям основного материала, характеристики которого приведены в работе [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электронный ресурс – <https://www.kuka.com/en-us/products/production-machines/rotary-friction-welding-machines>
2. MTI Friction Welding Solutions & Manufacturing Services – Электронный ресурс <https://www.mtiwelding.com/>
3. Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов (обзор). Ч. 2 // Сварочное производство. 2004. № 9. С. 3.
4. Ламберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 52.
5. Babaytsev A.V., Prokofiev M.V., Rabinskiy L.N. Mechanical properties and microstructure of stainless steel manufactured by selective laser sintering // Nanoscience and Technology: An Int. J. 2017. V. 8. № 4. С. 359.
6. Гарибов Г.С., Гриц Н.М., Востриков А.В., Федоренко Е.А., Волков А.М. Освоение перспективного высокопрочного гранулируемого никелевого сплава для турбинных дисков авиационных двигателей нового поколения // Технология легких сплавов. 2012. № 3. С. 65

ОБ АВТОРАХ

Яковлев М.Г. – сотрудник филиала акционерного общества "Объединённая двигателестроительная корпорация" "Научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей", Москва, Россия, e-mail: maxx81@list.ru

Миниахметов А.А. – сотрудник филиала акционерного общества "Объединённая двигателестроительная корпорация" "Научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей", Москва, Россия, e-mail: A.Miniakhmetov@uecrus.com

Фозиллов Т.Т. – сотрудник филиала акционерного общества "Объединённая двигателестроительная корпорация" "Научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей", Москва, Россия, mail: fozbourne@yandex.ru

Воробьёв Д.С. – сотрудник филиала акционерного общества "Объединённая двигателестроительная корпорация" "Научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей", Москва, Россия, e-mail: d.vorobyev@uecrus.com

© Яковлев М.Г., Миниахметов А.А., Фозиллов Т.Т., Воробьёв Д.С., 2023

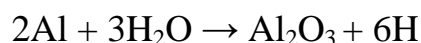
ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ПОР ПРИ НАПЛАВКЕ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Орлов В.К.

Аннотация: В статье рассматриваются физико-химические причины появлений пор в алюминиевых сплавах и предлагаются некоторые методы борьбы с ними, основанные на изменении режимов наплавки и охлаждения изделия.

Ключевые слова: алюминий, многослойная наплавка, поры, окисные пленки

Основной причиной образования пор в соединениях алюминия признается – водород. Решающим звеном в этих представлениях является скачкообразное, почти двадцатикратное падение растворимости газа в металле при переходе его из жидкого состояния в твердое. В реальных условиях сварки парциальное давление водорода в газовой фазе дуги ничтожно мало. Источником водорода, растворяющегося в алюминии, является реакция непосредственного взаимодействия влаги с металлом:



В результате этой реакции давление атомарного водорода в поверхностном слое атмосферы, контактирующей с металлом, возрастает, что приводит к значительному повышению концентрации водорода, растворенного в алюминии [1]. Основными источниками водорода являются влага, жир и другие углеводороды, поступающие с поверхности присадочной проволоки. Также могут увеличивать общее содержание водорода и влага от защитного газа, шланга, трубки и свариваемого металла/подложки для выращивания. Наконец, в самой присадочной проволоке или свариваемом металле/подложке может содержаться водород [2].

Характерной чертой всех алюминиевых сплавов является высокая склонность к образованию оксидных пленок, уступая в этом отношении лишь магнию. Оксидная пленка алюминия Al_2O_3 характеризуется: своей тугоплавкостью 2050°C ; устойчивостью против диссоциации; отсутствием растворимости как в твердом, так и в жидком алюминии; смещением в нижние слои сварочной ванны, в связи с большей плотностью – 4 г/см^3 ; склонностью к трещинам в связи с меньшим коэффициентом линейного расширения в сравнении с алюминием [3].

Обладая высокой температурой плавления, оксидная пленка на поверхности свариваемых кромок препятствует смачиванию твердого металла жидким, затрудняя образование сварочной ванны, замешиваясь в шов приводит к непровару и оксидным включениям. Вследствие высокой адсорбционной способности к парам влаги и газам оксидная пленка является источником газов в сварочной ванне и прежде всего водорода, которые приводят к появлению несплошностей в шве [3].

Особенное внимание должно уделяться поверхности деталей из сплавов, легированных магнием и литием. На поверхности таких сплавов образуется рыхлая оксидная пленка большой толщины. Пленка удерживает влагу до 900 С, замешивается в металл сварочной ванны, в которой происходит её частичное разложение с выделением водорода. Пленка не смачивается жидким металлом., на ее поверхности всегда имеется полости, не заполненные жидкостью с размером больше критического для образования пор (Рис. 1) [3].



Рис. 1 – Схема образования зародышей газовых пор на частицах, не смачиваемых жидкостью [3].

Высокое содержание магния в алюминиевых сплавах и присадочной проволоке для сварки и соответственно, как легирующего элемента непосредственно в металле шва способствует снижению диффузии водорода в твердой фазе. Поскольку при остывании сварочной ванны, из-за резкого падения растворимости, атомарный водород стремится выделиться, но, встречаясь и объединяясь с другими атомами водорода, с центрами кристаллизации и примесями в металле, рекомбинирует в молекулы и образует газовые пузыри. Пузыри всплывают, пока позволяет вязкость окружающего металла [1].

Методы борьбы с порами можно разделить на две группы, направленные на снижение водорода до возмущения дуги и направленные на устранение его влияния в сварочной ванне.

Основными методами борьбы с порами принято считать травление присадочной проволоки и подложки изделия, а также использование аргона высшего сорта в качестве защитного газа. Однако проверка чистоты аргона является проблематичной и упирается в добросовестность поставщика, а травление присадочной проволоки является трудоемкой операцией.

В связи с этим, варианты интенсивного сокращения или увеличения погонной энергии, позволяющие снизить порообразование непосредственно в сварочной ванне являются широкодоступными и нетрудоемкими способами борьбы с порами.

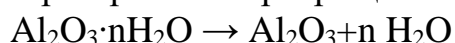
Применение повышенных скоростей наплавки на сокращение образования пор при постоянной погонной энергии подтверждается опытами проведенными инженерами И.М. Терентьевым, Ф.Е. Баруткиным и Г.С. Коноваловым для сварки алюминий-магниевого сплава АМгб [1].

При повышенных скоростях сварки (выше 29 м/ч) увеличение скорости сварки при постоянной погонной энергии приводит к уменьшению пористости

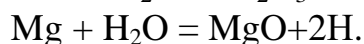
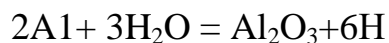
сварных швов. В металле швов, сваренных ими на скоростях 32 и 35 м/ч при погонной энергии 545 кал/см, макродефектов не было обнаружено.

Несколько большее содержание водорода в металле швов, сваренных при более низких скоростях, объясняется большим временем существования сварочной ванны в расплавленном состоянии (а следовательно, большим химическим поглощением водорода из зоны дуги) и большим объемным перемещением водорода из свариваемого металла к металлу шва за счет процессов термодиффузии.

В исследовании было установлено, что при скоростях 32 и 20 м/ч температура металла сварочной ванны составляет соответственно 766 и 850°C (без учета поверхностного слоя – 0,2 мм). Следовательно, гидроокись алюминия, попавшая в металл сварочной ванны и не подвергающаяся прямому воздействию дуги при скорости сварки 32 м/ч, не претерпевает превращения по реакции:



, а при скорости сварки 20 м/ч — претерпевает. Высвободившаяся при этом влага будет взаимодействовать с компонентами сплава по реакциям:



Таким образом, в металле сварочной ванны, в первом случае только часть влаги с поверхности свариваемых кромок участвует в образовании пористости в сварных швах, а во втором случае (при $V_{\text{св}} = 20$ м/ч) – вся влага. Следовательно, температура металла сварочной ванны является существенным фактором, определяющим величину пористости сварных швов.

Объем водорода, выделившегося в поры, зависит не только от концентрации водорода в расплаве, но и от времени существования металла сварочной ванны и скорости ее охлаждения. А так как давление дуги и газа на сварочную ванну при повышенной скорости сварки больше, то до момента затвердевания ванны затормаживается процесс зарождения и роста пор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосеева Е.М., Ольшанская Т.В. ОСОБЕННОСТИ ПОРООБРАЗОВАНИЯ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА AL-MG-LI ПРИ СВАРКЕ С ПРИСАДОЧНОЙ ПРОВОЛОКОЙ АМГ-6 // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2022. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-poroobrazovaniya-v-svarnyh-soedineniyah-alyuminievogo-splava-al-mg-li-pri-svarke-s-prisadochnoy-provolokoy-amg-6> (дата обращения: 31.05.2023).
2. Karan S. Derekar, Adrian Addison, Sameehan S. Joshi, Xiang Zhang, Jonathan Lawrence, Lei Xu, Geoff Melton, David Griffiths. Effect of pulsed metal inert gas (pulsed-MIG) and cold metal transfer (CMT) techniques on hydrogen dissolution in wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminium; The International Journal of Advanced Manufacturing Technology; Received: 5 September 2019 /Accepted: 17 January 2020; <https://doi.org/10.1007/s00170-020-04946-2>
3. Груздев, Б.Л. Технологическая подготовка сварочного производства в машиностроении: учебное пособие для студентов высших учебных заведений,

обучающихся по специальности 150202 «Оборудование и технология сварочного производства» / Б.Л. Груздев, Б.Л. Груздев, Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования Уфимский гос. авиационный технический ун-т. – Уфа: Уфимский гос. авиационный технический ун-т, 2008. – 238 с. – ISBN 978-5-86911-810-3. – EDN QNCGON.

4. Терентьев И.М., Баруткин Ф.Е., Коновалов Г.С. Влияние режима сварки алюминиевых сплавов на плотность металла шва // «Сварочное производство» № 10, 1965, с.16-18.

5. В.И. Лукин, Ю.П. Арбузов. Особенности сварки алюминиево-литевых сплавов. ВИАМ/1992-201098, Май 1992.

6. Черныш В.П., Сыроватка В.В., Гриценко А.Ф., Ржанов Б.П. Структуры и свойства металла швов на сплаве АМгб при сварке с электромагнитным перемешиванием // Автоматическая сварка № 11 (236), 1972.

ОБ АВТОРЕ

Орлов Валерий Кириллович – студент бакалавриата 4 курса, кафедра Сварочных. литейных и аддитивных технологий, Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, valera.orlov526@gmail.com

© Орлов В.К., 2023

УДК 621.791

МОНИТОРИНГ СИЛ ПРОЦЕССА СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Мунасыпов Р.А., Фецак С.И., Данилин А.П.

Аннотация: В статье рассматривается экспериментальная система мониторинга сил, действующих в процессе сварки трением с перемешиванием (СТП). Разработанная система мониторинга, включает в себя измерительную систему (датчики), преобразователи сигнала и программное обеспечение для отображения и записи показаний. Проведены экспериментальные исследования по СТП стали, алюминия и меди с элементами системы мониторинга.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, консольно-фрезерный станок, мониторинг технологического процесса, система регистрации параметров технологического процесса, датчики силы

Технологический процесс сварки трением с перемешиванием основан на формировании сварного соединения, происходящее за счет тепловой энергии, возникающей в результате сил трения инструмента и соединяемых заготовок [1]. В процессе вращающийся инструмент полностью погружается в заготовку и обеспечивает осевое сжимающее усилие на зону перемешивания [2]. Взаимодействие между инструментом и поверхностями заготовки создает большое количество тепла за счет трения, которое приводит материал заготовок

в вязко-текучее состояние и обтекает пин инструмента [3]. Таким образом происходит перемешивание материалов заготовок и образуется требуемый сварной шов [4].

Для решения задачи получения прочных и качественных сварных соединений необходима оценка сопротивления материала деформированию от воздействия сварочного инструмента. Это можно получить мониторингом ряда параметров непосредственно в процессе сварки, например: осевое усилие по оси Z; радиальное усилие по оси X; скорость перемещения инструмента; частота вращения инструмента; заглубление инструмента; температура в зоне сварки;

В качестве экспериментальной установки использовался консольно-фрезерный станок FSS-400 представленный на рисунке 1. Для контроля перемещения инструмента были использованы цифровые оптические линейки с точностью 0,005 мм.

Оборудование, используемое в системе мониторинга

Для экспериментальной проверки разработанной системы мониторинга была собрана экспериментальная схема с использованием датчиков силы AC22, шасси NI CDAQ-9172, а также усилителей AP5000 и модулей аналогово-цифрового преобразования (АЦП) NI9234.

Для измерения силы был выбран датчик силы AC22. Датчик силы AC22 (Табл. 1) предназначен для измерений динамических усилий. Данные датчики могут быть использованы как самостоятельно, так и в сочетании с виброиспытательными системами и вибропреобразователями при динамических испытаниях различных конструкций и машинного оборудования.



Рис. 1 – Консольно-фрезерный станок FSS-400

К особенностям датчика можно отнести следующее: прочная конструкция и герметичный корпус; сочетание высоких значений осевой чувствительности, собственной частоты и ударной стойкости; стабильность характеристик и

надёжность в процессе эксплуатации; широкий температурный диапазон; низкая чувствительность к изменению температуры.

Табл. 1. Технические характеристики датчика АС 22

Чувствительность по заряду (номинальное значение), пКл/Н	4
Относительная поперечная чувствительность, %	< 3
Чувствительность к измерению температуры, %/°С	< 0,1
Рабочий диапазон температур, °С	-60...+150
Деформационная чувствительность, Н·м/мкм	<0,1
Электрическая емкость, пФ	200...350
Сопротивление изоляции, Мом	> 1000
Диапазон силы, Н	+500...+5000

Усилители заряда серии AP5000 (далее усилитель) предназначены для измерения, усиления и преобразования высокоимпедансного сигнала заряда пьезоэлектрических преобразователей в низкоимпедансный сигнал напряжения. Принцип действия усилителя основан на преобразовании сигналов, поступающих от первичных пьезоэлектрических преобразователей (вибропреобразователей, датчиков силы, датчиков давления и т.д.) в низкоимпедансный сигнал напряжения. Конструктивно усилитель выполнен в жестком металлическом корпусе с двумя разъемами на боковых поверхностях для подключения первичных пьезоэлектрических преобразователей, блока питания и регистрирующей аппаратуры. Подсоединение регистрирующей аппаратуры и питание усилителя осуществляется по одному кабелю через специализированный блок питания AS01, AS07 который не требуется, если регистрирующая аппаратура имеет встроенный источник питания для подключения датчиков со встроенной электроникой стандарта IEPЕ.

Шасси NI CDAQ 9172 для системы NI Compact DAQ позволяет использовать модули ввода/вывода С-серии и работает от постоянного напряжения 11-30 В. Подключение к компьютеру осуществляется через интерфейс USB2.0. NI 9234 – это 4-х канальный модуль сбора динамических сигналов для высокоточных измерений, получаемых с датчиков. Модуль включает в себя встроенные фильтры, которые автоматически регулируют частоту обработки. Модуль 9234 идеален для широкого выбора мобильных и портативных программ, таких как промышленные машины мониторинга условий и шума транспортных средств, вибраций и жёсткости.

Разработана универсальная схема управления и мониторинга технологических процессов сварки трением с перемешиванием (Рис. 2).

Для реализации системы мониторинга была разработана схема на основе компонентов GlobalTest (Россия) (Рис. 3). Принципиальная схема подключения датчиков к ЭВМ представлена на рисунке 4.

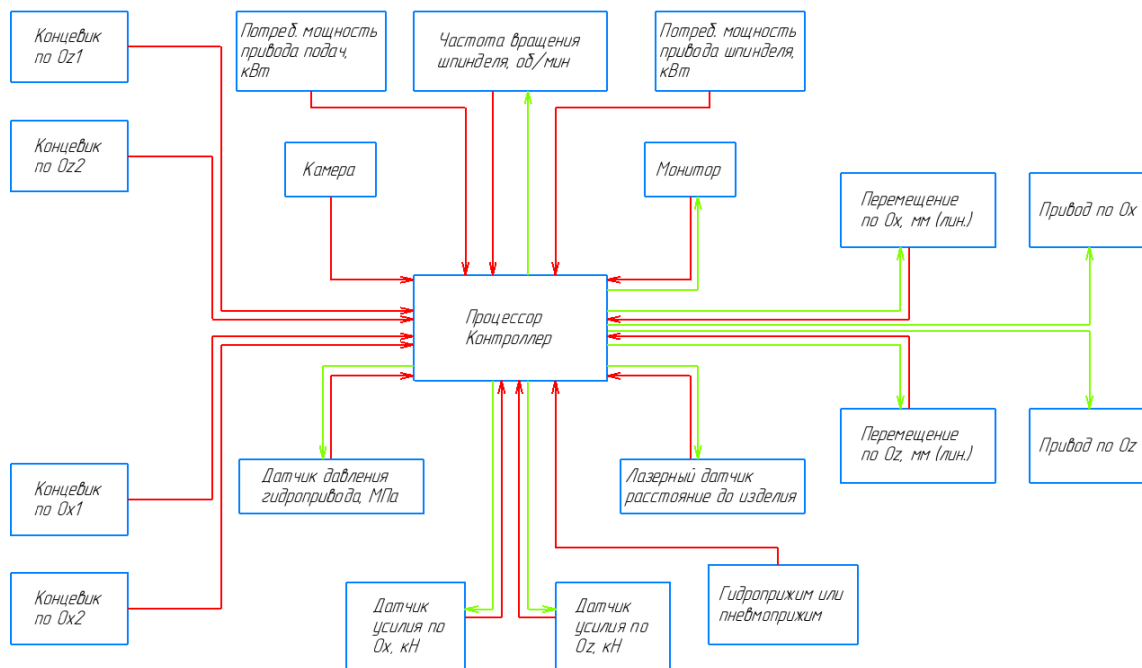


Рис. 2 – Адаптивная система предельного управления

Регистрация скорости сварки происходит следующим образом. Оптические линейки, расположенные по всем трём осям Ox , Oy , Oz регистрируют координаты и время перемещения, передавая полученные данные на ноутбук с установленной программой.



Рис. 3 – Применяемые компоненты GlobalTest

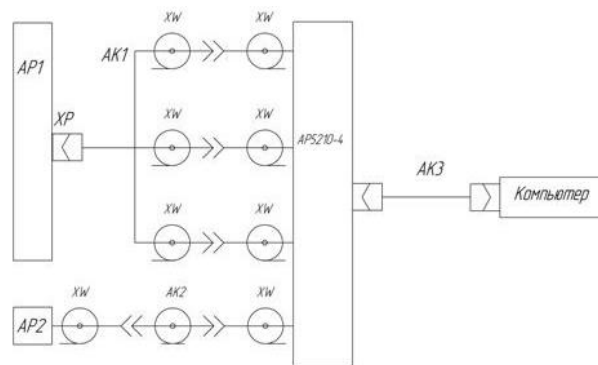


Рис. 4 – Схема подключения датчиков к ЭВМ

Так как частота вращения шпинделя также играет немаловажную роль регистрация данного параметра произведена следующим образом: на инструмент нанесен специальный маркер и установлен датчик, считывающий число оборотов инструмента. Для исключения слабого прижатия инструмента и исключения появления дефектов вводится система мониторинга осевого усилия с помощью программы датчиков силы AC22. Внешний вид экспериментальной установки представлен на рисунках 5-7.



Рис. 5 – Общий вид установки для СТП



Рис. 6 – Плита оснастки с установленными датчиками и заготовками

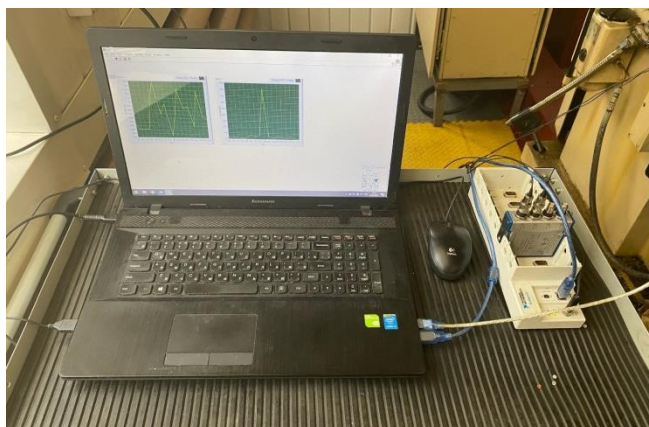


Рис. 7 – Шасси, модуль АЦП и ноутбук с программой для регистрации параметров

Измерение и запись данных производилось с помощью NI LabVIEW. Данное программное обеспечение является средой для разработки приложений измерения, тестирования и управления, реализующая концепции потока данных и графического программирования. В среде LabVIEW создан виртуальный прибор для получения с измерительного устройства данных и записи их на ПК. Для проверки работоспособности разработанной измерительной системы была выполнена сварка образцов из стали Ст3 и алюминия АМг6, толщиной 6 мм (таблицы 2-3).

Табл. 2. Режимы сварки алюминия АМг6

№ эксперимента	Заглубление инструмента S_y , мм	V , мм/мин	ω , об/мин	Длина сварного шва, мм
1	0,625	200	1120	75
2	0,625	150	1120	75
3	0,625	100	1120	75
4	0,625	200	1400	75
5	0,625	150	1400	75

6	0,625	100	1400	75
7	0,625	200	895	75
8	0,625	150	895	75
9	0,625	100	895	75

Табл. 3. Результаты измерений при сварке образцов из алюминия АМгб

№	Заглубление инструмента S_y , мм	V , мм/мин	ω , об/мин	Длина сварного шва, мм	P_x , кН	P_z , кН	Температура в зоне сварки, °С
1	0,625	200	1120	75	15,8	6,3	600
2	0,625	150	1120	75	12,3	4,9	605
3	0,625	100	1120	75	11,2	4,6	610
4	0,625	200	1400	75	7,8	2,9	631
5	0,625	150	1400	75	6,3	2,3	642
6	0,625	100	1400	75	4,2	1,7	665
7	0,625	200	895	75	18,4	8,0	610
8	0,625	150	895	75	17,3	7,7	614
9	0,625	100	895	75	16,9	7,4	623

Сварка образцов из стали Ст3 производилась при режимах, представленных в таблице 4. Результаты измерений при сварке образцов из алюминия Ст3 представлены в таблице 5.

Табл. 4. Режимы сварки стали Ст3

№ эксперимента (образца)	Заглубление инструмента S_y , мм	V , мм/мин	ω , об/мин	Длина сварного шва, мм
109	0,12	40	560	75
110	0,185	40	560	75
111	0,20	40	560	75
112	0,19	40	560	75
113	0,20	40	560	75

Табл. 5. Результаты измерений при сварке образцов из алюминия Ст3

№	Заглубление инструмента S_y , мм	V , мм/мин	ω , об/мин	Длина сварного шва, мм	P_x , кН	P_z , кН	Температура в зоне сварки, °С
1	0,625	200	1120	75	15,8	6,3	600
2	0,625	150	1120	75	12,3	4,9	605
3	0,625	100	1120	75	11,2	4,6	610
4	0,625	200	1400	75	7,8	2,9	631

5	0,625	150	1400	75	6,3	2,3	642
6	0,625	100	1400	75	4,2	1,7	665
7	0,625	200	895	75	18,4	8,0	610
8	0,625	150	895	75	17,3	7,7	614
9	0,625	100	895	75	16,9	7,4	623

Величины амплитудного напряжения в момент сварки образцов 110 и 111 показаны на рисунке 8 и 9. Зарегистрированные данные осевого усилия по оси Oz во время сварки трением с перемешиванием образцов 110 и 111, показаны в виде графиков на рисунке 10.

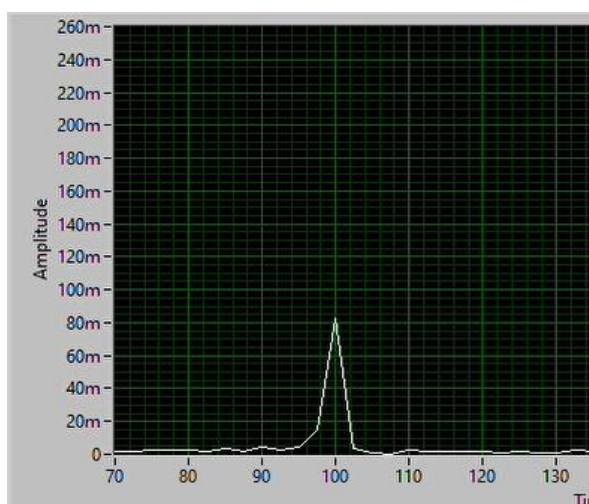


Рис. 84 – Величина амплитудного напряжения в момент сварки образца 110

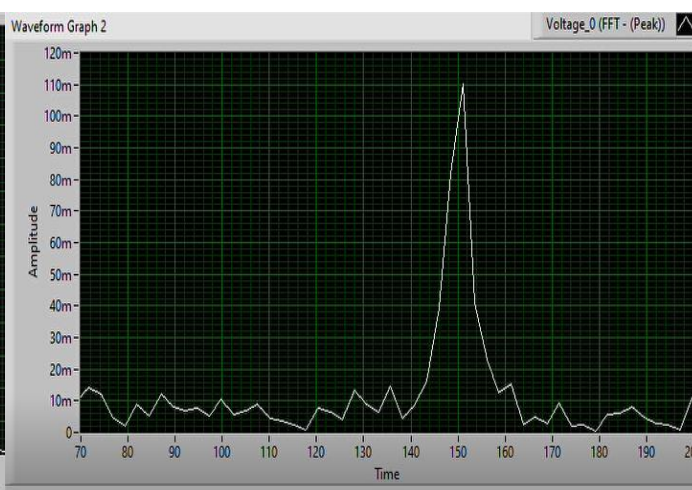


Рис. 95 – Величина амплитудного напряжения в момент сварки образца 111

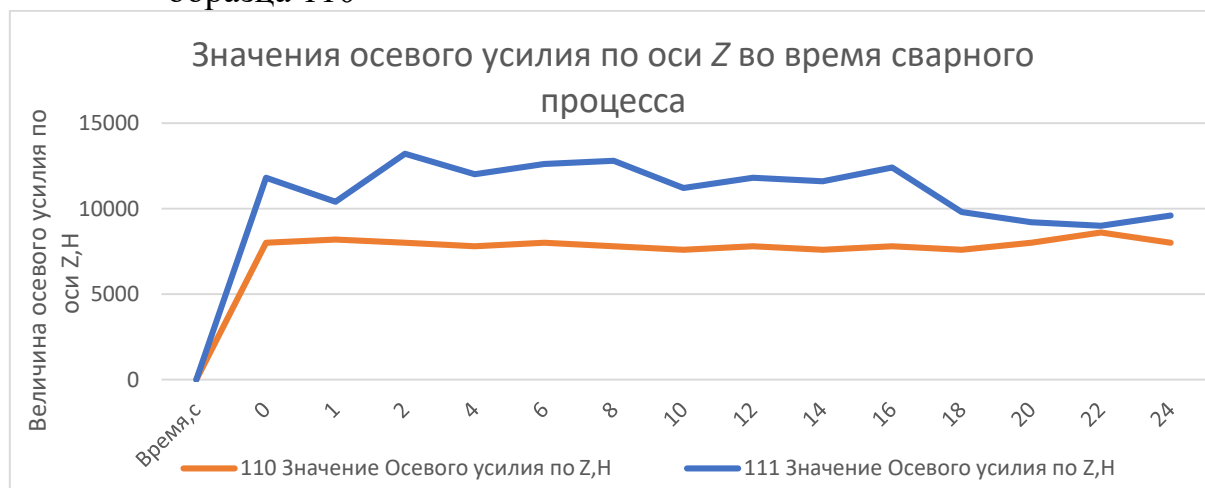


Рис. 10 – Значения осевого усилия по оси Z во время сварного процесса

Сравнив полученные значения усилия по осям X и Z со значениями, упоминаемыми в научной литературе, а также оценив получившееся качество сварного шва, был сделан вывод о пригодности к эксплуатации разработанной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана система мониторинга, использующая компоненты компании GlobalTest, подобраны датчики, усилители, АЦП, преобразователи. Разработана схема подключения и принципиальная схема системы мониторинга. Выполнено экспериментальное исследование разработанной системы мониторинга, получены экспериментальные значения параметров процесса СТП. В результате сравнения полученных параметров с параметрами, указанными в научной литературе, а также проанализировав получившиеся в результате СТП заготовки позволили сделать вывод о пригодности к эксплуатации разработанной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang, Y., et al., Review of tools for friction stir welding and processing. Canadian Metallurgical Quarterly, 2012. 51(3): p. 250-261.
2. Rai, R., et al., friction stir welding tools. Science and Technology of welding and Joining, 2011. 16(4): p. 325-342.
3. Mishra, R.S. and Z. Ma, Friction stir welding and processing. Materials science and engineering: R: reports, 2005. 50(1-2): p. 1-78.
4. Rai, R., et al., friction stir welding tools. Science and Technology of welding and Joining, 2011. 16(4): p. 325-342.

ОБ АВТОРАХ

Мунасыпов Рустэм Анварович – докт. техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО УУНиТ, г.Уфа

Фецак Сергей Игоревич – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО УУНиТ, г.Уфа

Данилин Артем Павлович – начальник конструкторского бюро, ООО «Технология ЕСМ».

© Мунасыпов Р.А., Фецак С.И., Данилин А.П., 2023

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

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

Все права защищены. Книга или любая ее часть не может быть скопирована, воспроизведена в электронной или механической форме, в виде фотокопии, записи в память ЭВМ, репродукции или каким-либо иным способом, а также использована в любой информационной системе без получения разрешения от издателя. Копирование, воспроизведение и иное использование книги или ее части без согласия издателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

Научное издание

**СТАНКОСТРОЕНИЕ И ИННОВАЦИОННОЕ
МАШИНОСТРОЕНИЕ.
ПРОБЛЕМЫ И ТОЧКИ РОСТА**

Материалы

*XII Всероссийской научно-технической конференции
(г. Уфа, 16 – 17 ноября 2023 г.)*

Электронное издание сетевого доступа

*За достоверность информации, изложенной в статьях,
ответственность несут авторы.*

Статьи публикуются в авторской редакции

Подписано к использованию 28.10.2024 г.
Гарнитура «Times New Roman». Объем 5,92 Мб.
Заказ 152.

*ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»
450008, Башкортостан, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12.*

Тел.: +7-908-35-05-007
e-mail: ric-bdu@yandex.ru