



МИНОБРНАУКИ
РОССИИ



УФИМСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

приоритет2030⁺
лидерами становятся

МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Том 2

Материалы

**XIX Всероссийской молодёжной научной конференции
(г. Уфа, 24 – 28 ноября 2025 г.)**



Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уфимский университет науки и технологий»

МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Том 2

*Материалы
XIX Всероссийской молодёжной научной конференции
(г. Уфа, 24 – 28 ноября 2025 г.)*

Научное электронное издание сетевого доступа

Уфа
Уфимский университет
2025

УДК 62
ББК 34.5
М12

*Публикуется по решению ученого совета
Института технологий и материалов УУНУТ.
Протокол № 4 от 24.12.2025 г.*

Редакционная коллегия:

канд. хим. наук, доцент **А.В. Баннова** (*отв. редактор, секция 2.6*);
канд. физ.-мат. наук, доцент **М.М. Абрамова** (*секции 2.1, 2.2*);
старший преподаватель **Г.М. Нурисламова** (*секция 2.3*);
старший преподаватель **И.И. Шайхутдинова** (*секция 2.4*);
инженер **А.И. Нигматуллина** (*секция 2.5*)

Мавлютовские чтения: материалы XIX Всероссийской молодежной науч-
М12 ной конференции (г. Уфа, 24–28 ноября 2025 г.) / отв. ред. А.В. Баннова /
8 т. Т. 2 [Электронный ресурс] / Уфимск. ун-т науки и технологий. – Уфа:
Уфимский университет, 2025. – 365 с. – URL: [https://uust.ru/media/
documents/digital-publications/2025/402.pdf](https://uust.ru/media/documents/digital-publications/2025/402.pdf) – Загл. с титула экрана.

ISBN 978-5-7477-6320-3

Том 2: ISBN 978-5-7477-6325-8

В 2-й том сборника материалов конференции вошли статьи секций 2.1–2.6.

Сборник предназначен для студентов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей.

Все материалы представлены в авторской редакции.

Мероприятие проведено в рамках субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования на реализацию мероприятий, направленных на поддержку студенческих научных сообществ (соглашение № 075-15-2025-429 от 23 мая 2025 г.).

УДК 62
ББК 34.5

ISBN 978-5-7477-6325-8 (том 2) © Уфимский университет, 2025
ISBN 978-5-7477-6320-3

СЕКЦИЯ 2.1. ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА

УДК 621.35

М.А. АЛАШОВ

Alashov_m@mail.ru

Науч. руковод. – д-р техн. наук, проф. Е.В. ПАРФЕНОВ

Уфимский университет науки и технологий

ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЕ ПОЛИРОВАНИЕ ШТАМПОВОЙ СТАЛИ

Аннотация: в данной статье рассматривается возможность применения электролитно-плазменного полирования штамповых сталей. Составлена таблица с рекомендуемыми параметрами электролитно-плазменного полирования для часто используемых штамповых сталей.

Ключевые слова: электролитно-плазменное полирование; штамповые стали; восстановление поверхности; шероховатость.

Современное машиностроение, в таких отраслях, как аэрокосмическая, автомобилестроительная и оборонная промышленность, использует высоконагруженные и высокоточные компоненты. Производство этих деталей зачастую получают методом объемной штамповки. Материалы для изготовления штампов должны работать в условиях циклических термических и механических нагрузок, подвергаться экстремальным воздействиям. Штампы для объемной штамповки после длительной работы с металлом изнашиваются и требуется проводить обработку поверхности.

Основной износ штампа происходит из-за термоусталости, приводящей к образованию сетки микротрещин, адгезии материала заготовки и прогрессирующему окислению. Трещины в материале штампа будут способствовать адгезии, и в дальнейшем заготовка будет брать с собой частицы штампа, а оголённый металл будет активно окисляться, цикл будет повторяться с нарастающей интенсивностью. Сочетание данных факторов будет приводить к катастрофическому ухудшению качества продукции, и, как следствие, рост брака и потерю прибыльности.

Восстановление поверхности штампа – это комплексный процесс, направленный на возвращение геометрии, устранение дефектов и восстановление поверхностных свойств. В процессе восстановления поверхности штамп тщательно шлифуют и полируют для получения низкой шероховатости. Для эффективного и контролируемого снижения шероховатости поверхности актуально исследование и использование электрофизических методов обработки.

Электролитно-плазменное полирование (ЭПП) – это метод обработки металлических поверхностей, основанный на воздействии парогазовой оболочки,

возникающей при повышенных напряжениях в условиях плазменного электролиза [1]. Электролитно-плазменное полирование реализуется за счет электрохимического анодного растворения металла. Роль парогазовой оболочки заключается в отводе гидроксидов металлов, чтобы не позволять им адсорбироваться на поверхности обрабатываемого изделия. Метод электролитно-плазменного полирования находит свое применение в аэрокосмической и автомобильной промышленности, в медицинской промышленности при производстве инструментов и в других отраслях.

Эффективность процесса ЭПП может зависеть от ряда параметров, включая напряжение, ток, состав электролита и время обработки. Проведение опытов в различных режимах обработки позволяет определить оптимальные условия для достижения желаемой шероховатости поверхности. Схема экспериментальной установки ЭПП приведена на рис. 1. Основными элементами установки являются: рабочая зона, содержащая электролизер, холодильник, технологический источник питания и система управления.

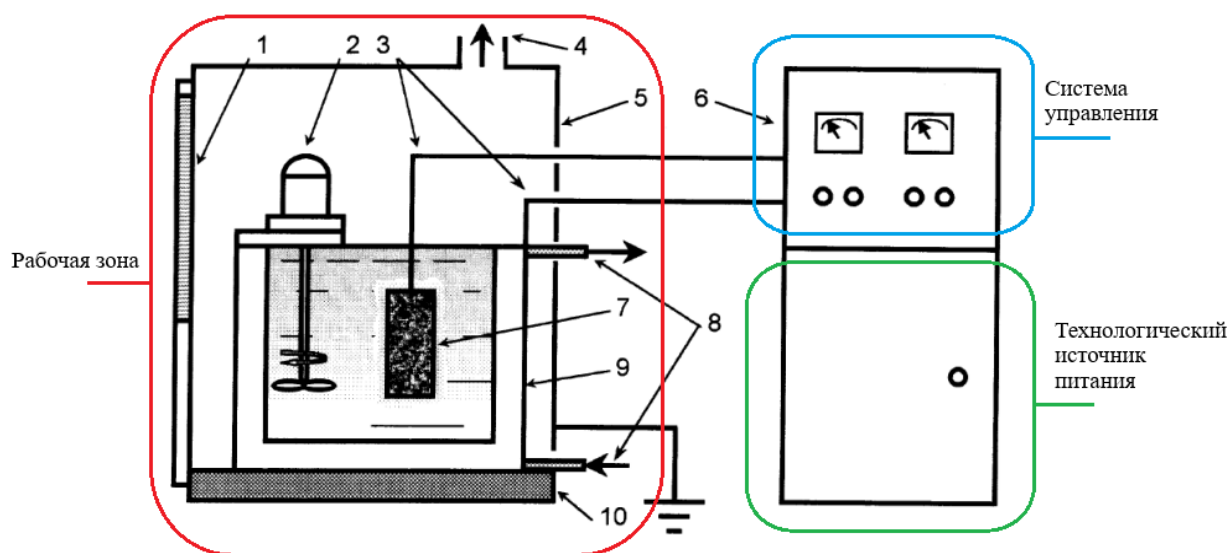


Рис. 1. Схема установки ЭПП

Обработка поверхности производится в растворах аммонийных солей: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{PO}_4$, NH_4Cl и других, с концентрацией 4–7% масс. Обрабатываемая деталь является анодом, а интервал напряжений составляет 250–350 В. Температура электролита для протекания электролитно-плазменного полирования должна составлять 80–90°C для обеспечения пузырькового кипения в парогазовой оболочке [2].

В работе было проведено электролитно-плазменное полирование шаровой пробки из стали 40Х для промышленных шаровых кранов. Обработка поверхности проводилась в растворе сульфата аммония с концентрацией 6%. Обрабатываемая деталь была анодом, напряжение составило 260 В, температура электролита 80°C. Время обработки составило 4 минуты. На рис. 2, показана разница поверхности двух, одинаковых по материалу, шаровых пробок, до и после ЭПП.

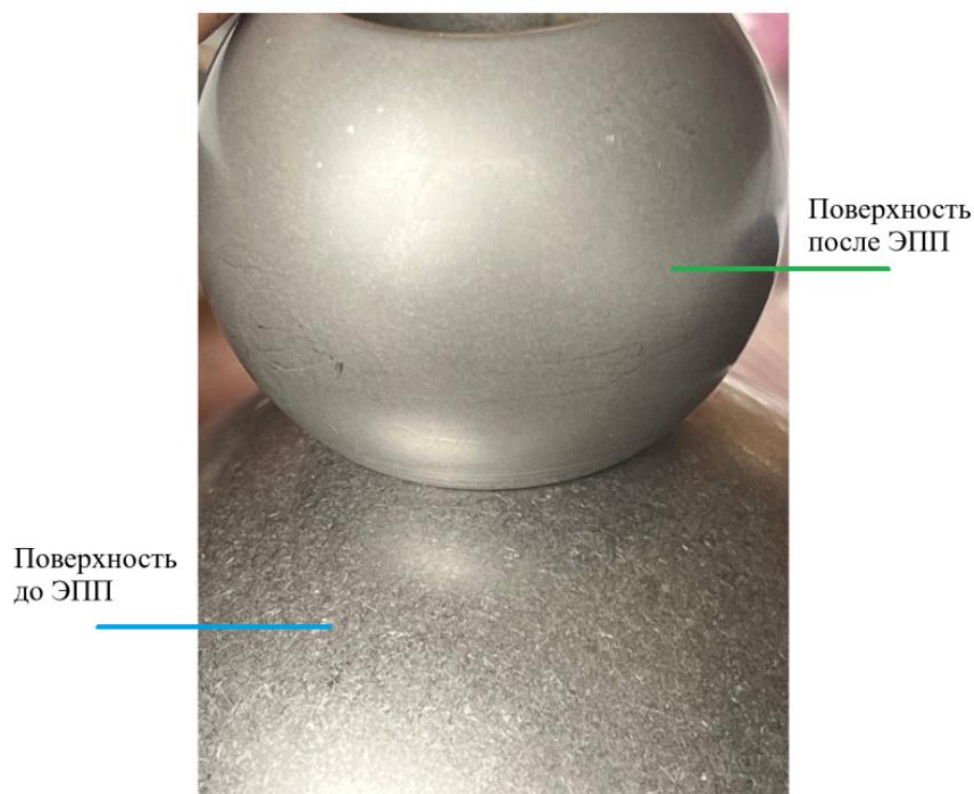


*Рис. 2. Шаровые пробки из стали 40Х до и после ЭПП
при $U = 260$ В, $T = 80^{\circ}\text{C}$, $t = 4$ мин*

Как видно из рис. 2, качество поверхности пробки шарового крана после электролитно-плазменного полирования улучшилось. Изделие приобрело серый матовый металлический блеск. Следы механической обработки устранены.

Далее выявлены режимы работы ЭПП для часто используемых штамповых сталей; данные приведены в табл. 1.

Выводы

1. Показана актуальность внедрения электрофизических методов полировки поверхности для и восстановления поверхности штамповой оснастки.
2. Составлена таблица с режимами работы электролитно-плазменной полировки для часто используемых штамповых сталей.
3. Приведен пример экспериментального применения процесса ЭПП для полирования деталей из стали 40Х.

Таблица 1

Режимы электролитно-плазменного полирования штамповой стали

Тип	Марка	Электролит	Концентрация, %	Напряжение, В	Температура электролита, °С	Время обработки, мин
Углеродистые и низколегированные стали	У7-У12(А) У8ГА	Хлорид аммония	3–6	200–300	80–90	3–10
	5ХНМ					
Хромистые стали	5ХНВТ, 5ХНТ	Сульфат аммония	3–5	200–350	80–90	2–5
	X12MB					
	X12Ф1					
	9ХС					
	ХВГ, 9ХВГ					
Быстрорежущие стали	4ХС, 6ХС, 6ХВ2С	Нитрат аммония	2–2,5	200–400	70–85	2–5
Стали для горячего деформирования	P6M5	Сульфат или нитрат аммония	3–6	230–250	80–85	3–6
	4X5MΦC					
	4X5MΦ1C					
	4X4MBΦC					
	3X3M3Φ					
	4X5B2ΦC					
	4X2B5ΦM					

Библиографический список

1. Электролитно-плазменная обработка: моделирование, диагностика, управление: монография / Е. В. Парфенов, Р. Р. Невьянцева, С. А. Горбатков, А. Л. Ерохин. – М.: Машиностроение, 2014. – 380 с. ISBN 978-5-94275-732-8.
2. Куликов, И. С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И. С. Куликов, С. В. Ващенко, А. Я. Каменев. – Минск: Беларус. наука, 2010. – 232 с. – ISBN 978-985-08-1215-5.

© Алашов М.А., 2025

УДК 004.312:629.7.07

Р.Р. ВАХИТОВ, Р.Р. ГАЛЛЯМОВ

rinar311376@gmail.com

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. О.В. МЕЛЬНИЧУК

Уфимский университет науки и технологий

DIY-УСТРОЙСТВО ДЛЯ СОЗДАНИЯ СВЕТОВЫХ УЗОРОВ НА ВЕЛОСИПЕДНЫХ КОЛЕСАХ НА БАЗЕ АДРЕСНЫХ СВЕТОДИОДОВ

Аннотация: представлен обзор разработки и реализации DIY-устройства, известного как POV-дисплей (Persistence of Vision), для велосипедного колеса. В работе описан принцип действия, основанный на инерции человеческого зрения, и ключевые технические компоненты, включая адресные светодиоды (WS2812B/APA102) и микроконтроллер (Arduino).

Ключевые слова: POV-дисплей, велосипед, адресные светодиоды, WS2812B, APA102, датчик Холла, микроконтроллер, Arduino, Persistence of Vision.

Введение

Проект представляет собой разработку и сборку POV-дисплея (Persistence of Vision) для велосипедного колеса, использующего эффект инерции человеческого зрения. Устройство формирует динамические световые узоры, текст или изображения, которые становятся видимыми при быстром вращении колеса. В основе системы лежат адресные светодиоды, управляемые микроконтроллером, и система синхронизации, обеспечивающая стабильность изображения независимо от скорости движения [1]. Подобные DIY-проекты не только демонстрируют возможности микроконтроллеров и программирования, но и являются эффективным средством повышения безопасности велосипедиста в темное время суток за счет высокой заметности и яркости.

Принцип действия и система синхронизации

Эффект POV основан на том, что зрительное впечатление от изображения, сформированное в результате обработки зрительной информации мозгом, сохраняется в течение короткого времени (примерно 0,04-0,06 секунды). Если линейка светодиодов, закрепленная на спице колеса, быстро мигает, включая нужные пиксели в определенные моменты времени, то за полный оборот колеса человеческий глаз воспринимает эти мигания как цельное, статичное изображение, «зависшее» в воздухе [2].

Ключевым элементом, обеспечивающим стабильность изображения, является система синхронизации. Для этого используется датчик Холла (или геркон), установленный на оси колеса или спице, и неодимовый магнит, закрепленный на раме велосипеда.

– Датчик положения. При прохождении магнита мимо датчика Холла генерируется импульс, который служит точкой отсчета (началом угла 0°) для микроконтроллера;

– Расчет скорости и угла. Микроконтроллер измеряет время между двумя последовательными импульсами, определяя время полного оборота колеса (T) и его угловую скорость;

– Отображение. Зная время оборота, контроллер рассчитывает, в какой момент времени необходимо обновить состояние светодиодов для отображения следующего «столбца» изображения. Если изображение состоит из N столбцов, то время Δt обновления для каждого столбца рассчитывается по формуле $\Delta t = T/N$. Таким образом, изображение «разворачивается» по окружности колеса, компенсируя изменение скорости вращения [4].

Обзор аппаратной части

Для реализации проекта необходимы следующие ключевые компоненты, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Основные компоненты POV-дисплея

Компонент	Назначение	Рекомендуемые модели	Примечание
Микроконтроллер	Управление светодиодами, обработка данных с датчика, расчет синхронизации.	Arduino Pro Mini/Trinket, ESP32, ESP8266	ESP32/ESP8266 предпочтительны для Wi-Fi управления и большей памяти.
Адресная LED лента	Создание самого изображения (линейка пикселей).	WS2812B (Neopixel), APA102 (DotStar)	APA102 (DotStar) обеспечивают более высокую скорость обновления, что критично при высоких оборотах.

Датчик положения	Определение начала оборота колеса (угла 0°).	Датчик Холла, геркон	Датчик Холла более надежен, не имеет механических контактов и не подвержен дрейбегу.
Магнит	Триггер для датчика положения.	Неодимовый магнит.	
Источник питания	Обеспечение питания всей системы.	Li-Po аккумулятор 3.7В или 5В, батарейный отсек 3хAA/4хAA.	Требуется стабильное напряжение 5В для светодиодов и контроллера.
Корпус и крепеж	Защита электроники от влаги и вибрации.	Влагозащищенный корпус, пластиковые стяжки.	Обеспечение безопасности и долговечности устройства.

Упрощенная схема подключения

В качестве примера рассмотрим подключение на базе микроконтроллера Arduino Pro Mini и адресной ленты WS2812B (рис. 1).

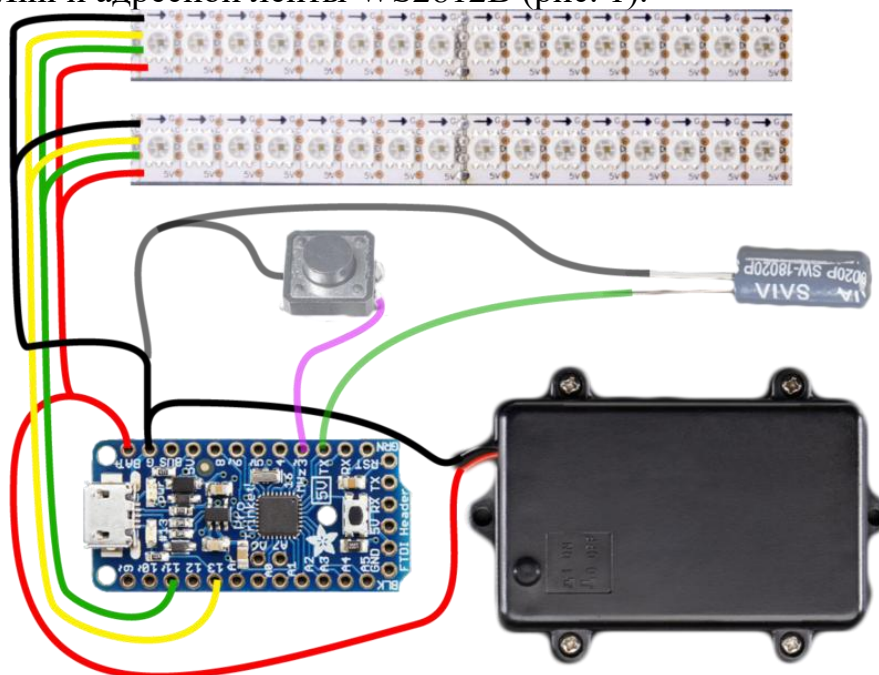


Рис. 1. Упрощенная схема подключения основных компонентов POV-дисплея

WS2812B Data Pin подключается к цифровому пину 6 Arduino.

Датчик Холла (Signal) подключается к цифровому пину 2 Arduino (для внешнего прерывания INT0).

Питание (VCC и GND) подается на все компоненты от общего источника.

Заключение

Разработка POV-дисплея на велосипедном колесе является комплексным DIY проектом, который успешно объединяет знания в области электроники, механики и программирования. Успешная реализация требует не только точной синхронизации, но и обеспечения надежного крепления и влагозащиты всех компонентов. Перспективы развития проекта включают разработку графического интерфейса для загрузки пользовательских изображений и оптимизацию алгоритмов для отображения более сложных и высококачественных узоров.

Библиографический список

1. Adafruit Learning System. Bike Wheel POV Display. [Электронный ресурс]. URL: <https://learn.adafruit.com/bike-wheel-pov-display/overview> (дата обращения: 20.10.2025).
2. Yet another POV – Wheel POV / Блог им. Signaller. [Электронный ресурс]. URL: <https://we.easyelectronics.ru/Signaller/yet-another-pov-wheel-pov.html> (дата обращения: 20.10.2025).
3. Instructables. RGBike POV - Open Project. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.instructables.com/RGBike-POV-Open-project> (дата обращения: 20.10.2025).
4. Amperka Wiki. POV-спидометр для велосипеда. [Электронный ресурс]. URL: <http://wiki.amperka.ru/projects:pov-speedometr> (дата обращения: 20.10.2025).

© Вахитов Р.Р., Галлямов Р.Р., 2025

УДК 621.315.592

А.А. ЖУРАВЛЕВ

zhuravlevaao4@mail.ru

Науч. руковод. – канд. тех. наук, доц. К.М. НЕСТЕРОВ

Уфимский университет науки и технологий

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД НА ОСНОВЕ ЧЕРНОГО ФОСФОРА

Аннотация: изготовление и исследование полупроводникового диода на основе черного фосфора.

Ключевые слова: графен, черный фосфор, фосфор, диод, полупроводник, p-n переход.

Введение

Черный фосфор полупроводниковый материал, обладающей низкой шириной запрещенной зоны по сравнению с традиционными полупроводниковыми

материалами кремний и германий чьи ширины запрещенной зоны равняются 1.12 и 1.78 эВ, а ширина запрещенной зоны черного фосфора размером в 0.3 эВ, что делает этот материал более энергоэффективным в изготовлении полупроводниковых элементов и при этом технология изготовления менее затратная чем с использованием кремния или германия, так как очистка фосфора является не столь трудоемким процессом, как очистка того же кремния. Черный фосфор может стать хорошим материалом для изготовления элементов с низким потреблением мощности.

Теоретические сведения о *p-n* переходе

p-n переход – это контакт двух примесных полупроводников *p* и *n* типа. При контакте двух разных полупроводников образуется металлургическая зона (граница соприкосновения двух разных типов полупроводников) и на этой границе образуется электронно-дырочный переход (рисунок 1)

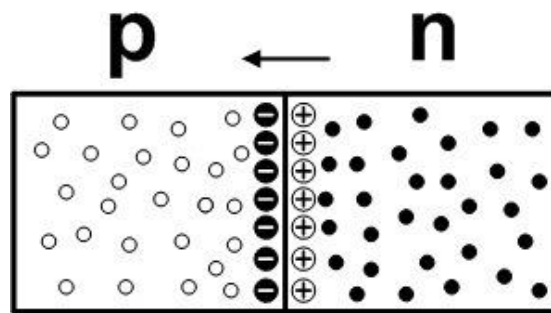


Рис. 1. Электронно-дырочный переход

Рассмотрим состояния электронно-дырочного перехода.

Равновесное состояние – это такое состояние перехода, когда его равновесие не нарушено внешними факторами. Но при этом хоть и переход находится в равновесном состоянии это не значит, что он не создает электрический ток, который возникает из-за движения электронов и дырок вблизи металлургической границы, а также движением собственных электронов. Распределение подвижных зарядов, создающие электрическое поле в переходе, можно описать исходя из уравнения 1, 2 Пуассона.

$$\frac{d^2 E(x)}{dx^2} = \frac{\lambda}{\epsilon \epsilon_0} (1) - \text{уравнение Пуассона}$$

Где $\lambda_p = -qN_a$, $\lambda_n = qN_d$

$$\frac{d^2 \Phi(x)}{dx^2} = \frac{1}{l_{Di}^2} (sh(\Phi) + \frac{1}{2} \frac{N}{n_i}) (2) - \text{следствие из уравнения 1}$$

Где $\Phi(x) = \phi_e(x) / \phi_t(x)$, N – концентрация носителей в *p* или *n* слое при этом $N = -N_a$ в *p* слое, $N = N_d$ в *n* слое.

Пренебрегая концентрацией дырок и электронов, находящихся в самом переходе, мы имеем полное право исключить первое слагаемое в правой части уравнения и получаем следующее решение 3, которое определяет высоту потенциального барьера.

$$\Delta \phi_0(x) = \phi_{Ep}(x) - \phi_{En}(x) (3)$$

Равновесную ширину потенциального барьера также выразим из уравнения 1 и получаем выражение 4.

$$l_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\Delta\varphi_0}{q} \left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a}\right)} \quad (4)$$

Теперь рассмотрим *p-n* переход в неравновесном состоянии. Переход станет неравновесным тогда, когда мы подключим к нему внешнюю ЭДС, тогда его параметры (высота и ширина потенциального барьера) будут меняться в соответствии с формулами 5-6.

$$\Delta\varphi(x) = \varphi_0(x) - U \quad (5)$$

Где U – напряжение ЭДС, $\varphi_0(x)$ – высота потенциального барьера в равновесном состоянии.

$$l_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\Delta\varphi}{q} \left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a}\right)} \quad (6),$$

где $\Delta\varphi$ – определяется согласно формуле 5.

Из этого можно сделать вывод, что при подаче прямого напряжения (положительный контакт подается на *p* слой, а отрицательный на *n* слой) ширина и высота потенциального барьера уменьшается, а при обратном возрастает, что делает его импеданс высоким.

Методика Изготовления *p-n* перехода

Для изготовления *p-n* перехода необходимо легировать фосфор примесями Sn (олова) и Zn (цинка) при этом получившееся *p* и *n* области должны быть единым целым (монолитным), ибо на практике *p-n* переход нельзя осуществить обычным соприкосновением двух типов полупроводников, так как при таком соединении существенное влияние оказывают образующиеся зазоры воздуха или же поверхностных оксидных пленок.

Создание *p-n* перехода осуществлялась в пресс форме, куда послойно засыпался порошок фосфора с легирующими компонентами, схема засыпки показана на рис. 2.

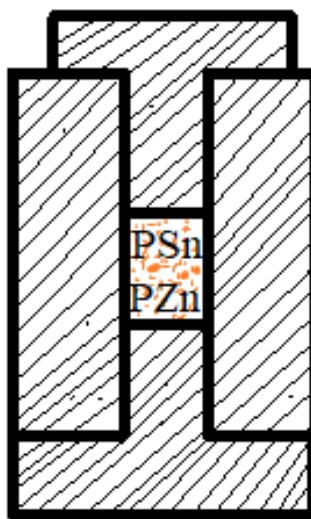


Рис. 2. Графическое представление размещения фосфора и легирующих материалов в пресс-форме

После пресс форма помещалась под пресс с одновременным нагреванием и по итогу на выходе получили цельный p - n переход в виде пластины.

Методика измерения ВАХ и сравнение с кремниевым и германиевым диодом

Для того, чтобы измерить ВАХ необходимо прикрепить медные электроды к получившемуся p - n переходу. Для этого к краям p - n перехода под небольшим давлением (для уменьшения влияния воздушных зазоров) подсоединили медные электроды, предварительно припаяли к ним провода с медной жилой (Рис. 3).

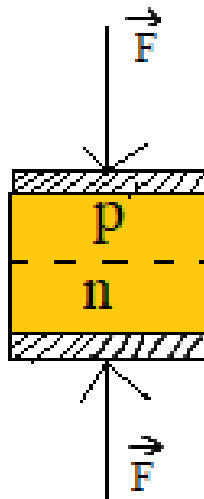


Рис. 3. Подсоединенные медные электроды в p - n переходу.

Далее произведем замеры ВАХ в двух режимах включения (прямого и обратного) p - n перехода. Для измерения ВАХ использовался мультиметр «Ц4353», данный прибор сертифицирован ГОСТами и с погрешностью в 2%. Общая схема включения показана на рисунке 4.

Сравним полученную вольт-амперную характеристику с характеристиками кремниевого и германиевого диода. Характеристики кремниевого и германиевого диода представлены на рисунке 6.

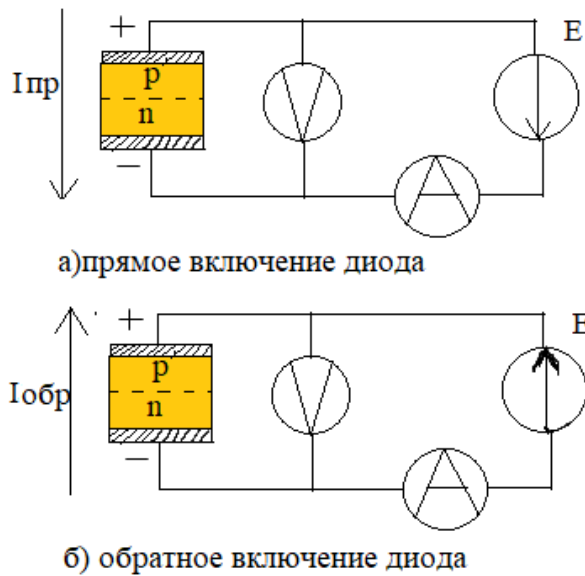


Рис. 4. Схема включения p - n перехода при прямом и обратном включении

Прямая характеристика диода показывает, что протекаемый ток от приложенного напряжения в p - n переходе изменяется согласно экспоненциальному закону (7) до наступления максимального напряжения для прямого включения, по нашему графику это значение $U_{пр, max} = 3В$, далее изменение тока от напряжения происходит по линейному закону.

$$I(U) = I_0(e^{\frac{U}{\phi_T}} - 1) \quad (7)$$

где U – подаваемое напряжение, I_0 – тепловой ток, ϕ_T – температурный потенциал (в нашем случае температурный потенциал берется для $25\text{ }^{\circ}C$).

При обратном включении ток не изменяется от подаваемого напряжения до того момента пока не наступит пробой. Согласно полученным данным напряжением пробоя для изготовленного p - n перехода является $2В$.

Результаты вольтамперной характеристики прямого диода на основе фосфора показаны на рис. 5.

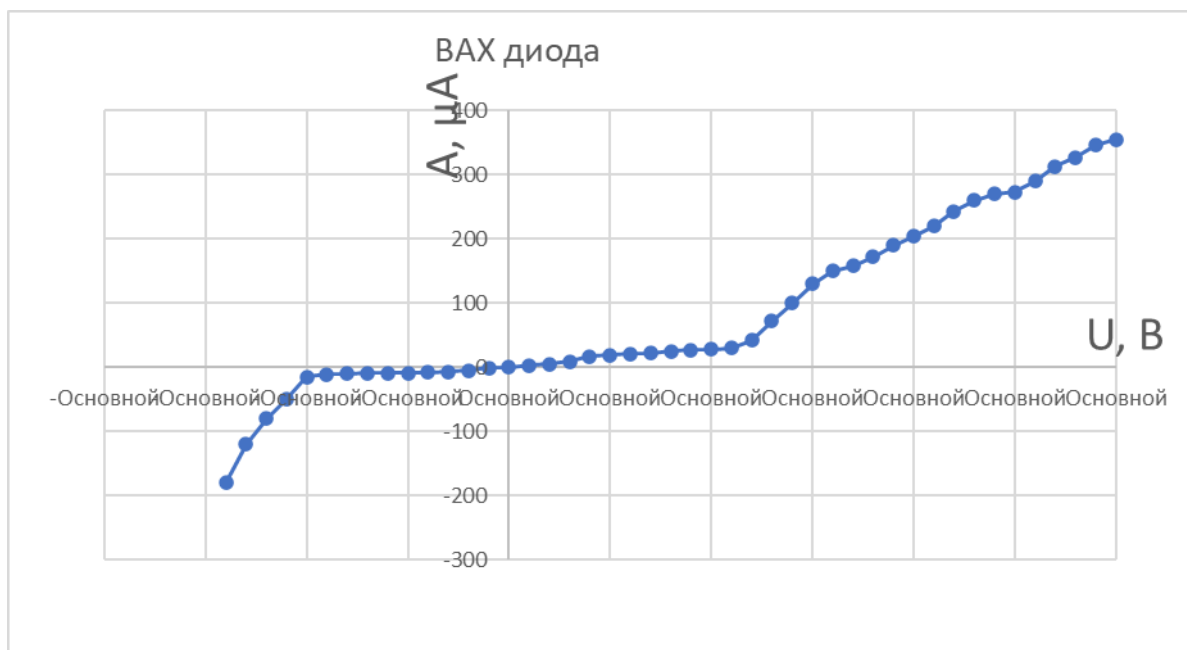


Рис. 5. ВАХ $p-n$ перехода на фосфоре.

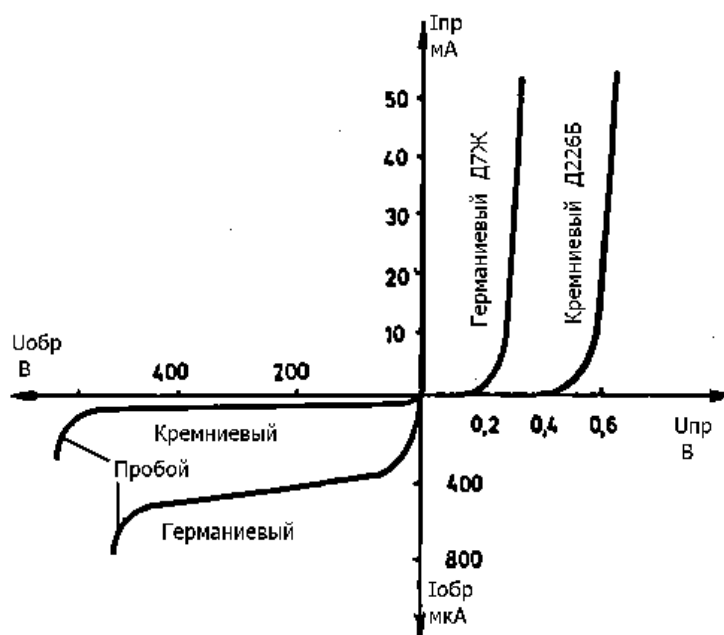


Рис. 6. ВАХ кремниевого и германиевого диода

Сравнительные данные Вах диодов на основе черного фосфора, кремния и германия приведены ниже в таблице.

Таблица 1

Сравнительные характеристики ВАХ диодов

	Диод на черном фосфоре	Кремниевый диод	Германиевый диод
$U_{обр-мах}, В$	2	530	470
$U_{пр-мах}, В$	3	0,6	0,3

Заключение

Изготовленный диод на черном фосфоре в сравнении с кремниевым и германиевым диодом имеет наибольшее рабочее прямое напряжение, но проигрывает в напряжении пробоя, к тому же у диода из черного фосфора выходной маленький ток, $I < 1\text{mA}$ в сравнении с кремниевым и германиевым диодами их выходные токи $I > 1\text{mA}$, что говорит о плохих токопроводящих свойствах диода на черном фосфоре. Это связано с аспектами технологии производства. Для улучшения параметров будет опробована другая технология получения диода на черном фосфоре.

Библиографический список

1. Физические основы микро- и нанoeлектроники: учебное пособие / Парфенова Е.Л. Терентьева Л.А. Хусаинов М. Г. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2012. – 240 с. ISBN978-5-222-19617-5.
2. Основы теории транзисторов и транзисторных схем / И. П. Степаненко. – Москва: Энергия 1973. – 608 с. ISBN978-5-458-38954-9.
3. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов/ Л.П. Павлов. – Москва: Высшая школа 1975.
4. Полупроводниковые приборы/ В.И. Галкин В.А. Прохоренко. – Минск: Беларусь, 1979. – 239 с. ISBN5-1384658-A.

© Журавлев А.А., 2025

УДК 669.295.5:621.78

А.Н. ПИВЦОВА

anastasiapivcova3@gmail.com

Науч. руковод. – канд. техн. наук, старший преподаватель С.А. ГАТИНА

Уфимский университет науки и технологий

ТЕРМООБРАБОТКА ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ

Аннотация: в данной работе исследовали влияние термообработки на микроструктуру титанового сплава ВТ6, полученного селективным лазерным сплавлением.

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление, термическая обработка, двухфазный титановый сплав, особенности структуры.

Введение

Титановый сплав ВТ6 применяется в авиакосмической, медицинской и машиностроительных отраслях. Его сочетание высокой прочности, коррозионной

стойкости и относительно низкой плотности делает его незаменимым для ответственных деталей.

Сплав ВТ6 является двухфазным титановым сплавом, содержащим 90% Ti. Двумя основными компонентами этого сплава являются Al (6%) и V (4%). Алюминий усиливает показатели прочности металла в процессе воздействия высокой температуры при плавке, а ванадий увеличивает пластичность, не снижая показатели устойчивости к механическим повреждениям. Низкая плотность делает его легким, а собственные физические свойства титана обеспечивают сплаву невосприимчивость к воздействию даже таких сильных коррозионных факторов, как морская вода [1,2].

СЛС – селективное лазерное сплавление – передовая технология аддитивного производства, позволяющая создавать сложные геометрические формы из порошкового материала путём послойного сплавления частиц лазером [4].

Технология СЛС имеет ряд преимуществ: возможность получать сложные геометрические формы без использования дополнительных поддерживающих структур, минимальные расходы материала, высокие механические свойства получаемых изделий и др. Несмотря на широкий интерес в последние годы к методам аддитивного производства, всё ещё существует ряд проблем, решение которых является актуальным на данном этапе развития. Следует учесть, что при использовании СЛС формируются характерные особенности структуры [6]:

1. Столбчатые зерна – вытягиваются в направлении отвода тепла;
2. Мартенситная α' – фаза – образуется из-за высоких скоростей охлаждения, отличается повышенной твёрдостью, но сниженной пластичностью;
3. Пористость – микропустоты между сплавляемыми частицами;
4. Остаточные термические напряжения – возникают из-за резких градиентов температуры в зоне лазерного воздействия.

Исходя из данных особенностей, целью исследования является поиск оптимального режима термической обработки для гомогенизации структуры, снятия остаточных напряжений, а также повышения таких механических свойств, как пластичность и ударная вязкость.

Материалы и методы исследования

Материалом исследования являлся титановый сплав ВТ6, полученный методом селективного лазерного спекания.

Для исследования была выбрана серийная термическая обработка при различных температурных режимах: отжиг при температуре 750 °C, 800 °C, 850 °C и 900 °C с последующим охлаждением с печью. Микроструктуру сплава до и после термической обработки исследовали на базе металлографического микроскопа 4ХС.

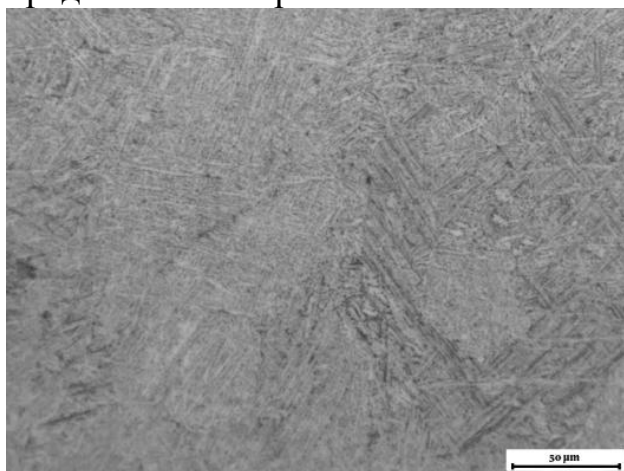
Результаты исследования и обсуждение

Исходная структура напечатанного сплава ВТ6 приведена на рис. 1 и представлена столбчатыми первичными бета зёрнами, в теле которых наблюдаются выделения мартенсита α' игольчатой морфологии.

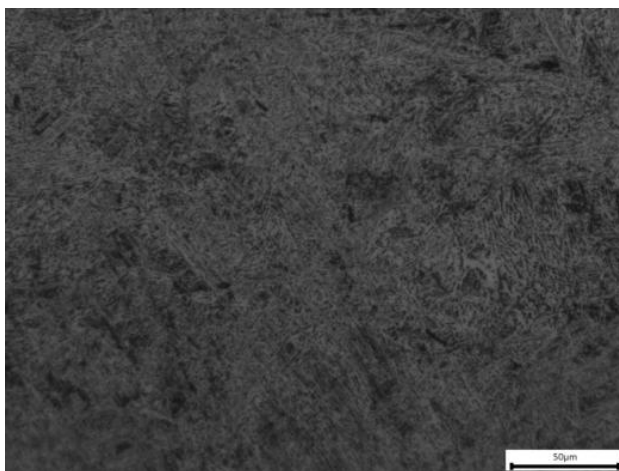


Рис. 1. Исходная структура сплава ВТ6, полученного методом селективного лазерного сплавления

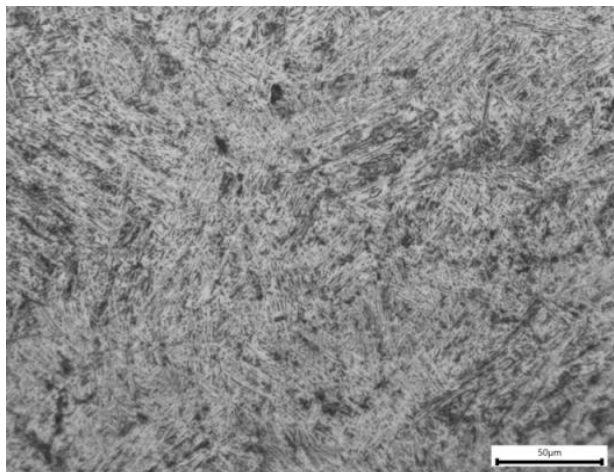
Структура сплава после каждого режима термической обработки представлена на рис. 2



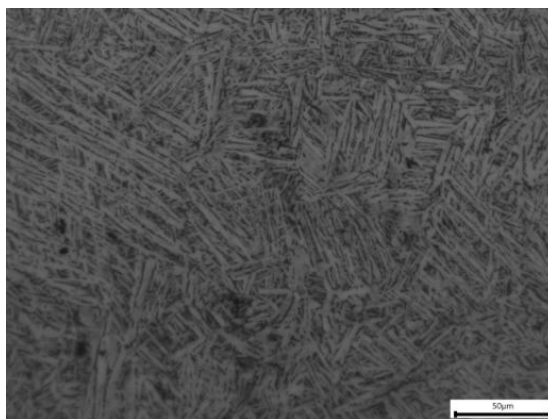
а



б



в



г

Рис. 2. Структура сплава ВТ6, полученного селективным лазерным спеканием, после термической обработки при: а) 750 °С; б) 800 °С; в) 850 °С; г) 900 °С - в течение 1 ч, охлаждение с печью

После термообработки происходит переход от игольчатой структуры к тонко-пластинчатой за счет распада мартенсита на пластины первичной $\alpha_{\text{п}}$ -фазы и мелкопластинчатую $(\alpha_{\text{в}}+\beta)$ -фазу [5]. При повышении температуры отжига наблюдается увеличение толщины $\alpha_{\text{п}}$ -пластин. Из литературных источников известно, чрезмерное увеличение размера зерна и ширины пластин приводит к снижению механических свойств [6,7], поэтому в ходе дальнейших исследований необходимо подобрать соответствующий режим термической обработки, который позволит получить равновесную структуру сплава, выращенного методом СЛС, а также повысить его механические свойства.

Выводы

1. Показано, что СЛС сплава ВТ6 приводит к формированию столбчатой структуры, состоящей из первичных β -зерен, вытянутых вдоль направления теплоотвода. Внутри зерен обнаружен мартенсит α' игольчатой морфологии.
2. Установлено, что с ростом температуры термической обработки увеличивается размер зерна и ширина α пластин; формируется более стабильная и однородная структура, по сравнению с исходной.

Работа выполнена при поддержке РНФ грант № 23-69-10003,
<https://rscf.ru/project/23-69-10003/>

Библиографический список

1. Ильин А. А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник / Ильин А. А., Колачев Б. А., Полькин И. С.: ВИЛС – МАТИ, 2009 – 520 с.
2. Цвиккер У. Титан и его сплавы. Берлин – Нью-Йорк, 1974. Переиздание с М., «Металлургия», 1979 – 512 с
3. DebRoy, T.; Wei, H.L.; Zuback, J.S.; Mukherjee, T.; Elmer, J.W.; Milewski, J.O.; Beese, A.M.; Wilson-Heid, A.; De, A.; Zhang, W. Additive manufacturing of metallic components—Process, structure and properties// Progress in Materials Science. 2018
4. Оспенникова О. Г. Особенности структуры сплава Ti-6Al-4V, полученного методом селективного лазерного сплавления / О.Г. Оспенникова, С.А. Наприенко, П.Н. Медведев, О.А. Крупнина, А.М. Рогалев - ТРУДЫ ВИАМ №10 (82) 2019
5. Wang, M., Yan, H., Lu, Q. et al. Selective Laser Melted Ti-6Al-4V Alloy after Post-Heat Treatments: Microstructure, Mechanical Properties and Fatigue Behavior// Journal of Materials Engineering and Performance. 2025. Vol. 34
6. Гущина, М. О. Разработка способов управления структурой и свойствами в титановом сплаве ВТ6 при прямом лазерном выращивании / Гущина М. О., Санкт-Петербург, 2020 – 110 с.

7. Ch. Su, H. Yu, Z. Wang, J. Yang, X. Zeng, Controlling the tensile and fatigue properties of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy by post treatment // Journal of Alloys and Compounds .2020 . Vol. 857

© Пивцова А.Н., 2025

УДК 669.295.5:621.78

Д.Т. МИФТАХОВА

miftahovadiana05@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, старший преподаватель С.А. ГАТИНА

Уфимский университет науки и технологий

ПРИМЕНЕНИЕ ПСЕВДО-БЕТА ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-15Mo В МЕДИЦИНЕ

Аннотация: в работе рассматриваются перспективы применения псевдо-β титанового сплава Ti-15Mo в медицинской практике, в частности, для изготовления имплантатов.

Ключевые слова: титановые сплавы, медицинские имплантаты, псевдо-β титановый сплав, интенсивная пластическая деформация, биосовместимые материалы.

Современные исследования сосредоточены на разработке титановых сплавов, которые являются безопасными для здоровья (не содержат токсичных элементов) и обладают пониженной жесткостью (низким модулем упругости). Это делает их идеальными для имплантатов, предназначенных для длительного или постоянного использования в медицине, например, при остеосинтезе и эндопротезировании. К таким сплавам относятся метастабильные и стабильные β-титановые сплавы, в состав которых входят биосовместимые элементы, такие как Mo, Nb, Ta и Zr, и чей модуль упругости не превышает 80 ГПа.

В качестве примера можно привести метастабильный β-титановый сплав Ti 15Mo. В его составе молибден, известный своей нетоксичностью и гипоаллергенностью, играет ключевую роль: он стабилизирует низко модульную β-фазу и существенно повышает устойчивость к коррозии. Исследования сплавов на основе титана и молибдена активно ведутся научным сообществом. Авторы работы [1] применили комплекс методов, включая рентгеноструктурный анализ, оптическую микроскопию, а также измерение микротвердости и модуля упругости, для изучения серии бинарных сплавов. Результаты показали выраженную зависимость микроструктурных параметров от содержания Mo. В свою очередь, работа [2] посвящена сравнительному анализу механических свойств и

коррозионной стойкости сплавов Ti-7,5Mo, Ti-15Mo, Ti 6Al-4V и коммерчески чистого титана. Исследования показали, что сплав Ti-15Mo имеет более высокий модуль упругости по сравнению с Ti-7,5Mo, но уступает по этому показателю чистому титану и сплаву Ti-6Al-4V. Кроме того, Ti-15Mo демонстрирует высокую пластичность, сопоставимую с пластичностью чистого титана, что является критически важным при производстве медицинских имплантатов (таблица 1). Также Ti-15Mo характеризуется отличной коррозионной стойкостью, сопоставимой с таковой у Ti и Ti-7,5Mo. В исследовании [3] были изучены механические свойства сплавов Ti-Mo с различным содержанием молибдена (5, 10, 15, 20%), и установлено, что с увеличением доли молибдена наблюдается уменьшение микротвердости и модуля упругости сплавов. В работе [4] исследование биологической активности показало, что сплав Ti-15Mo в крупнозернистом и наноструктурированном состояниях не проявляет цитотоксичности по отношению к лейкоцитам крови, что делает данные образцы биосовместимыми. Таким образом, Ti-15Mo является наиболее предпочтительным материалом из всех сплавов Ti-Mo для медицинских применений, благодаря не только выдающимся коррозионным свойствам, но также оптимальному сочетанию прочности и пластичности, что обеспечивает высокий предел выносливости.

Таблица 1

Механические характеристики титановых сплавов

	Предел прочности (МПа)	Предел текучести (МПа)	Модуль упругости (ГПа)	Удлинение (%)
Ti	673	523	108	24
Ti-7.5Mo	1019	737	70	16
Ti-15Mo	921	745	84	25
Ti-6Al-4V	1173	999	113	6

В однофазном β -состоянии сплав Ti-15Mo, характерный для псевдо- β -титановых сплавов, демонстрирует минимальный модуль упругости. Тем не менее, его прочностные характеристики уступают ($\alpha+\beta$)-титановым сплавам, что является фактором, ограничивающим его применение в ортопедической практике. Повышение прочности и предела выносливости сплава Ti-15Mo при сохранении низкого модуля упругости позволит расширить его применение, включая остеосинтез и эндопротезирование (изготовление искусственных суставов, работающих под длительными циклическими нагрузками). Стандартные технологические процессы, такие как старение, приводят к увеличению модуля

упругости вследствие выделения частиц второй фазы, наряду с ростом прочности [5, 6].

Разработка биосовместимых материалов для имплантатов, в частности, искусственных суставов, требует решения задачи повышения усталостной прочности псевдо- β сплава Ti-15Mo при одновременном сохранении его низкой жесткости.

Интенсивная пластическая деформация (ИПД) представляет собой эффективный подход к повышению усталостной прочности металлов и сплавов, минимизирующий снижение пластичности. Методы ИПД позволяют формировать ультрамелкозернистые (УМЗ) или нанокристаллические структуры за счет приложения высоких деформаций при относительно низких температурах и высоких гидростатических давлениях [7].

Библиографический список

1. Ho, W.F. Structure and properties of cast binary Ti-Mo alloys / W.F. Ho, C.P. Ju, J.H. Chern, J.H. Lin // *Biomaterials*. – 1999. – 20 (22). – P. 2115-2122.
2. Ho, W.F. A comparison of tensile properties and corrosion behavior of cast Ti 7,5Mo with c.p, Ti-15Mo and Ti-6Al-4V alloys / W.F. Ho // *Journal Alloys and Compounds*. – 2008. – 464. – P. 580-583.
3. Chen, Y. Microstructures and properties of titanium alloys Ti-Mo for dental use / Y. Chen, L. Xu, Zn. Liu, F. Kong, Z. Chen // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2006. – 16. – P. 824-828.
4. V. V. Polyakova, S. A. Gatina, K. M. Novruzov, N. Yu. Anisimova, M. M. Kiselevskiy & N. A. Enikeev. EFFECT OF THE STRUCTURAL-PHASE COMPOSITION ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND BIOCOMPATIBILITY OF NANOSTRUCTURED TI-15MO ALLOY//*Physical Mesomechanics*. 2025.
5. Bowen, A.W. Strength Enhancement in metastable β -titanium alloy: Ti-15Mo / A.W. Bowen // *Journal of materials science*. – 1977. – P.1355-1360.
6. Jablovkov, V.R. The Application of Ti-15Mo Beta Titanium Alloy in High Strength Structural Orthopaedic Applications / V.R. Jablovkov, M.J. Nutt, M.E. Richelsoph, H.L. Freese // *Journal of ASTM International*. – 2005. – 2, No.8. – P. 83 100.
7. Валиев, Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура, свойства / Р.З. Валиев, И.В. Александров – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.

© Мифтахова Д.Т., 2025

УДК 620.22

Д.И. АТАНГУЛОВА, Э.И. ЯКУПОВА

Atangulovadi@gmail.com

Науч. руковод. – д. ф.- м. н. Д.В. ГУНДЕРОВ

Уфимский университет науки и технологий

ВЛИЯНИЕ КВД МАЛОЙ СТЕПЕНИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗА

Аннотация: исследовано влияние КВД с $n=0,1$ на железо. Оценка проскальзывания показывает, что при КВД $n=0,1$ проскальзывание нет. Происходит уширение пиков РСА, что говорит о накоплении плотности дислокаций. Показано увеличение микротвердости после КВД, обусловленное накоплением дефектов кристаллической решетки. Отжиг при 500°C в течение 1 часа снижает микротвердость, поскольку в исходном горячекатаном образце происходит процессы возврата и рекристаллизации.

Ключевые слова: КВД; проскальзывание; железо.

Введение

Кручение под высоким давлением (КВД) – это эффективный метод, используемый для измельчения структуры металлических материалов до нанокристаллического состояния в лабораторных условиях с применением дисковых образцов [1,2]. Данный метод представляет интерес, поскольку КВД может индуцировать в сплавах необычные фазовые превращения [1,2], а в ряде многокомпонентных систем – приводит к аморфизации [1,2].

КВД заключается в следующем: дисковый образец толщиной до 1 мм размещается между бойками, изготовленными из высокопрочной инструментальной стали. Оснастка с бойками монтируется на гидравлический пресс, что позволяет прикладывать к образцу постоянное давление величиной 5 ГПа и более. Деформация осуществляется путем вращения нижнего бойка относительно верхнего на заданное число оборотов [1].

Согласно данным многочисленных исследований [1–3], с ростом числа оборотов (n) структура материала измельчается, достигая состояния «насыщения» при $n \approx 5$. Превышение этого порога не приводит к дальнейшему заметному измельчению структуры [1,2]. Условием реализации сдвиговой деформации при КВД является превышение касательных напряжений трения между образцом и бойками над пределом текучести материала на сдвиг (τ). Однако для многих материалов высокой и средней прочности наблюдается значительное расхождение между экспериментально достигнутой ($\gamma_{\text{эксп}}$) и расчетной деформацией [3-6]. Это

явление, известное как «проскальзывание», возникает, когда $\tau_{тр}$ оказывается ниже τ , что приводит к проскальзыванию бойка по поверхности образца. Следует отметить, что возможность проскальзывания была предсказана ещё Бриджменом в первых исследованиях КВД [4].

Для оценки проскальзывания использовался метод совместного КВД двух половин диска [4,7-10]. На мягких металлах (Cu, Al) проскальзывание незначительно [7-10]. Однако для прочных материалов, таких как сталь, существенное проскальзывание наблюдается уже до первого оборота, [7-10]. При этом, несмотря на проскальзывание, структура всех исследованных материалов измельчалась до нанокристаллической [7-10].

Ранее различными группами было уже выполнено большое количество исследований влияния КВД на структуру и свойства железа и низкоуглеродистых сталях. В работе [11] установлено, что процесс формирования наноразмерной микроструктуры при КВД в Армко - Fe носит стадийный характер. Первая стадия при КВД в интервале от 1/4 до 1 оборота бойков, характеризуется ячеистой структурой со средним размером фрагментов или ячеек ~ 400 нм и разориентировкой в $2-3^\circ$ между соседними элементами. Вторая стадия, наблюдаемая при 1–3 обороте бойков, отличается наличием переходной структуры, состоящей из ячеек и зёрен. При этом, увеличение степени деформации приводит к уменьшению среднего размера ячеек и увеличению их углов разориентации. В третьей стадии $n > 3$ оборотов образуется однородная наноразмерная микроструктура со средним размером зёрен около 100 нм.

Целью данного исследования является анализ влияния в начальных этапах КВД на структуру и свойство Fe и оценка проскальзывания.

Материалы и методы

В качестве материала для исследования была выбрана Армко - Fe в виде прутка диаметром 10 мм. Армко – Fe характеризуется умеренной прочностью с $\sigma_b \approx 290$ МПа, пределом текучести $\sigma_{0,2} \approx 150$ МПа, относительное удлинение при разрыве 38%, твёрдость 130 НВ.

КВД проводились на установке КВД «СКРУДЖ-200» в УУНиТ. Бойки были изготовлены из стали Р6М5, при этом нижний боек имел рабочую канавку диаметром 10 мм и глубиной 0,5 мм, а верхний боек был выполнен плоским. Исследованию подвергались образцы диаметром 10 мм и толщиной 1 мм.

Рентгеноструктурный анализ проводился на дифрактометре Bruker D2 Phaser при комнатной температуре (использовалось излучение Cu-K α , съёмка проводилась в интервале брэгговских углов 2θ от 20° до 130°). Расшифровка фаз происходила в программном пакете Diffract.Eva.

Микротвёрдость образцов измеряли на установке DuraScan 50 (по ГОСТ 2999-75 твердость по Виккерсу), при нагрузке 0,02 кг в течении 10 с. Вид образцов снимали на фотоаппаратах смартфонов.

Результаты

Для оценки проскальзывания подготовили образец, надрезом на электроэрозионном станке и рядом с ним провели чёрный маркер, который указан на рисунке 1.а. Далее провели КВД на угол 36° (число оборотов наковален $n = 0,1$). После определения расположения маркеров исходных и после КВД, получили угол

смещения 29° . Расчет величины проскальзывания показал, что она равна 20%, что можно считать незначительной.

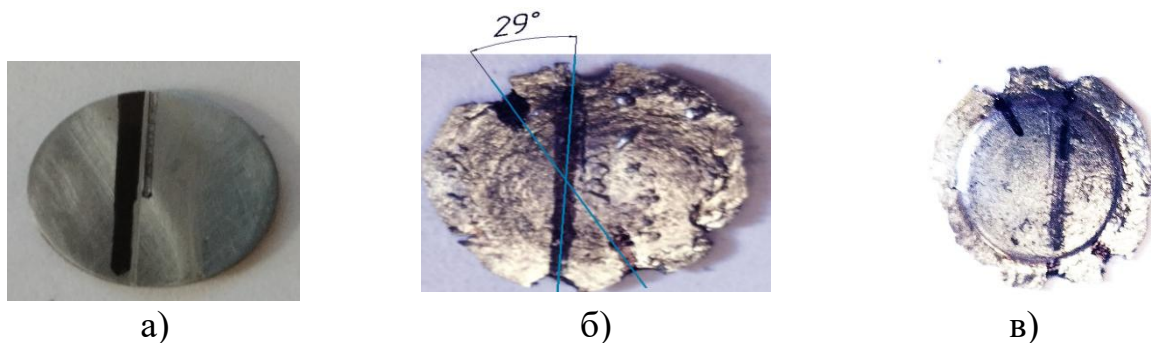


Рис. 3. а) подготовленный образец для КВД; б) задняя сторона образца с углом смещения; в) передняя сторона образца с вырезом и маркером.

Таким образом, оценка величины проскальзывания показала, что на начальной стадии КВД (при $n=0,1$) его влияние незначительно. Наблюдаемая деформация соответствует формуле, предсказанной общепринятой моделью.

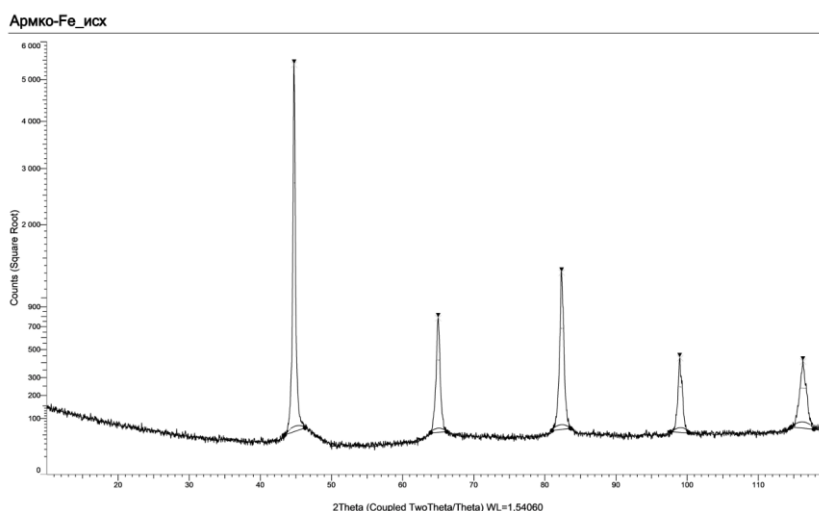


Рис. 2. РСА исходного состояния

Таблица 1

Параметры пиков исходного состояния

Положение пика	Пик	Интенсивность	Уширение
44.65	110	1000	0.1636
64.93	200	62.3	0.2835
82.27	211	156	0.2558
98.88	220	66.2	0.2981
116.27	310	61.0	0.3760

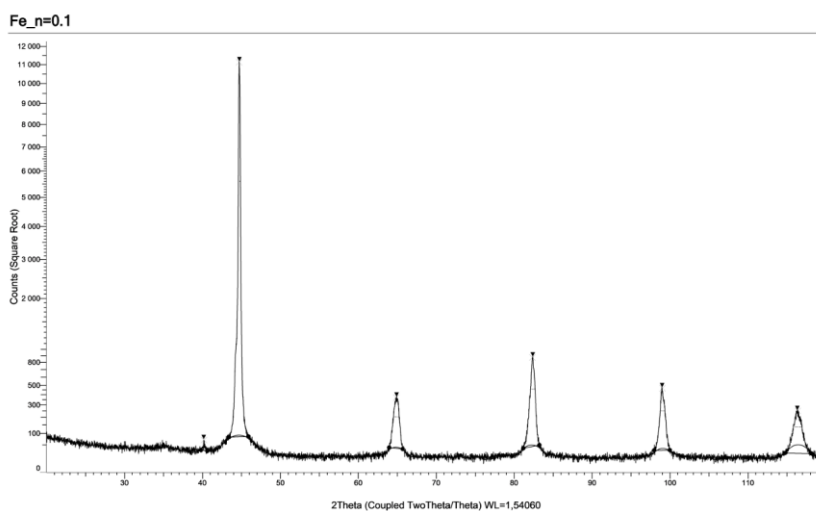


Рис. 3. РСА после КВД $n = 0,1$

Таблица 3

Параметры пиков после КВД при $n = 0,1$

Положение пика	Пик	Интенсивность	Уширение
44.65	110	1000.0	0.2165
64.90	200	71.6	0.4355
82.27	211	159.8	0.3775
98.89	220	59.9	0.4420
116.24	310	43.8	0.7833

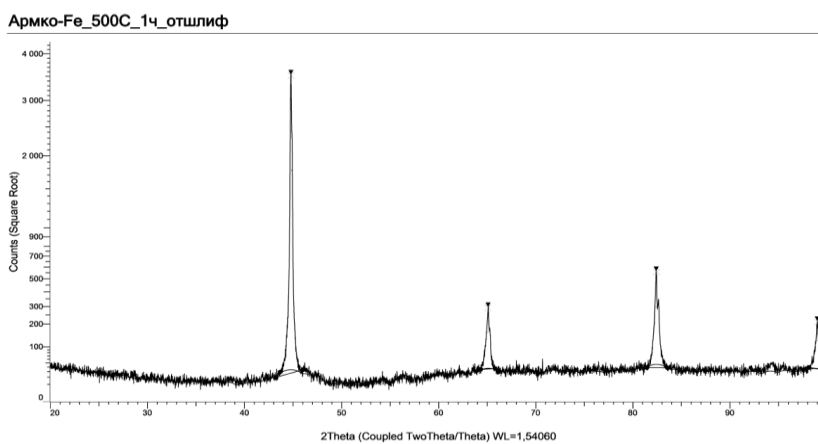


Рис. 4. РСА после отжига 500 C^0 в течении 1 часа

Таблица 4

Параметры пиков после отжига 500 C^0 в течении 1 часа

Положение пика	Пик	Интенсивность	Уширение
44.71	110	1000.0	0.1122
65.02	200	80.4	0.1966
82.40	211	205.8	0.1776
99.04	220	56.3	0.2314

Таким образом, рентгеноструктурный анализ показал, что в исходном состоянии полуширина пика основной фазы составляет 0,1636, а после деформации ($n=0,1$) она увеличивается до 0,2165. Это свидетельствует о значительном накоплении дислокаций и измельчении структуры в результате деформации, что и привело к уширению пиков на рентгенограмме. Отжиг при 500 °С в течение 1 часа вызывает небольшое дополнительное уменьшение полуширины. Вероятной причиной этого является наличие начального наклёпа в исходном материале (горячекатанном), который релаксирует при отжиге 500 °С.

Микротвердость в исходном состоянии составила 127 HV в центре и 134 HV на периферии. После деформации $n=0,1$ наблюдалось упрочнение материала. Микротвердость возросла до 211 HV в центре и 226 HV на периферии. Этот рост обусловлен накоплением дефектов кристаллической решетки (дислокаций) в процессе деформации. Последующий отжиг 500°С в течение 1 часа привел к выраженному разупрочнению исходного состояния, Hv снизилась до 112 HV в центре и 115 HV на периферии. Это свидетельствует о процессах возврата и рекристаллизации, в ходе которых внутренние напряжения снимаются, а структура становится более равновесной и мягкой.

Выводы

Проведенное исследование влияния КВД на Армко-Fe показало, что на начальной стадии ($n=0,1$) проскальзывание отсутствует, а деформация соответствует общепринятой модели. РСА выявил значительное уширение дифракционных пиков (с 0,1636 до 0,2165), что в сочетании с ростом микротвердости подтверждает интенсивное накопление дислокаций и измельчение структуры. Таким образом, КВД является эффективным методом упрочнения.

Библиографический список

1. Валиев, Р. З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией: учебное пособие / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – Москва: Логос, 2000. – 272 с.
2. Edalati, K. A review on high-pressure torsion (HPT) from 1935 to 1988 / K. Edalati, Z. Horita // *Materials Science and Engineering: A*. – 2016. – Vol. 652. – P. 325–352. – DOI: 10.1016/j.msea.2015.11.074.
3. Edalati, K. The significance of slippage in processing by high-pressure torsion / K. Edalati, Z. Horita, T. G. Langdon // *Scripta Materialia*. – 2009. – Vol. 60, no. 1. – P. 9–12. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2008.08.042.
4. Adachi, N. Cause of hardening and softening in the bulk glassy alloy Zr50Cu40Al10 after high-pressure torsion / N. Adachi, Y. Todaka, Y. Yokoyama, M. Umemoto // *Materials Science and Engineering: A*. – 2015. – Vol. 627. – P. 171–181. – DOI: 10.1016/j.msea.2015.03.056.
5. Kovács, Z. Localization of plastic deformation along shear bands in Vitreloy bulk metallic glass during high pressure torsion / Z. Kovács, E. Schafner, P. Szommer, Á. Révész // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2014. – Vol. 593. – P. 207–212. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.01.079.

6. Dmowski, W. Structural rejuvenation in a bulk metallic glass induced by severe plastic deformation / W. Dmowski, Y. Yokoyama, A. Chuang, Y. Ren, M. Umemoto, K. Tsuchiya, A. Inoue, T. Egami // *Acta Materialia*. – 2010. – Vol. 58, no. 2. – P. 429–438. – DOI: 10.1016/j.actamat.2009.09.021.
7. Gunderov, D. V. Observation of shear bands in the Vitreloy metallic glass subjected to HPT processing / D. V. Gunderov, A. A. Churakova, E. V. Boltynjuk, E. V. Ubyivovk, V. V. Astanin, R. N. Asfandiyarov, R. R. Valiev, W. Xioang, J. T. Wang // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2019. – Vol. 800. – P. 58–63. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.043.
8. Gunderov, D. V. Some Slippage Issues in High-Pressure Torsion Using Cu and Ti Samples as an Example / D. V. Gunderov, R. N. Asfandiyarov, V. V. Titov, S. D. Gunderova, V. V. Astanin // *Materials*. – 2023. – Vol. 16, no. 1. – P. 162. – DOI: 10.3390/ma16010162.
9. Gunderov, D. V. Slippage during High-Pressure Torsion: Accumulative High-Pressure Torsion—Overview of the Latest Results / D. V. Gunderov, R. N. Asfandiyarov, V. V. Astanin, A. V. Sharafutdinov // *Metals*. – 2023. – Vol. 13, no. 8. – P. 1340. – DOI: 10.3390/met13081340.
10. Гундеров, Д. В. The influence of equipment features on workpiece slippage under high pressure torsion / Д. В. Гундеров, А. М. Мавлютов, Р. Н. Асфандияров, В. В. Титов, С. Д. Гундерова // *Letters on Materials*. – 2024. – Т. 14, № 4 (56). – С. 359–364.
11. Valiev, R. Z. Structure and deformation behaviour of Armco iron subjected to severe plastic deformation / R. Z. Valiev, Yu. V. Ivanisenko, E. F. Rauch, B. Baudelet // *Acta Materialia*. – 1996. – Vol. 44, no. 12. – P. 4705–4712.

© Атангулова Д.И., 2025

Р.Р. ГАББАСОВ¹, М.П. ШАПКИН^{1,2}, Р.Г. ХАЗГАЛИЕВ¹

Awesome.radim@yandex.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, Э.В. ГАЛИЕВА

¹*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН*

²*Уфимский университет науки и технологий*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ТВЕРДОФАЗНОЙ СВАРКЕ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Аннотация: проведено численное моделирование полей напряжений при твердофазной сварке жаропрочных сплавов ЭК61 и ЭП741НП. Для решения задачи использовался метод конечных элементов. В результате расчета получены пространственные распределения напряжений и деформаций.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, твердофазная сварка, численное моделирование.

В авиационном двигателестроении жаропрочные никелевые сплавы используются для изготовления деталей газотурбинных двигателей, таких как валы, диски и лопатки [1–3]. Одним из стратегических направлений развития данной отрасли является создание облегченных и экономически эффективных конструкций. Достижению этих целей способствует внедрение биметаллических сварных узлов типа «диск-вал», «блиск» позволяющих оптимизировать вес и эксплуатационные характеристики [4–6]. Для создания качественных соединений из жаропрочных никелевых сплавов наиболее подходящим методом представляется твердофазная сварка в условиях сверхпластичности [7–9]. Проведение физических экспериментов по подбору условий сварки для исследуемых материалов требует значительных ресурсов. Численное моделирование позволяет существенно сократить количество проведения экспериментов, обеспечивая анализ распределения напряжений и деформаций.

Целью данной работы является проведение численного анализа распределение полей напряжений и деформаций по объему заготовки, для последующей оптимизации режима твердофазной сварки.

Материалами для исследований были выбраны жаропрочный сплавы на основе никеля ЭК61 и ЭП741НП. Для моделирования деформирования соединяемых заготовок при твердофазной сварке использовали схему одноосного сжатия. Деформирование осуществляли перемещением верхнего штампа со скоростью 0,0022 мм/сек при этом температуру соединяемых материалов задавали со стадийным повышением с 850°C до 1000°C. Свойства сплавов определены как температурно-зависимые функции на основе экспериментальных данных. Коэффициент трения между образцами и штампами был установлен на уровне 0,3. Размер исходной сетки для образцов составил 10000 элементов.

На рисунке 1 представлена исходная формы вычислительной модели. Для упрощения вычислений штампы заданы как жесткое тело.

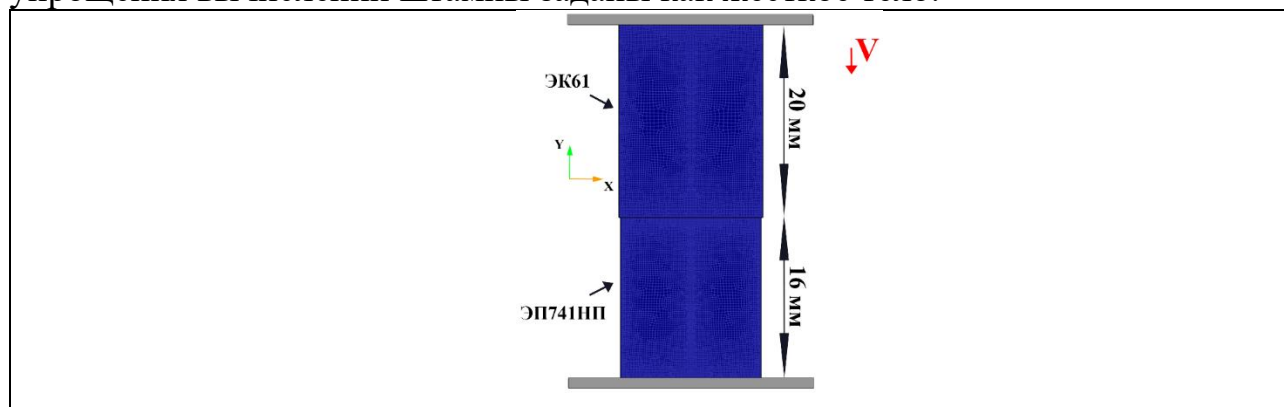


Рис. 1. Исходная форма вычислительной модели

На рисунке 2 показаны распределения напряжений (рис. 2а-в) и деформаций (рис. 2г) на конечной стадии моделирования твердофазной сварки. В зоне контакта заготовок сформирована застойная зона. В сплаве ЭП741НП напряжения локализуются в центральной части образца, в то время как в сплаве ЭК61 напряжения распределены равномерно по большей части объема. В зоне соединения со стороны сплава ЭК61 развиты растягивающие напряжения, что видим на картине распределения напряжений вдоль оси X (рис.2б). В свою очередь в зоне соединения со стороны сплава ЭП741НП преобладают преимущественно сжимающие напряжения. Напряжения вдоль оси Y (рис.2в) преимущественно сжимающие по всему объему соединяемых материалов. Большей деформации был подвержен сплав ЭК61, что видно по распределению полей деформации (рис.2г).

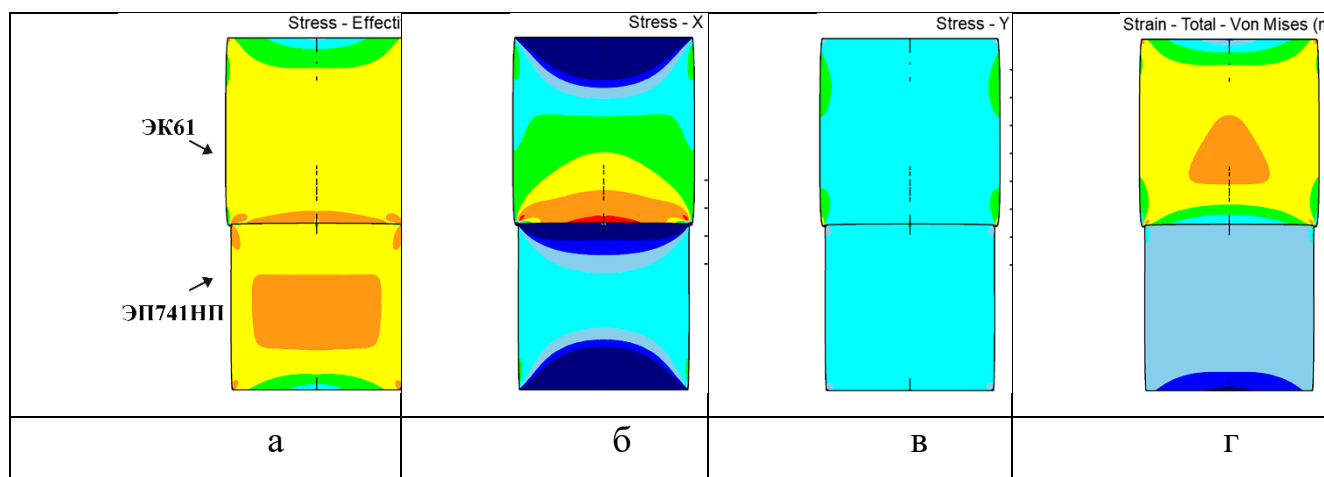


Рис. 2. Результаты численного моделирования твердофазной сварки.

Эквивалентные напряжения (а); Нормальное напряжение по оси X(б), по оси Y (в);
Интенсивные поля деформаций (г)

Разработанная модель позволяет прогнозировать уровень, характер распределения напряжений и деформаций, что может быть использовано для

оптимизации параметров твердофазной сварки с целью повышения надежности сварных соединений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания ИПСМ РАН №124022900007-9

Библиографический список

1. Кишкин С.Т. Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов: Избранные труды (К 100-летию со дня рождения). М.: Наука. 2006. 407 с.
2. Логунов А.В. Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин. М.: ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии». 2017. 854 с.
3. Reed R.C. The superalloys: Fundamentals and Applications. Cambridge University Press. 2006. 372 p.
4. Магеррамова Л.А. Применение биметаллических блисков, изготавливаемых методом ГИП из гранулируемых и литейных никелевых суперсплавов, для увеличения надежности и ресурса газовых турбин // Вестник УГАТУ. 2011. Т.15. № 4(44). С. 33–38.
5. Zhou J., Zhang, Y., Qin, F., Zhang, X., Wang, H., Liu, Z., Zhang, W., Huang, C., Zhang, C. Analysis of microstructural evolution and mechanical properties of FGH101 powder superalloy and IN718 deformed superalloy via inertia friction welding // Frontiers in Materials. 2025. Т. 11. P. 1544584.
6. Wang, Z., Huang, S., Zhang, W., Zhang, B., Ning, Y. Microstructure characterization and mechanical property of the GH4065A superalloy inertia friction welded joints // Metals. 2022. 12(8). P. 1390.
7. Galieva E.V., Klassman E.Y., Valitov V.A., Gabbasov R.R., Tagirova A.A., Stepukhov E.M. Microstructure and strength of solid-state joints of dissimilar nickel-based alloys // Letters on Materials. 2024. Т.14. №4. P. 453-459.
8. Galieva E.V., Klassman E.Y., Valitov V.A., Musabirov I.I. Pressure welding of heat-resistant EK61 and EP975 nickel-based superalloys at a temperature of 900°C // Letters on Materials. 2023. 13(4). P. 347-352.
9. Galieva E.V., Valitov V.A., Klassman E.Y., Ganeev A.A., Gabbasov R.R., Stepukhov E.M., Khafizov I.I. Mechanical properties and weldability of powder EP741NP nickelbased superalloy with an ultrafine-grained mixed type microstructure, Letters on Materials. 2023. 13(4s). P. 493-498.

© Габбасов Р.Р., Шапкин М.П., Хазгалиев Р.Г., 2025

УДК 669.721.5

А.А. ГАЙСИНА

azaliya021@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. М.А. НИКИТИНА

Уфимский университет науки и технологий

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ИПД ОБРАБОТКИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА МАГНИЕВОГО СПЛАВА Mg-0.8Mn ПРИ КОМНАТНОЙ И ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Аннотация: в работе представлены исследования влияния интенсивной пластической деформации (ИПД) методом кручения под высоким давлением (КВД) на микротвердость и механические свойства магниевого сплава Mg-0.8Mn. КВД при комнатной и повышенной температуре увеличивает микротвердость сплава. Испытания на кручение выявили снижение прочности при росте пластичности при нагреве, что свидетельствует о сверхпластичности.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, кручение под высоким давлением, микротвердость, сверхпластичность, механические свойства.

Магний и его сплавы привлекают значительное внимание в контексте создания легких и высокопрочных конструкционных материалов. Однако их широкое промышленное применение сдерживается ограниченной пластичностью и обрабатываемостью при комнатной температуре. Эта проблема обусловлена гексагональной плотноупакованной кристаллической решёткой магния, в которой при низких температурах может быть активировано в основном только базисное скольжение. Данная система скольжения не удовлетворяет критерию фон Мизеса, требующему наличия пяти независимых систем скольжения для обеспечения однородной пластической деформации поликристаллов. В результате магний демонстрирует сильную анизотропию механических свойств, плохую пластичность и высокое деформационное упрочнение [1-2].

Решением этой проблемы является формирование структуры материала для активации дополнительных механизмов деформации. Одним из наиболее эффективных подходов является интенсивная пластическая деформация (ИПД), позволяющая получать ультрамелкозернистые (УМЗ) структуры. В таких материалах значительный объём занимают границы зёрен, которые могут способствовать иным механизмам деформации, таким как зернограничное скольжение и вращение, обычно характерным для повышенных температур [3].

Легирование марганцем (Mn) является перспективным способом модификации механических свойств магния. Исследования показывают, что марганец не только способствует измельчению зерна, но и может существенно снижать критическое напряжение сдвига для небазальных систем скольжения. В

частности, в сплаве Mg-0.8Mn с ультрамелкозернистой структурой была зафиксирована аномально высокая пластичность при комнатной температуре. Предполагается, что это связано с сегрегацией атомов марганца на границах зёрен, что увеличивает их энергию и подвижность, облегчая процессы зернограницного скольжения [4].

Материал и методика проведения испытаний

В качестве материала исследования был выбран магниевый сплав Mg-0.8Mn. Главным легирующим элементом является марганец, который вводится в магний для повышения коррозионной стойкости и прочности сплава. Марганец, входящий в состав сплава, способствует образованию термостабильных дисперсных частиц интерметаллидных фаз, которые подавляют рост зерна при высокотемпературных воздействиях и повышают рекристаллизационную температуру. Благодаря этому формируется стабильная мелкозернистая структура, что положительно сказывается на комплексе механических свойств готового изделия.

Для исследования микротвердости использовалось оборудование ЦКП «Нанотех», автоматический микротвердомер Emco-Test Durascan 50, сер. № 119. Нагрузка составляла 0,5 кг, количество точек 20. Микротвердость рассчитывалась по методу Виккерса.

Для исследования механических характеристик магниевого сплава Mg-0,8Mn испытания проводились на установке интенсивной пластической деформации кручения под гидростатическим давлением «СКРУДЖ-200». Сплав подвергали 10 и 20 оборотам КВД при комнатной температуре, удельном сжимающем давлении 6 Гпа и скорости вращения бойков 1 об/мин.

Результаты

Результаты измерений микротвердости сплава Mg-0,8Mn в исходном состоянии и после интенсивной пластической деформации кручением под высоким давлением (КВД) представлены на гистограмме (рис. 1).

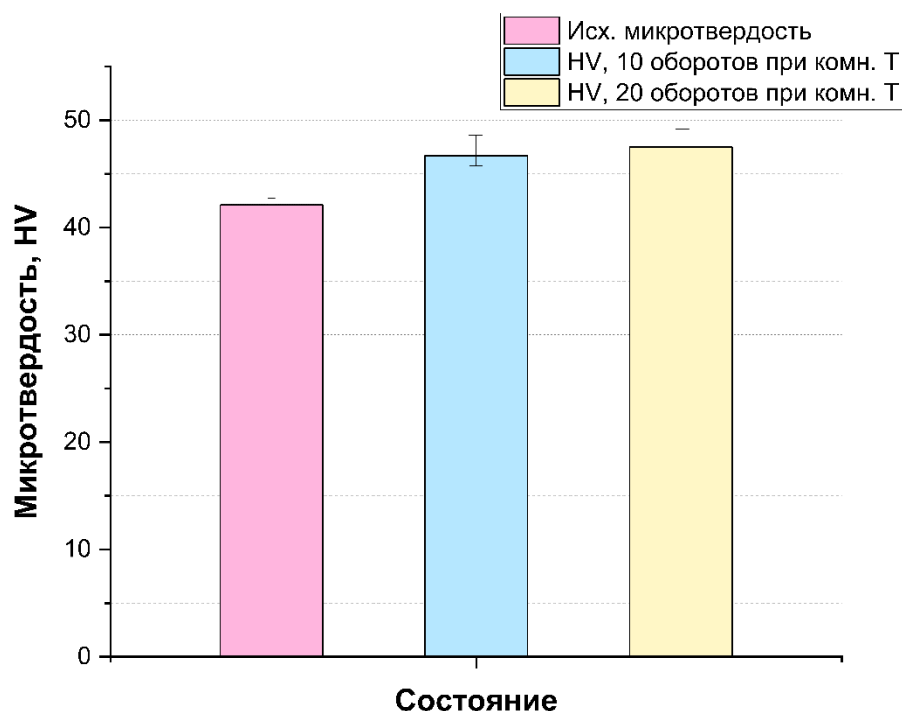


Рис. 1. Зависимость микротвердости от состояния образца

Сплав в исходном состоянии обладает наименьшей микротвердостью. Это характерно для магниевых сплавов, которые обычно в исходном состоянии имеют сравнительно крупное зерно и низкую плотность дефектов кристаллической решетки.

При 10 и 20 оборотах КВД наблюдается увеличение микротвердости по сравнению с исходным состоянием. Это увеличение является прямым следствием процессов упрочнения, вызванных интенсивной пластической деформацией. КВД приводит к измельчению зеренной структуры. Границы зерен являются эффективными барьерами для движения дислокаций, что повышает твердость материала.

После выполнения механических испытаний на растяжение был построен график зависимости «напряжение–деформация» для четырех состояний сплава Mg-0,8Mn, подвергнутого КВД (рис. 2). Механические характеристики приведены в таблице 1.

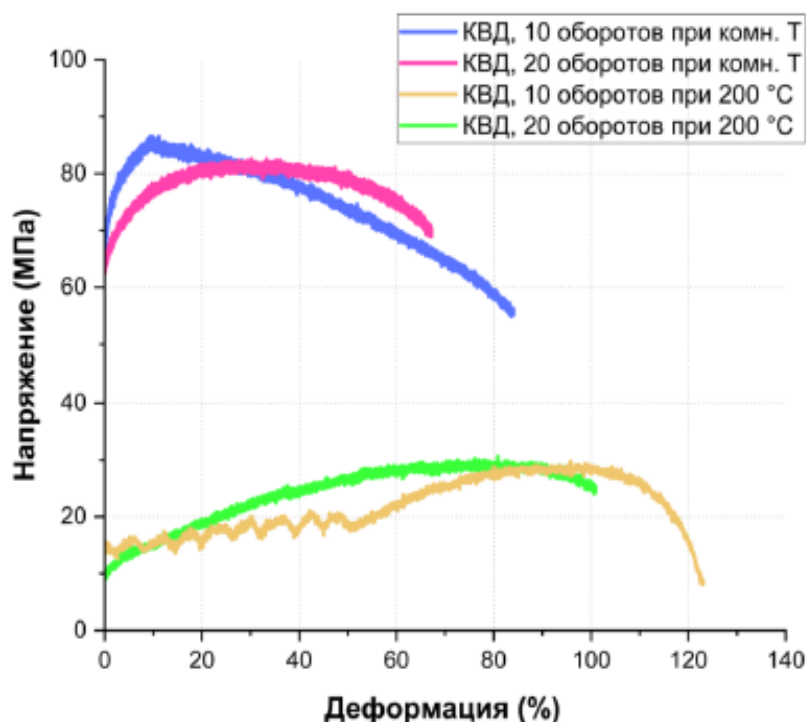


Рис. 2. Кривые растяжения сплава Mg-0,8Mn

Таблица 1

Механические характеристики сплава Mg-0,8Mn

	20 °С			200 °С		
	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
КВД, 10 оборотов	80±5	86±2	85±2	15±5	30±2	120±5
КВД, 20 оборотов	70±5	82±2	70±2	10±5	30±2	100±2

Увеличение числа оборотов при комнатной температуре с 10 до 20 приводит к снижению как прочностных характеристик ($\sigma_{0,2}$ уменьшается на ~10%, σ_b ~на 4%), так и пластичности (δ снизился на ~12%).

При нагреве до 200 °С механические свойства изменяются: прочность падает, материал проявляет признаки сверхпластичности, демонстрируя высокое относительное удлинение (100-120%). Это поведение объясняется формированием ультрамелкозернистой структуры в процессе КВД, которая идеально подходит для реализации механизма зернограничного скольжения при повышенных температурах.

Выводы

1) ИПДК приводит к увеличению микротвердости сплава Mg-0,8Mn. Наибольшие значения микротвердости наблюдаются после обработки КВД при 10 и 20 оборотах, что связано с измельчением зеренной структуры и увеличением плотности дефектов кристаллической решётки.

2) КВД при температуре 200°С приводит к резкому снижению прочностных характеристик ($\sigma_{0,2}$ и σ_b уменьшаются в несколько раз) и значительному увеличению пластичности (δ возрастает до ~120%).

Библиографический список

1. C.C. Li. Superior ductility Mg-Mn extrusion alloys at room temperature obtained by controlling Mn content / C.C. Li, Z.H. Xia, X.G. Qiao a, I.S. Golovin, M.Y. Zheng // Materials Science and Engineering: A. – 2023. – Т. 869.
2. Hidetoshi Somekawa. Room temperature grain boundary sliding behavior of fine-grained Mg-Mn alloys / Hidetoshi Somekawa, Dudekula Althaf Basha, Alok Singh // Materials Science and Engineering: A. – 2018. – Т. 730. С. 355-362.
3. Рейнор Г. В. Металловедение магния и его сплавов: [Пер. с англ.]. – М.: Металлургия, 1964. – 250 с.
4. C.C. Li. Achieving exceptional room-temperature ductility in ultrafine-grained Mg-0.8Mn alloy via high pressure torsion / C.C. Li, R.E. Kim, X.G. Qiao, W.T. Sun, L. Yuan, H.S. Kim, T. Sakai, R.Z. Valiev, M.Y. Zheng // Journal of Alloys and Compounds – 2025. – Т. 1020.

© Гайсина А.А., 2025

А.И. ГОМЗИН, Н.А. ХАЙБУЛИНА

andre-gomzi@yandex.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, вед. научн. сотр. Е.В. БОБРУК

Уфимский университет науки и технологий

ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОМПОЗИТА СИСТЕМЫ МАГНИЙ-БОР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

Аннотация: исследована возможность получения композиционного материала из магниевой матрицы, армированной непрерывным волокном бора, в режиме сверхпластичности. Ультрамелкозернистая структура с размером зерна 200 ± 5 нм, сформированная в сплаве МА14 обработкой кручением под высоким давлением, обеспечила реализацию низкотемпературной сверхпластичности при температуре 240 °С. Предел прочности композита при изгибе составил 620 МПа. Микроструктурный анализ показал отсутствие дефектов и хрупких фаз на границе раздела.

Ключевые слова: магниевый композит; борное волокно, сверхпластичность, кручение под высоким давлением, наноструктура.

Введение

Развитие таких высокотехнологичных отраслей как авиация и космонавтика напрямую зависит от создания конструкционных материалов с высокими удельными прочностными характеристиками. Одним из наиболее перспективных материалов для достижения высоких удельных показателей является магний, обладающий самой низкой плотностью среди всех конструкционных металлов. Однако широкое применение магния ограничено его относительно невысокой прочностью и, что особенно важно, сложностью процессов его пластического деформирования.

Эффективным методом получения высокопрочных материалов является создание на основе легких сплавов композиционных материалов (КМ) с наполнителем из волокон. В таком сочетании матрица обеспечивает передачу нагрузки и форму изделия, а волокна – прочность и жёсткость, сохраняя при этом довольно низкую плотность. Наибольший упрочняющий эффект в КМ достигается при использовании непрерывных волокон с высокими прочностью и модулем упругости, такими как борные волокна [1].

Исторически наиболее простым и технологичным методом получения таких композитов считалась жидкофазная пропитка волоконного каркаса расплавом матричного сплава. Однако ключевой проблемой, с которой столкнулись исследователи в СССР и за рубежом ещё во второй половине XX века (например, при разработке отечественных материалов типа «магний-бор»), является интенсивное химическое взаимодействие магния и бора [2]. При температуре

плавления магния 650 °С на границе раздела фаз происходит активное образование хрупких боридов магния (преимущественно MgB_2 [3]). Этот процесс приводит к деградации поверхности волокон, резкому снижению их прочности и, как следствие, к низким механическим характеристикам всего композита. Несмотря на попытки ингибировать эту реакцию различными методами (например, нанесением барьерных покрытий на волокна), стабильного и воспроизводимого результата достичь не удавалось, что в итоге помешало широкому внедрению боромагниевого КМ.

Принципиальным решением данной проблемы могло бы стать снижение температуры компактирования КМ ниже порога активного взаимодействия. Однако низкая пластичность магния в твердом состоянии затрудняет полное заполнение межволоконного пространства [4]. В этой связи особый интерес представляет явление сверхпластичности (СП), которое демонстрируют многие магниевые сплавы с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой в определенных термомеханических условиях [5]. Использование этого режима деформации открывает возможность получения плотного, беспористого материала без повреждения волокон.

Таким образом, целью настоящей работы являлось исследование возможности получения композиционного материала «магниева матрица – борное волокно» методом твердофазного компактирования в режиме сверхпластичности на примере сплава МА14.

Материалы и методики

Для получения УМЗ структуры из магниевого сплава МА14 были подготовлены диски диаметром 20 мм и толщиной 1,4 мм. Образцы подвергались предварительному отжигу при 410 °С в течение 13 ч с последующей обработкой кручением под высоким давлением (КВД) в режиме 10 оборотов при квазигидростатическом давлении 6 ГПа, скорости 1 об/мин и комнатной температуре.

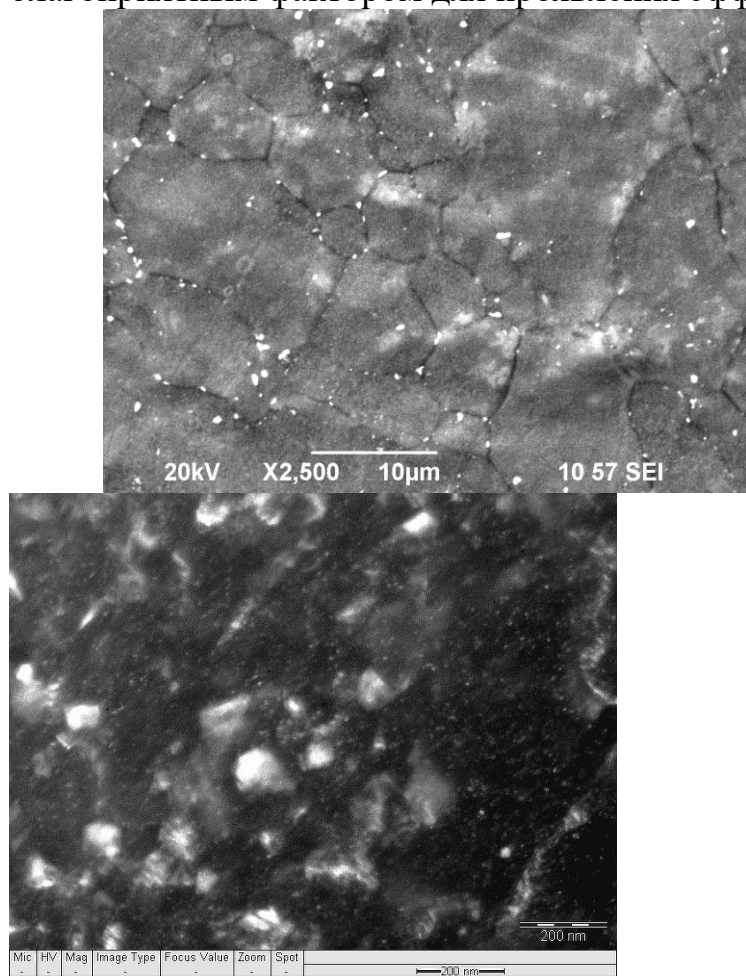
После механического шлифования полученные образцы совместили с однонаправленной лентой борного волокна диаметром 140 мкм (три слоя МА14 и два слоя борного волокна). Процесс компактирования композита проводили со скоростью деформации 10^{-3} с^{-1} при температуре 240 °С и остаточном давлении (в вакууме) 6×10^{-4} мбар. Максимальная приложенная осевая нагрузка составляла 99 кН.

Исследование микроструктуры исходной магниевой матрицы и полученного композиционного материала выполняли с использованием растровой (РЭМ) и просвечивающей (ПЭМ) электронной микроскопии. Компактирование КМ и механические испытания образцов проводили на универсальной испытательной машине Instron 5982.

Результаты

Для реализации режима сверхпластичности и обеспечения полного заполнения межволоконного пространства матрицей было проведено измельчение структуры магниевого сплава МА14. Обработка КВД позволила сформировать в материале УМЗ состояние с размером зерна $200 \pm 5 \text{ нм}$ (рис. 1, б), в исходном

отожженном состоянии размер зерен составлял 20 ± 1 мкм (рис. 1, а). Сплав в обоих состояниях характеризовался равноосной морфологией зёрен, что является благоприятным фактором для проявления эффекта СП.



а

б

Рис. 1. Микроструктура сплава МА14:
а) после отжига (РЭМ); б) после КВД обработки (ПЭМ)

Исследование механических свойств УМЗ сплава МА14 при температуре 240°C выявило ярко выраженный эффект сверхпластичности. Механические испытания образцов, вырезанных из центральной части дисков после КВД, проводились при температуре 240°C с различными скоростями деформации (рис. 2). Максимальное относительное удлинение (310 %) при минимальном уровне напряжений течения было достигнуто при скорости деформации 10^{-3} с^{-1} , в связи с чем данный режим был выбран для процесса компактирования КМ.

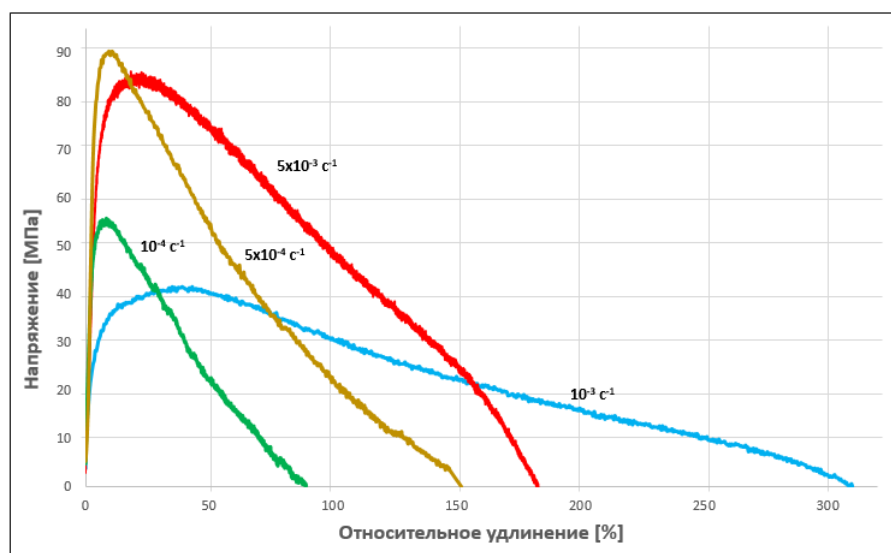


Рис. 2. Кривые растяжения образцов с различными скоростями ($T=240^{\circ}\text{C}$)

Процесс твердофазного компактирования слоёв УМЗ магния и борного волокна при данных условиях позволил получить композит высокого качества. Анализ микроструктуры поперечного сечения (рис. 3, а) подтвердил полное заполнение матрицей межволоконного пространства и отсутствие пор или других дефектов. Наблюдалась качественная диффузионная сварка между отдельными слоями магния, что говорит об эффективности выбранного термомеханического режима. Объёмная доля волокон в композите составила 11 %.

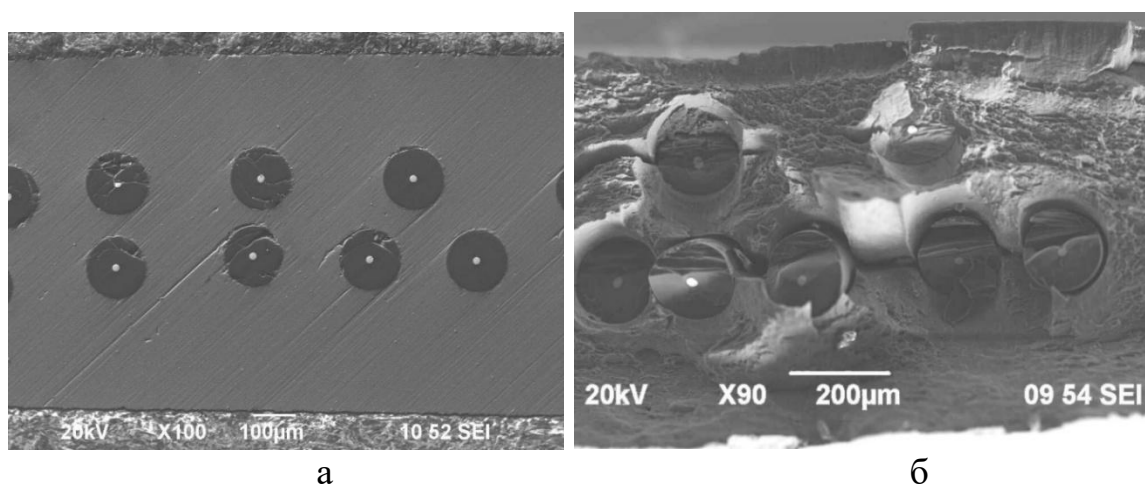


Рис. 3. Композит Mg-B (РЭМ): шлиф в поперечном сечении (а); излом после испытаний на трехточечный изгиб (б)

В результате механических испытаний полученного композита предел прочности при изгибе составил 620 МПа, что существенно превышает прочность магниевых сплавов ZK60 (~350 МПа), аналога МА14 [6]. Подобное повышение прочности обусловлено сочетанием двух факторов: армирования борными волокнами и упрочнения магниевой матрицы в результате КВД. Анализ поверхности излома (рис. 3, б) выявил развитый рельеф без признаков хрупкого разрушения, что косвенно свидетельствует об отсутствии образования хрупких интерметаллидных фаз на границе раздела матрица-волокно.

Выводы

1. Обработка сплава МА14 кручением под высоким давлением позволила получить ультрамелкозернистое состояние с размером зерна 200 ± 5 нм, что обеспечило проявление эффекта сверхпластичности в тонком фольговом материале (толщиной менее 1 мм) при температуре 240 °С с относительным удлинением 310 %.

2. Установленные температурно-скоростные условия реализации СП использовали при компактировании металломатричного композита, что позволило достичь полного заполнения межволоконного пространства и получить композит

3. Полученный композит с объемной долей волокон 11 %, характеризуется пределом прочности при изгибе 620 МПа, что на 77 % превышает прочность коммерческого аналога ZK60, благодаря сочетанию армирования борными волокнами и измельчению матрицы.

4. Микроструктурный анализ подтвердил отсутствие дефектов компактирования и хрупких интерметаллидных фаз на границе раздела, что демонстрирует перспективность разработанного подхода для создания высокопрочных магниевых композитов.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №24-19-00819 <https://rscf.ru/project/24-19-00819/> на оборудовании ЦКП ФГБОУ ВО «Нанотех» УУНУТ.

Библиографический список

1. Композиционные материалы [Текст]: [в 8 т.] / ред. Л. Браутман, Р. Крок. – Москва: [б. и.], 1978. – 22 см.

Т. 4: Композиционные материалы с металлической матрицей [Текст] / [К. Крейнер, Э. Райт, А. Левиц и др.]; ред. К. Крейнер; пер. под ред. К. Моргина. – 1978. – 504 с.: ил.

2. Портной, К. И. Структура и свойства композиционных материалов / К. И. Портной, С. Е. Салибеков, И. Л. Светлов, В. М. Чубаров. – Москва: Машиностроение, 1979. – 255 с.: ил.

3. Кузнецова, Е. И. Механизмы образования массивной сверхпроводящей фазы MgB_2 при высоких температурах / Е. И. Кузнецова, Ю. Н. Акшенцев, В. О. Есин [и др.] // Физика твердого тела. – 2015. – Т. 57, вып. 5. – С. 865–870.

4. Yoo, M. H. Slip, twinning, and fracture in hexagonal close-packed metals / M. H. Yoo // Metallurgical Transactions A. – 1981. – Vol. 12. – P. 409-418.

5. Yu, Y. Microstructure and Low-Temperature Superplasticity of Fine-Grain ZK60 Magnesium Alloy Produced by Equal-Channel Angular Pressing / Y. Yu, S. Kuang, D. Chu, H. Zhou, J. Li, C. Li // Metallography, Microstructure, and Analysis. – 2015. – Vol. 4. – P. 518-524.

6. Friedrich H.E., Mordike B.L. Magnesium Technology: Metallurgy, Design, Data, Applications, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 647 p.

© Гомзин А.И., 2025

А.А. ДАВЛЕТБАКОВ, Р. И. БАБИЧЕВА

davletbakov.arslan@mail.ru

Науч. руковод. – док. физ.-мат. наук, зав. лаб. Е.А. КОРЗНИКОВА

Уфимский университет науки и технологий

СРАВНЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО И АМОРФНОГО ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА FeNiCrCo, НАНЕСЕННЫХ НА ПОДЛОЖКУ АЛЮМИНИЯ, НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНДЕНТИРОВАНИЯ

Аннотация: выполнено моделирование процесса индентирования алюминия, покрытого тонкой пленкой кристаллического или аморфного высокоэнтропийного сплава (ВЭСа) FeNiCrCo. Показано, что в случае аморфной пленки пластическая деформация локализуется в слое ВЭСа, а в случае покрытия кристаллическим ВЭСом она распространяется вглубь подложки. Это демонстрирует более высокую надежность покрытий из аморфных многокомпонентных сплавов. Результаты важны для выбора состава и оптимизации защитных покрытий, нанесенных на детали из лёгких металлов и сплавов.

Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы, тонкопленочные покрытия, FeNiCrCo, алюминий, индентирование, молекулярная динамика, аморфная фаза, кристаллическая фаза, дефекты упаковки, фазовые превращения.

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭСы) содержат пять или более элементов относительно близкой концентрации и часто демонстрируют высокую прочность и коррозионную стойкость [0-3]. Некоторые исследования показывают, что тонкопленочные покрытия из ВЭСов могут защитить поверхность металлических деталей от преждевременного изнашивания или коррозии. Кроме того, такие покрытия могут обеспечить стабильность структуры при высоких температурах.

Свойства таких покрытий часто оптимизируют с помощью молекулярно-динамического (МД) моделирования [4-9]. МД моделирование позволяет анализировать влияние химического состава на эволюцию структуры и механизмы деформации, определяющие прочность и пластичность сплавов [10-13]. Кроме того, для улучшения свойств тонкопленочных покрытий, включающих множество различных элементов, важно учитывать влияние распределения атомов и ближнего порядка на дислокационную структуру и деформацию сплавов. При разработке новых ВЭСов эти вопросы обычно решаются путем интегрирования экспериментальных подходов, например, рентгеноструктурного анализ и современных методов моделирования [14, 15], таких как МД.

В данной работе изучены тонкопленочные покрытия алюминия (Al) кристаллическим или аморфным ВЭСом FeNiCrCo. Для этого рассмотрены две расчетные ячейки в форме прямоугольного параллелепипеда, состоящие из

подложки Al и поверхностного слоя сплава FeNiCrCo в аморфной или кристаллической формах (рис. 1). Размер подложки Al составляет $200 \times 160 \times 150 \text{ \AA}$ (~ 304000 атомов), а слоя ВЭСа - $200 \times 160 \times 40 \text{ \AA}$ (~ 110000 атомов). Для получения аморфной структуры слой ВЭСа-сначала был расплавлен при температуре 3400 К, а затем быстро охлажден до 300 К. Такое высокоскоростное охлаждение исключает кристаллизацию при понижении температуры.

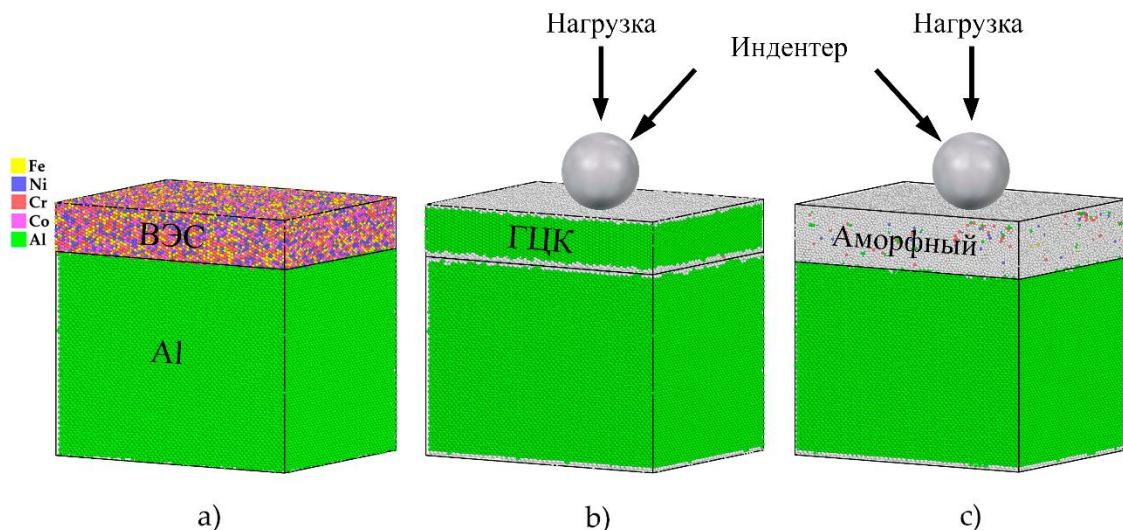


Рис. 1. Исходная расчетная ячейка Al со слоем ВЭСа на поверхности (а). На (b) и (с) приведены структуры до индентирования с кристаллическим и аморфным ВЭСом, окрашенные согласно координации атомов. Здесь зеленый цвет соответствует ГЦК структуре, а серый – аморфной фазе.

Помимо описанных структур со случайным распределением атомов в слое ВЭСа, также были получены соответствующие низкоэнергетические структуры. Для релаксации исходных образцов (рис. 1) использовалась комбинация метода Монте-Карло, при которой уменьшение энергии системы достигается перестановкой атомов, и молекулярной динамики (МК/МД). Этот подход позволяет минимизировать энергию системы и получить более равновесную структуру. В процессе релаксации (рис. 2) структура становится упорядоченной, уменьшается количество точечных дефектов и локальных искажений. Атомная структура кристаллического слоя ВЭСа существенно не меняется, в то время как аморфный слой несколько уплотняется. В результате МК/МД релаксации в обоих образцах наблюдается поверхностная сегрегация атомов Cr и Fe.

Дальнейшее индентирование проводилось для четырех образцов (рис. 2): двух исходных, со случайным распределением атомов ВЭСа (кристаллического или аморфного), и двух моделей, полученных после МК/МД релаксации. Процесс индентирования моделировался путем внедрения сферического индентора диаметром $60 \text{ \AA}$ на глубину $35 \text{ \AA}$ при температуре 300 К. Анализ структур проводился до и после этого воздействия. Сравнение четырех моделей показывает различия в механизмах деформации структуры при индентировании (рис. 3 и 4).

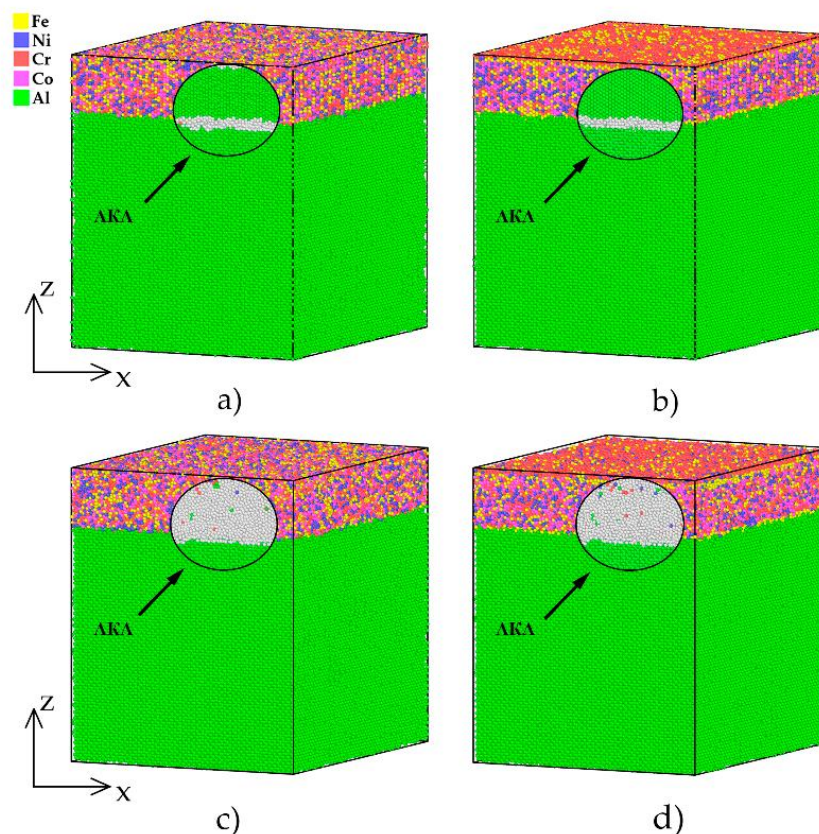


Рис. 2. Атомные структуры: с кристаллическим ВЭСом, до релаксации (а) и после МК/МД релаксации (б); с аморфным ВЭСом до релаксации (с) и после МК/МД релаксации (д). В круглых областях, показанных стрелками, атомы окрашены согласно их координации (АКА): зеленый – ГЦК структура, серый – аморфная фаза.

В аморфных покрытиях деформация поверхности при индентировании происходит за счет атомных смещений и фазового превращения, когда участки аморфной фазы под действием индентора локально переходят в ГЦК фазу (рис. 3). Внутри участков новой кристаллической фазы наблюдаются дефекты упаковки в виде красных полос. Кроме того, при максимальном погружении индентора, непосредственно под ним в Al заметно формирование ОЦК фазы. Стоит отметить, что в нерелаксированном образце участки ГЦК структуры распределены более однородно, в то время как в образце, подвергнутом предварительной МК/МД релаксации, такие области расположены преимущественно вблизи границы ВЭСа с индентором. По-видимому, поверхностная сегрегация Cr и Fe способствует формированию ГЦК фазы под воздействием приложенной нагрузки. Участки кристаллического ВЭСа после разгрузки образцов не исчезают, что свидетельствует о стабильности этой структуры.

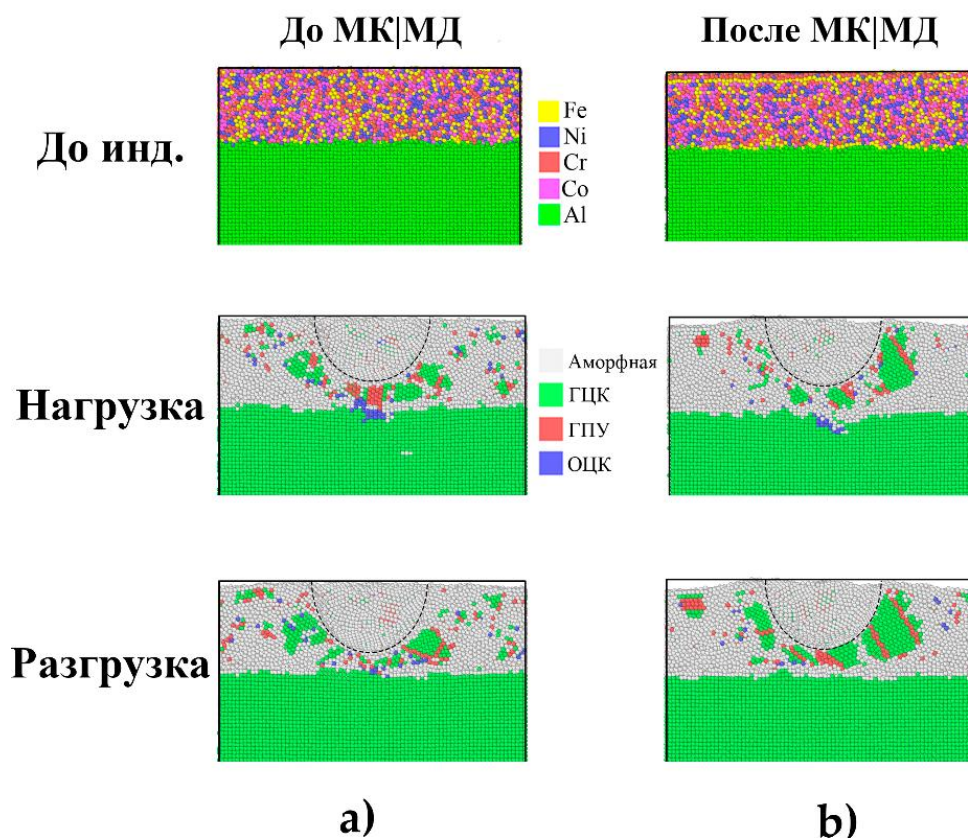


Рис. 3. Структура образцов с поверхностным слоем аморфного FeNiCrCo до индентирования (верхний ряд), при максимальной глубине погружения индентора (второй ряд) и после снятия нагрузки (нижний ряд): а) модель без предварительной МК/МД релаксации; б) модель после релаксации. Пунктирная линия показывает положение границы ВЭСа и индентора.

В случае покрытий, образованных кристаллическим ВЭСом, при индентировании активизируются дислокационные механизмы с образованием дефектов упаковки, в то время как фазовые превращения не наблюдаются (*рис. 4*). Сегрегация Cr и Fe благоприятствует испусканию дислокаций с поверхности, подвергнутой индентированию. Важно отметить, что под действием индентора межфазная граница ВЭС/Al выгибается в сторону подложки, что особенно ярко выражено для образца после МК/МД релаксации. В случае покрытия аморфными пленками этого не наблюдалось, межфазная граница оставалась плоской (*рис. 3*). Кроме того, хорошо видно, что индентирование запускает деформацию не только в кристаллическом ВЭСе, но также в подложке; в структуре Al образуются дефекты упаковки.

Полученные результаты демонстрируют различие в свойствах изучаемых покрытий. В случае аморфных покрытий пластическая деформация при индентировании локализована только в слое ВЭСа, а в случае кристаллического ВЭСа, деформации подвергается и Al подложка. Это доказывает, что покрытия из аморфного ВЭСа более надежные. Что касается влияния упорядочения атомной структуры при МК/МД релаксации, то образующиеся сегрегации, особенно в

случае кристаллического ВЭСа, скорее влияют негативно, так как они активизируют дислокационные механизмы деформации с поверхности пленки.

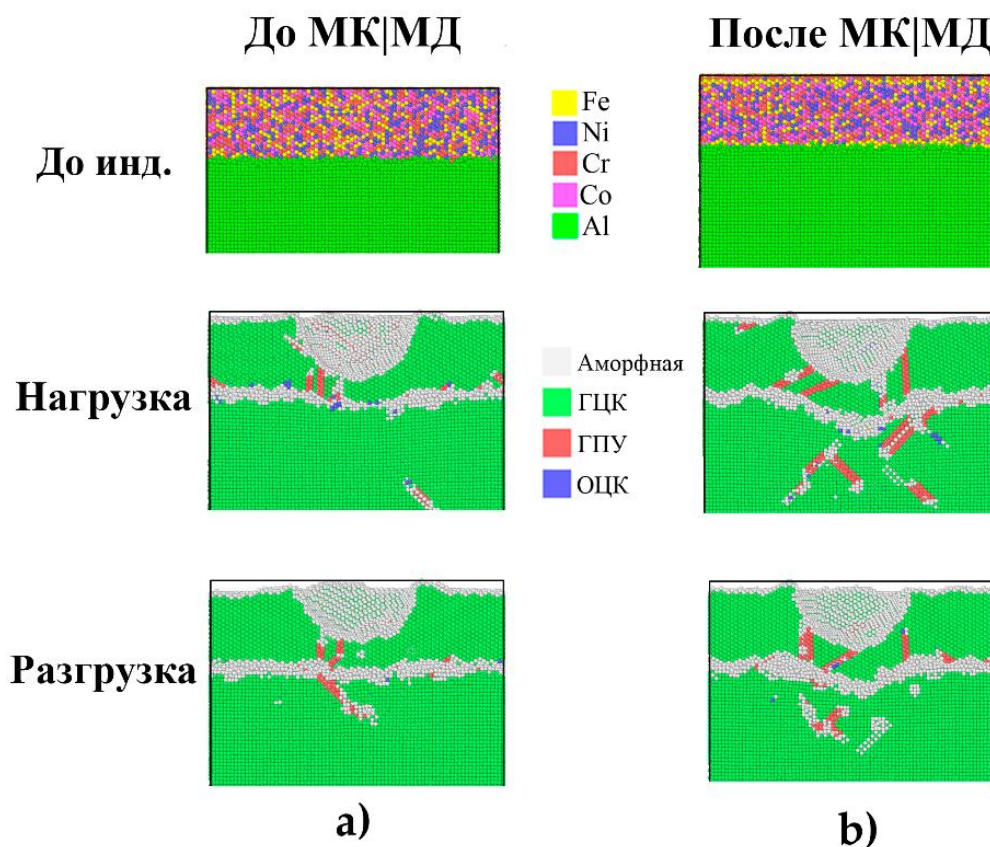


Рис. 4. Структура образцов с поверхностным слоем кристаллического FeNiCrCo до индентирования (верхний ряд), при максимальной глубине погружения индентора (второй ряд) и после снятия нагрузки (нижний ряд): а) модель без предварительной МК/МД релаксации; б) модель после релаксации.

Полученные результаты дополняют наши знания в области оптимизации защитных покрытий из многокомпонентных сплавов. Показано, что для повышения эксплуатационной надежности и долговечности деталей, при нанесении на них покрытий необходимо учитывать не только особенности структуры поверхностной пленки, но и ее неоднородность по составу.

Библиографический список

1. Zhang, Y., Zuo, T. T., Tang, Z., Gao, M. C., Dahmen, K. A., Liaw, P. K., & Lu, Z. P. Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*, 61, 1–93 (2014).
2. Miracle, D. B., & Senkov, O. N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 122, 448–511 (2017).
3. Senkov, O. N., Wilks, G. B., Miracle, D. B., Chuang, C. P., & Liaw, P. K. Refractory high-entropy alloys. *Intermetallics*, 18(9), 1758–1765 (2010).

4. Li, Z., Pradeep, K. G., Deng, Y., Raabe, D., & Tasan, C. C. Metastable high-entropy dual-phase alloys overcome the strength–ductility trade-off. *Nature*, 534(7606), 227–230 (2016).
5. Pickering, E. J., & Jones, N. G. High-entropy alloys: a critical assessment of their founding principles and future prospects. *International Materials Reviews*, 61(3), 183–202 (2016).
6. Wu, Z., Bei, H., Otto, F., Pharr, G. M., & George, E. P. Recovery, recrystallization, grain growth and phase stability of a family of FCC-structured multi-component equiatomic solid solution alloys. *Intermetallics*, 46, 131–140 (2014).
7. George, E. P., Raabe, D., & Ritchie, R. O. High-entropy alloys. *Nature Reviews Materials*, 4(8), 515–534 (2019).
8. Laplanche, G., Kostka, A., Horst, O. M., Eggeler, G., & George, E. P. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*, 118, 152–163 (2016).
9. Otto, F., Dlouhy, A., Somsen, C., Bei, H., Eggeler, G., & George, E. P. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*, 61(15), 5743–5755 (2013).
10. Gludovatz, B., Hohenwarter, A., Catoor, D., Chang, E. H., George, E. P., & Ritchie, R. O. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications. *Science*, 345(6201), 1153–1158 (2014).
11. Alkhafes I. A., Deluigi O. R., Tramontina D. R., Merkert N., Urbassek H. M., Bringa E. M. Nanoindentation into a bcc high-entropy HfNbTaTiZr alloy—an atomistic study of the effect of short-range order // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, No. 1. P. 9112–9125.
12. Ferrari A., Körmann F., Asta M., Neugebauer J. Simulating short-range order in compositionally complex materials // *Nature Computational Science*. 2023. Vol. 3, No. 3. P. 221–229
13. Ma, D., Grabowski, B., Körmann, F., Neugebauer, J., & Raabe, D. Ab initio thermodynamics of the CoCrFeMnNi high entropy alloy: Importance of entropy contributions beyond the configurational one. *Acta Materialia*, 100, 90–97 (2015).
14. Mishra D. K., Meraj M., BadJena S. K., Pal S. Structural evolution and dislocation behaviour study during nanoindentation of Mo₂₀W₂₀Co₂₀Ta₂₀Zr₂₀ high entropy alloy coated Ni single crystal using molecular dynamic simulation // *Molecular Simulation*. 2019
15. Thürmer D., Deluigi O. R., Urbassek H. M., Bringa E. M., Merkert N. Atomistic simulations of the shock and spall behavior of the refractory high-entropy alloy HfNbTaTiZr // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, No. 1. Article 9112

© Давлетбаков А.А., 2025

Д.Д. КОНДРАТЮК, Р.З. ХАМАТДИНОВ

Dima2665514@gmail.com

Науч. руковод. – д-р. техн. наук, проф. Е.В. ПАРФЕНОВ

Уфимский университет науки и технологий

СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ УДАЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ С ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ: МЕХАНИЧЕСКИЙ И ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННЫЙ МЕТОДЫ

Аннотация: в работе проведено сравнительное исследование двух методов удаления алюминидных покрытий с лопаток газотурбинных двигателей – механического и электролитно-плазменного. Испытания выполнены на образцах из жаропрочного сплава IN100 с нанесённым алюминидным покрытием толщиной 60-70 мкм. Механическое удаление осуществлялось с использованием абразивных инструментов и шлифовальных бумаг различной зернистости (от P320 до P2500), при этом достигнута шероховатость поверхности $Ra = 0,6 \pm 0,1$ мкм. Метод электролитно-плазменного полирования (ЭПП) реализован при температуре электролита 80 °С и напряжении 300 В. После 20 мин обработки получена шероховатость поверхности $Ra = 0,56 \pm 0,06$ мкм. Установлено, что метод ЭПП обеспечивает более равномерное и контролируемое удаление покрытий, снижает трудоёмкость как минимум, в 2 раза и отличается экологичностью реализации. Полученные результаты подтверждают перспективность применения ЭПП при ремонте и восстановлении лопаток авиационных газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель; защитные покрытия; алюминидные покрытия; удаление покрытий; механическая полировка; электролитно-плазменное полирование; электролитно-плазменная обработка; шероховатость поверхности; IN100; абразивная обработка; растровая электронная микроскопия; элементный анализ; шероховатость Ra .

Удаление защитных покрытий при ремонте деталей газотурбинных двигателей (ГТД) является одной из актуальных задач современного авиадвигателестроения. Используемые в настоящее время методы удаления покрытий отличаются низкой эффективностью и нередко связаны с серьёзной экологической опасностью. Наиболее распространённым методом удаления защитных покрытий является химический метод, отличающийся простотой реализации. Однако серьёзным его недостатком является экологическая опасность и, в некоторых случаях, токсичность применяемых растворов. Дополнительные трудности создаёт необходимость использования растворов при температурах, близких к температурам кипения. Наряду с химическим методом в ремонтной практике широко применяется механическое (ручное) удаление покрытий, которое заключается в шлифовании или зачистке поверхности абразивным инструментом.

Этот способ не требует сложного оборудования, однако характеризуется высокой трудоёмкостью, низкой производительностью и риском повреждения основного материала детали при неосторожном выполнении операции. В настоящее время одним из наиболее эффективных и перспективных методов удаления защитных покрытий с деталей ГТД является метод электролитно-плазменного полирования (ЭПП). Данный метод отличается высокой экологичностью, обеспечивает стабильную скорость удаления покрытий и минимизирует риск термомеханического воздействия на материал основы [1].

Алюминидные покрытия широко применяются для защиты рабочих лопаток и других деталей горячего тракта ГТД благодаря способности формировать на поверхности защитную оксидную плёнку Al_2O_3 , которая замедляет окисление и газовую коррозию при высоких температурах. Эти покрытия обычно представляют собой диффузионные слои на основе Ni–Al или Co–Al с характерной многослойной морфологией (внешний слой, внутренняя зона и зона междиффузии), что обеспечивает их высокую термостойкость и адгезию к подложке [2]. Микроструктура и состав алюминидных покрытий (включая присутствие фаз β -NiAl, Ni_2Al_3 и формирование плотной Al_2O_3) делают их весьма устойчивыми к рабочему износу, но одновременно усложняют задачу их удаления при ремонте и повторном нанесении [3]. Свойства алюминидных покрытий определяются их толщиной, концентрацией алюминия и присутствующими легирующими элементами.

Исследование механического и электролитно-плазменного полирования покрытий проводилось на образцах газотурбинных лопаток IN100 с алюминидным покрытием толщиной 60-70 мкм.

Метод механического удаления защитных покрытий осуществлялся с использованием гавера зернистостью Р60 и абразивных шлифовальных кругов зернистостью от Р320 до Р2500. Процесс проводился в лабораторных условиях при комнатной температуре.

Для проведения ЭПП использовалась установка, представленная на рис. 1, разработанная на базе стандартной электрохимической системы с регулируемыми параметрами напряжения, тока и температуры электролита. В качестве электролита применялся водный раствор аммонийных солей. Полировка проводилась при напряжении 300 В и температуре электролита 80 °С, что обеспечивало устойчивую парогазовую оболочку и равномерное удаление покрытия с поверхности образцов [4].

Анализ металлографических шлифов покрытий проводился с использованием высокоразрешающей растровой электронной микроскопии на установке Hitachi Regulus 8220. Исследования включали получение изображений поперечных шлифов. Определялись геометрические параметры покрытия, включая толщину внешнего и диффузионного слоёв.

На рис. 2 и в таблице 1 представлены результаты локального элементного анализа покрытия лопаток ГТД толщиной 36 ± 1 мкм внешней зоны и 34 ± 1 мкм диффузионной зоны.



Рис. 1. Схема установки электролитно-плазменного полирования

Таблица 1

Результаты локального элементного анализа

№	Al	Ca	Ti	Fe	Cr	Co	Ni	Mo
4	23.92				2.59	10.74	62.76	
5	23.52				4.05	11.36	61.07	
6	22.03		1.73	1.73	6.23	12.72	57.28	
7	15.96		4.73	4.73	7.93	13.79	54.45	3.13
8	7.52	1.02	4.87	4.87	10.81	14.54	61.24	

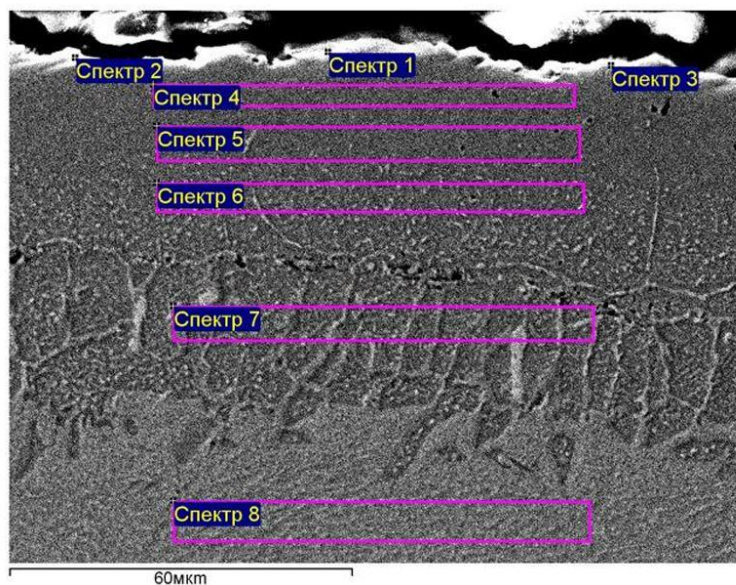


Рис. 2. Элементный анализ покрытия, где: 4 – 6 спектры – внешняя зона,
7 – диффузионная зона 8 – подложка

На рис. 3 представлены результаты полировки, выполненной механическим методом. Обработка образца осуществлялась в несколько этапов. На первом этапе в течение 20 минут проводилось снятие покрытия с помощью гравера. После полного удаления покрытия выполнялась последовательная шлифовка поверхности: 20 минут с использованием абразивного листа зернистостью Р320, затем по 10 минут абразивными бумагами Р800, Р1200 и Р2500. Такая

последовательность обработки позволила достичь параметра шероховатости поверхности $Ra = 0,6 \pm 0,1$ мкм. Следует отметить, что необходимость предварительного удаления покрытия перед окончательной доводкой приводит к существенным потерям материала основы. Кроме того, сложная геометрия лопатки затрудняет обработку со стороны корыта, что увеличивает трудоёмкость процесса.

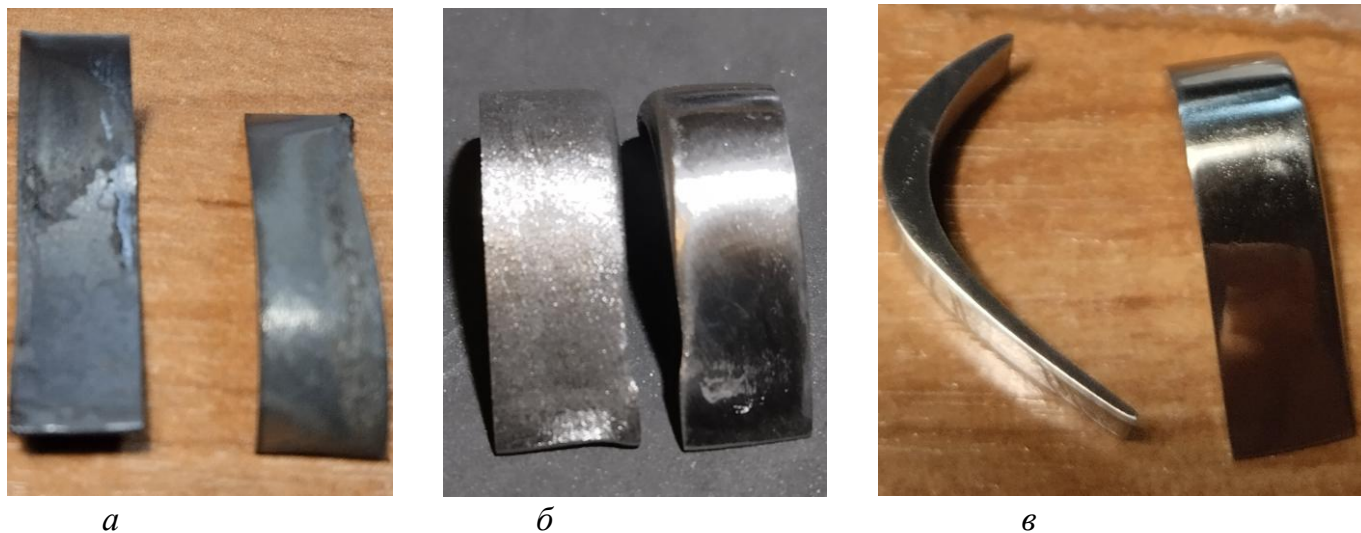
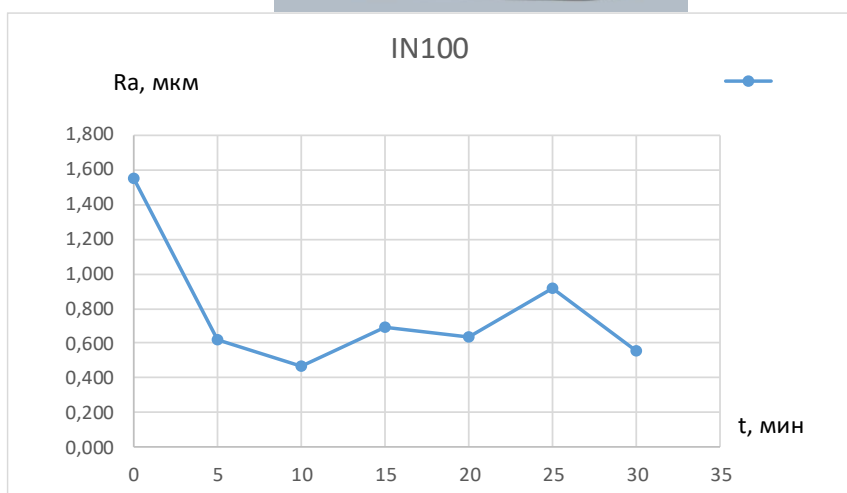


Рис. 3. Этапы снятия покрытия механическим методом: а – образцы с покрытием; б – образец, обработанный гравером и шлифовальной бумагой Р320; в – финальный результат

На рис. 4 представлены результаты удаления покрытия, выполненного методом ЭПП. В качестве объекта обработки были не образцы, а целая лопатка IN100, высота которой 138 мм. Продолжительность обработки составляла 20 минут. По завершении процесса были получены результаты, приведённые в таблице 2, из которых следует, что параметр шероховатости поверхности достиг значения $Ra = 0,56 \pm 0,06$ мкм. Применение метода ЭПП позволило обеспечить равномерное удаление покрытия по всей поверхности образца без видимых следов локального перегрева или механических повреждений. Процесс характеризуется стабильным съёмом материала и отсутствием заметного влияния на геометрию изделия, что особенно важно при обработке тонкостенных элементов сложной формы, таких как лопатки авиационных двигателей.



а б в

Рис. 4. Лопатки ГТД: а – до ЭПП; б – после ЭПП; в – график изменения шероховатости в процессе ЭПП

Таблица 2

Изменение шероховатости поверхности в процессе ЭПП на различных участках лопатки

t (мин)	Ra, мкм	Ra, мкм	Ra, мкм	Ra, мкм
	1,625	1,664	1,364	1,551
5	0,610	0,629	0,620	0,620
10	0,436	0,422	0,540	0,466
15	0,769	0,646	0,657	0,691
20	0,565	0,582	0,752	0,633
25	0,924	0,922	0,906	0,917
30	0,637	0,486	0,547	0,557

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы.

Результаты исследования показали, что метод электролитно-плазменного полирования значительно (более, чем в 2 раза) превосходит механический способ удаления покрытий по скорости и качеству обработки. ЭПП обеспечивает равномерное и контролируемое удаление алюминидных покрытий с минимальным повреждением основы, повышает качество поверхности. Процесс отличается экологичностью и меньшей трудоёмкостью. Таким образом, ЭПП является более эффективным и технологически перспективным методом для применения при ремонте лопаток авиационных газотурбинных двигателей.

Библиографический список

1. Парфенов Е.В., Невьянцева Р.Р., Горбатков С.А., Ерохин А.Л. Электролитно-плазменная обработка: моделирование, диагностика, управление: монография. М.: Машиностроение, 2014. 380 с.
2. Копес, Mateusz. (2024). Recent Advances in the Deposition of Aluminide Coatings on Nickel-Based Superalloys: A Synthetic Review (2019–2023). *Coatings*. 14. 1-15.
3. Azari Beni A., Rastegari S. Microstructural investigation of low-activity and high-activity aluminide coatings fabricated by vapor phase aluminizing on IN792 superalloy // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15, No. 1. – P. 25284.
4. Куликов И.С. Электролитно-плазменная обработка материалов: монография / Куликов И.С., Ващенко С.В., Каменев А.Я.; Минск: Белорусская наука, 2010. 232 с.

© Кондратюк Д.Д., Хаматдинов Р.З., 2025

А.А. КОРНЕЕВА

nkorneeva02@mail.ru

Науч. руковод. – доктор физ.-мат. наук, проф. каф. МиФМ В.В. АСТАНИН

Уфимский университет науки и технологий

РЕГИСТРАЦИЯ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПЛАСТИН ТОРСИОНОВ ВЕРТОЛЕТА МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Аннотация: экспериментально показана возможность регистрации усталостного разрушения пластин торсионов несущего винта вертолета методом акустической эмиссии. При изгибах торсиона трение разрушенных поверхностей испускает хорошо различимые сигналы. Создана предпосылка для разработки методики неразрушающего контроля торсионов.

Ключевые слова: вертолет, торсион несущего винта, усталость, контроль.

Методы неразрушающего контроля (НК) и рабочие методики, разрабатываемые с их применением, имеют критически важное значение при эксплуатации авиационной техники [1]. Особенное внимание уделяется узлам и деталям, силового назначения, работающим в условиях высоких знакопеременных нагрузок, где основной причиной отказов является усталостное разрушение [2]. Один из наиболее ответственных узлов вертолетов, в частности, вертолета Ка-226, это втулка несущего винта – узел соединения лопастей несущего винта с приводным валом [3].

Вертолет Ка-226 (рис. 1) оснащен двумя (верхним и нижним) соосными несущими винтами. Конструкция втулок верхнего и нижнего винтов практически одинакова. Их характерной особенностью является наличие пластинчатого V-образного торсиона. Торсион представляет собой пакет тонких пластин (рис. 2), выполненных из стали марки ВНС-9Ш. Между пластинами помещены антифрикционные прокладки. Являясь упругим звеном, он заменяет горизонтальный и осевой шарниры. Через торсион с лопасти на корпус втулки передаются аэродинамические, инерционные силы и моменты. При этом торсион обеспечивает маховое движение лопасти в плоскости тяги и поворот лопасти относительно ее продольной оси, нагружаясь в основном центробежной силой, приходящей с лопасти. Кинематические параметры втулки заданы таким образом, чтобы обеспечивались изменение угла взмаха лопасти в плоскости тяги от -4° до $+15^\circ$ и поворот лопасти относительно оси осевого шарнира от -20° до $+20^\circ$. Изгибы торсиона, в сочетании с растягивающими усилиями, происходят циклически при каждом обороте винта, что создает предпосылку к усталостному разрушению и предъявляет особые требования к контролю. Оценка остаточного ресурса и

контроль за появлением в них усталостных трещин является критически важной и актуальной задачей [4].

В процессе эксплуатации сломанные пластины выявляются визуальным осмотром или наощупь, что недостаточно надежно, поскольку торсион находится внутри защитного чехла. Применим спектральный анализ вибрационного сигнала, который позволяет обнаружить усталостные повреждения, определить их тип и локализацию поскольку каждый тип дефекта имеет характерную «подпись» в частотном спектре, но этот метод требует сложного оборудования для возбуждения и анализа спектра колебаний [5].

В настоящей работе опробован метод акустической эмиссии (АЭ) [5]. При изгибе торсиона вручную берега усталостной трещины или разрушенных пластин могут, соприкасаясь, тереться друг о друга издавая характерный шорох, регистрируемый системой АЭ.



Рис. 1. Вертолет Ка-226 с указанием расположения торсиона



Рис. 2. Внешний вид пластины торсиона

Объекты и метод исследования

Метод АЭ относится к пассивным методам акустического контроля, предназначенного для исследования динамически развивающихся дефектов при приложении нагрузки к объекту контроля. В качестве информативных параметров используется амплитуда сигналов, продолжительность и энергетический фактор, сочетание которых дает представление о природе источника эмиссии. Среди

различной аппаратуры привлекает внимание компактная двухканальная отечественная система Малахит АС-12А/2, которая позволяет не только регистрировать события, но и проводить их линейную локализацию. В данной работе этот прибор с датчиком ДР15И применялся в одноканальном режиме с порогом чувствительности 40 дБ. Информативным параметром выбрана амплитуда сигнала. Обработка результатов осуществлялась в приложении Малахит-Д.

Объектами исследования послужили два торсиона, один из которых был собран из 16 пластин без дефектов, в составе другого находились три разрушенные пластины. Ветви торсиона были закреплены на жестком основании, там же установлен датчик АЭ (рис. 3). Изгибали торсионы на заданные углы вручную рычагом 5. Для исключения помех от касания рук рычаг был соединен с полым болтом торсиона через резиновый изолятор 4.



Рис. 3. Установка для испытания торсионов:

- 1 – Система АЭ «Малахит АС-15А/2; 2 – Датчик акустической эмиссии;
- 3 – Торсион;
- 4 – Резиновый изолятор акустических помех; 5 – Рычаг для изгиба торсиона.

Результаты исследования

Для каждого торсиона было выполнено по пять серий изгибов, каждая из которых содержала 5-7 циклов. Результаты одной из серий, в качестве примера, представлены на рис. 4 в координатах амплитуда (дБ) – время (с). При испытаниях торсиона без дефектов были зарегистрированы только три случайных сигнала, связанные с хлопанием наружной пластины (рис. 4, а). В случае испытания торсиона с разрушенными пластинами на каждом цикле возникало множество акустических сигналов, связанных с трением поверхностей излома (рис. 4, б). Амплитуда этих сигналов над порогом чувствительности доходила до 60 и более дБ. Особенно убедительными выглядят результаты имитирующие взмах лопастей на разные углы (циклы 5, 6 и 7). Этот вариант интересен тем, что его можно

осуществлять вручную непосредственно на вертолете тогда, как крутка осуществляется автоматом перекоса, который может внести дополнительные помехи.

Остальные серии испытаний также показали существенную разницу в количестве сигналов от дефектного и бездефектного торсионов.

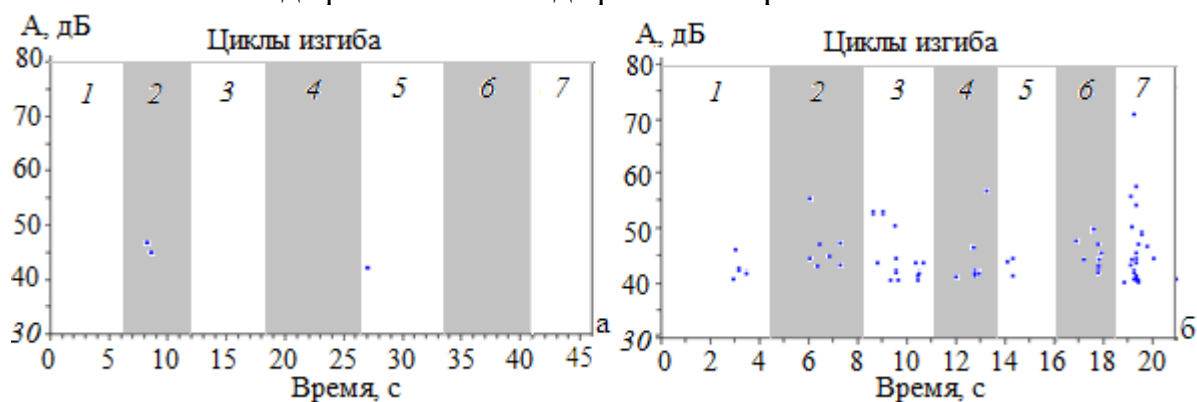


Рис. 4. Результаты испытаний на АЭ торсиона без повреждений (а) и торсиона с разрушенными пластинами (б), циклы изгиба:

1 – крутка на $+10^\circ$; 2 – крутка на -10° ; 3 – крутка на $+20^\circ$; 4 – крутка на -20° ; 5 – взмах - 4 ... 0° ; 6 – взмах -4 ... 10° ; 7 – взмах -4 ... 15° .

Вывод

Метод акустической эмиссии позволяет выявлять усталостные разрушения пластин торсионов, но конкретная методика его применения требует дальнейшей разработки.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 55253-2012 Воздушный транспорт. Контроль неразрушающий авиационной техники. Требования к применению, организации и проведению работ.
2. ГОСТ Р 52745-2007 – Контроль качества материалов и полуфабрикатов, используемых при изготовлении изделий авиационной, космической, оборонной техники.
3. Далин В.И. Конструкция вертолетов: учебник. / В.И. Далин, С.В. Михеев. М.: Изд-во МАИ, 2001. – 352 с.: ил. ISBN 5-7035-2330-3
4. Терегулов Н.Г. Анализ эксплуатационных отказов торсионов колонки вертолета / Н. Г. Терегулов, А. М. Смыслов, Р. Р. Латыпов [и др.] // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2017. – № 1(40). – С. 149–156.
5. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В. В. Клюев [и др.]; под ред. В. В. Клюева. – 2-е изд, перераб. и доп. – Москва: Машиностроение: НИИИН МНПО "Спектр", 2003. – 656 с.

© Корнеева А.А. 2025

М.В. МУХАМЕТОВ

muhamikhail@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, С.А. ГАТИНА

Уфимский университет науки и технологий

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО СПЛАВА Ti-15Mo

Аннотация: Исследовано влияние низкотемпературных отжигов (150 и 200 °С) различной продолжительностью на свойства ультрамелкозернистого титанового сплава Ti-15Mo. Выбран оптимальный режим отжига для снижения внутренних напряжений (150 °С, 3 ч), обеспечивающий сплав наилучшим балансом механических свойств. Показано, что данная термическая обработка привела к повышению равномерного удлинения с $(0,6 \pm 0,2) \%$ до $(1,6 \pm 0,2) \%$, удлинения до разрушения с $(8,9 \pm 0,2) \%$ до $(10,9 \pm 0,2) \%$ при сохранении прочностных характеристик.

Ключевые слова: титановые сплавы; Ti-15Mo; отжиг; релаксация напряжений; микроискажения кристаллической решётки; механические свойства; ω -фаза; биомедицинские материалы.

Введение

Титановые сплавы обладают уникальными механическими и физическими свойствами такими, как низкий вес, прекрасная биосовместимость и коррозионная стойкость [1]. В связи с этим они находят широкое применение в медицине. Однако для имплантатов постоянного применения важным требованием является уменьшение разницы в модуле упругости материала имплантата и кости (20-40 ГПа). Поэтому в последнее время большое внимание уделяется разработке псевдо- β -титановых сплавов, которые обладают свойством изменять свой модуль упругости в зависимости от фазового состава [2-4]. К таким сплавам относится, промышленный Ti-15Mo (ASTM F2066), сертифицированный в медицине и предназначенный для применения в ортопедии, травматологии, сердечно-сосудистой хирургии. Сплав Ti-15Mo в однофазном β -состоянии имеет самый низкий модуль упругости (около 80 ГПа). Однако при этом он характеризуется недостаточной прочностью ($\sigma_B \leq 800$ МПа, $\sigma_{-1} \leq 400$ МПа) [5,6]. Одним из эффективных способов получения высокопрочного состояния в металлах и сплавах является формирование в них ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры методами интенсивной пластической деформации (ИПД), в частности - равноканальным угловым прессованием (РКУП) [7]. При этом, известно, что ИПД приводит к накоплению внутренних напряжений в материале, что требует последующей термической обработки для их релаксации.

Таким образом, целью настоящей работы являлось определение оптимального режима отжига для снижения внутренних напряжений УМЗ сплава Ti-15Mo, полученного РКУП.

Материал и методика исследований

Материалом исследования являлся псевдо-β-титановый сплав Ti-15Mo в виде горячекатаных прутков. Химический состав сплава приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав Ti-15Mo					
Содержание легирующих компонентов и примесей, (вес, %)					
Ti	Mo	O	Fe	C	N
основа	15,2	0,16	0,92	0,008	0,010

Для формирования однофазного β-состояния образцы нагревали до 810 °С с временем выдержки 20 мин, после чего выполняли закалку в воду. УМЗ структуру получали методом РКУП по следующим режимам: 4 прохода при 250 °С, угол пересечения каналов – 120°, маршрут прессования – В_С. Степень деформации составила $\varepsilon_N \approx 2,8$ [7].

Для релаксации внутренних напряжений проводили низкотемпературные отжиги при температурах 150 °С, 200 °С в течении 1, 2, 3 и 4 ч. Механические свойства оценивали путём испытаний на одноосное растяжение согласно ГОСТ 1497-84. Испытания проводили при комнатной температуре на машине Instron со скоростью перемещения траверсы 0,24 мм/мин.

Для структурного анализа крупнозернистых (КЗ) образцов применяли оптический микроскоп «4ХС». УМЗ образцы исследовали с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100 при ускоряющем напряжении 200 кВ. Измерения микротвёрдости выполняли с использованием автоматического микротвердомера EMCO-Test DuraScan-50. Рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ проводили с помощью дифрактометра Bruker D2 Phaser, использовалось CuKα излучение при 30 кВ и 10 мА.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведена микроструктура сплава после закалки, которая представлена равноосными β-зёрнами с бимодальным распределением по размерам. При этом средний размер крупных зёрен составлял $34,2 \pm 1,6$ мкм, а мелких – $8,9 \pm 0,7$ мкм.

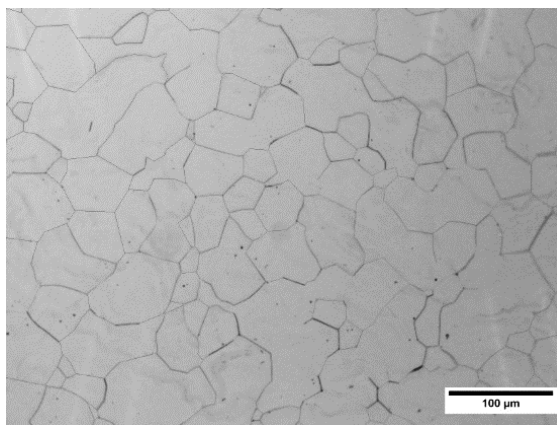


Рис. 1. Микроструктура КЗ сплава

РКУП (рис. 2) привело к существенным изменениям в микроструктуре. Деформация вызвала фрагментацию β -зёрен. Кроме того, сформировались деформационные полосы, средняя ширина которых составила 200 ± 15 нм (рис. 2, а, б).

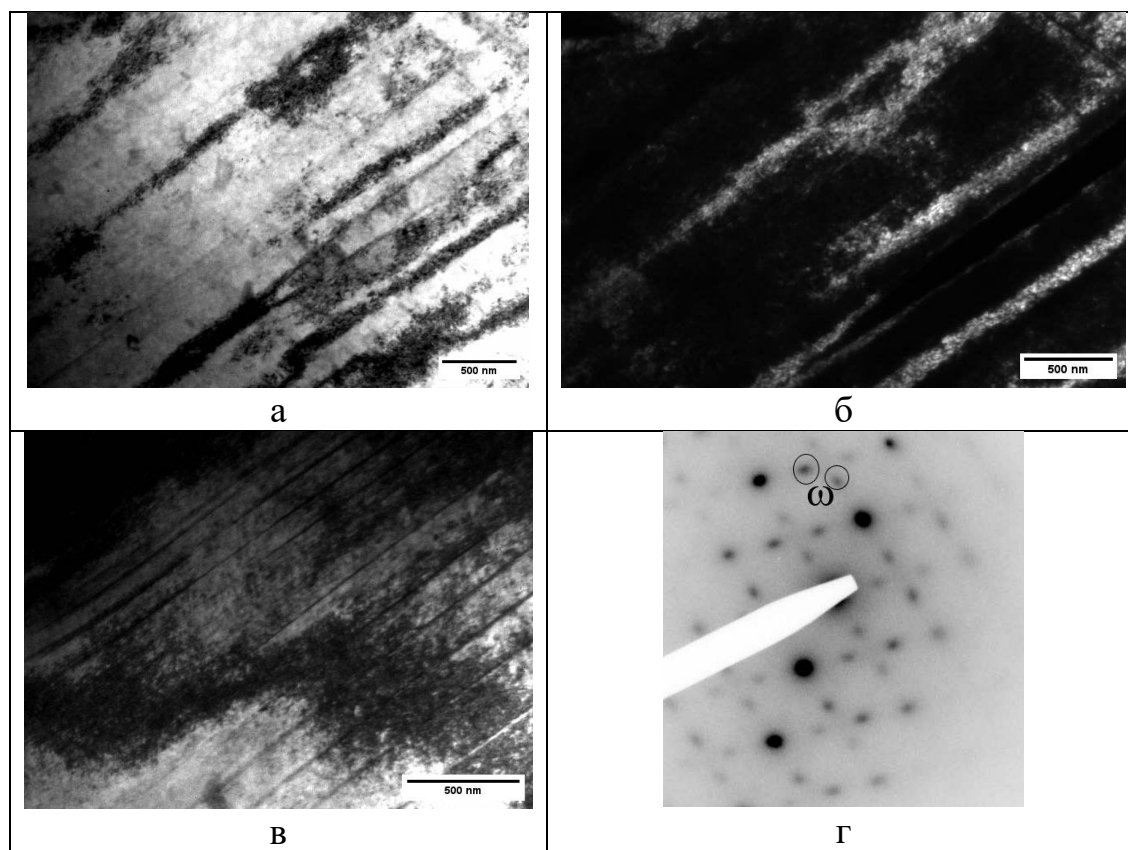


Рис. 2. ПЭМ изображения микроструктуры сплава Ti-15Mo после РКУП:
а – светлопольное изображение; б – темнопольное изображение;
в – изображение двойников деформации; г – картина микродифракции

При исследовании с помощью просвечивающего электронного микроскопа были обнаружены дислокационные скопления и дислокационные ячейки. Также в структуре выявили двойники деформации, ширина которых варьировалась от 10 до

50 нм (рис. 2, в). На дифракционной картине зафиксированы слабовыраженные рефлексы от ω -фазы (рис. 2, г).

На рис. 3 представлена зависимость микротвёрдости сплава от температуры и продолжительности отжигов. Отжиг при температуре 150 °С в течение 1 часа не привел к изменению значений микротвёрдости. Однако с увеличением продолжительности времени выдержки от 2 до 4 ч было отмечено постепенное снижение микротвёрдости. Это, вероятно, обусловлено процессами возврата — начальной стадии рекристаллизации, которые приводят к уменьшению плотности дефектов кристаллической решётки.

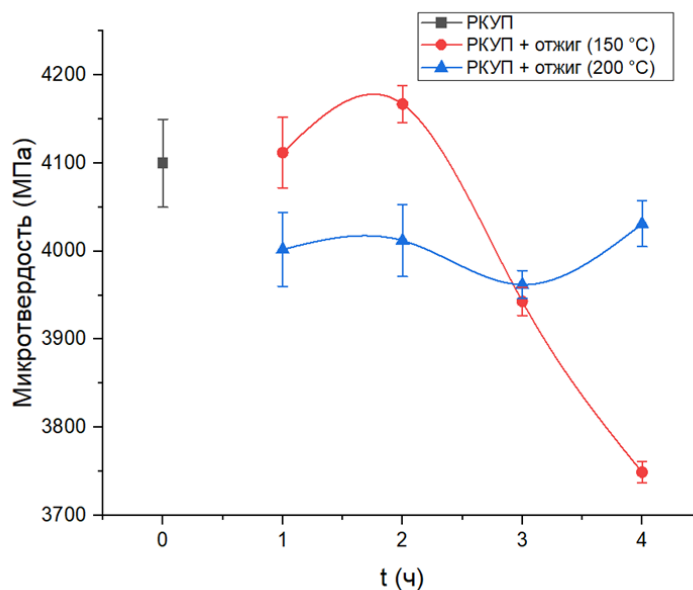


Рис. 3. График зависимости микротвёрдости сплава Ti-15Mo от времени и температуры отжигов

Отжиг при 200 °С снизил микротвёрдость сплава с (4031 ± 26) МПа до (4002 ± 42) МПа. При этом продолжительность отжига практически не повлияла на значения микротвёрдости. Данный эффект, по-видимому, связан с конкурирующими процессами возврата и старения (дополнительным выделением изотермической ω -фазы), что подтвердили результатами рентгенофазового анализа (рис. 4). Образование этой фазы способствует увеличению общей прочности материала, однако одновременно происходит снижение пластичности, что приводит к охрупчиванию сплава [8].

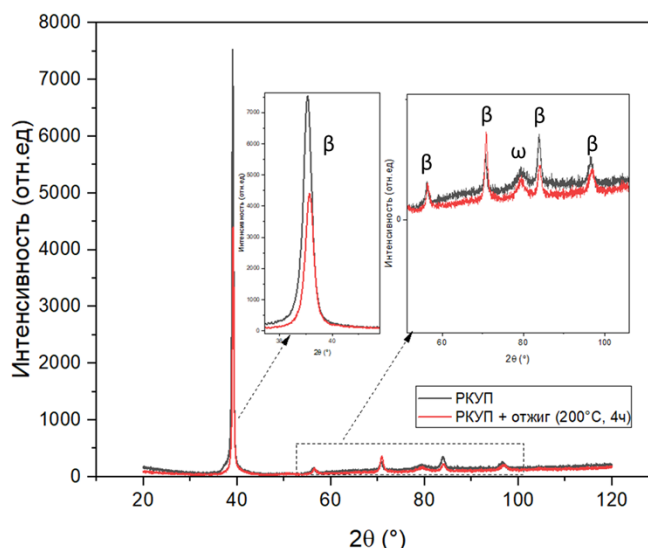


Рис. 4. Рентгенограммы сплава Ti-15Mo после РКУП и после отжига при 200°C, при времени выдержки 4 ч

С помощью программного обеспечения HighScore Plus выполнили индентификацию дифракционных максимумов. Анализ позволил идентифицировать основные пики β -фазы. Их сопоставили с эталонными данными картотеки PDF-2 (номер патента [98-009-2050]). Кроме того, при угле $2\theta = 79,5^\circ$ был выявлен пик слабовыраженной ω -фазы (номер патента [98-006-1043]).

На рис. 5 показана зависимость среднеквадратичного микроискажения от продолжительности отжига при различных температурах. Снижение данного параметра в сплаве Ti-15Mo во время отжигов обусловлено процессами релаксации внутренних напряжений.

Ключевую роль в уменьшении внутренних напряжений играют два механизма: миграция вакансий и дислокаций к границам зёрен, а также их аннигиляция на этих границах [9].

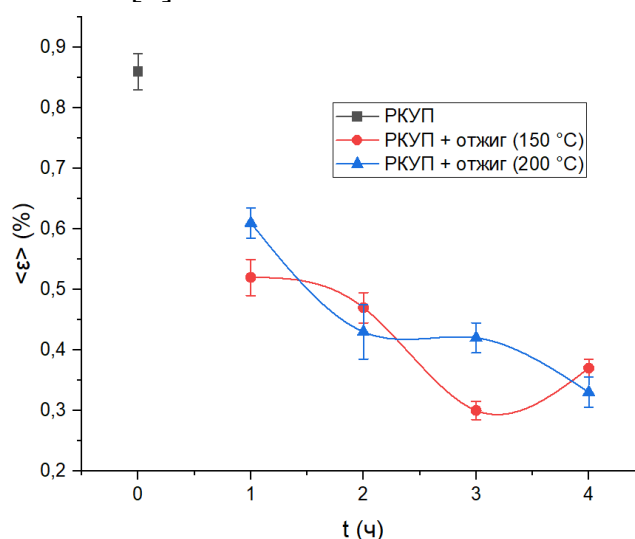


Рис. 5. График зависимости среднеквадратичного микроискажения сплава Ti-15Mo от времени и температуры отжигов

На основании экспериментальных данных был выбран режим отжига при температуре 150 °С с выдержкой в течение 3 часов. Данный режим обеспечивает наиболее эффективное протекание процесса релаксации внутренних напряжений в структуре материала при сохранении значений микротвердости на высоком уровне (3943 ± 16) МПа.

На рис. 6 представлена диаграмма растяжения сплава Ti-15Mo. В табл. 2 приведены основные параметры этой диаграммы. В исходном состоянии равномерное удлинение составляет $(0,6 \pm 0,2) \%$, а удлинение до разрушения – $(8,9 \pm 0,7) \%$. После проведения отжига при температуре 150 °С в течение 3 часов наблюдалось улучшение механических свойств. Равномерное удлинение повысилось до $(1,6 \pm 0,2) \%$, пластичность увеличилась до $(10,89 \pm 0,6) \%$. Предел прочности возрос на $(6,2 \pm 0,2) \%$ по сравнению с исходным состоянием. Это становится возможным благодаря достижению оптимального баланса между процессами релаксации напряжений и образованием дисперсных частиц ω -фазы при выбранном условии термообработки.

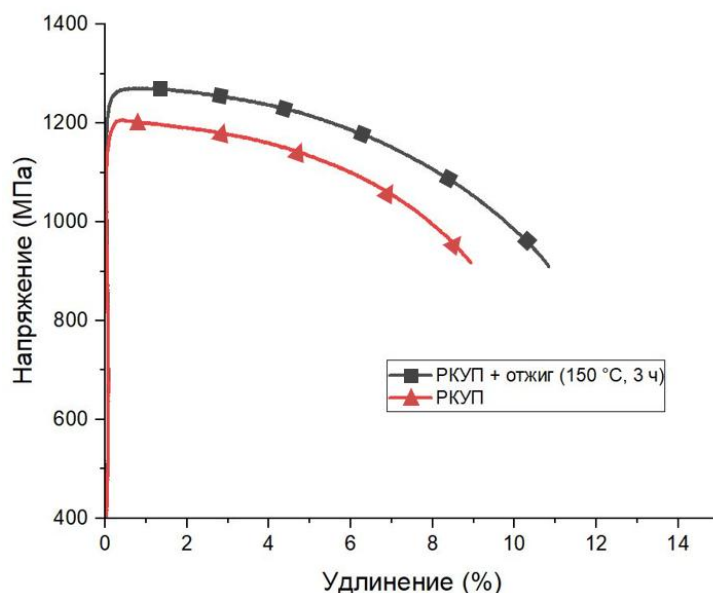


Рис. 6. Диаграмма растяжения сплава Ti-15Mo

Таблица 2

Параметры диаграммы растяжения сплава Ti-15Mo

	Предел прочности ($\sigma_{пч}$), МПа	Предел текучести ($\sigma_{0,2}$), МПа	Равномерное удлинение (δ_p), %	Удлинение до разрушения (δ), %
РКУП	$1205,21 \pm 1,1$	$1194,12 \pm 1,2$	$0,6 \pm 0,2$	$8,91 \pm 0,7$
РКУП + отжиг (150 °С, 3ч)	$1267,89 \pm 1,5$	$1257,07 \pm 0,8$	$1,6 \pm 0,2$	$10,89 \pm 0,6$

Выводы

1. Установлен оптимальный режим отжига для снижения внутренних напряжений УМЗ сплава Ti-15Mo, полученного РКУП: 150 °С с продолжительностью 3 часа.

2. Показано, что данная термическая обработка способствует эффективной релаксации внутренних напряжений и, как следствие, повышению пластичности (до $1,6 \pm 0,2\%$) при сохранении прочностных характеристик на высоком уровне (микротвердость – 3943 ± 16 МПа, предел прочности – $1267,89 \pm 1,5$ МПа).

Благодарность

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 23-79-00074.

Библиографический список

1. Lutjering, G.; Williams, J.C. Titanium; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, New York, NY, USA; 2007.
2. Raja, C.P.; Babu, N.B.K.; Kannan, A.R.; Shanmugam, V.; Balaji, N.S.; Sahani, R.; Behera, L.; Pugazhenth, A.; Thansekhar, M.R. Progress in the Optimization of Compositional Design and Thermomechanical Processing of Metastable β Ti Alloys for Biomedical Applications. ACS Biomater. Sci. Eng. 2024, 10, 3528–3547. <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.3c01912>.
3. Kuroda, D. Mechanical properties and microstructures of new Ti-Fe-Ta and TiFe-Ta-Zr system alloys / D. Kuroda, H. Kawasaki, A. Yamamoto, S. Hiromoto, T. Hanawa, T. // Material Science and Engineering C. – 2005. – 25. – P. 312-320.
4. Nag, S. Microstructural evolution and strengthening mechanisms in Ti-Nb-Zr-Ta, Ti-Mo-Zr-Fe and Ti-15Mo biocompatible alloys / S. Nag, R. Banerjee, H. Fraser // Material Science and Engineering C. – 2005. – 25. – P. 357-362.
5. ATI 15Mo™ Titanium Alloy IMI, Technical Data Sheet – Pittsburgh, PA 15222-5479 U.S.A., 2014. – 4 p.
6. ASTM F 2066 Standard Specification for Wrought Titanium-15Molybdenum Alloy for Surgical Implant Applications (UNS R58150) – Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013 – 5 p
7. Валиев, Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура, свойства / Р.З. Валиев, И.В. Александров - М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
8. Polyakova, V.V., Gatina, S.A., Novruzov, K.M. et al. Effect of the Structural-Phase Composition on the Mechanical Properties and Biocompatibility of Nanostructured Ti-15Mo Alloy. Phys Mesomech 28, 490–501 (2025). <https://doi.org/10.1134/S1029959924601672>
9. Зарипова, Р. Г. Рекристаллизация в металлах и сплавах: учеб. пособие для студ. обуч. по направлению подготовки магистров 28.04.02 Наноинженерия / Р.Г. Зарипова. – М.: ред.-изд. комплекс УГАТУ, 2022. – 168 с.

К.В.¹ ПУКИН, С.Д.² ГУНДЕРОВА

zetro4ing@mail.ru, gynderova@mail.ru

Науч. руковод. – д-р физ.-мат. наук Д.В.¹ ГУНДЕРОВ

¹*ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Институт технологий и материалов, кафедра Материаловедения и Физики Металлов*

²*Национальный исследовательский технический университет «МИСиС»*

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И МИКРОТВЕРДОСТИ СПЛАВА Ti-40Zr-8Nb-2Sn ПОСЛЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ОТЖИГА

Аннотация: проведены исследования микроструктуры и микротвердости биосовместимого β -титанового сплава Ti-40Zr-8Nb-2Sn после интенсивной пластической деформации кручением под высоким давлением (ИПДК) при степенях деформации $n = 0,25; 1; 5$ и последующего кратковременного отжига при 600 °С и 525 °С (5 мин). Установлено, что ИПДК существенно повышает микротвердость и вызывает градиент свойств по сечению; отжиг при 600 °С снимает упрочнение и гомогенизирует твердость, тогда как отжиг при 525 °С при высокой степени деформации сохраняет ультрамелкозернистую (УМЗ) структуру с зернами $\sim 2,5$ мкм.

Ключевые слова: Ti-Zr-Nb-Sn, интенсивная пластическая деформация, микротвердость, микроструктура, отжиг, ультрамелкозернистая структура.

Введение

Титановые β -сплавы на основе систем Ti-Zr-Nb представляют большой интерес как материалы для медицинских имплантатов благодаря сочетанию низкого модуля упругости, высокой коррозионной стойкости и биосовместимости [1-3]. В этих сплавах возможна обратимая термоупругая мартенситная трансформация, обеспечивающая эффект сверхупругости. Ещё больший интерес в этом ключе представляют сплавы системы Ti-Zr-Nb-Sn [4-8].

Интенсивная пластическая деформация (ИПД), в частности кручение под высоким давлением (ИПДК), позволяет получить ультрамелкозернистые структуры и повысить прочностные характеристики [10]. Однако термическая обработка (отжиг) может полностью снять накопленное упрочнение или, при правильных режимах, зафиксировать УМЗ структуру. Цель работы — исследовать влияние степени деформации при ИПДК и режимов отжига на микроструктуру и микротвердость сплава Ti-40Zr-8Nb-2Sn.

Материалы и методики

Образцы сплава состава Ti-40Zr-8Nb-2Sn (мас.%) имели форму тонких дисков диаметром ~ 20 мм и толщиной ≈ 1 мм. ИПДК выполняли при комнатной температуре и давлении 6 ГПа на бойках диаметром 20 мм с канавкой глубиной 0,5 мм. Число оборотов наковален (относительная деформация) составило $n =$

0,25; 1; 5.

Отжиги проводили в муфельной печи Nabertherm при 600 °С и 525 °С в течение 5 мин с последующим охлаждением на воздухе. Подготовка поверхности включала шлифовку до зернистости 4000 и полировку; травление осуществляли раствором 60% H₂O₂ + 35% HNO₃ + 5% HF в течение 1 мин. Микроструктурные исследования выполняли на оптическом микроскопе OLYMPUS GX51. Микротвердость измеряли методом Виккерса на установке DuraScan 50 при нагрузке 0,02 кг (с выдержкой 10 с), по 10 точкам в центре и на краю образцов.

Результаты

Микротвердость. Исходный недеформированный образец показал среднюю микротвердость $\sim 236,2 \pm 5,1$ HV. После ИПДК наблюдалось существенное повышение микротвердости и выраженная неоднородность по сечению: при $n = 0,25$ средняя микротвердость составила $286,3 \pm 16,2$ HV (центр $272,4 \pm 8,5$ HV, край $300,1 \pm 8,4$ HV); при $n = 1$ — $260,3 \pm 28,5$ HV (центр $232,4 \pm 4,0$ HV, край $288,1 \pm 8,3$ HV); при $n = 5$ измерения выполнялись преимущественно по краю — $281,8 \pm 6,6$ HV.

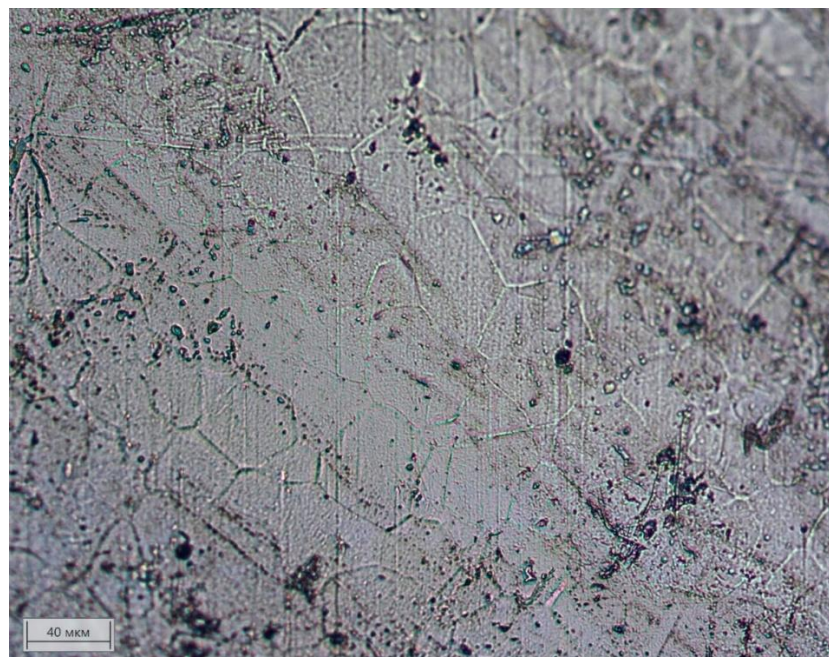
Короткий отжиг при 600 °С (5 мин) привёл к снятию деформационного упрочнения: значения микротвердости по краю всех образцов после отжига оказались близки друг к другу и к исходному состоянию (~ 231 – 234 HV) (Таблица 1). Это свидетельствует о рекристаллизации и гомогенизации свойств.

Таблица 1

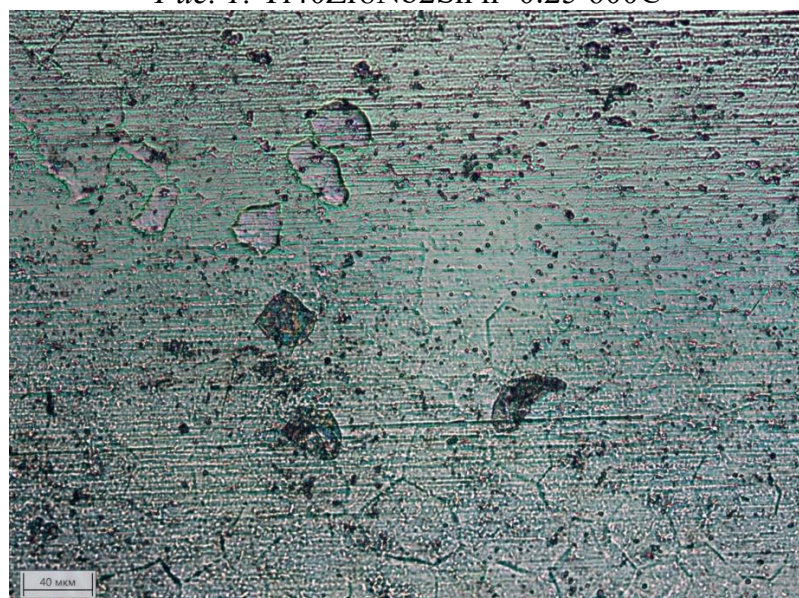
Измерение микротвердости

Образец	Центр, HV	Край, HV	Среднее, HV
Исходный	$236,2 \pm 5,1$	—	$236,2 \pm 5,1$
$n = 0,25$	$272,4 \pm 8,5$	$300,1 \pm 8,4$	$286,3 \pm 16,2$
$n = 1$	$232,4 \pm 4,0$	$288,1 \pm 8,3$	$260,3 \pm 28,5$
$n = 5$	—	$281,8 \pm 6,6$	—
$n = 0,25$, отжиг 600 °С	—	$231,7 \pm 5,1$	—
$n = 1$, отжиг 600 °С	—	$231,8 \pm 4,3$	—
$n = 5$, отжиг 600 °С	—	$231,3 \pm 3,8$	—
Отожжённый (ГК 1600 °С, 30 мин)	$234,2 \pm 2,8$	—	—

Микроструктура. Анализ структуры показал закономерное измельчение зерна с увеличением степени деформации: при $n = 0,25$ средний размер зерна после отжига при 600 °С составлял $\sim 47,2$ мкм; при $n = 1$ — $\sim 33,4$ мкм; при $n = 5$ — $\sim 21,8$ мкм. Снижение температуры отжига до 525 °С для образцов с $n = 5$ практически остановило рост зерен и обеспечило УМЗ структуру с размерами порядка 2,5 мкм (рис. 1-4).



Puc. 1. Ti₄₀Zr₈Nb₂Sn n=0.25 600C



Puc. 2. Ti₄₀Zr₈Nb₂Sn n=1 600C

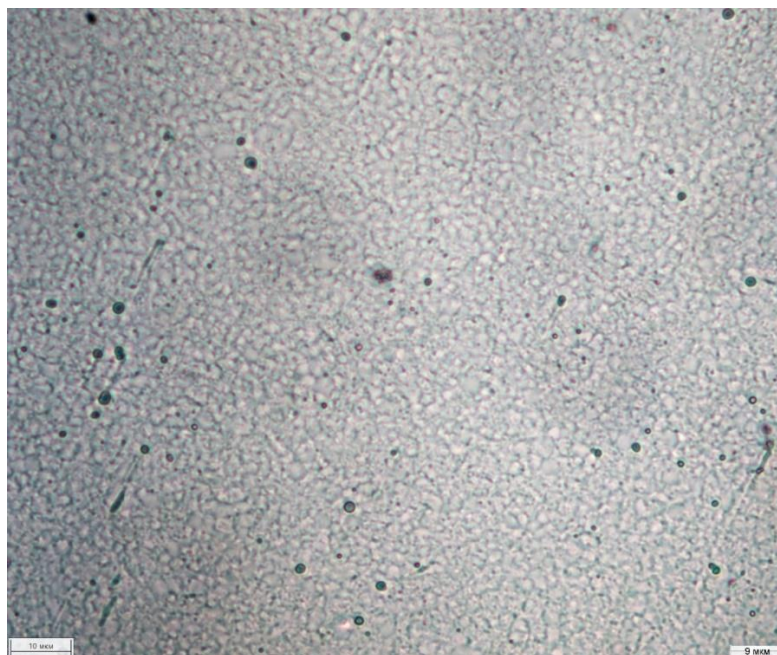


Рис. 3. Ti40Zr8Nb2Sn n=5 525C

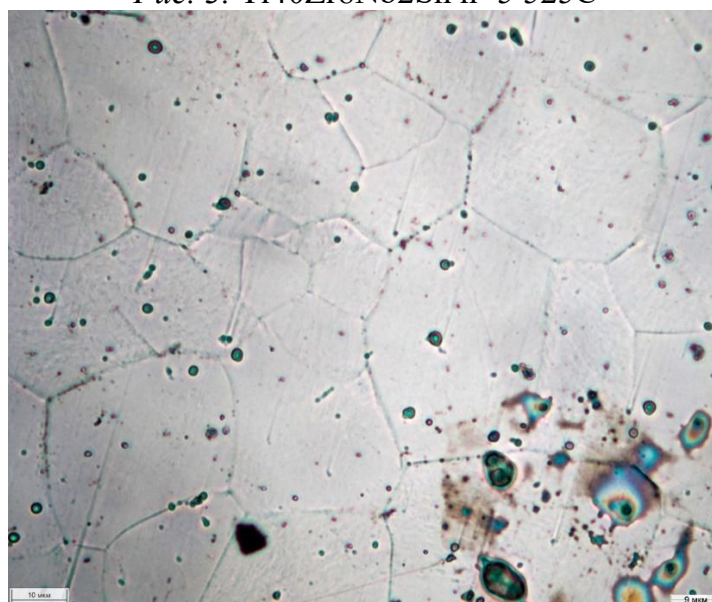


Рис. 4. Ti40Zr8Nb2Sn n=5 600C

Таблица 2

Средние размеры зерен образцов Ti-40Zr-8Nb-2Sn после ИПДК и отжига при 600 °C в зависимости от степени деформации

Образец	Средний размер зерна, мкм
n = 0,25, 600 °C, 5 мин	47,2
n = 1, 600 °C, 5 мин	33,4
n = 5, 600 °C, 5 мин	21,8
n = 5, 525 °C, 5 мин	2,5

Обсуждение

Результаты показывают характерные эффекты ИПДК: накопление дислокаций и измельчение зерна приводят к значительному упрочнению, при этом наблюдается торцовое усиление (более высокие значения твердости на краю диска), что объясняется неравномерностью деформации при кручении под высоким давлением.

Кратковременный отжиг при 600 °С обеспечивает полную рекристаллизацию и снятие упрочнения, что пригодно для задач, где требуется восстановить пластичность и однородность свойств. Напротив, отжиг при 525 °С при высокой степени деформации замедляет рост зерен и позволяет сохранить УМЗ структуру, что полезно для получения высокой прочности при приемлемой пластичности.

Выводы

1. ИПДК сплава Ti-40Zr-8Nb-2Sn при $n = 0,25-5$ повышает микротвердость и формирует градиент свойств по сечению (край > центр).
2. Отжиг при 600 °С в течение 5 мин снимает деформационное упрочнение и выравнивает микротвердость по сечению за счёт рекристаллизации.
3. Отжиг при 525 °С после высокой степени деформации ($n = 5$) фиксирует ультрамелкозернистую структуру (~2,5 мкм), что является перспективным режимом для повышения прочностных характеристик материала.
4. Полученные результаты демонстрируют возможность управлять сочетанием микротвердости и микроструктуры сплава Ti-Zr-Nb-Sn посредством сочетания ИПДК и термической обработки, что важно для разработки биомедицинских имплантатов с требуемыми механическими свойствами.

Библиографический список

1. Шереметьев В.А. Научно-технологические основы получения и обработки сверхупругих сплавов Ti-Zr-Nb, дис. ... докт. техн. наук, 2024.
2. Gunderov, D.; Kim, K.; Gunderova, S.; Churakova, A.; Lebedev, Y.; Nafikov, R.; Derkach, M.; Lukashevich, K.; Sheremetyev, V.; Prokoshkin, S. Effect of High-Pressure Torsion and Annealing on the Structure, Phase Composition, and Microhardness of the Ti-18Zr-15Nb (at. %) Alloy. Materials 2023, 16, 1754. <https://doi.org/10.3390/ma16041754>
3. Гундеров Д.В., Шереметьев В.А., Гундерова С.Д., Чуракова А.А., Деркач М.А., Шарафутдинов А.В МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА Ti-18ZR-15NB, ПОДВЕРГНУТОГО ИПДК И ОТЖИГАМ ПО РАЗЛИЧНЫМ РЕЖИМАМ.
4. Материаловедение. 2025. № 2. С. 21–28.
5. Takahashi E., Sakurai T., Watanabe S., Masahashi N., Hanada S. Effect of heat treatment and Sn content on superelasticity in biocompatible TiNbSn alloys, Mater. Trans., 2002.
6. Maeshima T., Nishida M. Shape memory properties of biomedical Ti-Mo-Ag and Ti-Mo-Sn alloys, Mater. Trans., 2004.
7. Kim J.I. et al., Shape memory characteristics of Ti-22Nb-(2-8)Zr, Mater. Sci. Eng. A, 2005.
8. Miyazaki S. et al., Development and characterization of Ni-free Ti-base superelastic alloys, MSE A, 2006.
9. Kim H.Y. et al., Martensitic transformation, shape memory effect and superelasticity of Ti-Nb binary alloys, Acta Mater., 2006.
10. Валиев, Р.З. Объемные наноструктурные материалы [Текст] / Р.З. Валиев, И.В. Александров // Москва: Академкнига. – 2007.

© Пукин К.В., 2025

Е.С. РОЩИНА

lizaroschina2004@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, О.Б. КУЛЯСОВА

Уфимский университет науки и технологий

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ МЕТОДОМ ИПДК НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЦИНКОВОГО СПЛАВА ZN-LI-CA

Аннотация: в данной статье исследовано влияние интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) на микроструктуру и механические свойства биосовместимого сплава Zn-0.8%Li-0.1%Ca. Описаны основные фазы сплава, микротвердость исходного состояния составила 155,85 HV0,1. После ИПДК в твердом растворе цинка формируется мелкозернистая структура со средним размером зерен ~2 мкм. Механические испытания на растяжение при 37 °С демонстрируют, что обработка ИПДК придает сплаву сверхпластичные свойства: относительное удлинение достигает 290% при скорости деформации $5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Результаты работы подтверждают перспективность использования сплава Zn-Li-Ca и метода ИПДК для создания материалов для биомедицинских применений.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация кручением, цинковый сплав, микроструктура, микротвердость, сверхпластичность, механические испытания на растяжение, интерметаллид LiZn_4

Введение

Цинковые сплавы обладают хорошей коррозионной стойкостью, имеют легкий вес и низкую стоимость. Они являются перспективными материалами для создания биорезорбируемых имплантатов, основное преимущество которых – способность разлагаться в физиологической среде после имплантации в организме пациента. Однако механические свойства цинковых сплавов могут быть ограничены, что является препятствием для их использования. Для повышения цинк легируют элементами, которые, улучшая механические свойства, не должны ухудшать биосовместимость конечного медицинского изделия. Однако одного легирования часто бывает недостаточно, чтобы достичь механических свойств нужного уровня, поэтому возникает потребность в деформационной обработке сплава. С этой точки зрения перспективным является применение интенсивной пластической деформации, которая позволяет упрочнять металлы. [1, 2]

Деформационная обработка, такая как интенсивная пластическая деформация (ИПДК), является эффективным методом улучшения механических свойств металлических материалов. При ИПДК материал подвергается значительной пластической деформации, что приводит к изменению его микроструктуры и свойств. Однако вопросы формирования микроструктуры в

сплаве Zn-0.8Li-0.1Ca при ИПДК, влияние свойств на растяжение после деформации при различных скоростях были не полностью изучены и исследованы. [1, 2]

Целью данной работы является изучить эволюцию структуры и механических свойств сплава Zn-0.8Li-0.1Ca на растяжение после деформации при различных скоростях $2 \cdot 10^{-3} \text{с}^{-1}$ – $5 \cdot 10^{-5} \text{с}^{-1}$.

Материалы и методики

В качестве материала исследования был выбран сплав Zn-0.8Li-0.1Ca (вес.%). Исходное состояние сплава диаметром 20 мм и длиной 100 мм. Подготовка образцов включала в себя: шлифование, полировку на шкурках зернистости от 600 до 4000 и на суспензии Al₂O₃. На Рис. 11 макроструктура образца.



Рис. 1. Макроструктура образца

Для выявления структуры образцы были подвергнуты травлению в электролите 5 мл азотной кислоты (HNO₃) и 95 мл этилового спирта, 30 секунд. Исследование структуры проводили на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEM-6390 в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 30 кВ.

Для проведения ИПДК исходный образец был нарезан на диски диаметром 20 мм и толщиной 2 мм. Образцы были подвергнуты ИПДК с использованием модифицированных бойки с канавкой. Температура деформации T=20⁰С. Давление P=6ГПа. Число оборотов верхнего бойка составило n=10 оборотов. После ИПДК толщина образцов составила 0,84 мм.

Микротвердость образцов провели на твердомере «EMCO – Test DuraScan 50» с пирамидальным алмазным наконечником при нагрузке HV 0,1 (по Виккерсу) и времени нагружения 10 секунд. Для вычисления микротвёрдости делались измерения не менее 20 точек по диаметру.

Механические испытания на растяжение проводили на испытательной машине Instron 5982 с использованием плоских малых образцов с размерами рабочей части 0,6×1×4 мм³ в диапазоне начальных скоростей деформации $2 \cdot 10^{-3} \text{с}^{-1}$ – $5 \cdot 10^{-5} \text{с}^{-1}$. Испытания были проведены при температуре человеческого тела – 37 °С.

Результаты и обсуждения

Микроструктура исходного сплава состоит из нескольких фаз: крупных зерен интерметаллида LiZn₄ (~45 мкм), эвтектики Zn+LiZn₄ (~45% объема) и частиц фазы, содержащей кальций (~5% объема). Средняя микротвердость составила 155,85 Hv0,1. Сравнение со сплавом без кальция (Zn-0.8%Li,

микротвердость $Hv_{0,1}$) показало, что присутствие Са-содержащих частиц повышает прочностные характеристики. На Рис. 2 показана микроструктура исходного сплава.

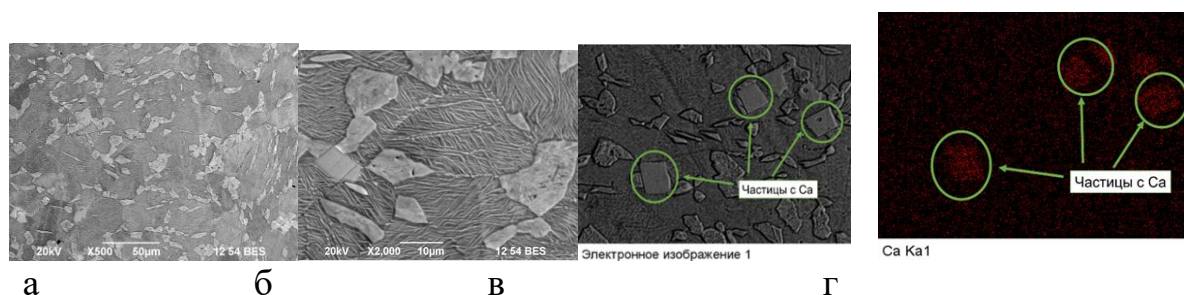


Рис. 2. Микроструктура сплава Zn-0,8Li-0,1Ca

а – общий вид, б – цинковая фаза Zn_{II} и интерметаллидная фаза $LiZn_4$ в эвтектике, в – вид структуры, г – спектр Са

Структура после ИПДК также содержит интерметаллидную фазу $LiZn_4$ и эвтектику. В твердом растворе цинка сформировалась мелкозернистая структура со средним размером зерен 2 мкм. При этом фазы $LiZn_4$ и Са-содержащие частицы сохранились. Средняя микротвердость после деформации снизилась до 133,95 $Hv_{0,1}$. На Рис. 3 показана микроструктура сплава после ИПДК.

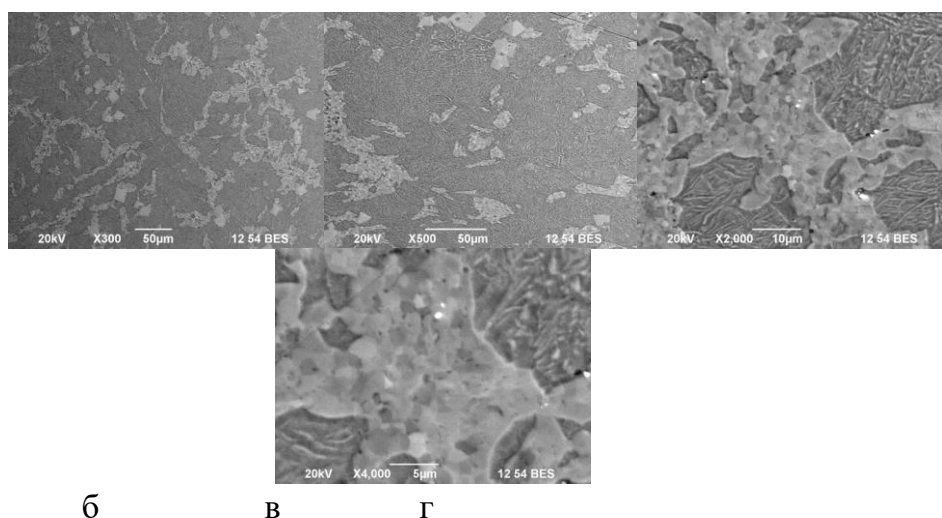


Рис. 3. Микроструктура сплава Zn-0,8Li-0,1Ca

а, б – РЭМ-изображение сплава,
в, г – формирование зерен

В исходном состоянии образцы исследуемого сплава продемонстрировали хрупкое разрушение при всех начальных скоростях деформации, в связи с чем прочностные характеристики и значения пластичности не были получены. Видно, что постепенное уменьшение начальной скорости деформации приводит к снижению прочностных показателей и значительному увеличению пластичности, то есть чем ниже скорость, тем меньше напряжение и выше удлинение. Так при

уменьшении начальной скорости деформации с $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ – $5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ показатели пластичности возрастают с 190% до 290%. Повышение пластичности сплава Zn-0,8%Li-0.1%Ca хорошо согласуется с увеличением протяженности границ зерен за счет формирования зеренной структуры после ИПДК.

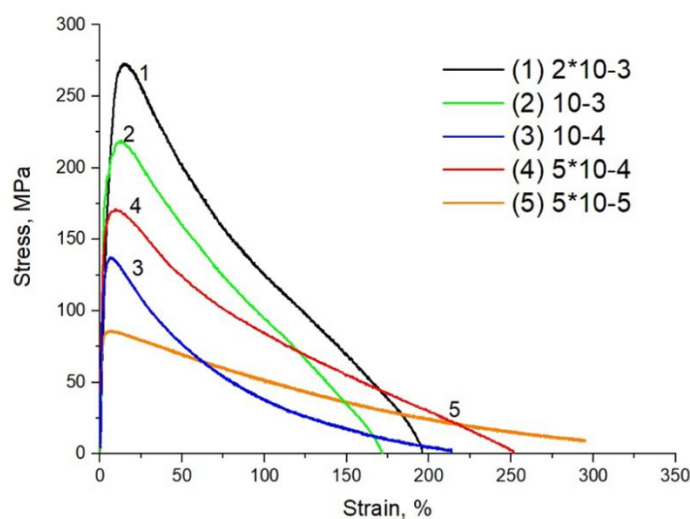


Рис. 4. График зависимости напряжения от относительного удлинения

Zn-0.8%Li-0.1%Ca

Выводы

Исследована структура в исходном состоянии, описаны ее основные фазы. Значение микротвердости в исходном состоянии составило 155,85 Hv0,1. Содержание Ca приводит к увеличению микротвердости за счет содержания кальцевых частиц.

Установлено, что после ИПДК формируется зеренная структура в твердом растворе Li в Zn, со средним размером 2 мкм. Для выявления границ зерен в LiZn4 фазе интерметаллидной фазе необходимо дальнейшее исследование.

В результате механических испытаний было установлено, что максимальный предел прочности был получен при скорости $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, а максимальное удлинение при скорости $5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$.

Библиографический список

1. Tapiero H. Trace elements in human physiology and pathology: zinc and metallothioneins / H. Tapiero, K.D. Tew // Biomed. Pharmacother. – 2003. – Vol. 57. – P. 399-411.
2. Bowen P.K. Zinc exhibits ideal physiological corrosion behavior for bioabsorbable stents / P.K. Bowen, J. Drelich, J. Goldman // Adv. Mater. – 2013. – Vol. 25. – P. 2577-2582.

3. Vojtěch D. Mechanical and corrosion properties of newly developed biodegradable Zn-based alloys for bone fixation / D. Vojtěch, J. Kubásek, J. Šerák, P. Novák // Acta Biomater. – 2011. – Vol. 7. – P. 3515-3522.

4. Ситдигов В.Д. Влияние интенсивной пластической деформации на структуру и свойства сплава Zn–1%Li–2%Mg / В.Д. Ситдигов, Э.Д. Хафизова, М.В. Поленок // Изв. вузов. Цветн. металлургия. – 2023. – № 3. – С. 45-53.

5. Li Z. High-performance hot-warm rolled Zn-0.8Li alloy with nano-sized metastable precipitates and sub-micron grains for biodegradable stents / Z. Li, Z.-Z. Shi, Y. Hao, H.-F. Li, X.-F. Liu, A.A. Volinsky, H.-J. Zhang, L.-N. Wang // J. Mater. Sci. Technol. – 2019. – Vol. 35. – P. 2618-2626.

© Рощина Е.С., 2025

УДК 669.245

А.А. ТАГИРОВА¹, Д. А. МИНЮКЕВИЧ^{1,2}, Э.В. ГАЛИЕВА¹
azaliya_tagirova72@mail.ru

Науч. руковод. – д-р техн. наук, вед. науч. сотр. В.А. ВАЛИТОВ

¹*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН*

²*Уфимский университет науки и технологий*

МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДОФАЗНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация: в работе изучено влияние термической обработки на структуру и механические свойства соединений из жаропрочных никелевых сплавов ЭК61 и ЭП741НП, полученных методом твердофазной сварки. После термической обработки наблюдалась диффузия Co и Al из ЭП741НП в ЭК61 и встречная диффузия Fe и Cr с расширением диффузионной зоны с 28 до 32 мкм, прочность соединения возросла с 620 до 1050 МПа, а пористость снизилась с 15 до 8 %.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, микроструктура, сверхпластичность, твердофазное соединение, термическая обработка, механические свойства.

Введение

Жаропрочные никелевые сплавы широко применяются в авиационной, энергетической и космической технике из-за их высокой прочности и способности работать при повышенных температурах [1, 2]. Такие сплавы применяют для

изготовления деталей, работающих в агрессивных условиях, где требуются устойчивость к высоким температурам и способность сохранять прочность и надёжность при длительной эксплуатации [3, 4].

Однако указанные материалы являются труднодеформируемыми и имеют низкую технологичную пластичность [5]. Создание неразъемных деталей из таких сплавов позволит оптимизировать технологию изготовления и снизить массу деталей. В настоящее время одним из эффективных методов получения соединений в твердом состоянии – является твердофазная сварка с использованием сверхпластической деформации, которая позволяет получать качественные соединения и сохранять исходные свойства и структурную однородность свариваемых металлов, а также исключает возникновение значительных термических напряжений из-за отсутствия градиента по температуре [6,7].

Для улучшения свойств соединений после сварки применяется термическая обработка, которая способствует снятию остаточных напряжений, выравниванию структуры и стабилизации фазового состава [8]. Подбор оптимальных режимов нагрева позволяет повысить эксплуатационные характеристики соединений, включая прочность, пластичность и коррозионную стойкость [9].

Цель работы – установить влияние термической обработки на структуру и механические свойства твердофазных соединений из жаропрочных никелевых сплавов ЭП741НП и ЭК61.

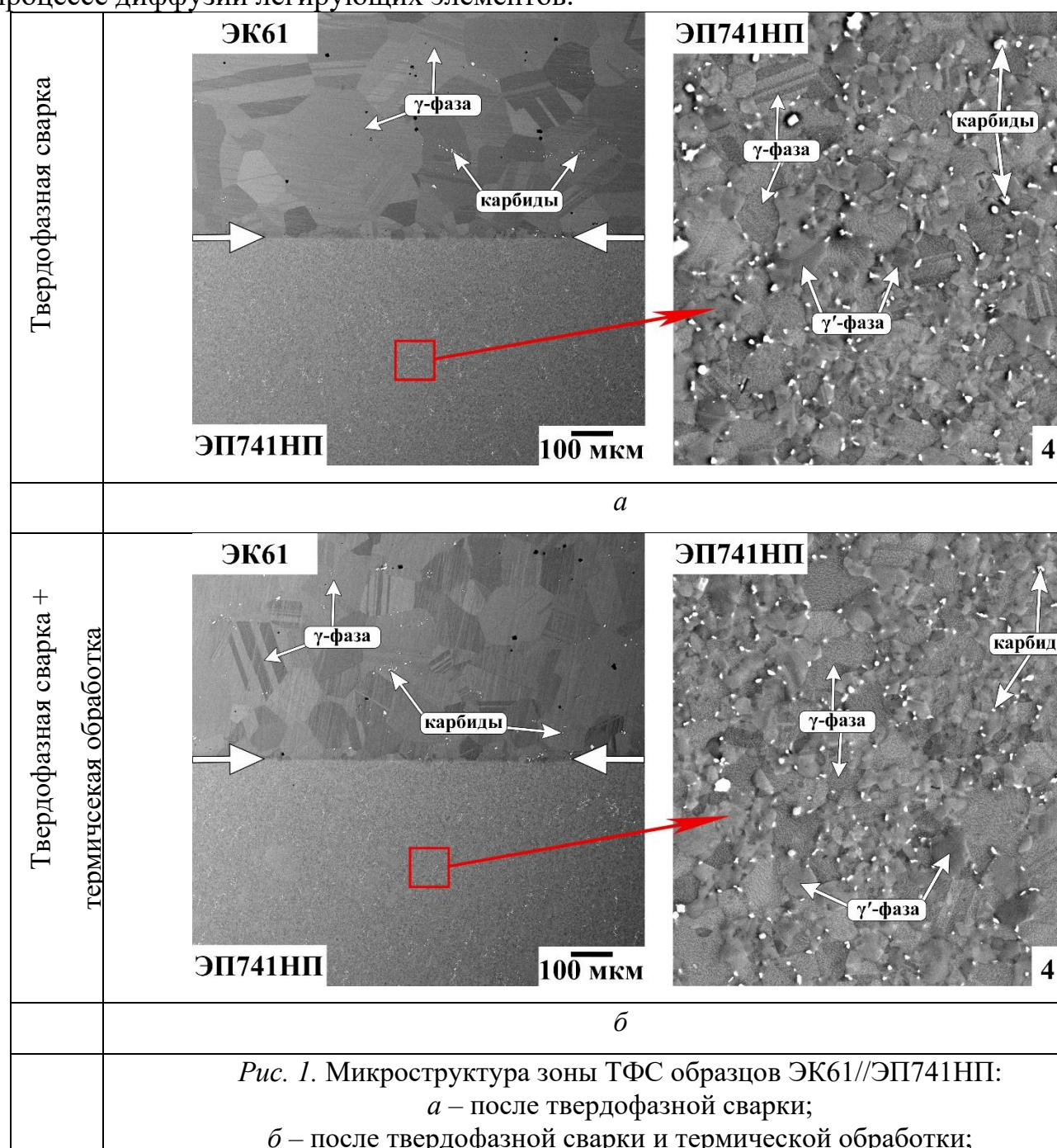
Материалы и методики исследования.

В качестве материалов для исследований использовались сплавы на основе никеля: деформируемый сплав ЭК61 и порошковый сплав ЭП741НП. Сплав ЭК61 в исходном состоянии имел смешанную микроструктуру (ультрамелкозернистая составляющая, представляющая собой зерна γ -фазы и некогерентных частиц δ -фазы (Ni_3Nb) размером 0,3-0,8 мкм, а также крупные частицы δ -фазы размером до 2 мкм), которая была предварительно сформирована посредством всесторонней изотермическойковки. В исходном состоянии сплав ЭП741НП имел мелкозернистую микроструктуру типа микродуплекс со средним размером зерен матричной γ -фазы 5-6 мкм, в теле зерен равномерно выделены дисперсные когерентные частицы γ' -фазы ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$). Кроме того, по границам и в тройных стыках зерен γ -фазы были выделены некогерентные частицы γ' -фазы размером 2-3 мкм [10].

Твердофазную сварку под давлением в вакууме проводили на образцах ЭК61//ЭП741НП со ступенчатым повышением температуры от 850 до 1100 °С [10]. Низкотемпературную термическую обработку, применяемую для сплава ЭК61, по режиму: закалка с 980 °С и старение при 730 °С выполняли в электропечи АТС. Посредством растровой электронной микроскопии изучены микроструктура и распределение легирующих элементов. Проведены механические испытания на растяжение при комнатной температуре на плоских образцах в форме гантелей, вырезанных из сварных заготовок. Также выполнено измерение микротвёрдости в зоне основных материалов и в зоне твердофазного соединения (ТФС).

Результаты

На рис. 1 показана микроструктура в зоне ТФС образцов ЭК61//ЭП741НП после твердофазной сварки (рис. 1а) и последующей термической обработки (рис. 1б), для лучшей наглядности справа на рисунках показан увеличенный кадр сплава ЭП741НП. После твердофазной сварки в сплаве ЭК61 при повышении температуры с 850 °С до 1100 °С наблюдался рост зерна матричной γ -фазы до (108 ± 10) мкм, тогда как в сплаве ЭП741НП сохранилась мелкозернистая микроструктура (порядка 8 мкм), пористость составила 15 %. Термическая обработка не привела к микроструктурным изменениям: в сплаве ЭК61 размер зерен составил (110 ± 10) мкм, структура ЭП741НП осталась мелкозернистой. Пористость после термической обработки снизилась почти вдвое – до 8 % из-за схлопывания пор в процессе диффузии легирующих элементов.



Энергодисперсионный анализ показал, что в зоне соединения ЭК61//ЭП741НП происходит диффузия Со и Al из порошкового сплава и встречная диффузия Fe и Cr. Ширина диффузионной зоны увеличилась с 28 до 32 мкм после термической обработки.

После твердофазной сварки, а также термической обработки значения микротвёрдости составили: $(2,1 \div 2,4)$ ГПа в сплаве ЭК 61; $4,3 \div 4,4$ ГПа в зоне ТФС и $4,8 \div 5,1$ ГПа в сплаве ЭП741НП. В зоне соединения микротвёрдость имеет промежуточное значение, что свидетельствует о плавном переходе свойств.

По результатам механических испытаний установлено, что прочность соединения из разноименных никелевых сплавов ЭК61//ЭП741НП после твердофазной сварки составила (620 ± 80) МПа, а после термической обработки возросла до (1050 ± 110) МПа. Разрушение сварных образцов как после твердофазной сварки, так и после термической обработки происходит по зоне соединения.

Заключение

В работе были успешно получены сварные соединения из разноименных жаропрочных никелевых сплавов ЭК61 и ЭП741НП методом твердофазной сварки. Установлено, что термическая обработка способствует повышению прочности сварных образцов с (620 ± 80) МПа до (1050 ± 110) МПа, а также снижению пористости сварных соединений почти вдвое.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания ИПСМ РАН №124022900007-9

Библиографический список

1. Reed R.C. The Superalloys: Fundamentals and Applications. – Cambridge University Press, 2006. – 372 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511541285>.
2. Behera S., Dash M.K., Kumar N.K., Mitra R., Rao G.A. Microstructure and High-Temperature Tensile Behavior of Ni-Based Superalloy EP741NP for Aerospace Applications // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2021. – V.30. – PP. 5834-5844.
3. Shahwaz Md., Nath P., Sen I. A critical review on the microstructure and mechanical properties correlation of additively manufactured nickel-based superalloys // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – V. 907. – PP. 164530. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164530>.
4. Campbell F.C. Manufacturing Technology for Aerospace. Chapter: Nickel Based Superalloys. – Elsevier, 2016. – pp. 221-224. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-495-4.X5000-8>.
5. Logunov A.V. Heat-resistant nickel alloys for blades and disks of gas turbines. – Moscow: LLC Publishing House Gas Turbine Technologies, 2017. – 854 p.
6. Galieva E.V., Klassman E.Y., Valitov V.A., Musabirov I.I. Pressure welding of heat-resistant EK61 and EP975 nickel-based superalloys at a temperature of 900°C //

Letters on Materials. – 2023. – V. 13. – №4. – P. 347-352. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2023-4-347-352>.

7. Galieva E.V., Klassman E.Y., Valitov V.A., Gabbasov R.R., Tagirova A.A., Stepukhov E.M. Microstructure and strength of solid-state joints of dissimilar nickel-based alloys // Letters on Materials. – 2024. – V. 14. – №4. – P. 453-459. <https://doi.org/10.48612/letters/2024-4-453-459>.

8. Karadge M., Grant B., Withers P.J., Baxter G., Preuss M. Thermal Relaxation of Residual Stresses in Nickel-Based Superalloy Inertia Friction Welds // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2011. – V. 42 – PP. 2301-2311. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0613-3>.

9. Lin C.I. Sintering and Solid-State Joining of Nickel-based Superalloys Using Field-Assisted Sintering Technology. – The Pennsylvania State University Press, 2021. – 183 p.

10. Gabbasov R.R., Tagirova A.A., Galieva E.V., Valitov V.A. Formation of solid-state joints of dissimilar alloys based on Ni and Ni₃Al // Letters on Materials. – 2024. – V. 14. – №4 – PP. 475-481. <https://doi.org/10.48612/letters/2024-4-475-481>.

© Тагирова А.А., Минюкевич Д.А., Галиева Э.В., 2025

УДК 620.172.2

Л.Ф. УТЯГУЛОВА, Д.А. ШАРАФУТДИНОВ, Э.И. УСМАНОВ
leysan.utyagulova@bk.ru, s7rontium38@yandex.ru, usm4nov-emil@yandex.ru
Науч. руковод. – канд. техн. наук. Р.Р. ВАЛИЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ВЛИЯНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА НА МИКРОСТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО ТИТАНА GRADE 4 ПОСЛЕ РКУП-К И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ВОЛОЧЕНИЯ

Аннотация: в данной работе представлены результаты исследования влияния низкотемпературного отжига на микроструктуру и микротвердость технически чистого титана Grade 4, подвергнутого равноканальному угловому прессованию по схеме «Конформ» (РКУП-К) и последующему волочению. Применение этих методов привело к формированию УМЗ структуры в технически чистом титане Grade 4 со средним размером зерен в поперечном сечении около (120 ± 20) нм, а в продольном направлении – (105 ± 20) нм. Также после обработки наблюдается повышение микротвердости данного до $HV_{ср} = (3650 \pm 120)$ МПа. Очевидно, это связано с формированием УМЗ структуры, накоплением дефектов кристаллической решетки при интенсивной пластической деформации. В

результате последующего отжига при температуре 350 °С в течении 30 минут УМЗ титана Grade 4, подвергнутого РКУП-К + волочению наблюдается незначительное снижение микротвердости до $HV_{ср} = (3570 \pm 120)$ МПа, а также заметный рост зерен до (150 ± 20) нм в поперечном направлении и уменьшение дефектов кристаллической решетки.

Ключевые слова: технически чистый титан Grade 4, РКУП-К, волочение, ультрамелкозернистая структура, низкотемпературный отжиг, микротвердость.

Введение

Известно, что технически чистый титан является одним из наиболее широко используемых материалов для изготовления медицинских имплантатов в связи с его высокой коррозионной стойкостью, биосовместимостью и отсутствием вредных примесных элементов [1]. Однако, с активным развитием медицины растут и требования к механическим свойствам имплантатов, таким как прочность, в том числе и усталостная, а также пластичность, которые у титана Grade 4 недостаточно высокие как у Ti сплава [2].

Для повышения прочностных характеристик зачастую применяют деформационную обработку методом интенсивной пластической деформацией (ИПД), тем самым формируя в объеме материала ультрамелкозернистую (УМЗ) структуру. Особенности такой структуры являются размеры зерен в нанометровом диапазоне (обычно 100-1000 нм) с преимущественно высокоугловыми разориентировками границ, малая плотность дислокаций внутри зерен и неравновесные границы зерен. Кроме этого, УМЗ металлические материалы зачастую обладают более высокими прочностными свойствами за счет большей плотности границ зерен и дефектов кристаллической решетки [3].

Одним из современных методов ИПД обработки является комбинация равноканального углового прессования по схеме «Конформ» (РКУП-К) с последующим волочением до заданного диаметра. Данный подход с высокой производительностью позволяет формировать УМЗ структуру в длинномерных прутках, которые востребованы промышленностью, в том числе для изготовления медицинских имплантатов (стоматологические, ортопедические, травматологические) [3]. Вместе с тем актуальной задачей развития этой технологии является изучение закономерностей механического поведения УМЗ титана с целью оптимизации режимов (параметров) обработки и, соответственно, достижения в нем комплекса более высоких механических свойств.

Несмотря на высокие показатели твердости и прочности после ИПД, зачастую пластичность не удовлетворяет требуемым характеристикам. В связи с этим актуальной задачей является повышение пластических свойств с сохранением

высокого уровня прочности. Известно, что увеличение пластичности без потери прочности можно достичь термическим воздействием [4].

Эволюция микроструктуры и изменения механических свойств в результате отжига технически чистого титана Grade 4 с УМЗ структурой, полученной методом РКУП-Конформ, в интервале температур 50-850 °С, исследовалась в работе [5].

Обработка, включающая РКУП-К с последующей термомеханической обработкой (ТМО), позволила получить в титане Grade 4 УМЗ структуру с размером зерна около 150 нм и, как следствие, с высоким показателем предела прочности ($\sigma_B=1240$ МПа) [5], при этом наблюдалась очень низкая пластичность ($\epsilon=1,8$ %)

Также авторы определили, что последующий отжиг УМЗ титана Grade 4 значительно влияет на прочность и пластичность. Например, отжиг при 350 °С с выдержкой в течение 6 ч приводит к одновременному повышению предела прочности ($\sigma_B=1450$ МПа) и пластичности до ($\epsilon=4,5\%$) [5].

Таким образом, целью работы является исследование влияния низкотемпературного отжига на микроструктуру и микротвердость технически чистого титана Grade 4 после РКУП-К и последующего волочения.

Материал и методы исследований

В качестве материала для исследований использовали технический титан марки Grade 4 (состав, вес. %: Fe – 0.5, O – 0.4; C – 0.08; N – 0.05; H₂ – 0.015; Ti – основа) в состоянии поставки.

Для получения длинномерных прутков с УМЗ структурой применяли метод РКУП-К с последующим волочением. Деформационная обработка методом РКУП-К осуществляли на уникальной научной установке «КВ-048.ИФПМ.043911001» (НИИ ФПМ «УУНиТ»): при следующих параметрах температура деформации – 250 °С, угол пересечения каналов – 120°, маршрут деформации В_с, количество проходов – 4. Для равномерной деформации перед каждым проходом заготовку поворачивали на 90° вокруг своей оси.

Волочение заготовок после РКУП-К проводили на волочильном стане до диаметра 6 мм за 17 проходов с шагом изменения диаметра фильеры 0,5 мм. Температура заготовки при волочении составляла 250 °С, скорость 0,3 м/с.

Термическую обработку проводили посредством отжига в печи “Nabertherm” при температуре 350 °С в течении 30 мин. с охлаждением на воздухе.

Исследование микроструктуры образцов проводили с помощью оптического микроскопа (ОМ) Olympus GX53 и просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) JEOL JEM-2100, работающего при ускоряющем напряжении 200 кВ.

Микротвердость образцов по Виккерсу определяли на приборе Emco-Test «Durascan 50» при нагрузке 100 грамм с выдержкой в течение 15 сек. Измерение микротвердости проводили на площади диаметра по 30 точкам.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведена исходная микроструктура титана Grade 4 в состоянии поставки. В данном состоянии образца наблюдается относительно однородная структура с вытянутыми зёрнами, средний размер которых составляет примерно $(10,15 \pm 0,85)$ мкм.

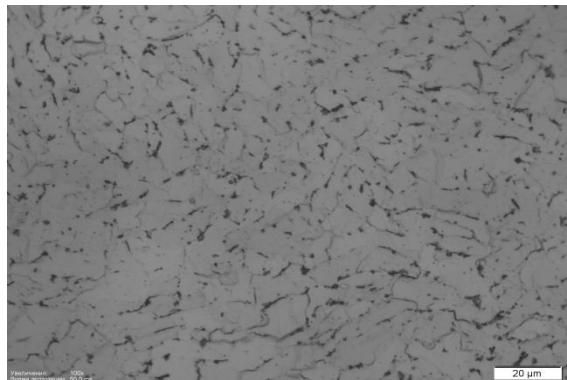


Рис. 1. Микроструктура титана Grade 4 в состоянии поставки (ОМ)

Применение РКУП-К наряду с волочением привело к заметному измельчению зёрен. Микроструктура в поперечном сечении состоит из зёрен/субзёрен со средним размером (120 ± 20) нм (рисунок 2а). В продольном направлении структура приобрела характерные полосы после деформационной обработки. (рисунок 2б). Ширина этих полос составила (105 ± 20) нм, а длина достигла нескольких микрометров. Многочисленные рефлекссы по окружностям на картинках микродифракций ; подтверждают образование УМЗ структуры и преимущественно высокоугловую разориентировку границ зёрен в титане Grade 4.

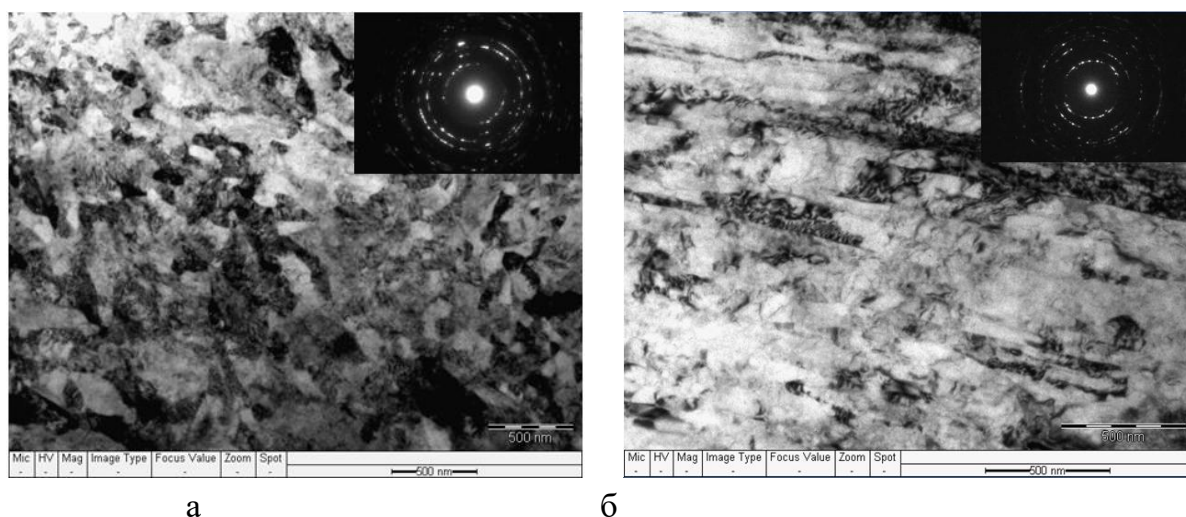


Рис. 2. Светлопольные изображения микроструктуры титана Grade 4 после РКУП-К с дальнейшим волочением (ПЭМ):

Применение отжига при 350°C в течении 30 мин. после РКУП-К с последующим волочением привело к небольшому росту зёрен. Микроструктура в поперечном направлении состоит из зёрен с размером (150 ± 20) нм (рис. 3а). В продольном направлении структура сохранила полосовой характер (рисунок 3б).

Ширина данных полос составляет (145 ± 15) нм, а длина достигает нескольких микрометров. На электроннограмме (рис. 3а) наблюдается множество рефлексов, расположенных по окружностям, что характерно для УМЗ-структуры с высокоугловой разориентировкой границ. Также после отжига наблюдается значительное снижение плотности дефектов кристаллической решетки.

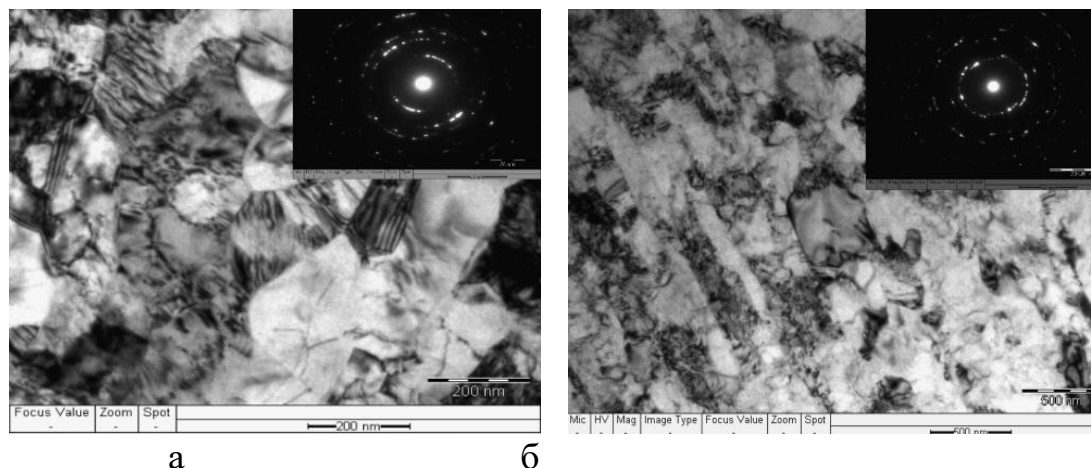


Рис. 3. Светлопольные изображения микроструктуры после низкотемпературного отжига титана Grade 4, подвергнутого РКУП-К и волочению (ПЭМ):
а – поперечное сечение; б – продольное сечение

На рисунке 4 представлены результаты измерения микротвердости Grade 4 в различных структурных состояниях. Среднее значение микротвердости технически чистого титана Grade 4 в состоянии поставки составило $HV_{cp} = (2850 \pm 270)$ МПа, а после применения метода РКУП-К с последующим волочением повысилось до $HV_{cp} = (3650 \pm 120)$ МПа. Повышение микротвердости титана Grade 4 после обработки РКУП-К с последующим волочением очевидно связано с формированием УМЗ структуры в объёме материала, внесением дефектов кристаллического строения при интенсивной пластической деформации. В результате последующего отжига при температуре 350 °С в течении 30 минут УМЗ титана Grade 4, подвергнутого РКУП-К + волочению наблюдается незначительное снижение микротвердости до $HV_{cp} = (3570 \pm 120)$ МПа.

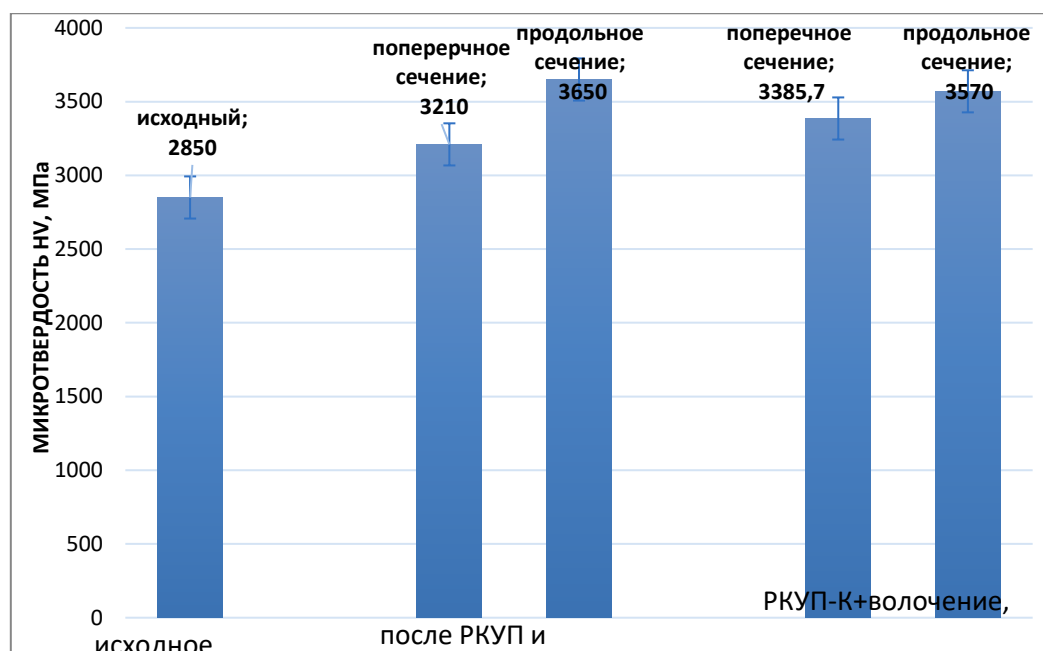


Рис. 4. Микротвердость титана Grade 4 после различных обработок

Закключение

В данной работе была исследована микроструктура и микротвердость технически чистого титана Grade 4 подвергнутого РКУП-К и последующему волочению, а также последующему низкотемпературному отжигу.

Применение методов РКУП-К и волочения привело к формированию УМЗ структуры в технически чистом титане Grade 4 со средним размером зерен в поперечном сечении равным (120 ± 20) нм, а в продольном направлении – (105 ± 20) нм, при этом границы зерен имели преимущественно высокоугловые разориентировки.

Также наблюдалось повышение микротвердости до $HV_{cp} = (3650 \pm 120)$ МПа после обработки методом РКУП-К с волочением, что связано с формированием УМЗ структуры, накоплением дефектов кристаллической решетки при интенсивной пластической деформации.

Проведение отжига при 350°C в течении 30 мин. привело к незначительному росту размеров зерен технически чистого титана Grade 4: в поперечном сечении средний размер зерна составил (150 ± 20) нм, а в продольном – (145 ± 15) нм. Также наблюдалось уменьшение дефектов кристаллической решетки. В том числе наблюдалось небольшое снижение микротвердости до $HV_{cp} = (3570 \pm 120)$ МПа.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-19-00445-П

Библиографический список

1. Valiev R. Z., Parfenov E. V., Raab G. I., Semenova I. P. Study and development of nanostructured metals for production of medical implants and equipment // Materials. Technologies. Design. 2019. vol. 1. no. 1. pp. 42–47.

2. Valiev R. Z., Estrin Y., Horita Z., Langdon T. G., Zehetbauer M. J., and Zhu Y. Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation: Ten Years Later // JOM. 2016. vol. 68. no. 4. pp. 1216–1226.

3. Рыбальченко О. В. Влияние интенсивной пластической деформации на структуру, механические свойства стали 08X18H10T // Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук. г. Москва. 2014. С. 21-22.

4. Резяпова Л.Р., Валиев Р.Р., Усманов Э.И., Валиев Р.З. Исследование старения и механических свойств наноструктурного титана // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 3. С. 67–68.

5. Dyakonov G. S., Mironov S., Semenova I. P., Еникеев Н. Valiev R. Z., Semiatin S. L. Annealing behavior of severely-deformed titanium Grade 4 // Materials Science and Engineering: A. 2019. vol. 742. pp. 89–101.

© Утягулова Л.Ф., Шарафутдинов Д.А., Усманов Э.И., 2025

СЕКЦИЯ 2.3. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.793

Л.Ч.М. КОГГАЛА

chethanaliyanage41@gmail.com

Науч. руковод. – док. техн. наук, К.Н. РАМАЗАНОВ

Уфимский университет науки и технологий

РАЗРАБОТКА НИКЕЛЕВОГО ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ОСНАСТКИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СТАНКОВ

Аннотация: в статье представлен обзор современных подходов к разработке никелевых гальванических покрытий для оснастки электрохимических станков.

Рассмотрены процессы электроосаждения никеля, составы электролитов и их влияние на свойства покрытий. Отмечены преимущества композитных систем Ni-P, Ni-W, Ni-Co по коррозионной стойкости и износоустойчивости. Приведено сравнение никелевых покрытий с цинковыми, хромовыми и медными аналогами. Выявлены перспективные направления — оптимизация электролитов и применение импульсных режимов осаждения. Сделан вывод о высокой эффективности никелевых покрытий для повышения ресурса и надёжности оснастки.

Ключевые слова: никелевое покрытие, гальваническое никелирование, электрохимическая обработка, износостойкость, технико-экономическая эффективность.

Введение

Электрохимические методы обработки металлов широко применяются в современном машиностроении, приборостроении и инструментальном производстве благодаря высокой точности, возможности обработки труднообрабатываемых материалов и чистоте поверхности. Важнейшим элементом таких технологических процессов является оснастка – электроды, держатели и контактные узлы, находящиеся в прямом контакте с электролитом и подвергающиеся воздействию электрического тока. При длительной эксплуатации они подвержены коррозии, электроэрозии и износу, что приводит к снижению производительности и увеличению затрат на техническое обслуживание оборудования (табл.1). [8, 9]

Примерный уровень затрат

Метод покрытия / Coating method	Ориентировочная стоимость (за 1 м ² покрытия, при толщине ~20 мкм)	Примечание
Гальваническое никелирование	1 000 – 2 500 Р	Базовый промышленный метод, хорошее соотношение «цена– качество»
Химическое никелирование	2 500 – 5 000 Р	Дороже, но равномерное и износостойкое покрытие
Хромирование	2 000 – 3 500 Р	Более твёрдое, но токсичное производство
Оцинковка (цинковое покрытие)	500 – 1 000 Р	Дешевле, но хуже защита от химии и износа
Меднение	800 – 1 500 Р	Хорошая проводимость, но слабая коррозионная стойкость
Серебрение	5 000 – 15 000 Р	Отличная проводимость, но очень дорого
Фосфатирование / оксидирование	300 – 600 Р	Только антикоррозионная защита, без электропроводности

Видно, что применение гальванических покрытий является одним из наиболее эффективных способов повышения долговечности и стабильности работы оснастки электрохимических станков. Среди различных металлов никель выделяется высокой коррозионной стойкостью, прочностью и электропроводностью.

Гальваническое никелирование – технологически доступный процесс, обеспечивающий плотные и равномерные покрытия на деталях сложной формы [10].

Целью работы является анализ современных данных о структуре, свойствах и применении никелевых покрытий для повышения ресурса оснастки электрохимических станков.

Обзор литературы

Исследования в области гальванического никелирования (рис. 1) ведутся более ста лет и по-прежнему остаются актуальными в связи с потребностью промышленности в долговечных, износо- и коррозионностойких покрытиях. Никелевые покрытия применяются в машиностроении, электронике, приборостроении, а также в производстве технологической оснастки, подвергающейся воздействию электролитов и электрических полей [11].

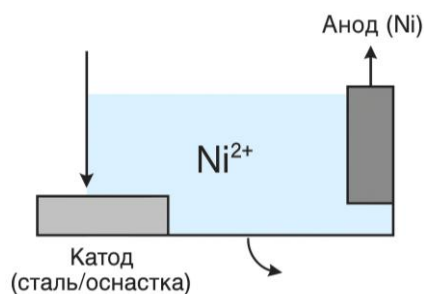


Рис. 1. Гальваническое никелирование

По данным Мельникова А. И. [1], никелевые покрытия отличаются высокой плотностью, адгезией и равномерностью слоя даже на деталях сложной формы. Оптимальные режимы никелирования (2–6 А/дм², 45–60 °С) обеспечивают минимальную пористость и стабильные свойства покрытия.

Исследования Виноградова С. Н. [2] показали, что введение блескообразователей и борфтористых соединений формирует мелкокристаллическую структуру с твёрдостью до 600 НВ и высокой износостойкостью; термообработка при 200–300 °С повышает адгезию.

Сравнительный анализ Кузнецовой Е. В. [3] подтвердил, что никель превосходит медь, цинк и хром по коррозионной стойкости и увеличивает срок службы оснастки в 2–3 раза.

Зарубежные авторы (Parkinson R. [4]; Lin et al. [5]) отмечают, что композитные покрытия Ni–P и Ni–W обладают аморфной структурой, повышенной химической и термической стойкостью.

Работы Беляева А. Г. [6] и Иванова П. Н. [7] показывают снижение коррозии в 2,5–3 раза и износа на 30–40 % при применении никелевых покрытий.

В целом, никелевое гальваническое покрытие сочетает технологичность, устойчивость к агрессивным средам и стабильность свойств, а актуальные исследования направлены на оптимизацию электролитов и режимов осаждения для повышения равномерности и долговечности слоя.

Анализ и обсуждение результатов исследований

Литературный обзор показал, что никелевые гальванические покрытия обладают оптимальным сочетанием технологических, механических и эксплуатационных свойств, обеспечивая эффективную защиту и упрочнение оснастки электрохимических станков.

Главными преимуществами никеля по сравнению с цинком, медью и хромом являются высокая коррозионная стойкость и стабильность структуры при воздействии токов и электролитов.

Отмечено, что композитные покрытия Ni–P и Ni–W превосходят чистый никель по микротвёрдости (на 10–20 %) и долговечности (на 30–40 %), благодаря аморфной или нанокристаллической структуре.

Оптимальная толщина никелевого слоя составляет 20–50 мкм; термообработка при 200–250 °С улучшает адгезию и стабильность покрытия.

Перспективными считаются многослойные и импульсные режимы никелирования, позволяющие повысить однородность и износостойкость тонких элементов.

Таким образом, никелевое гальваническое покрытие является технологически и экономически целесообразным способом повышения ресурса оснастки электрохимических станков.

Экономический аспект

Применение никелевого гальванического покрытия при изготовлении и восстановлении оснастки электрохимических станков обладает выраженным экономическим эффектом.

Средняя стоимость никелирования (250–400 руб/м² при толщине 20–30 мкм) ниже, чем у хромирования (≈ 600 руб/м²) и лишь немного выше цинкования. При этом срок службы оснастки увеличивается в 2–3 раза, что снижает эксплуатационные затраты на 15–25 %.

Возможность локального восстановления покрытия уменьшает списание дорогостоящих деталей, а применение композитных систем Ni–P и Ni–W дополнительно повышает ресурс до 30 %.

Таким образом, никелевое покрытие является технологически и экономически целесообразным решением для повышения эффективности работы электрохимических станков (тал. 2).

Таблица 2

Сравнение экономических показателей различных покрытий

Показатель	Никель (Ni)	Никель–фосфор (Ni–P)	Хром (Cr)	Цинк (Zn)	Без покрытия
Средняя стоимость нанесения, руб/м ²	300–400	400–550	600–700	150–200	—
Средняя толщина покрытия, мкм	20–40	25–50	15–25	10–15	—
Увеличение срока службы оснастки	×2.5	×3	×2	×1.2	1×
Снижение затрат на ремонт и обслуживание, %	20–25	25–30	15–20	5–10	0
Экономический эффект (снижение эксплуатационных расходов)	высокий	высокий	средний	низкий	отсутствует
Целесообразность применения	✓✓✓	✓✓✓	✓✓	✓	✗

Предположим, предприятие эксплуатирует электрохимические станки с комплектом оснастки общей площадью покрытия 100 м² (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение экономических показателей различных покрытий

Показатель	Без покрытия	Никель (Ni)	Никель–фосфор (Ni–P)
Средняя стоимость нанесения покрытия, руб/м ²	—	350	450
Общие затраты на нанесение покрытия, руб	—	35 000	45 000
Средний срок службы оснастки,	12	30	36
Стоимость ремонта и замены оснастки, руб/год	200 000	80 000	65 000
Экономия на ремонте и замене, руб/год	—	120 000	135 000
Срок окупаемости покрытия	—	≈3,5 мес	≈4 мес
Чистая экономия за 3 года эксплуатации	—	≈325 000 руб	≈360 000 руб

Выводы

1. Никелевое гальваническое покрытие является эффективным средством защиты оснастки электрохимических станков от коррозии и износа.
2. Покрытия Ni, Ni–P и Ni–W повышают микротвёрдость на 10–25 %, коррозионную стойкость в 2–3 раза и продлевают срок службы деталей до 50 %.
3. Применение никелирования снижает эксплуатационные расходы на 15–25 % благодаря увеличению ресурса и сокращению ремонтов.
4. Технология доступна, универсальна и допускает локальное восстановление.
5. Перспективы связаны с разработкой многослойных систем (Ni–P–Cr, Ni–Cu–Ni) и совершенствованием импульсных режимов осаждения.

Библиографический список

1. Melnikov A. I. Galvanotechnics and electrochemistry of coatings. – Mechanical Engineering, 2019.P.284.(in Russian) [Мельников А. И. Гальванотехника и электрохимия покрытий. М. Машиностроение, 2019. 284 с.].
2. Vinogradov S. N. Study of electrolytic deposition of nickel-chromium coatings // Surface. Physics, Chemistry, Mechanics. – No. 5. – 44-50 (2020). (In Russian) [Виноградов С. Н. Исследование электролитического осаждения никель-хромовых покрытий // Поверхность. Физика, химия, механика. № 5. – 44–50. (2020)].
3. Kuznetsova E. V., Smirnov D. A. Influence of electrolyte composition on the corrosion resistance of nickel coatings // Metalworking. No. 2. 28–34 (2021) (In Russian) [Кузнецова Е. В., Смирнов Д. А. Влияние состава электролита на коррозионную стойкость никелевых покрытий // Металлообработка. № 2. – 28–34. (2021)].

4. Parkinson R. Properties and Applications of Electroless Nickel. – Nickel Institute Technical Series, 2021. P. 36
5. Lin Y., Zhou X., Chen Y. Study of Ni–W composite coatings for corrosion protection. // *Journal of Surface and Coatings Technology*, 358, 51–59(2019). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.01.053
6. Belyaev A. G. Galvanic nickel plating in the production of equipment for electrochemical processing // *Electroplating and surface treatment*. - No. 4. 60-65 (2022). (In Russian) [Беляев А. Г. Гальваническое никелирование в производстве оснастки для электрохимической обработки // *Гальванотехника и обработка поверхности*. № 4. 60–65. (2022)]
7. Ivanov P. N. Increasing the service life of electrochemical machine tool equipment using nickel coating // *Mechanical Engineering Technology*. No. 8. 19–23(2020). (In Russian) [Иванов П. Н. Повышение ресурса оснастки электрохимических станков методом никелевого покрытия // *Технология машиностроения*. № 8. 19–23. (2020)]
8. Sudagar J., Lian J., Sha W. “Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings – A critical review.” *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 571 (2013), P. 183–204.
9. Zellele D. M., Yar-Mukhamedova G. Sh., Rutkowska-Gorczyca M. “A Review on Properties of Electrodeposited Nickel Composite Coatings: Ni-Al₂O₃, Ni-SiC, Ni-ZrO₂, Ni-TiO₂ and Ni-WC.” *Materials*. Vol. 23 (2024), Art. 5715.
10. Recent Advances in Electrodeposition of Nickel-Based Nanocomposites Enhanced with Lubricating Nanoparticles. *Nanomanufacturing and Metrology*. Vol. 7 (2024), Art. 25.
11. Chen M., Dong W., Qin C. A Method for Electroless Nickel Plating on Aluminum Alloy Surface. *Engineering Science*. Vol. 5, No. 3 2020, P. 33–37
12. Polyakov V. I., Knyazev S. A. Increasing the durability of technological equipment by nickel electroplating. // *Technology of Mechanical Engineering*, No. 6 P. 42–47(2023). (In Russian) [Поляков В. И., Князев С. А. Повышение долговечности технологической оснастки методом

© Коггала Л.Ч.М., Рамазанов К.Н., 2025

М.В. ЛУКАШОВ, Д.А. БАЙДИМИРОВ

lukaschoff.misha@yandex.ru

Науч. руковод. – старший преподаватель Р.К. ДАВЛЕТКУЛОВ

Уфимский университет науки и технологий

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ, ПОСЛЕ СУХОГО ЭЛЕКТРОПОЛИРОВАНИЯ

Аннотация: данная работа предлагает методику для применения сухого электрополирования для образцов, выращенных селективным лазерным сплавлением. В ходе исследования были выявлены зависимости шероховатости и структура поверхности от напряжения, частоты вращения шпинделя и времени обработки.

Ключевые слова: методика, сухое электрополирование, селективное лазерное сплавление, шероховатость, структура.

В данной работе предлагается методика исследования постобработки образцов, полученных в ходе селективного лазерного сплавления (СЛС), сухим электрополированием (СЭП).

Селективное лазерное сплавление – это технологическая операция аддитивного производства, при которой деталь создается послойно полным расплавлением металлического порошка с помощью высокоомощного лазерного луча. На каждой стадии лазерный луч выборочно сплавляет частицы порошка, полностью расплавляя их и формируя твердый слой, плотный материал, свойства которого близки к свойствам литого металла. [1, с.5, с.14]

Метод сухого электрополирования заключается в уносе материала с поверхности изделия пористыми ионообменными гранулами, пропитанными микродозами химических элементов (рис. 1). [2]

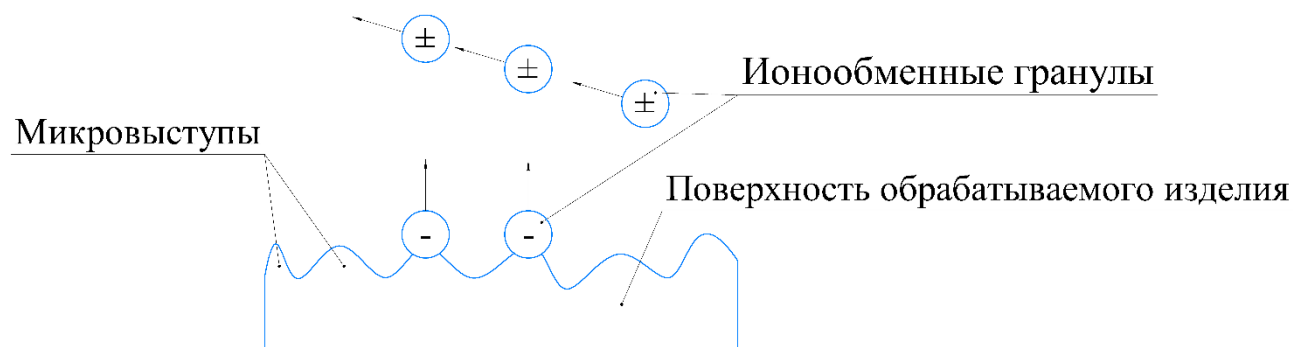


Рис. 1. Принцип работы СЭП

Сухое электрополирование не изменяет химический и структурный состав поверхности изделий, не окисляет поверхность и не создает оксидных пленок на поверхности, а также не скругляет острые кромки. [2]

При разработке методики, в ходе эксперимента, была установлена зависимость шероховатости поверхности, микроструктуры, структурно-фазового состава и веса до и после обработки от следующих ключевых параметров сухого электрополирования: напряжения, число оборотов в минуту и времени обработки изделий.

Исследование проводилось на базе Уфимского университета науки и технологий (УУНиТ), в студенческом конструкторском бюро «Поверхность» на созданном там же станке сухого электрополирования (рис. 2).

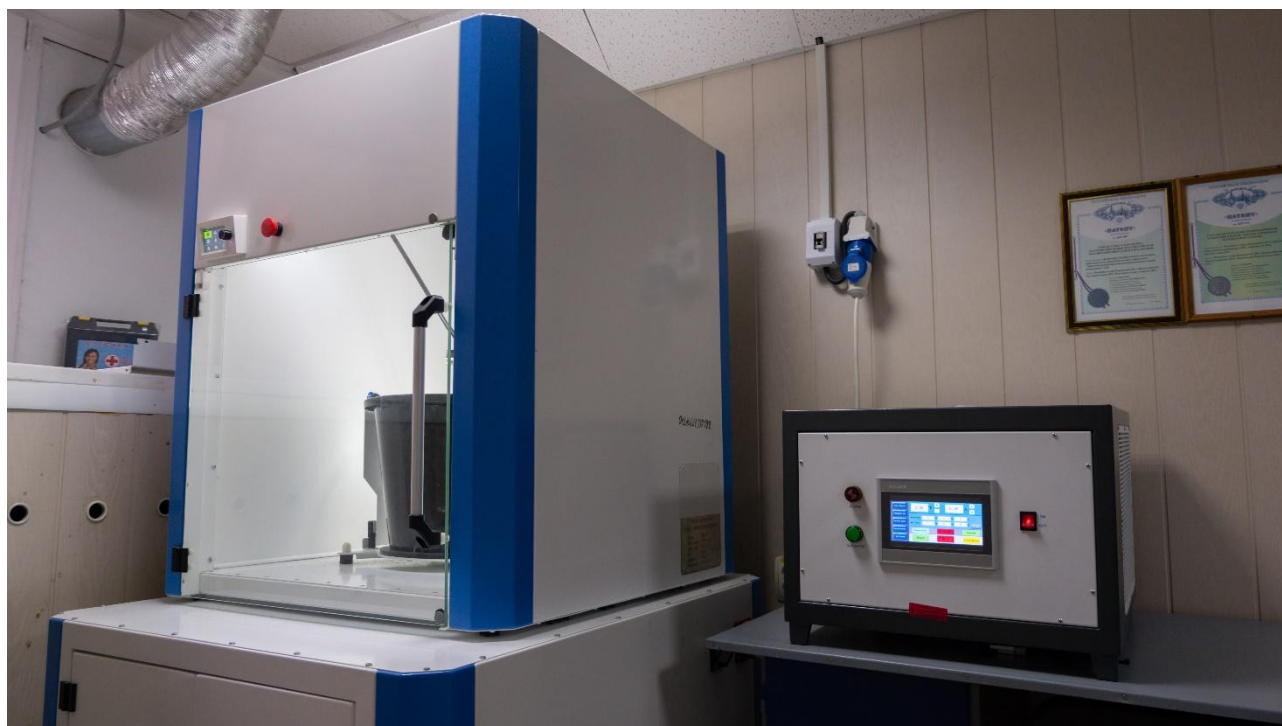


Рис. 2. Станок СЭП российского производства

В ходе эксперимента были исследованы различные режимы работы, менялись следующие параметры: напряжение U (30 В и 50 В), частота вращения шпинделя N (30 об./мин., 60 об./мин., 120 об./мин.) и время обработки t (1 час, 3 часа, 6 часов), схема эксперимента представлена на (рис. 3).

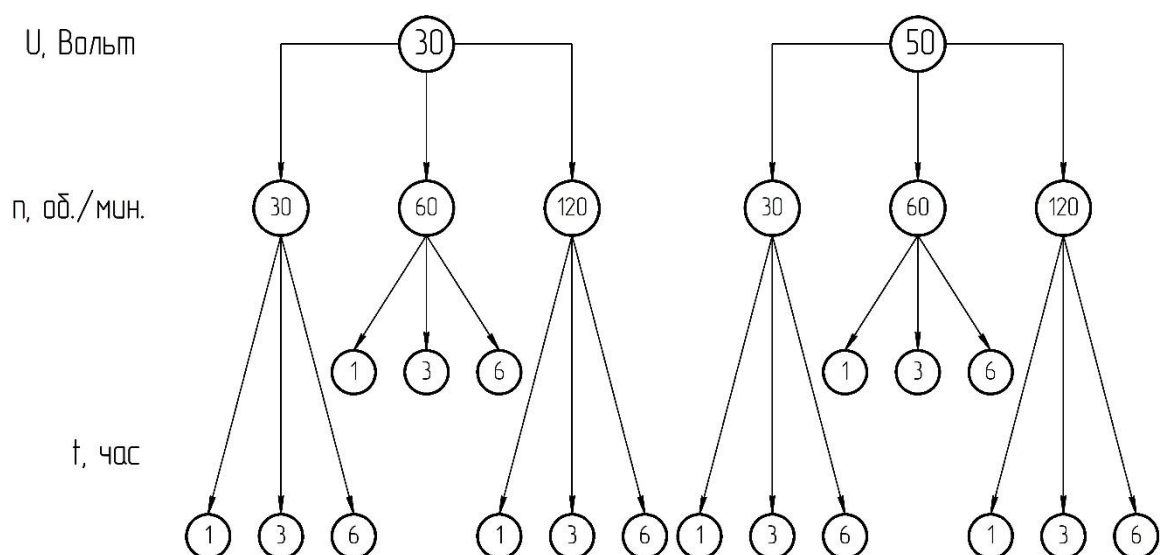


Рис. 3. Схема эксперимента

Для эксперимента использовались образцы из сплава 12X18H10T, выращенные селективным лазерным сплавлением.

После каждого этапа эксперимента проводились замеры шероховатости и микроструктуры, а также структурно-фазовый анализ поверхности. Шероховатость оценивается по среднеарифметическому отклонению профиля (R_a), замеры производились снятием профилограммы, оценка происходит как вдоль трека построения СЛС, так и поперек, до и после СЭП. Микроструктура и структурно-фазовый анализ поверхности производился в лаборатории металлографии при университете. (рис. 4).

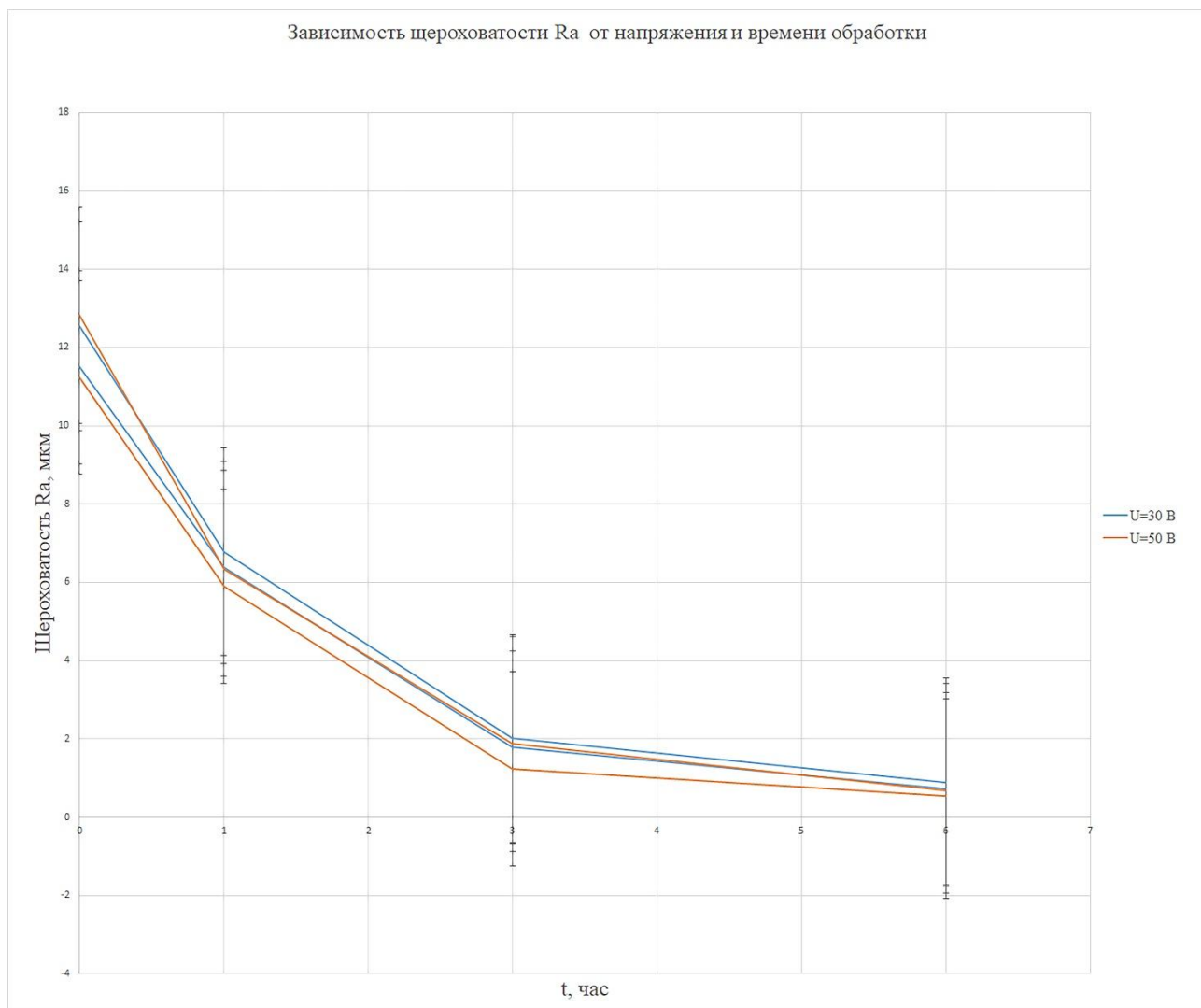


Рис. 4. Диаграмма изменения шероховатости поверхности образцов от времени и напряжения

Так же после до и после каждого этапа обработки производился замер массы изделий. Для измерений использовались аналитические весы модели AND HR-150AG. (рис. 5)

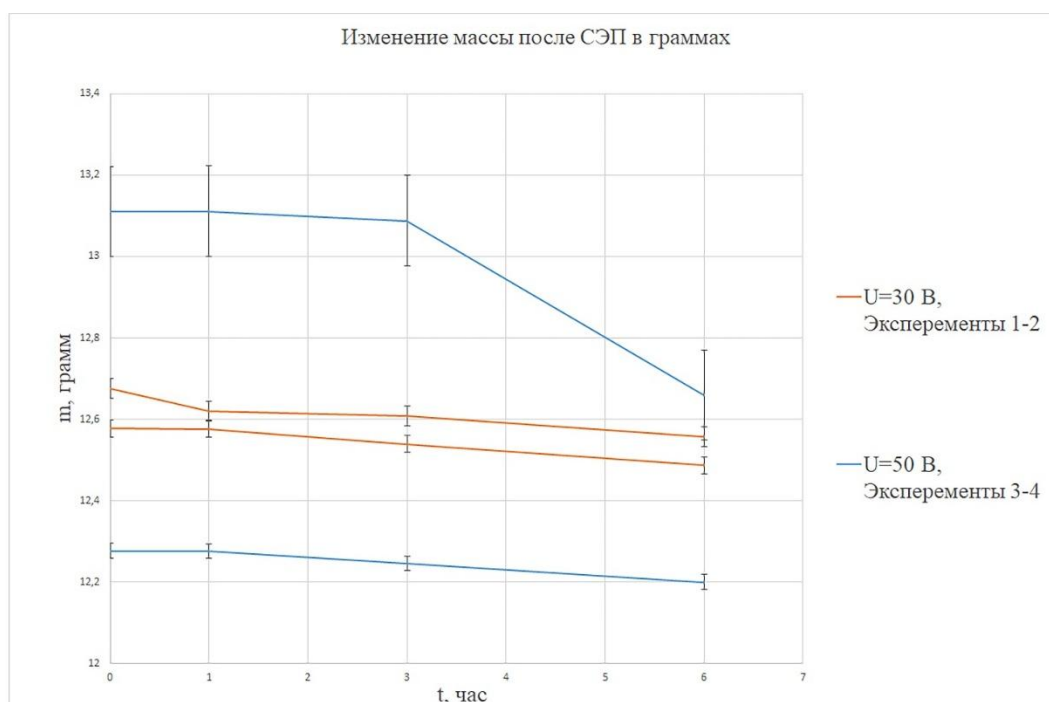


Рис. 5. Диаграмма изменения массы изделия в зависимости от напряжения и времени обработки

В результате данного исследования были получены методологические рекомендации по обработке изделий из сплава 12Х18Н10Т, полученных путем селективного лазерного сплавления.

Библиографический список

1. Кулик В. И., Нилов А. С., Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники. г. Санкт-Петербург
2. Мингажев А.Д., Криони Н.К., Мингажева А.А., Давлеткулов Р.К., Патент РФ № 2715398. МПК С25F 3/24. Способ электрополирования детали.

© Лукашов М.В., Байдимиров Д.А., 2025

А.А. МИНГАЖЕВА

adventureseeker@list.ru

Науч. руковод. – докт. техн. наук, проф. К.Н. РАМАЗАНОВ

Уфимский университет науки и технологий

ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОГО АЗОТИРОВАНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ НЕФТЕСКВАЖИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация: в работе представлены результаты исследований эксплуатационных свойств деталей из сталей 40Х и 40ХН с азотированными слоями, полученными при ионно-имплантационной активации их поверхности. Показано, что ионно-имплантационная активация при энергиях порядка 25 кэВ позволяет значительно повысить износостойкость деталей нефтескважинного оборудования.

Ключевые слова: активация; ионное азотирование; ионная имплантация; диффузия; зерна; границы; износостойкость; вал; нефтескважинное оборудование; ресурс; натурные испытания.

К одним из ответственных деталей нефтяного и нефтедобывающего оборудования относятся валы различного назначения (рис.1). В процессе эксплуатации в условиях воздействия агрессивных сред, наличия абразивных частиц, значительных нагрузок и высоких скоростей данные валы подвергаются интенсивному изнашиванию в местах сопряжений с подшипниками скольжения. Кроме того, особенностью работы внутрискважинного оборудования является различие условий эксплуатации в зависимости от нефтедобывающего региона, отличающегося составом водо-нефтяной смеси, а также содержанием и видом частиц абразива, что создает дополнительные трудности при выборе средств защиты оборудования и деталей. Преждевременный выход из строя скважинного оборудования требующий его замены или ремонта связан с необходимостью использования дорогостоящих подъемно-спусковых работ [1]. В этой связи повышению ресурса и надежности нефтепромыслового оборудования оказывается значительное внимание.

Известно, что для повышения износостойкости деталей используются методы нанесения таких защитных покрытий как геотермические, ионно-плазменные, гальванические и др. Однако перечисленные виды покрытий не показали обнадеживающего результата в условиях эксплуатации нефтескважинного оборудования [2]. В то же время, такие методы упрочнения поверхности детали как газовое и, особенно, ионное азотирование показали перспективность их использования для повышения износостойкости деталей погружного скважинного оборудования [3].

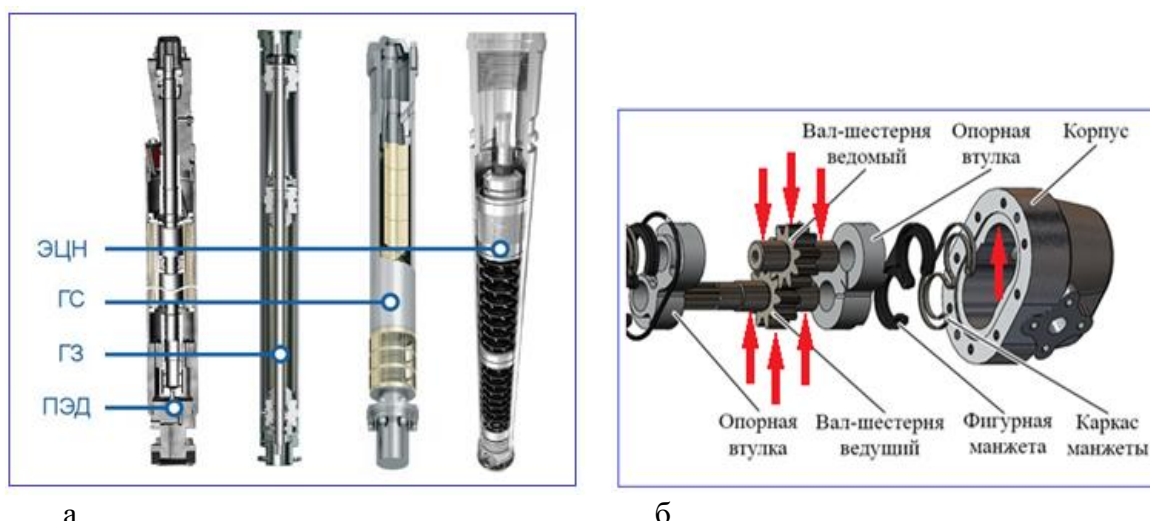


Рис. 1. Износ валов:

а – скважинного оборудования (ПЭД- погружной электродвигатель, ГЗ - гидрозащита, ГС –газосепаратор, диспергатор, ЭЦН – электроцентробежный насос);
б – роторных насосов

Газовое азотирование детали часто приводит к образованию неравномерного слоя с уменьшенной концентрацией насыщаемого вещества, неоднородной и пониженной твердостью материала поверхностного слоя, возникновением дефектных участков, формированию нитридной сетки. Кроме того, газовое азотирование характеризуется низкой производительностью процесса насыщения азотом. Ионному азотированию, хотя и в гораздо меньшей степени также присущи указанные недостатки. Как при газовом, так и при ионном азотировании диффузия азота происходит в основном избирательно по границам зерен, что приводит к образованию нитридной сетки [4]. Причиной образования нитридной сетки в АС является различие в интенсивности диффузии азота в зернах металла и по его границам. Поскольку интенсивность диффузии по границам зерен намного выше чем в объемах зерен, то, для получения АС с достаточным содержанием нитридных фаз, приходится перенасыщать азотом границы зерен для получения достаточной насыщенности азотом самих зерен. Учитывая тот факт, что различие в интенсивности насыщения зерен и их границ отличается до тысячи раз [4], то этот эффект приводит к значительному перенасыщению границ зерен азотом. Наличие же нитридной сетки приводит к снижению износостойкости азотированного слоя. [5].

Исходя из современных представлений о процессах диффузии [6] и процессах изнашивания [7], снижение прочностных характеристик на границах зерен в результате их перенасыщения азотом, приводит к выкрашиванию фрагментов АС (рис. 2) в результате усталостных разрушений, возникающих при многократном механическом взаимодействии микровыступов контактирующих поверхностей в процессе трения изнашивания (рис. 3).

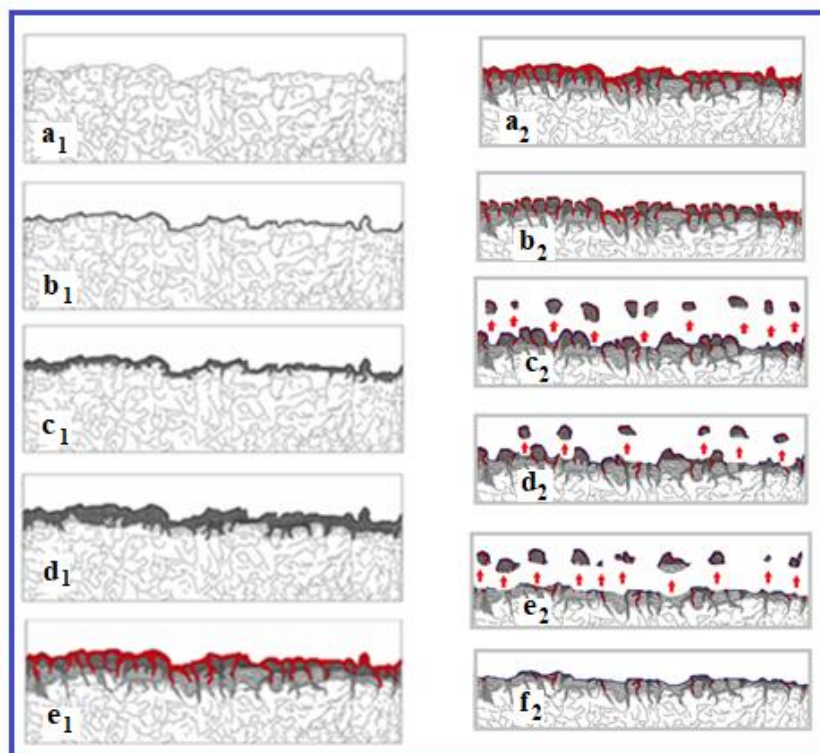


Рис. 2. Схематические модели процессов формирования и изнашивания АС, полученного при азотировании традиционным способом:

a_1, b_1, c_1, d_1, e_1 – процесс формирования АС;
 $a_2, b_2, c_2, d_2, e_2, f_2$ – процесс изнашивания АС

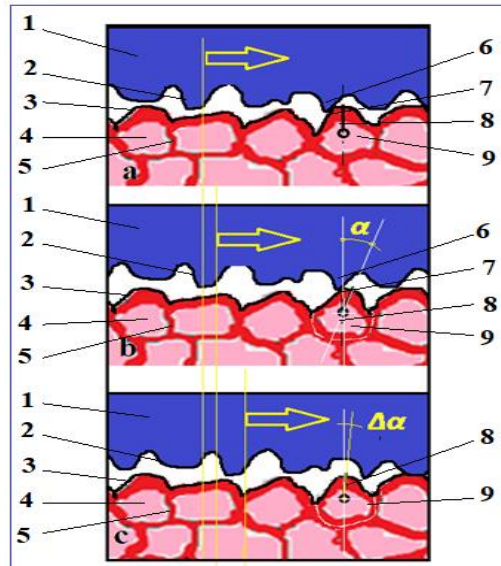


Рис. 3. Взаимодействие микровыступов контактирующих поверхностей в процессе трения скольжения:

1 – подшипник, 2 – микровыступы на поверхности подшипника,
 3 – микровыступы АС вала, 4 – зерна АС, 5 – границы зерен АС,
 6 – взаимодействующий микровыступ втулки, 7 – точка контакта микровыступов,
 8 – ось зерна, 9 – деформируемое зерно АС; α – угол поворота зерна при взаимодействии с контрвыступом, $\Delta \alpha$ – остаточная деформация зерна

Использование ионного азотирования (ИА) в тлеющем разряде позволяет значительно повысить однородность АС и, как следствие, его износостойкость. Однако, производительность процесса азотирования повышается незначительно [4].

В последние годы целью повышения производительности ИА и обеспечения однородности его физико-механических свойств разрабатываются различные технологии комплексного азотирования, включающие предварительную активацию материала ПС перед ИА. Эффект использования активации ПС заключается в повышении в нем плотности дефектов кристаллической структуры (ДКС), поскольку интенсивность диффузии напрямую зависит от этого фактора [6]. Активацию ПС проводят методами ППД [8], а также воздействием сильнофокусированных электронных пучков [9].

Указанные методы активации ПС приводят к значительному повышению производительности азотирования [8,9]. В то же время Активация ПС, основанная на измельчении зерен, уменьшая их размеры позволяет несколько снизить различие в интенсивности диффузионных процессов в зернах и по их границам, что, однако не приводит к упрочнению границ зерен АС. При этом для повышения однородности АС образующаяся дефектность внутри зерен должна приближаться к дефектности границ зерен [4].

В этой связи разработка технологии комплексного ИА с предварительной активацией ПС, обеспечивающей значительное повышение плотности ДКС в зернах, является достаточно актуальной задачей.

Известно, что в процессе среднеэнергетической (порядка 25 кЭВ и более) ионной имплантации (ИИ), в ПС происходит формирование высокой плотности ДКС на глубине порядка 200 до 300 мкм [10], что позволяет использовать для предварительной активации ПС перед ИА.

Исходя из этого предположения в данной работе были проведены разработки и исследования комплексной технологии ИА [11] с предварительной среднеэнергетической ИИ азотом ПС образцов из конструкционных сталей 40Х, 40ХН. Среднеэнергетическую ИИ проводили на установке Виктория-3М при энергии ионов азота 25 кЭВ, дозы ИИ: для стали 40Х – $1,98 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, для 40ХН – $1,82 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Натурные испытания валов проводились на экспериментальном стенде в лаборатории УГНТУ, позволяющем обеспечить условия эксплуатации роторных насосов близкие к производственным.

Лабораторные стендовые испытания на изнашивание АС исследуемых образцов показало на повышение износостойкости АС, полученных при активации ИИ. Для АС стали 40Х износостойкость повысилась в 3 раза, а для АС стали 40ХН – в 3,5 раз (таблица 1).

Характер распределения микротвердости по глубине АС показал, что в исследуемых сталях при активации ПС происходит увеличение толщины упрочненного слоя: для 40Х – со 160 мкм до 250 мкм, для стали 40ХН – со 170 мкм до 240 мкм.

Таблица 1

Результаты натурных испытаний на изнашивание образцов из сталей 40Х и 40ХН

	Материал образца	Вид обработки	M ₀ , Г	M ₁ , Г	Δ M, Г
1	40Х	Исх	680,22	627,29	52,93
2		ИА	681,90	664, 58	17,32
3		ИИ+ИА	684,32	676,69	7,63
1	40ХН	Исх	701,84	653,09	48,75
2		ИА	707,81	692,37	15,44
3		ИИ+ИА	709,56	703,33	6,23

Исх – исходное состояние, ИИ – ионная имплантация, ИА – ионное азотирование,

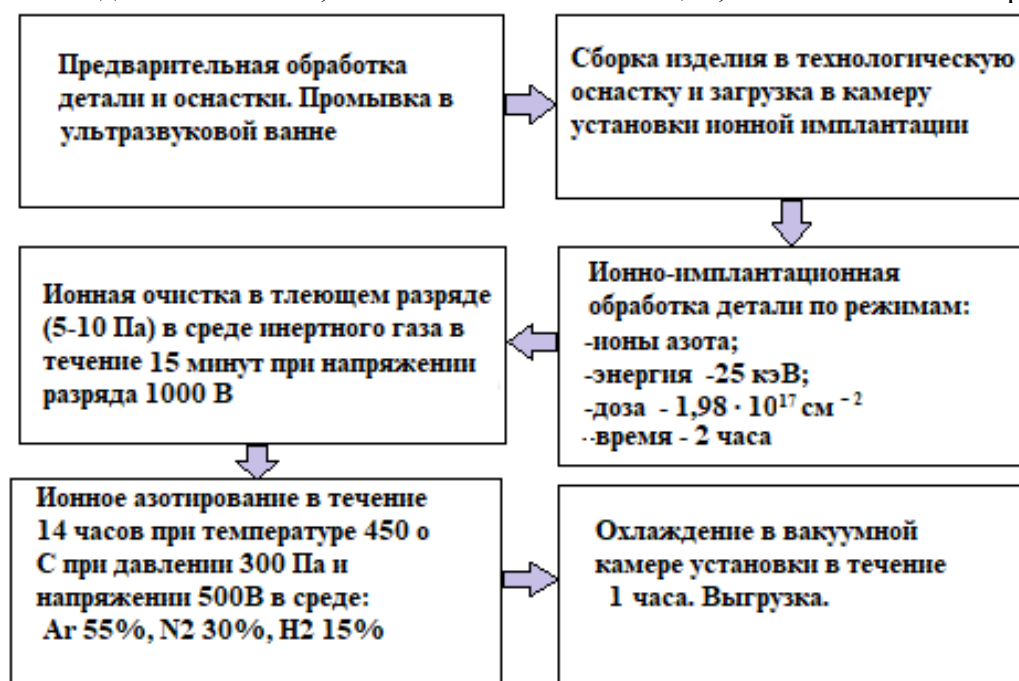


Рис. 4. Схема технологического процесса ИА валов нефтяного оборудования

На основе проведенных в работе исследований была разработана новая технология комплексного ионного азотирования (см. рис. 4). Результаты промышленных испытаний детали «вал внутрискважинного нефтяного диспергатора» с АС, полученным по разработанной технологии показал на повышение ресурса детали в 2,8–3,2 раза.

Библиографический список

1. Гаврилова, Л. А. Анализ технико-экономических показателей установок для ремонта скважин / Л. А. Гаврилова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – № 2. – С. 214-217. – EDN MURJWT.
2. Песин, М. В. Технологическое обеспечение повышения надежности изделий нефтегазодобывающей и горной промышленности / М. В. Песин // Экспозиция Нефть Газ. – 2012. – № 4(22). – С. 54-55. – EDN OYXQVV.

3. Песин, М. В. Технологическое обеспечение, повышение качества и долговечности деталей нефтепромыслового и бурового оборудования / М. В. Песин, Е. Д. Мокроносов // Экспозиция Нефть Газ. – 2010. – № 6(12). – С. 41-43. – EDN MWIVBF.
4. Моделирование процесса ионного азотирования / С. А. Герасимов, М. Г. Крукович, Е. А. Бадерко, Н. П. Клочков // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. – № 1. – С. 313-332.
5. Иваненко А. О., Тулькова И. А., Уваров М. М. Технологические особенности азотирования резьбовых поверхностей ответственных деталей электромеханического привода. Изв. вузов. приборостроение. 2018. т. 61, № 4. с. 360 – 367.
6. Гегузин Я.Е. Диффузионная зона. – М.: Наука, 1979. – 343 с
7. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
8. Ковалевская Ж.Г. Структура и свойства поверхностных слоев и покрытий при модифицирующей ультразвуковой обработке: дис. ... д-ра тех. наук 05.16.09 / Ковалевская Ж.Г. - Томск, 2018. - 334 с.
9. Квасницкий В.В., Кузнецов В.Д. , Коваль Н.Н. , Иванов Ю.Ф. , Тересов А.Д., Маркашова Л.И., Квасницкий В.Ф., Электронная обработка материалов, 2009, № 3, с. 14–20.
10. Н.П. Апарина, М.И. Гусева, Б.Н. Колбасов, С.Н. Коршунов, А.Н. Мансурова, Ю.В. Мартыненко. Некоторые аспекты эффекта дальнего действия, Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2007, вып. 3, с. 18–27.
11. Патент № 2777058 С1 Российская Федерация, МПК С23С 8/26, С23С 8/02, С23С 8/36. Способ азотирования детали из легированной стали:
№ 2022102050: заявл. 30.01.2022: опубл. 01.08.2022 / А. Д. Мингажев, Н. К. Криони, А. А. Мингажева. – EDN ZXUQAL.

© Мингажева А.А., 2025

А.А. САГИТОВ

anversagitov@gmail.com

Науч. руковод. – канд. техн. наук., А.Ю. НАЗАРОВ

Уфимский университет науки и технологий

ПОКРЫТИЯ TiAlSiN: МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ЭРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ. УПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Аннотация: в статье раскрывается тема необходимой защиты металлорежущих инструментов в современной промышленности. Рассматривается покрытие системы TiAlSiN как эффективный метод противодействия различным типам износа инструмента. Описываются методы нанесения покрытия и его механические свойства.

Ключевые слова: методы защиты; компоненты покрытия; физическое осаждение из паровой фазы; эрозия; режущая сила; срок службы инструмента.

Введение

Постоянное развитие промышленности и производства влекут за собой непрерывный рост требований, предъявляемых к средствам производства, в частности, к металлорежущим инструментам. Так, обработка все более твердых и труднообрабатываемых материалов становится все сложнее, и в итоге приводит инструменты к выходу из строя, что влечет за собой большие затраты. Например, суперсплав Inconel 718 известен как материал, который трудно обрабатывать, из-за высокой склонности к упрочнению, высокой горячей твердости, низкой теплопроводности, высокой химической активности и наличия твердых карбидных частиц в своем химическом составе. Высокие скорости упрочнения и высокая горячая твердость материала приводят к высоким силам резания во время механической обработки.

Для обеспечения высоких эксплуатационных свойств современных инструментальных материалов поверхность должна иметь высокую твердость, низкий коэффициент трения, низкую шероховатость поверхности, коррозионную стойкость и пр. Для этого применяют различные в зависимости от задачи методы защиты. Их можно разделить на 5 групп: деформационное воздействие; термическое воздействие; поверхностное легирование; нанесение покрытий; комбинированная обработка.

Наиболее эффективным методом повышения работоспособности режущего инструмента - нанесение износостойких покрытий. Об этом можно судить по результатам, полученным в [1]: применение градиентных TiAlSiN покрытий увеличивают износостойкость режущего инструмента до десяти раз; [2]: нанокompозитный твердосплавный режущий инструмент с покрытием

TiAlSiN/TiSiN/TiAlN обеспечил в 1,7 раза больший срок службы инструмента и более гладкую поверхность ($R_a < 0,18$ мкм) на материале Inconel 718 по сравнению с непокрытым инструментом.

Характеристика системы TiAlSiN

Каждый компонент рассматриваемой системы оказывает значительное влияние на свойства покрытия. Важно, чтобы соотношение содержания атомов в покрытии было эффективным, чтобы один компонент не оказывал негативное воздействие на другие.

Ti способствует улучшению адгезии покрытия к подложке, особенно в виде своего нитрида TiN, применяемого в многослойных и градиентных архитектурах [3, 4, 5, 6]. Al используется для повышения твердости (в [7] было выявлено, что, когда содержание Al составляет 19,52%, жесткость, модуль упругости и сила сцепления считаются наилучшими, и их значения составляют 42 ГПа, 286 ГПа и 23,5 Н соответственно. Высокое содержание алюминия вызывает разрушение структуры, что доказано и в [8]). Кроме того, данный компонент играет важную роль, препятствуя окислению [5, 9, 10, 11, 12, 13], что позволяет применять покрытие для быстрорежущих сталей. Добавление Si принципиально изменяет структуру и позволяет создать аморфную матрицу Si_3N_4 , которая способствует уменьшению зерен (до 10 нм и меньше), а также упрочнению покрытия и снижению коэффициента трения [14]. В [11] описывается, что внедрение атомов Si эффективно задерживает фазовый переход между формами TiO_2 во время термического окисления и снижает растрескивание в оксидной пленке, таким образом увеличивая срок службы при повышенных температурах. N улучшает термическую стабильность, а изменение давления азота в камере может существенно увеличить твердость покрытия (она почти линейно возрастает до максимального значения 55,1 ГПа при $P_{N_2} = 0,037$ Па) [15].

Высокие значения были получены благодаря грамотному подбору параметров в [8]: в системах TiAlSiN максимальное рассчитанное значение модуля Юнга составляет 482 ГПа; максимальное теоретическое значение твердости – 48,2 ГПа. Это доказано и в [16], где проводился контроль смещения напряжения, количество оборотов подложки в единицу времени и т.д., в результате чего были получены параметры H, E, H3/E2 и H/E равные 56 ГПа, 770 ГПа, 0,75 ГПа и 0,124 соответственно.

Методы получения покрытия TiAlSiN

Все методы осаждения покрытий входят в две большие группы - химическое осаждение из паровой фазы (CVD - Chemical Vapor Deposition) и физическое осаждение из паровой фазы (PVD - Physical Vapor Deposition).

В химическое осаждение покрытий входят: высокотемпературное осаждение покрытий, среднетемпературное осаждение и осаждение покрытий с плазменным сопровождением. Основной принцип этих методов – протекание химических реакций в подаваемых на инструмент парах, которые и создают покрытие. Такой

подход проводится при высоких температурах 600...1100 °С, что исключает возможность применения для упрочнения инструментальной стали.

Говоря о физическом осаждении паров, можно выделить три основных метода: вакуумно-дуговой, магнетронный и электронно-лучевой. Первый способ обеспечивает высокую плотность покрытия, хорошую адгезию к поверхности, высокие эксплуатационные характеристики и стабильность, но образует капельную фазу, ухудшающую качество покрытий [14, 17, 18]. Магнетронный метод нанесения покрытий отличается значительно меньшей плотностью капельной фазы и относительно меньшей температурой подложки, однако магнетронное распыление не обеспечивает достаточную скорость осаждения покрытий и характеризуется низкой концентрацией плазмы и низкой степенью её ионизации. Для нейтрализации этих недостатков в [19] и [20] были предложены методы комбинирования технологий. В электронно-лучевом методе металл нагревается и испаряется с помощью электронно-лучевой пушки. В результате взаимодействия электронного луча с испаряемым металлом над его поверхностью возникает плазменная область - металлический пар, который взаимодействует с ионами реакционного газа, ускоряется в электрическом или магнитном поле и конденсируется на поверхности подложки (инструмента). Метод демонстрирует высокую скорость осаждения и чистоту покрытия, но требует высокие значения температуры.

Результаты исследований защиты поверхности инструментов

На данный момент проведено большое число исследований покрытия TiAlSiN, отражающих такие его характеристики как твердость, модуль Юнга и Н/Е. Связывая эти исследования непосредственно с областью защиты металлорежущих покрытий, хочется обратить внимание на статьи [21, 22, 23].

В [21] описывается способность покрытия TiAlSiN противостоять эрозии, так как она является основной причиной отказа высокоскоростных вращающихся механических компонентов. Поведение эрозии испытано с использованием угловых твердых частиц Al_2O_3 под углами удара 30 и 90 градусов. В результате испытаний, было выяснено, что более тонкие зерна и введенное остаточное сжатие обеспечили максимальные значения твердости и модуля Юнга ($35,34 \pm 0,63$) ГПа и ($360,6 \pm 2,5$) ГПа соответственно, когда разрядное напряжение увеличилось до 570 В. Однако, несмотря на более низкие значения твердости и модуля Юнга до ($34,85 \pm 0,58$) ГПа и ($330,7 \pm 2,7$) ГПа у покрытия, изготовленного при 560 В, оно показало самые низкие скорости эрозии со значениями ($0,015 \pm 0,002$) мг/г и ($0,025 \pm 0,002$) мг/г при углах удара 30 и 90 песочной эрозии соответственно, что составило лишь 1/45 и 1/9 от показаний, полученных при подложке ТС6 без покрытия. Это возможно благодаря наибольшему соотношению Н/Е, что означает, что оно обладает лучшей ударной стойкостью и способно наиболее эффективно сдерживать распространение трещин.

Авторы исследования [22] поставили цель определить колебания в резательной силе, износе инструмента, качестве поверхности и сроке службы инструмента для покрытых и непокрытых резцов из вольфрамового карбида, так

как в процессах механической обработки температура и сила, которые возникают, играют критическую роль в определении срока службы инструмента, что влияет на качество продукции. Суть эксперимента - фрезерование мартенситной стали 250 с использованием инструмента без покрытия, а также с покрытием системы TiAlSiN при различных условиях окружающей среды (сухие, влажные и криогенные). Результаты экспериментов показывают, что резательные усилия были снижены на 25–46% при использовании покрытых инструментов по сравнению с непокрытыми инструментами (таблица 1).

Таблица 1

Снижение силы резания и шероховатости поверхности R_a инструментов с покрытием TiAlSiN по сравнению с непокрытыми образцами при разных скоростях и в разных условиях

Скорость шпинделя об/мин	Процент снижения параметров					
	Сухие условия		Влажные условия		Криогенные условия	
	Сила резания	R_a	Сила резания	R_a	Сила резания	R_a
270	44,66	28,81	45,79	23,52	36,86	24,48
350	36,70	23,07	44,84	28,88	32,58	30,23
540	25,31	17,39	39,28	28,94	31,9	32,43

Причиной снижения шероховатости поверхности являются улучшенные механические свойства покрытого инструмента, что приводит к снижению износа инструмента и режущей силы.

Статья [23] наглядно отображает влияние толщины (исследовали покрытия толщиной 2, 3.5, 5, 7, 11 и 15 мкм) наноструктурированного износостойкого многослойного композитного покрытия Ti–TiN–(Ti,Al,Si)N на его механические и эксплуатационные свойства. Резательные испытания (продольное точение) проводились на стали С45 с карбидными вставками с исследуемыми покрытиями при различных режимах резания (250, 300 и 350 м/мин). Явная тенденция заключается в том, что при увеличении скорости резания срок службы инструментов с более толстыми покрытиями (особенно 11 и 15 мкм) уменьшается по сравнению с инструментом с более тонким покрытием. При скорости резания 350 м/мин инструмент с покрытием 15 мкм имеет срок службы, практически идентичный сроку службы инструмента без покрытия. Испытания показали, что наибольший срок службы инструмента был у инструментов с толщинами износостойкого слоя 5–7 мкм (общими толщинами 6–8 мкм).

В итоге, можно утверждать, что в настоящее время нанесение покрытий – это необходимый и очень эффективный способ защиты инструментальных материалов, позволяющий значительно продлить срок службы металлорежущих инструментов и повысить качество выпускаемой продукции. Хорошие результаты демонстрируют стойкие к окислению TiAlSiN покрытия, способные выдерживать ударную нагрузку, уменьшить износ и увеличить эксплуатационный ресурс.

Библиографический список

1. S. V. Ovchinnikova, A. D. Korotaev, and Yu. P. Pinzhin. Structure of Ti–Al–Si–N gradient coatings, 2014
2. Bilal Kursuncu, Halil Caliskan, Sevki Yilmaz Guven and Peter Panjan. Wear behavior of multilayer nanocomposite TiAlSiN/TiSiN/TiAlN coated carbide cutting tool during face milling of Inconel 718 superalloy, 2017
3. Yan Wu, Zhiyuan Guo, Zhaoyang Li, et al. Study on bonding strength and layer structure design of TiAlSiN multilayer gradient coating, 2022
4. K. Gołombek, A.E. Tomiczek, D. Pakuła, K. Matus. Characterization of nanocrystalline AlTiSiN coatings deposited by a LARC-CAE process, 2018
5. Верещака А.А. Исследование процесса осаждения и эксплуатационных свойств многослойно композиционного наноструктурированного покрытия Ti–TiN–(Ti,Al,Si)N, 2018
6. Cao, F; Munroe, P; Zhou, Z; Xie, Z. Mechanically robust TiAlSiN coatings prepared by pulsed DC magnetron sputtering system: Scratch response and tribological performance, 2018
7. Yulong Wang, Hao Zhang, Chengang Luo, et al. Influence of Al content on micro-properties of TiAlSiN coatings deposited by plasma enhanced magnetron sputtering, 2019
8. Xin Tan, Zhuangzhuang Hou, QiHui and Yinan Dong. First principle study of the elastic properties and electronic structure of TiAlSiN, 2017
9. Sang Hwan Bak, Dong Bok Lee. Oxidation of nano-multilayered TiAlSiN films at 800–900 °C in air, 2015
10. Ai Peng, Liu Lixiang, Li Xiaogang, Lang Wentao. Influence of TiAlSiN coatings on high temperature oxidation resistance of γ -TiAl based alloys, 2019
11. Jian W. Du, Li Chen, Jie Zhang, et al. Tuning mechanical properties of TiAlSiN/TiAlN multilayers by interfacial structure, 2024
12. Patrik Šulháněk, Libor Ďuriška, Marián Palcut, et al. Influence of isothermal annealing on microstructure, morphology and oxidation behavior of AlTiSiN/TiSiN nanocomposite coatings, 2023
13. D. Chaliampalias, L. Kolaklieva, R. Kakanakov, et al. Thermal and corrosion resistance of nanocomposite gradient TiAlSiN films, 2015
14. Wang Wenchang, Zhang Ling, Kong Dejun. AFM analysis of TiN, TiAlN, and TiAlSiN coatings prepared by cathodic arc ion plating, 2016
15. Н. М. Чекан, И. П. Акула, Е. В. Овчинников и др. Получение и термообработка покрытий системы Ti–Al–Si–N
16. I. V. Blinkov, A. O. Volkhonsky, V. S. Sergevnin, and N. Yu. Tabachkova. Structure and phase formation in the Ti–Al–Si–N system during the growth of nanostructured arc PVD coatings, 2015
17. D. V. Dukhopel'nikov and D. V. Kirillov. Cathodic arc evaporation of polycrystalline silicon, 2020
18. Oleg Sobol'a, Osman Dur. Structural engineering of multi-period composite nitride vacuum-arc coating based on (TiAlSi)N, 2020

19. А.И. Потекаев, В.М. Савостиков, А.Н. Табаченко, А.Ю. Шубин. Модификация свойств поверхности металлов и сплавов с применением комбинированного ионно-плазменного оборудования и многокомпонентных СВС-катодов, 2017
20. В.М. Савостиков, А.И. Потекаев, А.Н. Табаченко. Физико-технологические основы создания градиентно-слоистых поверхностей многокомпонентного состава совмещением методов ионно-диффузионного насыщения, магнетронного и вакуумно-дугового осаждения, 2011
21. Hua Li, Liuhe Li, Duoduo Li, et al. Erosion performance of TiAlSiN coatings prepared by high-power pulsed magnetron sputtering, 2023
22. Vinay Varghese, Abhishek Jagmalpuria, Pradeep V. Badiger, Ramesh M. R. Optimisation of machining parameters for end milling of maraging steel MDN 250 using TiAlSiN and TiSiN coated WC-Co inserts, 2020
23. Alexey Vereschaka, Sergey Grigoriev, Nikolay Sitnikov, et al. Influence of the thickness of multilayer composite nano-structured coating Ti–TiN–(Ti,Al,Si)N on the tool life of metal-cutting tools and the nature of wear, 2019

© Сагитов А.А., 2025

УДК 669.295

Н.А. СОКОЛОВА

sokolova_na@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент. А.Д. МИНГАЖЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация: в статье приводится механизм образования микропористой поверхности на деталях из магнитных сталей при их электролитно-плазменной обработке с наложением постоянного магнитного поля. Показано, что микропористая поверхность в условиях трения со смазкой позволяет повысить износостойкость сталей 40Х и 40ХН приблизительно в 1,5 -2 раза.

Ключевые слова: электролитно-плазменная обработка; наложение магнитного поля; микропористая поверхность; смазка; износостойкость; азотирование; гидродинамический эффект.

Повышение износостойкости деталей машин, работающих в условиях трения изнашивания является одной из важнейших задач современного машиностроения. Наряду с традиционными методами ХТО и нанесением покрытий создаются

специальные поверхности с регулярным рельефом и микропористыми покрытиями. Создание микропористых покрытий связано с необходимостью удержания смазки на контактных поверхностях узлов трения, поскольку микропоры способствуют проникновению и удержанию в них смазки, обеспечивая тем самым постоянную ее подачу в зону трения и образования устойчивого слоя смазки за счет использования эффекта гидродинамического подшипника [1,2]. При этом основными методами получения микропористых поверхностей (МПП) является нанесение газотермических покрытий или получение гальванического пористого хромового слоя [3]. В последнее время появились разработки, использующие для получения МПП электрохимические методы обработки [5,6]. Однако механизмы формирования МПП при электролитно-плазменной обработке поверхностного слоя конструкционных сталей при наложении магнитного поля остаются пока малоизученными.

Целью настоящей работы являлась разработка технологии формирования микропористой поверхности и исследование влияния наложения магнитного поля (МП) при обработке конструкционных магнитных сталей 40Х и 40ХН электролитно-плазменным методом (ЭПО).

В качестве объектов исследования влияния наложения МП при ЭПО на формирование МПП использовались образцы из конструкционных магнитных сталей типа 40Х и 40ХН. Испытания на изнашивание образцов проводились в следующих вариантах: исходное состояние материала (ИМ), исходное состояние материала с микропористой поверхностью (ИМ), после ионного азотирования (ИА) и МПП после ИА. В каждом варианте обработки использовалось по три образца. Испытания на износостойкость проводились на машине трения (High-Temperature Tribometer, CSM Instruments, Швейцария), по схеме «шарик-диск» (по стандарту ASTM G99 959 и DIN50324). Использовался шарик из стали ШХ15 диаметром 3 мм. Условия изнашивания: время испытания $T = 2,0$ часа, нагрузка на образец $F = 10$ Н, скорость перемещения образца $V = 10$ см/с, в условиях смазки. Электролитно-плазменная обработка в магнитном поле (ЭПО в МП) проводилась на экспериментальной установке «ЭПП-2М». В качестве электролита использовался водный раствор аммония сернокислого концентрацией 40,0 г/л и аммония лимоннокислого концентрацией 5,5 г/л, ЭПО детали проводили при температуре порядка 70 °С. Ионное азотирование осуществляли на установке «Эльтропульс» (Германия) по стандартным режимам обработки. Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе РА53-MET 3D.

Известно, что при наложении внешнего МП на ферромагнитные материалы происходит их намагничивание в результате ориентации доменов в соответствии с направлением действия внешнего МП [7]. При этом, в соответствии с эффектом Баркгаузена, увеличение намагниченности ферромагнитного материала при повышении напряженности внешнего МП происходит скачками, поскольку все большее количество доменов ориентируются по направлению действия внешнего МП [7].

При наложении МП на деталь из магнитной конструкционной стали происходит частичная переориентация доменов и образование зон с

преимущественной их ориентацией по направлению действия внешнего МП (рис.1). В связи с совпадением собственного и внешнего МП силовые линии внешнего МП концентрируются в упомянутых зонах преимущественной ориентации доменов (рис.1 б). Известно также, что силовые линии МП способствуют концентрации и перемещению заряженных частиц (ионов и электронов) [8]. При ЭПО, в следствие фокусировки силовых линий МП по упомянутым зонам с преимущественной ориентации, происходит интенсивный унос материала и образование микропор (рис. 1 с).

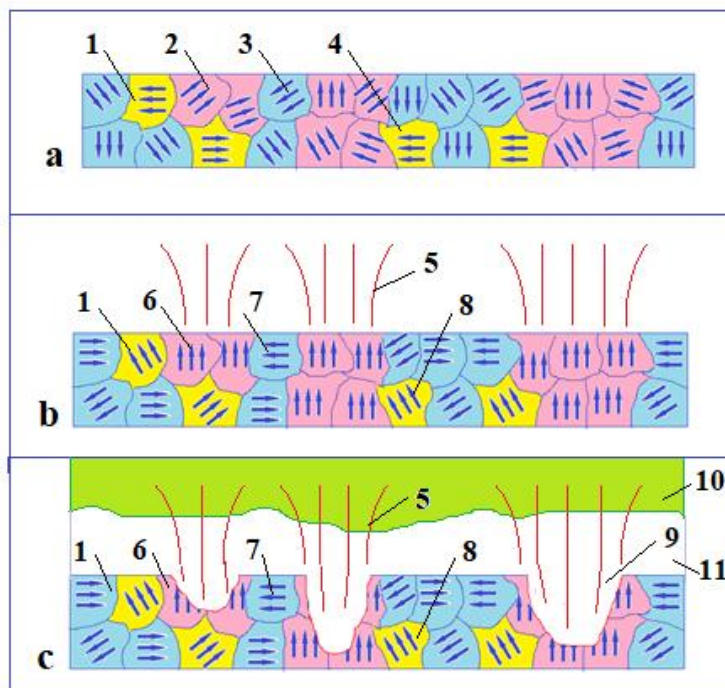


Рис. 1. Схема формирования МПП на поверхности ферромагнитного материала при ЭПО с наложением внешнего магнитного поля:

а – поверхностный слой стали в исходном состоянии;

б – переориентация доменов под действием внешнего МП;

с – процесс формирования МПП; 1 – обрабатываемая деталь, 2 – домены с близкой ориентацией в внешнем МП, 3,4 – домены с нейтральной и отрицательной ориентацией в внешнем МП, 5 – силовые линии МП, 6,7,8 – переориентированные домены, 9 – формирующиеся микропоры, 10 – электролит, 11 – паро-газовая оболочка)

С целью проверки представленной модели формирования МПП были получены МПП на конструкционных сталях 40Х и 40ХН, при изменении воздействия внешнего МП в процесс ЭПО (рис. 2).

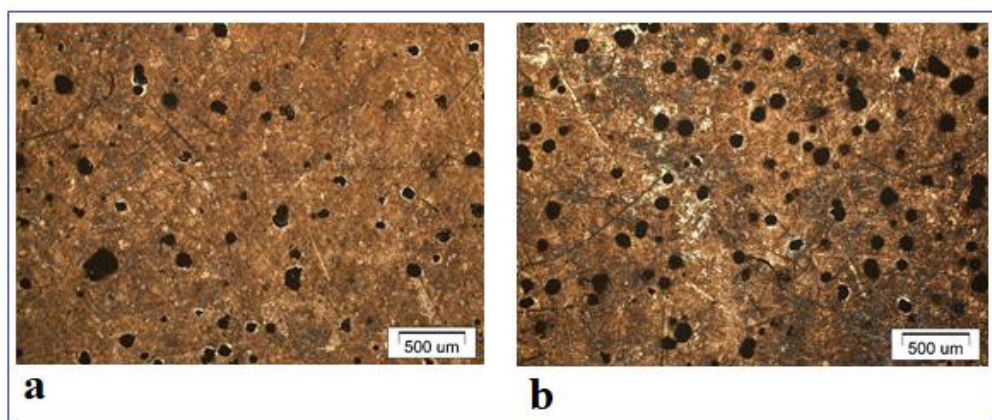


Рис. 2. МПП образца из стали 40ХН после ЭПО в МП (при дистанции поверхности от постоянного магнита: а –15 мм, б –10 мм)

Величина воздействия МП на обрабатываемую поверхность образцов изменялась за счет изменения дистанции между магнитом и образцом. Незначительное воздействие МП на поверхность образца привело к образованию МПП с меньшим количеством пор (рис. 2 а), поскольку напряженность МП была недостаточна для обеспечения значительного количества зон с преимущественной ориентацией доменов по направлению действия внешнего МП. Уменьшение расстояния до поверхности, усилила воздействие МП и привело к увеличению количества пор (рис. 2б).

В табл. 1 приведены исследованные режимы формирования МПП на образцах из сталей 40Х и 40ХН.

Таблица 1

ЭПО сталей 40Х и 40ХН

№	Сталь	ЭПО МП			Пористость	
		Электролит, соотношение АСК/АЛК, г/л	Время, мин	Дистанция, мм	%	Кол-во, шт/мм ²
1	40Х	30 / 3,5	12,0	10	10,2	14
2		30 / 12,5	10,0		11,3	15
3		50 / 3,5	10,0		9,6	13
4		50 / 12,5	8,0		12,1	17
5		50 / 5,0	10,0		10,4	14
6		40 / 10,0	10,0		12,2	18
7	40ХН	30 / 3,5	4,0	10	11,3	13
8		30 / 12,5	3,0		12,1	16
9		50 / 3,5	3,0		10,2	11
10		50 / 12,5	2,0		12,6	18
11		50 / 5,0	3,0		11,2	13
12		40 / 10,0	3,0		12,4	19

Испытания на износостойкость образцов из сталей 40X и 40XH по сравнимым вариантам показали, что наиболее эффективным методом повышения износостойкости поверхности деталей является создание МПП с последующим ионным азотированием при предварительной ионной имплантации азотом (табл. 2).

Таблица 2

Износостойкость образцов с МПП из сталей 40X и 40XH

№	Материал образца	Способ подготовки	Результаты	
			Потеря массы, $\Delta m \cdot 10^{-4}$, г	Коэффициент трения
1	40X	ИМ	306	0,09- 0,06
2		ИА	68	0,08- 0,07
3		ЭПОМП+ЭПП	162	0,03- 0,04
4		ЭПОМП+ЭПП+ИА	43	0,02- 0,03
6	40X Н	ИМ	293	0,09- 0,06
7		ИА	61	0,08- 0,07
8		ЭПОМП+ЭПП	157	0,03- 0,04
9		ЭПОМП+ЭПП+ИА	41	0,02- 0,03

МПП - микропористая поверхность; ИМ - исходный материал; ЭПО МП - электролитно-плазменная обработка в магнитном поле; ИА - ионное азотирование.

Использование МПП в условиях трения со смазкой позволяет повысить износостойкость сталей 40X и 40XH приблизительно в 1,5-2 раза. Азотирование МПП сталей 40X и 40XH обеспечивает повышение их износостойкости по сравнению с простым традиционным азотированием приблизительно в три раза, а по сравнению с МПП без азотирования более чем в 9 раз.

Библиографический список

1. Лебедев Д.И., Винокуров Г.Г., Стручков Н.Ф. Открытая пористость и шероховатость поверхности износостойких порошковых покрытий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018 (20), № 6, 68–72
2. Шнейдер Ю.Г., Гузок Я.В. Влияние микрорельефа трущихся пар герметичных холодильных компрессоров на их долговечность // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 1973, № 5, 30–32 .
3. Черкез М.Б., Богорад Л.Я. Хромирование. Изд 4-е. – Л.: Машиностроение. – 1978.
4. Башмур К.А., Петровский Э.А. Технологические возможности ячеистого рельефа для обеспечения эксплуатационных свойств цилиндрических поверхностей технологических агрегатов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2022, № 11, 99–107.

5. Erlebacher J. An Atomistic Description of Dealloying Porosity Evolution, the Critical Potential, and Rate-Limiting Behavior // J. Electrochem. Soc. – 2004, no. 151, 614;
6. Н.К. Криони, А.А. Мингажева, А.Дж. Мингажев Износостойкость азотированной микропористой поверхности из конструкционной стали, полученной электролитно-плазменной обработкой. Трение и износ. 2024. – Т. 45, № 6. – С. 486–492
7. Бозорт Р. Ферромагнетизм, пер. с англ., – М.: Иностранная литература, 1956. с. 784.
8. Арцимович, Л. А.. Физика плазмы для физиков / Л. А. Арцимович, Р. З. Сагдеев. – Москва: Атомиздат, 1979 – 312 с.

© Соколова Н.А., 2025

УДК 669.295

И.С. ХАЙРОВ

Salavatovich08.05@gmail.com

Науч. руковод. – канд. техн. наук. И.И. ЕМАЕВ

Уфимский университет науки и технологий

РАЗРАБОТКА РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ РЕЗАНИЯ НА ИЗНОС И СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТА

Аннотация: методика прогнозирования износа режущего инструмента с использованием регрессионного анализа в Microsoft Excel. Выявлены ключевые факторы, влияющие на стойкость инструмента, исключены статистические выбросы. Результаты позволяют оптимизировать режимы резания и снизить затраты на инструментальное обеспечение в машиностроении.

Ключевые слова: режущий инструмент, износ, стойкость, регрессионный анализ, математическое моделирование, оптимизация режимов резания, машиностроение, прогнозирование.

Введение

Износ режущего инструмента остается одной из наиболее актуальных проблем в области механической обработки материалов, непосредственно влияющей на качество продукции, производительность и экономическую эффективность производственных процессов. Анализ факторов, определяющих интенсивность износа, позволяет разрабатывать эффективные стратегии повышения стойкости инструмента и оптимизации технологических процессов.

Проведенные исследования позволяют выделить следующие ключевые факторы, влияющие на износ режущего инструмента.

Режимы резания оказывают комплексное воздействие на стойкость инструмента. Скорость резания является наиболее значимым параметром - ее увеличение приводит к экспоненциальному росту температуры в зоне резания и пути трения, что резко сокращает срок службы инструмента. Подача влияет на износ преимущественно через увеличение механической нагрузки, в то время как глубина резания изменяет термические условия обработки.

Свойства материала: твердость, прочность и наличие абразивных включений, напрямую определяют интенсивность изнашивания режущей кромки. С увеличением твердости материала стойкость инструмента значительно снижается при прочих равных условиях.

Материал режущей части инструмента определяет его способность сохранять рабочие характеристики в условиях высоких температурных нагрузок. Инструменты на основе твердых сплавов демонстрируют значительно более высокую стойкость по сравнению с инструментами из быстрорежущей стали при работе в интенсивных режимах обработки.

Существенное влияние на износ оказывают применение смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС), повышающих стойкость в 1,5-4 раза, и жесткость системы СПИД, где недостаточная жесткость приводит к вибрациям и ускоренному усталостному разрушению инструмента.

Несмотря на выявленные качественные зависимости, для практического прогнозирования износа требуется разработка математических моделей, учитывающих совместное влияние всех перечисленных факторов. В данном исследовании представлены результаты регрессионного анализа износа режущего инструмента с целью построения адекватной прогнозной модели.

Выбор инструмента для математического моделирования и анализа данных

Для проведения регрессионного анализа и построения математической модели износа режущего инструмента требовалось выбрать специализированное программное обеспечение. Среди современных систем математического моделирования (Maple, MathCad, Mathematica, MATLAB) первоначально рассматривался MATLAB, обладающий мощным функционалом для численных расчетов и регрессионного анализа.

Однако для решения конкретной задачи построения регрессионной модели на ограниченном массиве экспериментальных данных был выбран Microsoft Excel с надстройкой «Анализ данных». Этот выбор обусловлен следующими преимуществами:

- доступностью и распространенностью в инженерной среде;
- адекватным функционалом для регрессионного анализа;
- наглядностью работы с табличными данными;
- простотой интерпретации результатов.

Использование Excel обеспечивает необходимую точность расчетов при оптимальных затратах на реализацию модели.

Методология регрессионного анализа

Для количественной оценки влияния параметров режима резания на износ инструмента применяется метод регрессионного анализа. Этот статистический метод позволяет не только установить наличие связей между технологическими параметрами и стойкостью инструмента, но и получить математическую модель в виде уравнения, описывающего данную зависимость. В отличие от корреляционного анализа, который лишь определяет силу и направление статистической связи, регрессионный подход дает возможность прогнозировать стойкость инструмента при различных комбинациях режимов обработки, что имеет важное практическое значение для оптимизации процессов механической обработки.

В рамках исследования рассматриваются три основных типа регрессионных моделей, каждая из которых имеет свою область применения. Простая линейная регрессия вида:

$$y = a + bx + \varepsilon. \quad (1)$$

Подходит для описания парных зависимостей, когда необходимо оценить влияние одного технологического параметра на износ. Множественная линейная регрессия вида:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + \varepsilon. \quad (2)$$

Позволяет учесть одновременное влияние нескольких факторов, таких как скорость резания, подача и глубина резания.

Для описания нелинейных зависимостей применяется полиномиальная регрессия вида:

$$y = a + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_nx^n + \varepsilon, \quad (3)$$

которая может отражать сложные физические процессы, происходящие при резании.

Особое внимание уделяется подготовительному этапу анализа. Перед построением моделей проводится комплексная проверка исходных данных, включающая анализ характера функциональных зависимостей с помощью графических методов, проверку случайности распределения остатков, оценку мультиколлинеарности факторов с использованием коэффициентов корреляции, а также верификацию репрезентативности экспериментальных данных. Этот этап является критически важным для обеспечения достоверности получаемых результатов.

Выбор режущего инструмента и режимов резания

Для проведения экспериментальных исследований осуществлен выбор режущих инструментов и режимов резания на основе рекомендаций ведущих российских компаний, специализирующихся в области металлообработки. В качестве технологической базы использованы данные компаний «Абамет» и «CNCMagazine», предлагающих комплексные решения для оснащения машиностроительных производств.

Из ассортимента компании «Абамет» и «CNCMagazine» отобраны твердосплавные пластины для обработки конструкционных сталей и так же выбраны регламентированные режимы резания для резцов этих компаний.

При формировании матрицы экспериментов учитывались рекомендуемые диапазоны скоростей резания, подачи и глубин резания, указанные в технической документации производителей. Для каждого типа инструмента определены оптимальные и предельные режимы обработки, что позволило сформировать репрезентативную базу данных для последующего регрессионного анализа. Примеры режимы резания сформулированы в табличной форме часть этих данных приведены в таблицах 1, 2.

Таблица 1

Режимы резания, подобранные с компаний «Абамет»

Обрабатываемый материал	Твердость	Вид обработки	Скорость резания V (м/мин)	Глубина резания t (мм)	Подача S (мм/об)	x	y	m	Cv
Низкоуглеродистая сталь	≤HB180	Чистовая	280	0,5	0,1	0,15	0,2	0,2	350
			250	0,6	0,12	0,15	0,2	0,2	350
			260	0,6	0,1	0,15	0,2	0,2	350
			240	0,6	0,1	0,15	0,2	0,2	350
			220	0,6	0,1	0,15	0,2	0,2	350
		Получистовая	250	0,8	0,2	0,15	0,2	0,2	350
			230	1	0,15	0,15	0,2	0,2	350
			200	1	0,2	0,15	0,2	0,2	350
			200	1	0,2	0,15	0,2	0,2	350
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Таблица 2

Режимы резания, подобранные с компаний «CNCMagazine»

Обрабатываемый материал	Твердость	Вид обработки	Скорость резания V (м/мин)	Глубина резания t (мм)	Подача S (мм/об)	x	y	m	Cv
Низкоуглеродистая сталь	≤HB180	Тонкая чистовая	300	0,15	0,08	0,15	0,2	0,2	350
		Чистовая	300	0,8	0,12	0,15	0,2	0,2	350
			280	1	0,15	0,15	0,2	0,2	350
			280	0,8	0,15	0,15	0,2	0,2	350
			260	0,8	0,15	0,15	0,2	0,2	350
			260	0,8	0,15	0,15	0,2	0,2	350
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Для дальнейшей работы был выполнен расчет стойкости инструмента по следующей формуле:

$$T = \frac{C_T * k_T}{v^z * S^y * t^x} \quad (4)$$

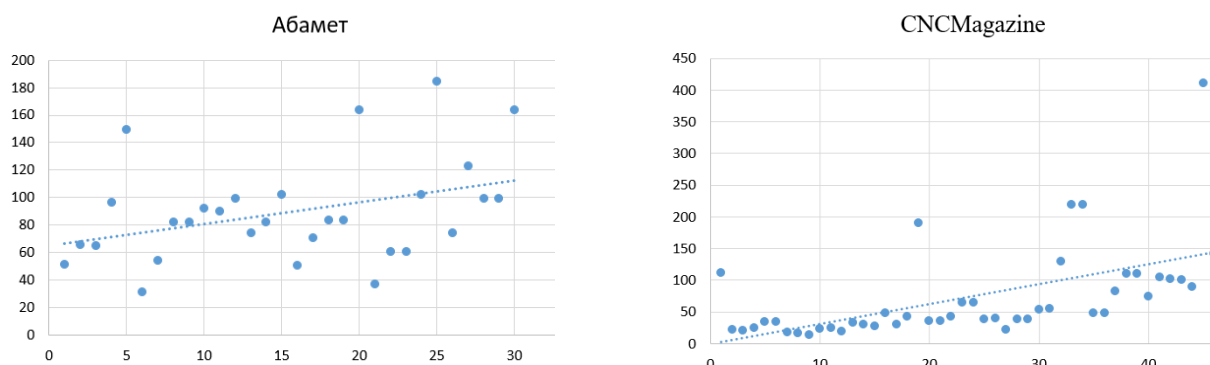
где C_T – коэффициент, зависящий от условий обработки;

k_T – поправочный коэффициент на отличие условий экспериментатора от условий технолога;

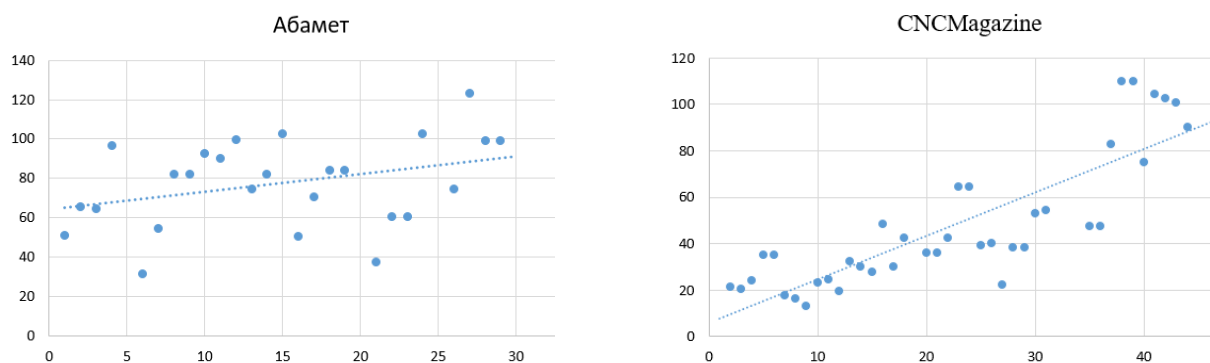
z, y, x – дробные показатели степени;

v, S и t – скорость, подача и глубина резания.

После выполнения расчетов стойкости инструментов и построения соответствующих графиков были идентифицированы выбросы - значения, статистически значимо отклоняющиеся от общей закономерности. Данные точки могут свидетельствовать о наличии погрешностей измерений или неучтенных факторов воздействия на процесс износа (рис. 1).



а) график значений стойкостей до исключения выбросов



б) график значений стойкостей после исключения выбросов

Рис. 1. Графики значений стойкостей компаний «Абамет» и «CNCMagazine»

В целях повышения достоверности и адекватности математической модели было принято решение исключить указанные выбросы из дальнейшего анализа. Такой подход соответствует общепринятой статистической практике обработки экспериментальных данных и позволяет:

- Увеличить точность регрессионной модели.
- Улучшить сходимость алгоритмов аппроксимации.

– Повысить прогностическую способность полученных зависимостей.

Исключение выпадающих значений проведено на основе анализа остатков регрессии с применением критерия Шовене. Окончательная модель будет построена на очищенном массиве данных, что гарантирует ее статистическую значимость и физическую обоснованность.

Программный пакет Excel предоставляет удобный инструмент для проведения корреляционного анализа, позволяющий без выполнения громоздких вычислений оценить степень влияния различных факторов на стойкость инструмента. В результате проведенного анализа были идентифицированы факторы, демонстрирующие статистически незначимое влияние на исследуемый параметр. В частности, было установлено, что коэффициенты x , y , m и C_v , учитываемые в классических расчетах стойкости инструмента, не оказывают существенного влияния в рамках данной модели. Результаты корреляционного анализа указаны в таблице 3 и 4.

Таблица 3

Результат расчета корреляционного анализа для РИ с «Абамет»

	x1(V)	x2(t)	x3(s)	x4(x)	x5(y)	x6(m)	x7(Cv)	Y(T)
x1(V)	1							
x2(t)	-0,82288	1						
x3(s)	-0,85648	0,687741536	1					
x4(x)	-2,5E-16	-2,2318E-16	4,46E-16	1				
x5(y)	2,5E-16	2,23178E-16	-4,5E-16	-1	1			
x6(m)	2,5E-16	2,23178E-16	-4,5E-16	-1	1	1		
x7(Cv)	0	0	0	0	0	0	1	
Y(T)	-0,563	0,2740	0,2287	-7,55E-17	7,6E-17	7,5E-17	0	1

Таблица 4

Результат расчета корреляционного анализа для РИ с «CNCMagazine»

	x1(V)	x2(t)	x3(s)	x4(x)	x5(y)	x6(m)	x7(Cv)	Y(T)
x1(V)	1							
x2(t)	-0,746	1						
x3(s)	-0,674	0,966	1					
x4(x)	2,2E-16	-2,8E-16	1,1E-15	1				
x5(y)	-3,9E-16	-2,5E-16	1,1E-15	1	1			
x6(m)	-3,9E-16	-2,5E-16	1,1E-15	1	1	1		
x7(Cv)	0	0	0	0	0	0	1	
Y(T)	-0,655	0,058	-0,002	-2,8E-16	-3,0E-16	-3,0E-16	0	1

На основании полученных результатов принято решение об исключении указанных параметров из дальнейшего рассмотрения при построении регрессионной модели. Это позволит:

– упростить математическую аппроксимацию зависимости;

– повысить адекватность модели за счет удаления малозначимых переменных;

– сократить объем вычислений без потери точности прогнозирования.

Таким образом, окончательная модель будет содержать только статистически значимые факторы, что соответствует принципу рационального параметрического моделирования технологических процессов.

При проведении корреляционного анализа был выявлен ряд факторов, демонстрирующих статистически недопустимую степень взаимосвязи с исследуемым параметром – стойкостью инструмента. В частности, параметры x , y , m и C_v показали значения коэффициента корреляции, приближенные к ± 1 , что свидетельствует о наличии практически функциональной линейной зависимости.

Исключение параметров x , y , m и C_v из регрессионной модели обусловлено необходимостью устранения эффекта мультиколлинеарности.

Заключение

В ходе исследования разработана методика прогнозирования износа режущего инструмента с использованием регрессионного анализа. Определены ключевые факторы, влияющие на стойкость инструмента: параметры резания, характеристики обрабатываемого материала и инструмента, применение СОТС, жесткость системы СПИД.

Для построения математической модели использован Microsoft Excel, что обеспечило доступность и воспроизводимость результатов. Проведена предварительная обработка данных с исключением статистических выбросов и мультиколлинеарных параметров.

Разработанные модели позволяют прогнозировать влияние технологических параметров на стойкость инструмента. Практическая значимость работы заключается в возможности оптимизации режимов резания для снижения затрат на инструментальное обеспечение в машиностроении.

Библиографический список

1. Богданов, В. И. Основы теории резания. – М.: Машиностроение, 2015. – 320 с.
2. Кузнецов, А. А., & Петров, И. И. Износ режущих инструментов: причины и механизмы. – Журнал "Машиностроение", 2020, № 4, с. 45–50.
3. Шевченко, Н. В. Влияние условий резания на износ инструментов. – Вестник Технического университета, 2018, том 12, № 2, с. 78–83.
4. Коваленко, С. В. Современные методы оценки износа режущих инструментов. – Научный журнал "Инструментальная техника", 2019, № 3, с. 22
5. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Юрайт, 2021. – 567 с.

6. Большаков В.Д. Справочник по математической статистике для инженеров и научных работников / В.Д. Большаков, А.В. Лосев. – М.: Машиностроение, 2019. – 412 с.

© Хайров И.С., 2025

СЕКЦИЯ 2.4. СВАРОЧНЫЕ, ЛИТЕЙНЫЕ И АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.791.927.5

И.У. КАДИКОВ, И.В. КИРИЛЛИН

uralovich888@mail.ru

Науч. руковод. – старший преподаватель В.Р. ГАЛИМОВ

Уфимский университет науки и технологий

РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ НАПЛАВКИ ПРОВОЛОКОЙ HASTELLOY C-22

Аннотация: данная работа посвящена разработке и оптимизации режимов наплавки проволокой Hastelloy C-22 в защитном газе на внутренние стенки сосудов и аппаратов нефтехимической отрасли, обеспечивающих, уменьшенную глубину проплавления для снижения перемешивания с основным материалом и стабильный процесс без разбрызгивания.

Ключевые слова: импульсно-дуговая наплавка, коррозионностойкие сплавы, жаростойкие сплавы, никель-хром-молибденовый сплав, наплавка плавящимся электродом, нефтехимическая отрасль.

Сплав Hastelloy C-22 является никель-хром-молибденовым сплавом. Применяется в химической/нефтехимической отрасли, энергетике, судостроении благодаря устойчивости к агрессивным средам (сильные окислители, морская вода и органические кислоты), высокой стойкости к локальной коррозии. Демонстрирует хорошую свариваемость и оптимальными свойствами для наплавки, что обусловлено его химическим составом. К тому же обладает коррозионной стойкостью в окислительных средах выше, чем Hastelloy C-4 и C-276 [1].

Оборудование нефтехимической отрасли подвергается интенсивной коррозии в агрессивных средах, что требует эффективных методов восстановления. Таким методом является наплавка коррозионностойким сплавом. Для его качественного нанесения необходимо минимизировать проплавление основного металла и обеспечить стабильность процесса

В работе исследуется влияние режимов наплавки на проплавление основного металла.

Материалы и методы. Для исследования влияния режима наплавки на проплавление основного металла были выполнены серии наплавки на разных режимах на пластины 100x100x8 из стали Ст3 электродом Hastelloy C-22 Ø1.2 в аргоне первого сорта в нижнем положении. Наплавка осуществлена на роботизированном сварочном комплексе на базе робота ABB IRB1600 и источника

питания ESAB AristoMIG5000i integrated (рис 1). Снятие электрических параметров производилось системой регистрации Esab WeldCloud.

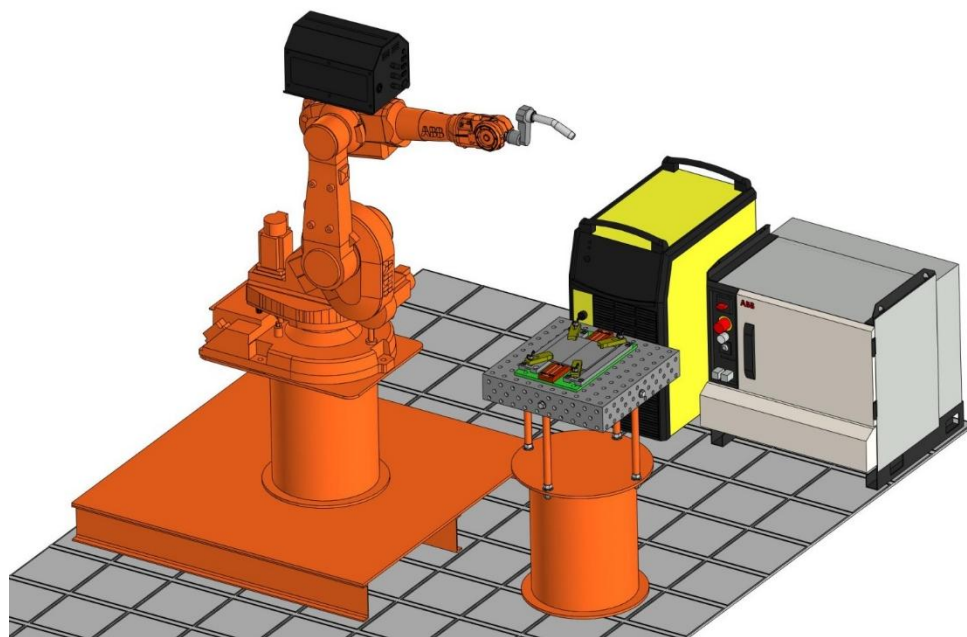


Рис. 1. Роботизированный сварочный комплекс

Оценка проплавления была выполнена на макрошлифах, изготовленных из наплавленных образцов. При этом были измерены высота валика h , ширина валика e , глубина проплавления $h_{пр}$, площадь проплавления $S_{пр}$, площадь наплавленного валика S_H и общая площадь наплавки S (рис. 2).

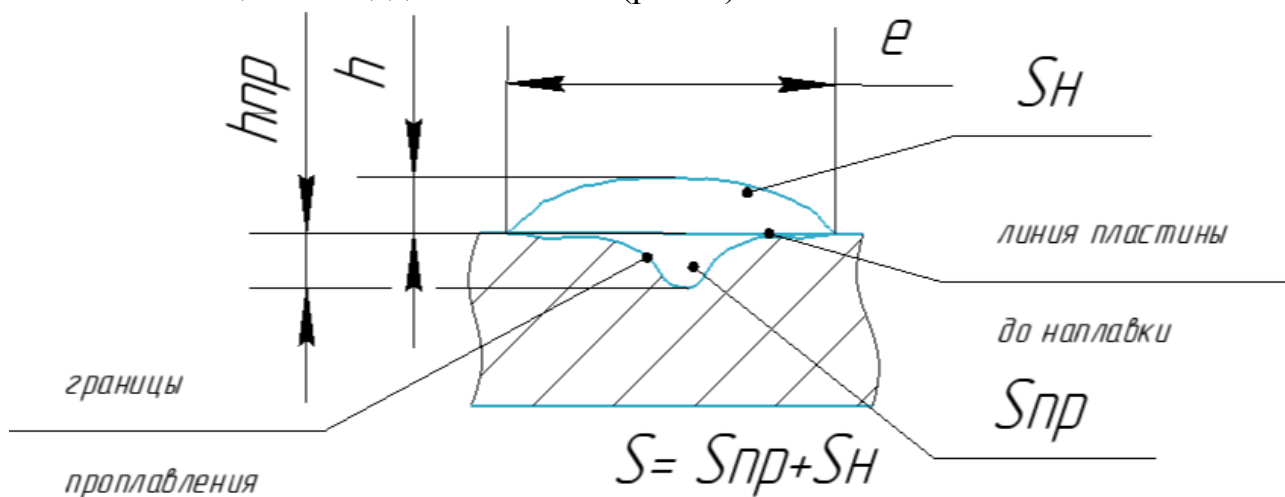


Рис. 2. Схема измерений при макроструктурном анализе

Эффективная мощность $P_{и}$ определяется по формуле (1):

$$P_{и} = I \cdot U \cdot \eta_{и}, \quad (1)$$

где $\eta_{и}$ – показатель эффективного КПД электрической дуговой наплавки (равен 0,75).

Погонная энергия $q_{п}$ определяется по формуле (2):

$$q_{\text{п}} = \frac{P_{\text{и}}}{v_{\text{н}}} \quad (2)$$

Исследование влияния параметров режима при наплавке. Сравнение проводилось для 5 разработанных режимов горения дуги (табл. 1):

- 1) стационарная дуга с мелкокапельным переносом без коротких замыканий;
- 2) импульсная дуга с пониженным тепловложением и производительностью.;
- 3) импульсная дуга с высокой мощностью импульса;
- 4) импульсная дуга с сниженной по сравнению с режимом 3 мощностью импульса;
- 5) импульсная дуга со средней производительностью.

Таблица 1

Параметры режима наплавки

Параметры	Режимы				
	1	2	3	4	5
Дуга	Стационарная	Импульсная	Импульсная	Импульсная	Импульсная
I, A	235	97	178	170	159
$U, \text{В}$	27	20	24	24	23
$V_{\text{п}}, \text{м/мин}$	7,5	2,8	5,6	5,6	5

Скорость наплавки в ходе экспериментов варьировалась от 2,5 до 10 мм/с таким образом, чтобы объем наплавки в каждом из рассматриваемых случаев для разных режимов дуги был одинаковым.

На рис. 3 представлены макрошлифы сравнения с погонной производительностью наплавки 60-63,5 см³/м, на рисунке 4 – с 68-75 см³/мм.

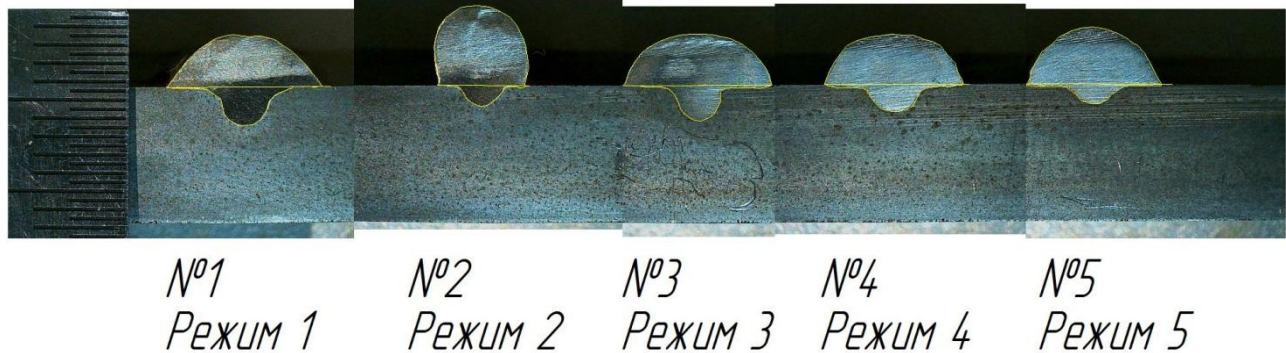


Рис. 3. Макроструктурный анализ наплавки на первой пластине

Результаты обмеров макрошлифов и расчетов тепловой мощности и погонной энергии были сведены в табл. 2.

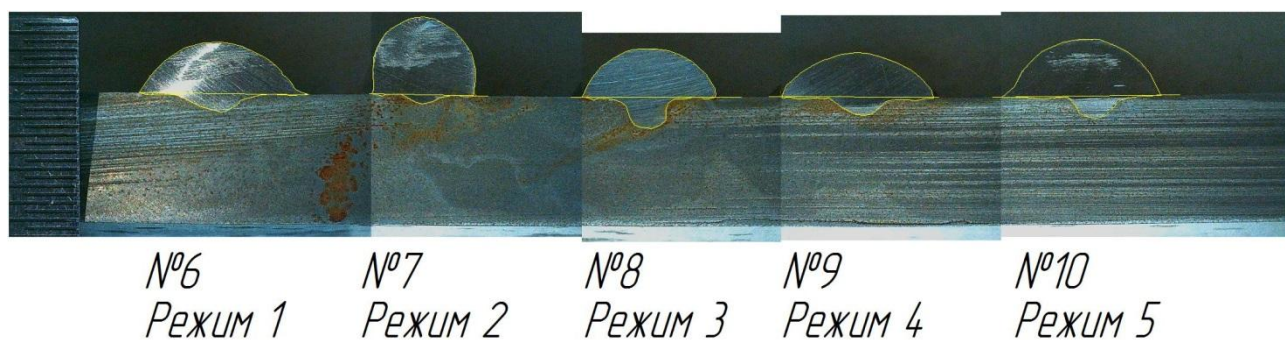


Рис. 4. Макроструктурный анализ наплавки на второй пластине

Таблица 2

Сравнение результатов наплавки

№	Режим	V_H , мм/с	P_H , Вт	q_H , Дж/мм	e , мм	h , мм	$h_{пр}$, мм	$S_{пр}$, мм ²
1	1	8	4588,5	574	8,62	2,82	2,12	5,56
2	2	3	1542	514	4,8	4,34	1,15	2,10
3	3	6	3208,5	535	8,14	2,8	1,9	4,53
4	4	6	3039,5	506	7,63	2,73	1,52	4,2
5	5	5,5	2778,5	505	7,42	3,07	1,12	2,7
6	1	7	4385,5	627	9,86	2,95	1,1	3,25
7	2	2,5	1542	617	6,18	4,5	0,51	0,89
8	3	5,5	3249	591	7,83	2,81	1,89	4,45
9	4	5,5	3116,5	567	8,95	2,58	1,08	3,22
10	5	5	2875	575	9,29	3,34	1,29	3,15

Как видно из таблицы 2, важным параметром, влияющим на проплавляющую способность, является мощность, например наплавка №1 и №10. В первом случае мощность составляет 4588,5 Вт, и глубина проплавления составляет 2,12 мм, во втором случае мощность меньше, чем в первом, 2875 Вт, а глубина проплавления 1,29 мм. На больших мощностях уменьшение скорости приведет к увеличению проплавления, а на малых мощностях (режим 2 и режим 5) наблюдается уменьшение площади и глубины проплавления с уменьшением скорости.

В дальнейших работах планируется оценить влияние параметров на химический состав наплавленного металла, а также отработать режимы наплавки слоя заданной ширины и высоты.

Библиографический список

1. Akhilesh Kumar Yadav, 2016, A review on research trend in corrosion resistant alloy (Hastelloy) International Journal of innovative research in science and engineering, Vol. 2, p. 310-321

© Кадиков И.У., Кириллин И.В., 2025

Е.М. БЕЛОВ

egor2002belov@gmail.com

Науч. руковод. – канд. наук, доцент О.Б. ДЕМЕНОК

Уфимский университет науки и технологий

ЛИТЬЁ ПОД НИЗКИМ ДАВЛЕНИЕМ: ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ

Аннотация: в статье рассматриваются технико-экономические преимущества технологии литья под низким давлением (ЛНД) в сравнении с традиционными методами литья в кокиль и под высоким давлением. Проанализированы принципы процесса, конструктивные особенности оборудования и оснастки, а также экономическая эффективность.

Ключевые слова: литье под низким давлением (ЛНД); промышленность России; литейное производство; цветное литье; алюминиевые сплавы; автомобильная промышленность; кокильное литье; литье под высоким давлением; качество отливок; импортозамещение; модернизация производства.

В условиях глобальной конкуренции и роста цен на сырье и энергоресурсы российские промышленные предприятия вынуждены искать пути снижения себестоимости выпускаемой продукции без ущерба для ее качества. Одним из таких путей является внедрение передовых литейных технологий, среди которых особое место занимает литье под низким давлением (ЛНД). Несмотря на то, что технология известна несколько десятилетий, ее потенциал в России раскрыт не в полной мере. Мировой опыт, подробно описанный в технической литературе [1], демонстрирует, что ЛНД является эффективной альтернативой как кокильному литью, так и литью под высоким давлением для широкой номенклатуры ответственных отливок, особенно в цветной металлургии.

Сущность технологии и ее преимущества:

Литье под низким давлением – это процесс, при котором жидкий металл (чаще всего алюминиевые или магниевые сплавы) подается в металлическую форму (пресс-форму) под регулируемым давлением сжатого газа (0,2–0,7 атм). В отличие от кокильного литья, где металл заполняет форму под действием гравитации, в ЛНД подача осуществляется снизу через специальный металлопровод (питатель), выполняющий также роль прибыли.

Ключевые преимущества ЛНД:

Высокое качество отливок: Направленная кристаллизация снизу вверх обеспечивает получение плотных отливок с минимальной пористостью, что критически важно для деталей, работающих под давлением (например, головки блоков цилиндров).

Экономия металла: Масса литниковой системы сокращается до 2–10% от массы отливки, в то время как при кокильном литье этот показатель достигает 30–50% [1]. Это приводит к прямому снижению расхода дорогостоящего цветного металла.

Улучшенные механические свойства: благодаря отсутствию турбулентности при заполнении формы и эффективному питанию усадочных раковин под давлением, отливки обладают высокими прочностными характеристиками, герметичностью и хорошо поддаются термообработке и сварке.

Высокая производительность и возможность автоматизации: Современные машины ЛНД работают в автоматическом и полуавтоматическом режимах, что позволяет одному оператору обслуживать несколько единиц оборудования. Производительность в 2-3 раза выше, чем у кокильных машин [1].

Гибкость технологии: ЛНД позволяет использовать разовые песчаные стержни, что расширяет возможности для получения сложных внутренних полостей, недостижимых при литье под высоким давлением.

Оборудование и оснастка для ЛНД

Конструктивно машина ЛНД представляет собой вертикальную установку, в нижней части которой расположена герметичная печь выдержки металла. Основные узлы включают в себя механизм смыкания формы, систему подачи газа с точным контролем давления и саму пресс-форму. Мировой опыт показывает тенденцию к совершенствованию печных агрегатов: от простых тигельных печей к более эффективным индукционным канальным печам большой емкости, что позволяет стабилизировать температурный режим и снизить энергопотребление [1]. Перспективным направлением является использование электромагнитных насосов для подачи металла, что полностью исключает необходимость в герметизации печи, снижает окисление металла и предоставляет более широкие возможности для управления скоростью заливки. Стойкость оснастки (пресс-форм) при ЛНД сопоставима со стойкостью кокилей, однако стоимость формы, как правило, ниже, чем при литье под высоким давлением, из-за менее жестких условий работы.

Потенциал применения в промышленности России

Наиболее очевидной и перспективной сферой для внедрения ЛНД в России является автомобильная промышленность. Согласно анализу, проведенному еще в 70-х годах, тенденция к увеличению использования алюминия в автомобилестроении только усилилась [1]. Современные автомобили содержат до 150-200 кг алюминиевых деталей, и эта цифра продолжает расти в рамках борьбы за снижение массы и расхода топлива.

Номенклатура отливок для ЛНД в автопроме:

Детали двигателя: головки цилиндров (как с воздушным, так и с водяным охлаждением), блоки цилиндров, картеры.

Колесные диски. Специализированные цеха по производству дисков методом ЛНД успешно функционируют за рубежом, демонстрируя высокую экономическую эффективность.

Детали трансмиссии и подвески: корпуса коробок передач, кронштейны, рычаги.

Как показано в технико-экономическом сравнении [1], для средне- и крупносерийного производства отливок массой от 5 кг ЛНД зачастую оказывается экономичнее кокильного литья за счет колоссальной экономии металла в литниковой системе и снижения трудоемкости зачистных операций. По сравнению с литьем под высоким давлением, ЛНД требует меньших капиталовложений в оснастку и более эффективно для выпуска средних партий крупногабаритных и толстостенных отливок. Кроме автопрома, технология востребована в авиационной промышленности (для магниевых сплавов), машиностроении и приборостроении.

Выводы и рекомендации

Технологическая модернизация. Внедрение технологии ЛНД на российских литейных предприятиях позволит вывести производство ответственных алюминиевых и магниевых отливок на качественно новый уровень, соответствующий мировым стандартам.

Импортозамещение и экспортный потенциал. Освоение производства сложных отливок, таких как головки блоков цилиндров, будет способствовать импортозамещению в автопроме и смежных отраслях, а также может создать потенциал для экспорта литейной продукции.

Экономическая эффективность. Снижение себестоимости за счет экономии металла, энергии и повышения производительности делает ЛНД высокоэффективной инвестицией с относительно коротким сроком окупаемости.

Необходимость государственной поддержки. Для ускорения внедрения ЛНД целесообразно развитие программ государственно-частного партнерства, направленных на модернизацию литейных производств, а также стимулирование научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) в области совершенствования этой технологии применительно к условиям России.

Опыт ведущих мировых фирм (Karl Schmidt GmbH, Dimo Ltd., Soag Machinery Ltd.) демонстрирует, что непрерывное совершенствование систем управления, механизации и автоматизации машин ЛНД открывает новые горизонты для его применения. России необходимо активно осваивать этот потенциал для укрепления позиций отечественной промышленности.

Библиографический список

1. Аналитический обзор «Технико-экономические предпосылки развития литья под низким давлением» (по материалам зарубежной научно-технической литературы 1970-х гг.). – 45 с.
2. Александров, В.В. Специальные виды литья: учебное пособие для вузов / В.В. Александров. – М.: Машиностроение, 2010. – 256 с.
3. Зуев, А.А. Литье цветных металлов под низким давлением / А.А. Зуев // Литейное производство. – 2018. – № 5. – С. 34–38.
4. Современные технологии литья: монография / под ред. И.Б. Куманина. – СПб.: Политехника, 2015. – 320 с.

5. Технология литейного производства: учебник для вузов / В.Н. Баландин и др. – М.: Академия, 2012. – 496 с.

6. Отраслевой дорожная карта «Развитие литейного производства в Российской Федерации на период до 2030 года». – М.: Минпромторг России, 2021.

© Белов Е.М., 2025

УДК 669

А.С. БРЕЕВ

vovviv03mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук., О.Б. ДЕМЕНОК

Уфимский университет науки и технологий

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ: ШПРИЦ-МАШИНЫ

Аннотация: в работе проведен анализ современного оборудования для изготовления восковых моделей по технологии литья по выплавляемым моделям (ЛВМ). Рассмотрены принцип действия, ключевые компоненты, преимущества и недостатки различных типов шприц-машин. На основе сравнительного анализа и требований к производству прецизионных изделий для аэрокосмической отрасли сделан вывод о целесообразности их применения.

Ключевые слова: литье по выплавляемым моделям (ЛВМ), шприц-машина, восковая модель, литьевая форма, автоматизация, прецизионное литье.

Введение

Литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) является одним из наиболее точных методов получения сложных и ответственных отливок из жаропрочных сплавов, широко используемых в авиационно-космической промышленности (лопатки турбин, элементы двигателей). Качество конечной металлической отливки в значительной степени определяется точностью и поверхностным качеством первичной восковой модели. Ключевым оборудованием для изготовления таких моделей являются шприц-машины.

Современные требования к авиационным компонентам, такие как сложность геометрии охлаждающих каналов в лопатках турбин и минимальные допуски, обуславливают необходимость использования высокотехнологичного оборудования, обеспечивающего стабильность параметров процесса. Данная работа посвящена анализу современного оборудования для изготовления моделей – шприц-машин.

1. Технология ЛВМ и роль шприц-машины

Технологический процесс ЛВМ включает следующие основные этапы:

1. Изготовление пресс-формы для восковых моделей.
2. Получение восковых моделей на шприц-машине.
3. Сборка моделей в модельные блоки.
4. Нанесение на блоки огнеупорного покрытия (формирование керамической формы).
5. Вплавление воска и прокалка формы.
6. Заливка расплава металла в форму.
7. Выбивка отливки и ее очистка.

Шприц-машина – это агрегат, предназначенный для дозированного впрыска расплавленного модельного состава (воска, полимеров) под давлением в литьевую форму. Основные задачи шприц-машины:

1. Поддержание оптимальной температуры модельного состава.
2. Создание необходимого давления впрыска.
3. Обеспечение стабильной выдержки под давлением для компенсации усадки.
4. Автоматизация цикла для обеспечения воспроизводимости.

2. Классификация и анализ современного оборудования

Существует несколько типов шприц-машин, различающихся по принципу создания давления и степени автоматизации.

2.1. Пневматические шприц-машины

Принцип работы: Подача воска осуществляется за счет сжатого воздуха, который действует на поршень, вытесняющий расплав из цилиндра.

Преимущества:

1. Простота конструкции и низкая стоимость.
2. Высокая ремонтпригодность.
3. Подходят для мелкосерийного производства и опытных работ.

Недостатки:

1. Низкая стабильность давления впрыска и выдержки.
2. Зависимость от колебаний давления в воздушной сети.
3. Невозможность точного программного управления параметрами цикла.
4. Невысокая производительность.



Рис. 1. Пневматические шприц-машины

2.2. Поршневые электромеханические шприц-машины с ЧПУ
Принцип работы: это наиболее современный тип оборудования. Подача воска осуществляется электромеханическим приводом (серводвигателем) через шарик винтовую передачу, который толкает поршень. Все параметры (температура, скорость впрыска, давление, время выдержки) задаются и контролируются через компьютерную систему (ЧПУ).

Преимущества:

1. Высокая точность и воспроизводимость каждого цикла.
2. Возможность программирования сложных профилей впрыска (многоступенчатое давление и скорость).
3. Высокое качество поверхности модели и точность геометрии.
4. Регистрация и сохранение параметров циклов для контроля качества.
5. Высокая производительность, подходят для серийного и массового производства.

Недостатки:

1. Высокая стоимость.
2. Сложность обслуживания и необходимость квалифицированного персонала.



Рис. 2. Поршневые электромеханические шприц-машины с ЧПУ

2.3. Шнековые (плунжерные) шприц-машины

Принцип работы: подача и гомогенизация воска осуществляются с помощью вращающегося шнека (винта Архимеда), аналогично литьевым машинам для пластмасс. Это позволяет лучше перемешивать модельный состав и предотвращать расслоение.

Преимущества:

1. Отличная гомогенизация модельной композиции.
2. Высокая стабильность параметров.
3. Эффективное использование материалов.

Недостатки:

1. Наиболее сложная и дорогая конструкция.

2. Требовательность к обслуживанию.



Рис. 3. Шнековые (плунжерные) шприц-машины

3. Ключевые тенденции в развитии шприц-машин

Автоматизация: Интеграция с роботами-манипуляторами для автоматической загрузки вкладышей пресс-форм, извлечения готовых моделей и их передачи на конвейер.

Интеллектуализация: Встроенные системы диагностики и предиктивного анализа, которые предупреждают оператора о необходимости обслуживания.

Энергоэффективность: Применение сервоприводов и теплоизолированных цилиндров для снижения энергопотребления.

Гибкость: Быстрая переналадка и смена программ для производства широкой номенклатуры моделей.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что выбор шприц-машины напрямую определяет качество восковых моделей и, как следствие, всей продукции ЛВМ.

Для мелкосерийного и опытного производства могут быть оправданы простые и надежные пневматические машины. Однако для серийного выпуска высокоответственных изделий, таких как лопадки газотурбинных двигателей, необходимы современные поршневые или шнековые машины с ЧПУ. Они обеспечивают необходимую точность, стабильность и воспроизводимость технологического процесса, что является залогом получения бездефектных отливок.

Таким образом, развитие и внедрение автоматизированного программно-управляемого оборудования является основным направлением для повышения конкурентоспособности и эффективности литейных производств, работающих по технологии ЛВМ.

Библиографический список

1. Технология литья по выплавляемым моделям: учебное пособие / В.Я. Буль и др. – М.: Машиностроение, 2018. – 456 с.
2. Пневматические шприц-машины: [Электронный ресурс]. URL: <https://siblitcom.ru/katalog/formovochnoe-oborudovanie/oborudovanie-dlya-litya-po->

vyiplavlyaemyim-modelyam-lvm/oborudovanie-dlya-izgotovleniya-voskovyix-modelej/odnopolozicionnaja-shpric-mashina/

3. Поршневые электромеханические шприц-машины с ЧПУ: [Электронный ресурс]. URL: <https://abcfе.ru/oborudovanie-dlya-litya-po-vyiplavlyaemyim-modelyam-lvm/shprints-mashiny-oborudovanie-dlya-prigotovleniya-modelnogo-sostava>

4. Шнековые (плунжерные) шприц-машины [Электронный ресурс]. URL: <https://sibtehlit.ru/shpricz-mashina-dlya-ruchnoj-inzhekczii-voska>

© Бреев А.С., 2025

УДК 621.74

Д.В. ДЕЕВ

danil.deev.04@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук., Е.С. ГАЙНЦЕВА

Уфимский университет науки и технологий

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОКИЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ОТЛИВОК

Аннотация: в работе проведён сравнительный анализ современных кокильных покрытий, применяемых при литье алюминиевых сплавов. Рассмотрены принципы действия, преимущества и недостатки различных типов покрытий. Изучены требования к покрытиям для кокильных форм и подобраны оптимальные составы для различных условий эксплуатации.

Ключевые слова: кокильное литье, покрытие, алюминиевые отливки, тепловой барьер, смазка, адгезия, газовыделение.

Введение

Кокильное литьё широко применяется в производстве алюминиевых отливок благодаря высокой производительности и точности размеров. Одним из ключевых факторов, влияющих на качество отливок, является использование специальных покрытий для поверхности кокиля. Эти покрытия выполняют несколько функций: тепловая изоляция, предотвращение пригара, облегчение выемки отливки и регулирование теплоотвода. Выбор оптимального покрытия позволяет значительно снизить количество брака и повысить стойкость формы.

Требования к кокильным покрытиям

Современные кокильные покрытия должны соответствовать ряду требований:

1. Высокая термостойкость и стабильность при циклическом нагреве.
2. Хорошая адгезия к поверхности металлической формы.
3. Низкое газовыделение для предотвращения газовой пористости в отливках.
4. Равномерное нанесение и формирование прочного слоя.
5. Устойчивость к термическим ударам и эрозии.

Сравнительный анализ покрытий

Наиболее распространёнными материалами для кокильных покрытий являются дисперсии на основе оксидов, графита, бентонита и силикатов. В табл. 1 приведены сравнительные характеристики популярных покрытий.

Таблица 1

Сравнительные свойства кокильных покрытий

Материал основы	Преимущества	Недостатки
Графит	- Хорошая смазка - Легкое отделение отливки	-Склонность к выгоранию при высоких температурах
SiO ₂	- Высокая термостойкость - Низкая стоимость	-Возможность пригара при неравномерном нанесении
Al ₂ O ₃	- Стабильность - Высокая стойкость к эрозии	-Высокая стоимость
Бентонит	-Хорошая пластичность -Простота нанесения	-Ограниченная термостойкость

Виды покрытий и их применение

1. Графитовые покрытия

Широко применяются для литья алюминиевых сплавов благодаря отличным смазывающим свойствам. Обеспечивают лёгкое извлечение отливки, но требуют регулярного обновления из-за выгорания.

2. Оксидные покрытия (на основе SiO₂, Al₂O₃)

Обладают высокой термостойкостью и используются для ответственных отливок. Обеспечивают стабильность размеров и снижение пригара.

3. Силикатные покрытия

Включают жидкое стекло и наполнители. Образуют прочный слой, устойчивый к эрозии, но могут требовать дополнительной обработки поверхности.

4. Комбинированные составы

Современные покрытия часто включают несколько компонентов (графит + оксиды) для совмещения преимуществ каждого материала.

Выбор конкретного типа покрытия зависит от технологических требований к отливке и экономических соображений.

1. Для серийного производства сложных тонкостенных отливок (автомобильный цилиндр, корпус насоса), где критично качество поверхности и отсутствие приваривания, оптимальным выбором являются покрытия на органической основе с графитовым наполнителем. Их высокая стоимость компенсируется снижением брака и увеличением стойкости кокиля.

2. Для крупносерийного и массового производства более простых по конфигурации отливок, где важна общая экономическая эффективность, широко применяются покрытия на водной основе с жидким стеклом. Необходим строгий контроль сушки для предотвращения газовых дефектов.

3. Для ответственных отливок, требующих регулирования структуры металла (например, для получения мелкозернистой структуры), целесообразно применение специализированных теплоизоляционных покрытий на основе, например, двуокиси циркония, которые позволяют управлять градиентом температуры.

4. Универсальным компромиссным решением для большинства видов литья алюминия являются современные водно-графитовые покрытия. Они сочетают хорошие антипригарные свойства, приемлемую экологичность и удобство нанесения.

Ключевые аспекты технологии нанесения:

- Подготовка поверхности: Кокиль должен быть чистым и обезжиренным.

- Консистенция: Покрытие разбавляется до состояния «жидкой сметаны».

- Метод нанесения: Распыление (наиболее эффективно), обмахивание или обмазка кистью.

- Сушка: Обязательная стадия для водных покрытий (газовая горелка, печь). Спиртовые сохнут за несколько минут самостоятельно.

Заключение

В ходе проведенного сравнительного анализа кокильных покрытий для литья алюминиевых сплавов были сделаны следующие выводы:

1. Каждый тип покрытия (на неорганической, органической основе и комбинированные) обладает уникальным комплексом свойств, определяющим его область применения.

2. Покрытия на водной основе с неорганическим связующим являются наиболее экономичными и экологичными, но требуют тщательного контроля процесса сушки и могут уступать в антипригарных свойствах.

3. Покрытия на органической основе обеспечивают высочайшее качество поверхности отливок и максимальную защиту кокиля, однако их применение сопряжено с повышенными затратами и требованиями к охране труда и технике безопасности.

4. Современные комбинированные покрытия (например, водно-графитовые) позволяют нивелировать многие недостатки классических составов и

представляют собой перспективное направление для широкого внедрения в литейных цехах.

Таким образом, правильный выбор кокильного покрытия, основанный на понимании его состава и свойств, является критически важным фактором для обеспечения высокого качества алюминиевых отливок, повышения производительности и снижения себестоимости литейного производства.

Библиографический список

1. Влияние состава кокильных покрытий на качество отливок из алюминиевых сплавов / Д.С. Корнеев, И.П. Волков // Литейное производство. – 2022. – № 4. – С. 28-32.
2. Технология литья в металлические формы (кокили) / А.М. Петриченко, В.И. Набатов. – М.: Машиностроение, 2015. – 320 с.
3. Литейные технологии: учебник для вузов / Под ред. Ю.А. Степанова. – М.: МИСиС, 2018. – 456 с.

© Деев Д.В., 2025

УДК 621.791.927

И.В. КИРИЛЛИН, И.У. КАДИКОВ

kirillinivan@kivvvi.ru

Науч. руковод. – старший преподаватель В.Р. ГАЛИМОВ

Уфимский университет науки и технологий

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОДГОТОВКИ РОБОТИЗИРОВАННОГО WAAM-ПРОЦЕССА ДЕТАЛЕЙ ПРОСТОЙ ФОРМЫ

Аннотация: работа посвящена разработке методики подготовки процесса печати деталей простой формы методом WAAM. Рассмотрен подбор параметров наплавки, совершенствование алгоритма формирования управляющей программы роботизированным комплексом, в частности выбор стратегии заполнения и смещение начальных и конечных точек печати на каждом слое на заданное положение. Представлены результаты апробации методики.

Ключевые слова: технологические параметры, схема заполнения, роботизированная наплавка, управляющая наплавка.

В прошлой работе [1] был разработан и программно реализован алгоритм для переноса управляющих программ из FDM- печати на роботизированный комплекс CRP. В ходе апробации были выявлены следующие проблемы во время

наплавки: несоответствие геометрических параметров наплавки, оплавление стенок из-за перегрева, наплыв из-за повторения начальных и конечных точек.

Целью данной работы является совершенствование методики подготовки процесса к печати и модификация управляющей программы для предотвращения дефектов, выявленных при печати ранее.

Оборудование и материалы. В рамках исследования используется робот CRP-RH14-10, оборудованный для сварки и наплавки плавящимся электродом в среде защитных газов источником питания Rehm FocusArc500.

Для наплавки в качестве подложки использовались пластины из стали марки Ст3. Наплавка велась электродной проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм в смеси аргона с углекислотой (Ar+CO₂)

В ходе экспериментов были подобраны режимы наплавки такие как скорость наплавки скорость подачи размеры валиков. В Таблица . 1 приведены параметры режима наплавки, используемые при проведении экспериментов.

Таблица 1

Режимы наплавки

I, A	U, В	v_H , мм/с	v_H , м/мин	высота	ширина
42	20,5	2	5	3,3	3,9
71	21	3,5	8,75	2	5,1
101	26	5	12,5	2,3	5,3

Используя данные из Таблица 1 в управляющей программе были скорректированы количество слоев и расстояние между соседними валиками для обеспечения равномерного сплавления и соответствия высоты наплавки высоте выращиваемой детали.

Так же была скорректирована программная часть, отвечающая за траекторию заполнения. Стратегия заполнения была заменена с зигзагообразной на заполнение изнутри-наружу прямоугольной спиралью (рис. 1 (б) для более равномерного распределения металла и исключения дефектов типа полость.

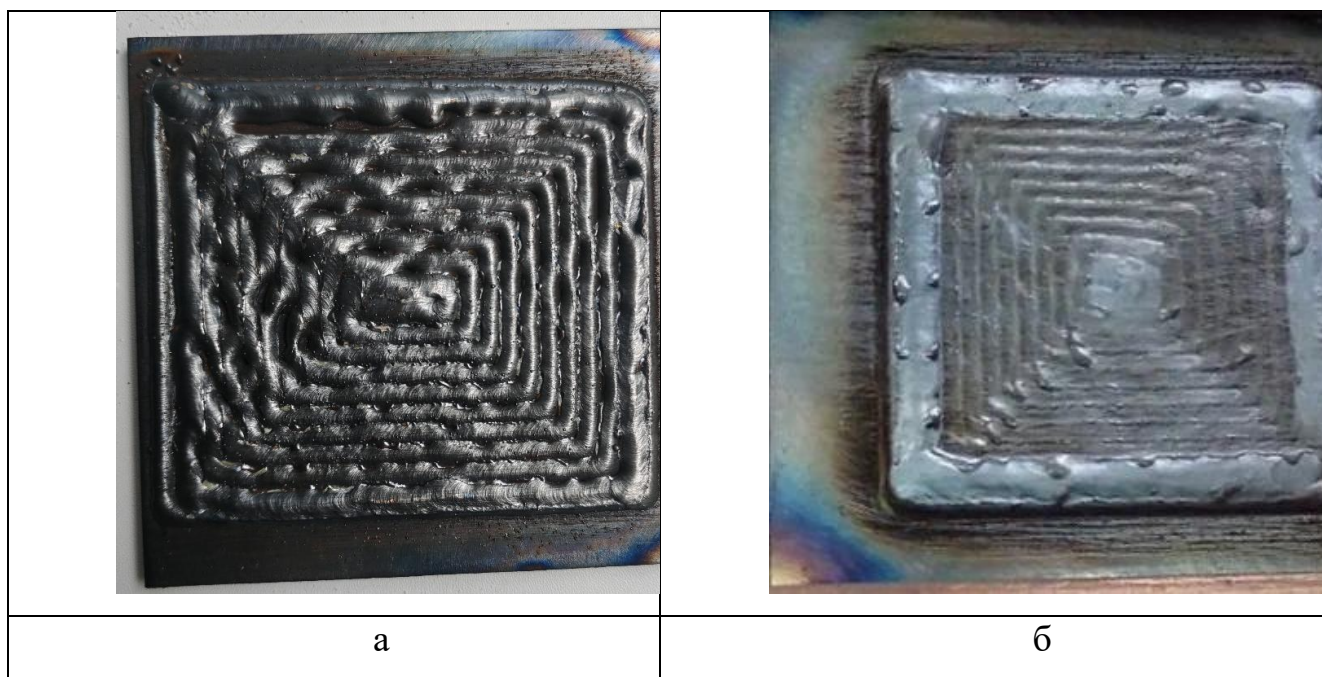


Рис. 1. Заполнение детали
 а – заполнение до подбора параметров,
 б – заполнение с рассчитанными параметрами

Как видно на рис. 1 заполнение стало более однообразным и нет кратеров, как в прошлых экспериментах рис. 1(а).

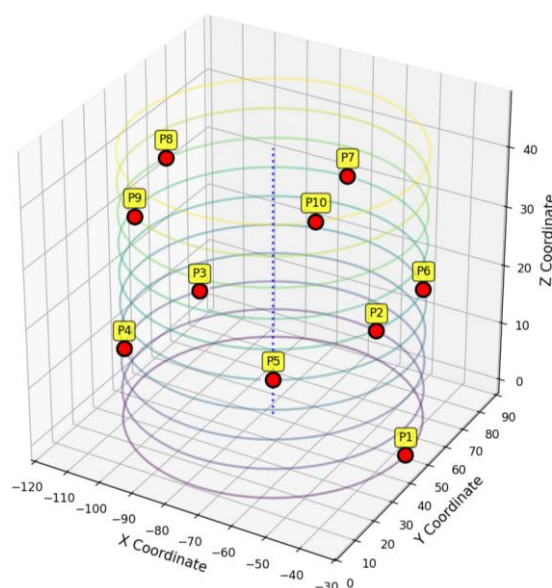


Рис. 2. Визуализация поворота точек на 75 градусов

Так же была проведена доработка программного кода для наплавки по окружности чтобы избежать наплывов на месте замков из-за повторения начальной и конечной точки наплавки в одной точке. С помощью «алгоритма» или «функции» кода было реализовано смещение начальной точки каждой окружности на определенный градус, который можно задать. На рис. 2 показана визуализация смещения начальной точки окружностей на 75 градусов.

В результате проведённой работы были изготовлены образцы: деталь сплошного заполнения (рис. 3) и деталь с центральным отверстием (рис. 4).

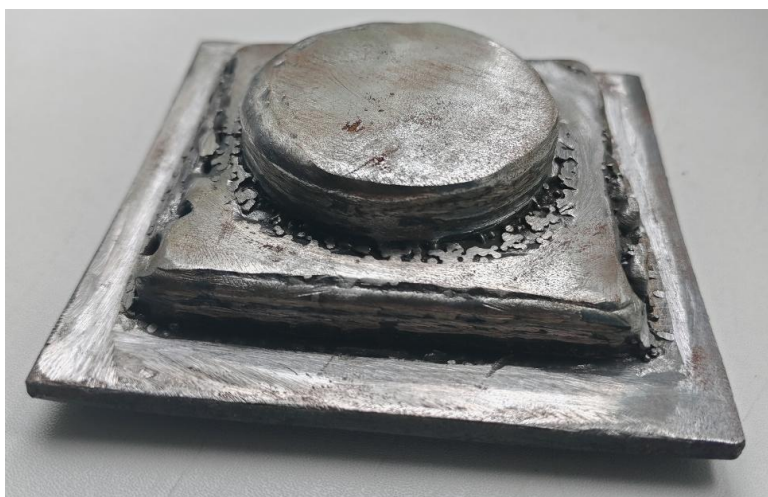


Рис. 3. Сплошное заполнение детали

Хотя используемые траектории заполнения и подобранные режимы обеспечивают равномерное заполнение каждого слоя отсутствие пауз между слоями всё еще может вызвать перегрев и оплавление ранее осажденных слоев. Потому при печати нужно соблюдать паузы для остывания, длительность которых зависит от высоты слоя, толщины наплавляемых стенок и сплошности заполнения (деталь с отверстием или сплошным заполнением).

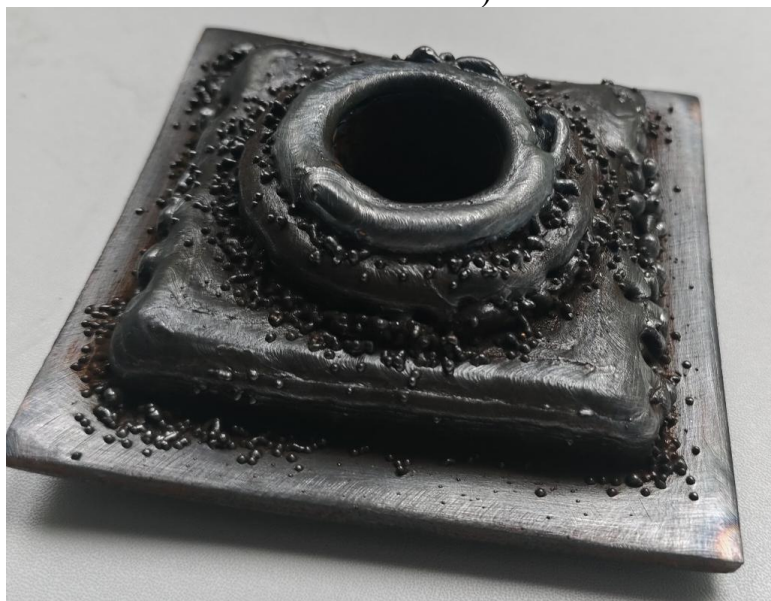


Рис. 4. С центральным отверстием

Заключение

В результате проведенной работы были решены задачи повышения точности геометрии выращиваемой детали, снижение тепловложения и искажения формы детали, а также предотвращение искажения круговой стенки вследствие повторения положения замков. Были скорректированы технологические параметры что позволило добиться стабильных размеров валиков, а также позволило обеспечить соответствие высоты наплавки проектным значениям, была произведена смена схемы заполнения, что способствовало более равномерному

наплавлению слоя. Так же был разработан алгоритм для смещения начальных точек для окружностей с возможностью смещения координат на заданный угол что способствовало устранению проблеме наплывов из-за совпадения начальной и конечной точки.

В дальнейшем планируется работа над новыми материалами, в частности алюминиевыми сплавами, жаропрочными и жаростойкими аустенитными сталями и никелевыми сплавами, как наиболее перспективными в авиадвигателестроении [2]. Кроме того, планируется совершенствование методики для определения припусков.

Библиографический список

1. Кадиков, И. У. Разработка алгоритмов адаптации G-кода управляющих программ 3D-принтера под роботизированную WAAM-печать / И. У. Кадиков, И. В. Кириллин // Мавлютовские чтения: Материалы XVIII Всероссийской молодёжной научной конференции. В 9-ти томах, Уфа, 25–29 ноября 2024 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2025. – С. 211-215. – <https://elibrary.ru/etbbwq>
2. Галимов В.Р., Мансуров Д.И. (2022). Возможность применения современных аддитивных технологий для выращивания изделий из жаропрочных никелевых сплавов. *Materials. Technologies. Design*, 4 (2 (8), 14–21. https://doi.org/10.54708/26587572_2022_42814.

© Кириллин И.В., Кадиков И.У., 2025

УДК 621.791

Д.А. КУЛИКОВА

89053098534@mail.ru

Науч. руковод. – доктор техн. наук, проф. А.Ю. МЕДВЕДЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ОТРАБОТКА РЕЖИМОВ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ СПЛАВА ЭП708

Аннотация: представлены результаты исследования технологии плазменной сварки с подачей присадочной проволоки, так и без присадки. Работа выполнялась на роботе. Сваривались стыковые листы жаропрочного сплава ЭП 708 толщиной 4, 5, 7 мм без скоса кромок и зазора. В качестве плазмообразующего и защитного газа использовали аргон. Сварные швы оценивались внешним осмотром и замеряли геометрические параметры шва.

Ключевые слова: роботизированная плазменная сварка, плазматрон, стыковые соединения, отработка режимов, присадочный материал, жаропрочный сплав.

Введение

Для соединения цветных сплавов в авиационной отрасли используется в основном аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом и электронно-лучевая сварка. Это две наиболее распространённые разновидности сварки плавлением [1]. Ведутся работы по применению роботизированной сварки плавящимся электродом для соединения корпусных деталей из жаропрочных никелевых сплавов [2].

Плазменная сварка обладает следующими преимуществами:

- по сравнению с аргонодуговой сваркой обеспечивает большую скорость сварки, большую концентрацию энергии и высокую эффективность;
- по сравнению с электронно-лучевой сваркой менее чувствительна к зазорам [3].

Плазменная сварка применяется для соединения практически всех металлов и их сплавов, используемых в качестве конструкционных материалов, толщиной от 0,01 мм до нескольких миллиметров [4]. Суть метода заключается в расплавлении сплавов узконаправленной струей плазмы, обладающей огромной энергией рис. 1. Процесс может осуществляться как с подачей расходного материала в зону дуги, так и без нее. Для очень тонких листов толщиной до 1 мм (микроплазменная сварка) плазменная сварка является практически основным методом соединения на основе дуги. Он используется в автомобильной промышленности, авиации, аэрокосмической промышленности, пищевой промышленности, при сварке трубопроводов, сосудов высокого давления, углов шкафов управления, а также в точной механике, медицинской технике, электронике и т.д. [5]

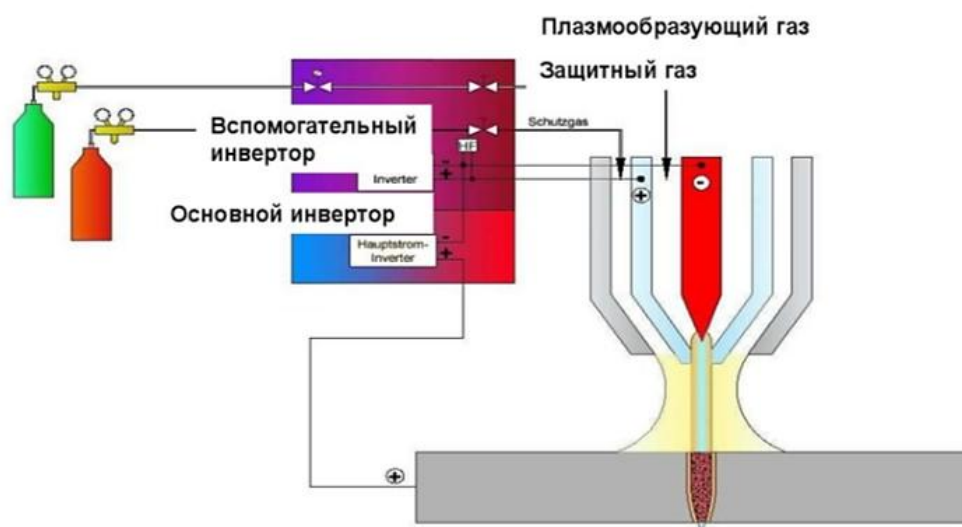


Рис. 1. Схема процесса плазменной сварки

Целью данной работы является исследование возможности плазменной сварки с подачей проволоки, а также без ее применения, обеспечивающего качественное формирование сварного шва.

Методика исследований

Осуществилась роботизированная плазменная сварка на роботе YASKAWA. Внешний вид установки плазменной сварки представлен на рис 2.

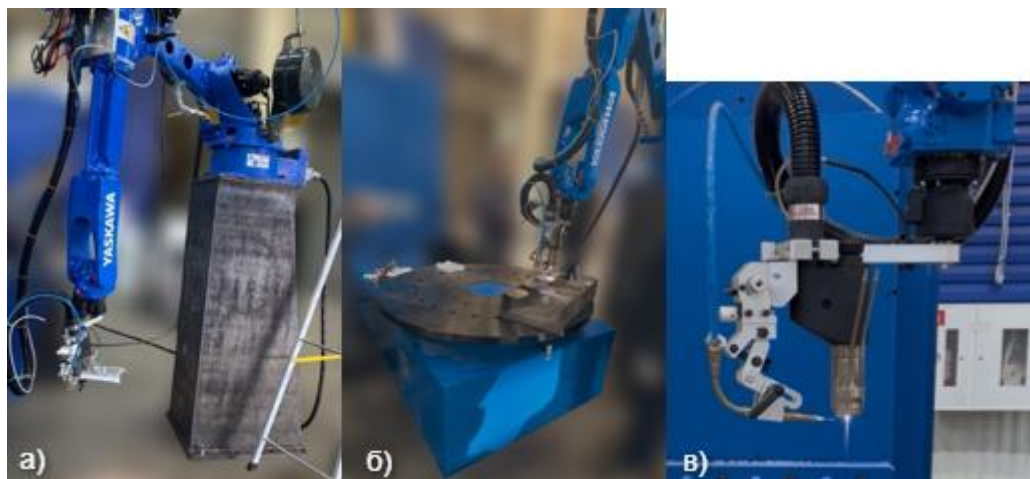


Рис. 2. Внешний вид установки роботизированной плазменной сварки:
а) робот, б) манипулятор, в) плазматрон

Оборудование для плазменной сварки состоит из:

– Аппарат плазменной сварки SBI, позволяющий производить сварку токами в диапазоне от 0,1 до 400 А, робот YASKAWA имеющий 6 степеней свободы, механизм подачи проволоки, плазматрон, система водяного охлаждения, манипулятор, контроллер.

Расстояние от изделия до среза сопла устанавливалось равным 5 мм от. В экспериментах применяли электрическую дугу непрерывного действия прямой полярности и плазматрон прямого действия. Сила тока дуги регулировалась от 100 до 350 А. В качестве плазмобразующего и защитного газа использовали аргон по ГОСТ 10157 высшего сорта.

В качестве образцов для сварки встык использовали листы размером 200x100x δ мм (рис. 3), где $\delta = 4, 5, 7$ мм. В качестве присадки использовали проволоку для жаропрочной стали ЭП367 ($\varnothing 1,2$ мм), которую подавали со скоростью 0,8-1,8 м/мин. В качестве катодов использовали вольфрамовые прутки $\varnothing 5$ мм. Плазматрон перемещали относительно свариваемого образца при помощи робота. Прихватки осуществлялись ручной аргонодуговой сваркой. Сварка производилась в оснастке, обеспечивающей защиту корня шва.



Рис. 3. Внешний вид пластин

При отработке технологии сварки настраивались следующие параметры:

– Устанавливались неизменными: диаметр электродной проволоки (d_p), диаметр электрода ($d_э$), диаметр сопла плазматрона ($d_c = 5$ мм), расстояние от сопла плазматрона до детали (5 мм), расход защитного газа на защиту корня ($q_k = 6-8$ л/мин), общая длина шва ($L_{ш}$), скорость сварки ($v_{св} = 20$ мм/мин);

– Варьировались: сила тока ($I_{св}$), расход плазмогаза ($q_{пл}$), расход основного газа ($q_{осн}$), время роста тока перед сваркой, время спада тока после сварки, скорость подачи проволоки ($v_{пп}$);

В результате проведения ряда экспериментов были определены параметры режимов плазменной сварки встык листов сплава ЭП708 как без применения присадочной проволоки, так и с её применением (табл. 1). Согласно этим параметрам, были сварены соединения. Качество сварных швов оценивалось внешним осмотром и замером геометрических параметров шва.

Таблица 1

Режимы плазменной сварки с использованием присадочной проволоки и без ее использования

№ шва	δ , мм	I, А	$Q_{плз}$ л/мин	$Q_{осн}$, л/мин	$V_{пп}$, м/мин	№ шва	δ , мм	I, А	$Q_{плз}$ л/мин	$Q_{осн}$, л/мин	$V_{пп}$, м/мин
1	7	200	4	4	-	11	7	215	4	3,5	1
2	4	120	4	4	-	12	7	215	4	3,8	-
3	4	140	4	4	0,8	13	7	220	4	3,5	1,4
4	7	215	4	4	-	14	4	140	4	4	1
5	7	215	4	4	0,8	15	4	140	4	4	1
6	5	150	3,5	4	-	16	4	150	4	3,5	1
7	5	150	4	4	1	17	4	130	4	4	-
8	5	160	4	4	-	18	4	130	4	4	1
9	5	160	4	4,5	1	19	4	120	4	4	-
10	7	215	4	4	-	20	4	130	4	4,5	1

Таблица 2

Значения полученных геометрических параметров сварных швов

№ шва	δ , мм	e, мм	g, мм	g1, мм	Примечания
1	7	-	-	-	Полный непровар шва
2	4	5	0,5	2	-
3*	4	6	-	-	Не провар
4	7	7	0,5	2	Трещины
5	7	6,5	0	1,5	
6	5	6	0,5	1	Подрезы
7*	5	6,5	1,5	2	-
8	5	5,5	0,5	2	-
9*	5	6	1,5	1,5	-
10	7	8	2	0,5	Подрезы
11*	7	8,5	2	2	Подрезы
12	7	9	1	1	Провалы по краям шва
13*	7	8	1	2	-

14*	4	5	1,5	1	-
16*	4	5,5	0,5	2	-
17	4	-	-	-	Провал шва
18	4	5,5	1	2	-
20*	4	6,5	2	2	-
21	4	6	1	1	-
22*	4	5,5	2	2	-

*- режимы с использованием присадочной проволоки

Так, на примере сварки листа толщиной 4 мм и варьируемых параметров изменяется ширина шва, наличие или отсутствие выпуклости шва и обратного валика (рис. 4-6). Сварной шов при скорости $V_{пп} = 0.2$ м/мин равной оптимальной формируется с небольшим усилением и плавным переходом к основному металлу внешние дефекты отсутствуют.

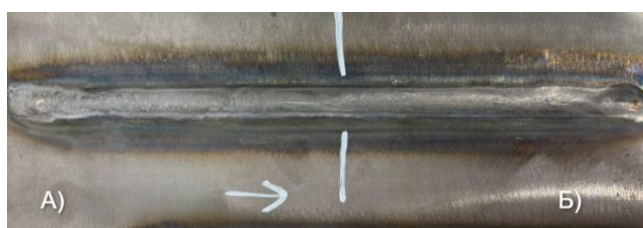


Рис. 4. Параметры режима:

$I=140$ А, $Q_{пл} = 4$ с, $Q_{осн} = 4$ с, $V_{пп} = 1.0$ м/мин

Геометрические параметры:

А) Ширина шва 6 мм, выпуклость шва 0,5 мм, обратный валик 0,5 мм (без присадки);

Б) Ширина шва 6,5 мм, выпуклость шва 1 мм, обратный валик 1 мм (с присадкой);



Рис. 5. Параметры режима:

$I=120$ А, $Q_{пл} = 4$ с, $Q_{осн} = 4$ с, $V_{пп} = 0.8$ м/мин

Геометрические параметры (без присадки):

Ширина шва 5 мм, выпуклость шва 1 мм, обратный валик 1 мм



Рис. 6. Параметры режима:

$I=130$ А, $Q_{пл} = 4$ с, $Q_{осн} = 4.5$ с, $V_{пп} = 1$ м/мин

Геометрические параметры:

- А) Ширина шва 5,5 мм, выпуклость шва 0,5 мм, обратный валик 0,5 мм (без присадки);
- Б) Ширина шва 6 мм, выпуклость шва 1 мм, обратный валик 1,5 мм (с присадкой);

Технология роботизированной СПЭ, предлагаемая в [7] требует разделки кромки хотя бы одной детали при толщинах от 2 мм, в соответствии с ГОСТ без разделки кромок сварка возможна до 6 мм, а на практике разделку выполняют с 4 мм.

Для свободно горячей дуги стандарт оговаривает следующие размеры: для $\delta = 4$ мм с присадкой: ширина шва (е), не более 9,0 мм, выпуклость шва (g) = $1,5 \pm 0,5$, ширина обратного валика (g1) = $1,5 \pm 1,0$; без присадки: е, не более 8,0 мм; g = $0 \pm 1,0$, g1 = $0 \pm 1,0$ и для $\delta = 5$ мм с присадкой: е, не более 12,0 мм; g = $1,5 \pm 0,5$, g1 = $1,5 \pm 1,0$. Таким образом, не прибегая к разделке кромок с помощью плазменной сварки способны проплавить листы толщиной 7 мм. Размеры сварных швов оказались существенно уже, чем те, которые предписываются в ГОСТе, что свидетельствует о большей концентрации нагрева и меньшем тепловложении.

Сравнительные исследования параметров плазменной сварки конструктивных элементов толщиной 4, 5 и 7 мм без зазора показали параметры в пределах допустимых значений см. табл. 2 с требованиями ГОСТ 14771-76 [6].

Выводы

1. За счет более высокой концентрации энергии плазменная сварка позволяет отказаться от разделки кромок и вести сварку в один проход без зазора в диапазоне толщин от 4 до 7 мм.

2. Размеры швов оказались существенно уже, чем те, которые предписываются в ГОСТе, что свидетельствует о большей концентрации нагрева и меньшем тепловложении.

Библиографический список

1. Демичев, Сергей Федорович. Основные способы сварки и их применение при изготовлении узлов летательных аппаратов и их двигателей [Электронный ресурс]: [учеб. пособие] / С. Ф. Демичев, А. В. Рясный, А. Л. Усольцев; Федер. агентство по образованию, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева. – Электрон. дан. – Самара: Изд-во СГАУ, 2007
2. Применение роботизированной сварки плавящимся электродом для сварки узлов газотурбинных двигателей толщиной 3 ММ Медведев А.Ю., Галимов В.Р., Никифоров Р.В., Туров А.В. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2023. Т. 25. № 2. С. 45-50.
3. Halina Pasek-Siurek (2014) Plasma welding: processes and equipment, Welding International, 28:9, 672-678, DOI: 10.1080/09507116.2012.753222
4. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. (2008) Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, уточнение. Москва, Машиностроение.
5. Ю.Д. Щицын, И.Л. Синани, Д.С. Белинин, С.Д. Неулыбин (2013). Совершенствование технологий плазменной сварки проникающей дугой цветных

металлов и сложнолегированных сплавов / Основные проблемы машиностроения - № 1. - С.2-8.

6. ГОСТ 14771-76 Дуговая сварка в защитном газе. Основные типы, конструктивные элементы и размеры межгосударственный стандарт утвержден и введен в действие от 28 июля 1976: дата введения 1976-12-01 /— Москва: Стандартиформ.

7. Способ автоматической однопроводной сварки плавящимся электродом в импульсном режиме гетерогенных никелевых сплавов. Никифоров Р.В., Медведев А.Ю., Галимов В.Р., Хисамутдинов Э.Р. Патент на изобретение RU 2828444 С1, 11.10.2024. Заявка № 2024100788 от 15.01.2024.

© Куликова Д.А., 2025

УДК 669

Р.Р. СИРАЗЕТДИНОВ

sirazetdinov-rus@mail.ru

Науч. руковод. — канд. техн. наук., О.Б. ДЕМЕНОК

Уфимский университет науки и технологий

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ШЛИКЕРА

Аннотация: в работе проведен сравнительный анализ и рассмотрены принципы работы, преимущества и недостатки современного оборудования, применяемого при приготовлении стержневой смеси и шликера. Изучили требования и материалы, применяемые при приготовлении твердоспекаемых стержней, и выбрали подходящее оборудование.

Ключевые слова: конвертер, смеситель, стержневая смесь, шликер, лопатка, твердоспекаемый стержень.

Введение

Использование современного оборудования позволяет получать однородную и качественную смесь, что снижает количество дефектов и обеспечивает выпуск годного изделия. Кроме того, автоматизация процесса приготовления шликера повышает общую производительность.

Авиационная промышленность развивается с 1920-х годов прошлого века по настоящее время. Появляются и модернизируются новые поколения военных самолётов (см. табл. 1).

Характеристики развития поколения

Модель самолёта	Су-27	Су-57
Экипаж	1 человек	1 человек
Масса самолёта	16380 кг	18500 кг
Предельная скорость	До 2500 км/ч	До 2600 км/ч
Дальность полета	3680 км	4300 км
Высота полёта	18500 м	20000 м
Длина разбега	700 м	350 м

Двигатель – самый важный элемент самолёта. При модернизации устанавливаются мощные турбины по сравнению с прошлыми поколениями, благодаря этому у истребителя повышается тяга, скорость. Турбина - слабое место в двигателе (см. рис. 1,2). Турбина работает в условиях высоких температур и коррозионной среды.



Рис. 1. Турбореактивный двухконтурный двигатель АЛ-31Ф



Рис. 2. Турбореактивный двухконтурный двигатель АЛ-41Ф1

Сравнив характеристики истребителей (см. таблицу 1), убеждаемся в ужесточении требованиям лопаток двигателей:

1. Высокая жаропрочность;
2. Устойчивость к нагрузкам;

3. Коррозионная стойкость.

Решением проблемы высоких температур и коррозионной среды является применение термобарьерного покрытия. Оно предназначено для изоляции элементов оборудования: камеры сгорания, лопатки турбин и т.д. Покрытие наносят методом плазменного и газопламенного напыления. Защитный слой обладает низкой теплопроводностью, благодаря этому повышается КПД турбин, однако при значительном различии в коэффициентах теплового расширения материалов покрытия и детали защитные свойства слоя утрачиваются.

Также с развитием авиации для охлаждения лопаток, усложняется внутренняя полость, для формирования, которой используется твердоспечаемый стержень.

Для приготовления стержня используются различные оксиды: SiO_2 , Al_2O_3 , MgO (см. табл. 2).

Таблица 2

Сравнительные свойства оксидов

Материал	Свойства	Преимущества	Недостатки
SiO_2	- Огнеупорность (1710 °C) - Химическая стойкость (устойчив к большинству черных расплавов черных металлов)	Дешевизна, хорошая сыпучесть	Склонность к пригару
Al_2O_3	- Огнеупорность (2050 °C) - Высокая химическая стойкость	Отсутствие пригара отливки, высокая прочность стержня	Высокая стоимость
MgO	- Огнеупорность (2850 °C) - Высокая химическая стойкость	Высокая огнеупорность	Гигроскопичность

Наибольшее распространение получили Al_2O_3 , SiO_2 благодаря оптимальным техническим свойствам и цене.

Для получения качественных стержней, требуется качественное оборудование, то есть создание новых моделей или модернизация старых.

Существует, различные виды оборудования для приготовления стержневой смеси и шликера: смеситель, конвертер, V – образный смеситель. Рассмотрим принцип работы, а также + и – каждого.

Смеситель – литейный чашечный – Бегуны используются в традиционной технологии литья для смесей ПГС (см. рис. 3).



Рис. 3. Смеситель литейный чашечный – Бегуны

Рабочими органами литейного смесителя катки из износостойкого чугуна, и направляющие скребки. Сначала, при помощи шнековых питателей, а также бункеров весового дозирования, загружаются сухие компоненты, такие как свежий песок, порошковой бентонит и др. Затем идёт перемешивание в течение 1 – 2 мин., добавляются вода, глинистая эмульсия и др. Текучесть падает, направляющие скребки перемещают смесь под каток, который оказывает истирающее воздействие на микрообъем смеси. В процессе перемешивания глина набухает, зерна равномерно покрываются глиняной пленкой. Когда смесь готова к формовке, открывается разгрузочное окно, и готовая смесь выгружается на ленточный конвейтер.

К преимуществам можно отнести:

- Удобность эксплуатации;
- Надежность получения качественной формовочной смеси;
- Доступная стоимость.

Недостатки:

- Короткий срок службы.

Конвертор УПШ (см. рис. 4) предназначен для приготовления горячих шликерных и стержневых составов в вакуумируемой вращающейся обогреваемой емкости с изменяемым углом наклона, для последующего литья на литевых установках под давлением или в прессах для стержней.



Рис. 4. Конвертор УПШ-10

В смесительную емкость загружаются смешивающие тела (см. рис. 5) (цилиндры) и компоненты смеси (оксид алюминия и т.д.). Перед началом работы ёмкость устанавливается в горизонтальное положение, после чего включается вращение и обогрев. При вращении, тела поднимаются по стенкам барабана и падают вниз, смешивая и перетирая горячий шликерный состав. Данный принцип обеспечивает равномерное смешение, отсутствие застойных зон и комков. После того как шликер приобретает необходимую пластичность и текучесть, включается вакуумирование смесительной емкости. Для слива готового состава на лючок рабочей емкости устанавливается сливная крышка (см. рис. 6) с патрубком – направителем и при наклоне рабочей емкости шликер сливается в технологическую емкость.



Рис. 5. Смешивающие цилиндры из керамики 22ХС (ВК94-1)



Рис. 6. Сливная крышка для выгрузки шаров (конвертер для работы без вакуума)

Преимущества:

- благодаря подобранным параметрам смесительной емкости, обеспечивается эффективное смешивание и сдвиг, а также разнонаправленное движение смеси по всему объему перемешиваемого состава, что обеспечивает высокое качество готового литьевого состава;

- конвертер позволяет выполнять одновременно две технологические операции: горячее перемешивание абразивных составов и вакуумирование. Вакуумирование обеспечивает удаление пузырей воздуха из шликерного состава;

- высокая производительность и эффективность процесса перетирания и перемешивания;

V-Образный смеситель – используется для смешивания порошков, порошкообразных и гранулированных материалов, материалов различной

плотности и различным размером частиц, смешивания пастообразных продуктов за счёт вращения V-образной емкости (см. рис. 7).



Рис. 7. V-образный смеситель

Загрузка компонентов смеси осуществляется через загрузочные лючки в торцах V-образной камеры, герметично закрывается крышками. При вращении рабочей емкости V-образной формы компоненты смеси многократно разделяются на два равных объема с последующим соединением. Выгрузка готового материала выполняется через нижний (одинарный) отвод, что обеспечивает его полное удаление. Данный способ смешивания позволяет выполнить качественное смесеприготовление, не разрушая структуру компонентов.

Преимущества:

- качественное и однородное смешивание;
- экономно расходует электроэнергию;
- возможность визуально контролировать процесс.

Для приготовления шликера, наиболее удовлетворяет требованиям конвертер, что обусловлено обеспечением высокой однородности перемешивания и наличием системы вакуумирования.

Заключение

Проведенный сравнительный анализ показал, что выбор оборудования существенно влияет на технологические свойства шликера.

Наиболее универсальным является конвертер. Таким образом, развитие и модернизация оборудования являются актуальной задачей повышения эффективности литейного производства.

Библиографический список

1. Термобарьерное покрытие: [Электронный ресурс]. URL: <https://old.tspc.ru/hardening/element.php?ID=1749>
2. Смеситель литейный чашечный (бегуны): [Электронный ресурс]. URL: <https://sibtehlit.ru/oborudovanie-pgs-smesiteli-litejnyie-chashechnyie-beguny>
3. Конвертер для приготовления шликера и стержневых составов: [Электронный ресурс]. URL: <https://techno-centr.ru/products/prigotovlenie-i->

vakuumirovanie-shlikera-sterzhnevyykh-mass/konverter-dlya-prigotovleniya-shlikera-i-sterzhnevyykh-sostavov/

4. Смеситель V-образный: [Электронный ресурс]. URL: <https://techno-centr.ru/products/sukhie-poroshki-granuly-i-poroshki-so-svyazkoy/smesiteli-v-obraznye-i-yobraznye/>

© Сиразетдинов Р.Р., 2025

УДК 621.74

И.И. ХАЙРУЛЛИН

krabo00@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент. Е.С. ГАЙНЦЕВА

Уфимский университет науки и технологии

РАЗРАБОТКА ПРОДУКЦИОННЫХ ПРАВИЛ ДЛЯ ТИПИЧНЫХ ДЕФЕКТОВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Аннотация: в статье рассматривается актуальная проблема повышения качества литых заготовок из алюминиевых сплавов путем внедрения систем искусственного интеллекта. Предложен подход на основе продукционных правил, позволяющий формализовать эмпирический опыт технологов и данные научных исследований для создания базы знаний. Приведены конкретные примеры правил для диагностики наиболее распространенных дефектов.

Ключевые слова: литейное производство, алюминиевые сплавы, дефекты, диагностика, продукционные правила, база знаний, искусственный интеллект, качество отливок.

Литье алюминиевых сплавов – процесс, находящийся на стыке науки и искусства. Дефекты на отливках, такие как усадочные раковины, газовые поры, трещины и неметаллические включения, имеют сложную, часто взаимосвязанную природу. Опытный технолог или мастер способен по внешнему виду, локализации и структуре дефекта определить его причину. Однако формализовать этот опыт для обучения новых кадров или для создания систем автоматизированного контроля крайне сложно.

Здесь на помощь приходят **продукционные правила** (production rules) – модели представления знаний в системах искусственного интеллекта вида **ЕСЛИ (условие), ТО (действие или заключение)**. Такой подход позволяет создать базу знаний, где эмпирический опыт экспертов и данные из научной литературы структурируются в четкие алгоритмы диагностики [1].

Структура продукционного правила для литейного дефекта

Каждое правило должно быть комплексным и учитывать несколько аспектов:

1. Визуальные и макроскопические признаки дефекта.

2. Локализация дефекта на отливке.
 3. Результаты инструментального контроля (например, рентгеновского или ультразвукового).
 4. Параметры технологического процесса, приведшие к его возникновению.
- Рассмотрим применение этого подхода к наиболее распространенным дефектам.

Примеры производственных правил для типичных дефектов

1. Усадочная раковина

Описание: Полость с шероховатой, часто окисленной поверхностью, расположенная в тепловых узлах отливки.

Производственное правило:

ЕСЛИ:

- Дефект представляет собой полость с грубой, кристаллической структурой внутри.
- Дефект локализован в зоне последующего затвердевания (тепловой узел, области с максимальной толщиной стенки).
- На рентгенограмме наблюдается затемнение неправильной формы.
- Питатели и прибыли расположены неоптимально или имеют недостаточный размер.

ТО:

- С вероятностью 95% дефект является усадочной раковиной.
- Рекомендуемые действия: пересчитать и перераспределить прибыли и стояки для обеспечения направленного затвердевания. Увеличить эффективность питания за счет применения экзотермических или теплоизоляционных вкладышей. Оптимизировать температурный режим заливки [4].

2. Газовая пористость

Описание: Скопление округлых или вытянутых пор с гладкой, блестящей поверхностью.

Производственное правило:

ЕСЛИ:

- Дефект представляет собой сферические или слегка вытянутые поры.
- Поверхность пор гладкая и чистая.
- Дефект распределен по всему объему отливки или сосредоточен в верхних частях полости формы.
- На изломе отливки наблюдается сильное окисление зерен.
- Перед заливкой была зафиксирована повышенная влажность формовой смеси или стержней.

ТО:

- С вероятностью 90% дефект является газовой пористостью.
- Рекомендуемые действия: усилить сушку и прокалку стержней и форм. Увеличить газопроницаемость формовой смеси. Оптимизировать режим плавки и рафинирования расплава для снижения содержания водорода [3]. Применить вакуумирование или продувку инертными газами.

3. Горячая трещина

Описание: Тонкая, извилистая межкристаллическая трещина, образующаяся в интервале хрупкости при затвердевании.

Производственное правило:

ЕСЛИ:

- Дефект имеет вид тонкой, извилистой линии.
- Поверхность трещины окислена (для песчаных форм).
- Дефект расположен в местах резкого перепада сечений, в углах, у карманов, то есть в зонах концентрации напряжений.
- Конструкция литниковой системы создает препятствия для свободной усадки отливки.

ТО:

- С вероятностью 85% дефект является горячей трещиной.
- Рекомендуемые действия: смягчить конструкцию отливки плавными переходами. Применить составные стержни, разрушаемые при усадке. Снизить температуру заливки. Оптимизировать химический состав сплава для уменьшения интервала хрупкости [1].

4. Неметаллические включения (окисные плёны)

Описание: Расслоения, плёнки или скопления неметаллических фаз, нарушающие сплошность металла.

Производственное правило:

ЕСЛИ:

- Дефект имеет вид блестящих, словно чешуйчатых, расслоений.
- На изломе наблюдается участок с цветами побежалости.
- Дефект расположен вблизи поверхности раздела металл-форма, часто в верхних частях отливки.
- Наблюдалась турбулентная заливка, приводящая к захвату окисной пленки.

ТО:

- С вероятностью 90% дефект является окисной пленкой.
- Рекомендуемые действия: обеспечить плавный, безударный вход металла в полость формы (системы с сифонными подводами). Применить фильтры в литниковой системе. Улучшить качество подготовки расплава (рафинирование) [2].

Внедрение и практическая значимость

Разработанная база производственных правил не является статичным документом. Это ядро динамической экспертной системы. Ее внедрение в производственный цикл предполагает следующие этапы:

1. Верификация и валидация: Проверка правил на исторических данных о браке и их постоянная корректировка по результатам новых случаев.
2. Интеграция с IoT: Подключение к данным в реальном времени от датчиков (температура формы, скорость заливки), что позволит автоматически проверять условия правил.

3. Создание пользовательского интерфейса: Разработка простого ПО для операторов контроля качества, где они, выбирая признаки дефекта, получают вероятный диагноз и рекомендации.

Практическая значимость заключается в сокращении времени на диагностику брака, снижении зависимости от человеческого фактора, системном накоплении знаний и, как следствие, в значительном снижении процента брака и повышении рентабельности производства.

Заключение

Разработка базы производственных правил – это не просто академическое упражнение. Это создание «цифрового двойника» эксперта-технолога, который может быть использован для:

1. Обучения новых специалистов.
2. Быстрой диагностики дефектов в цеховых условиях.
3. Интеграции в системы CAPP (Computer-Aided Process Planning) и MES (Manufacturing Execution System).

Конечно, такие правила требуют постоянной валидации и пополнения новыми данными. Однако именно этот подход позволяет перейти от интуитивного исправления брака к управлению качеством на основе данных и формализованных знаний, что является залогом конкурентоспособности любого современного литейного производства в условиях Industry 4.0.

Библиографический список

1. Ермаков, С.С. Горячеломкость алюминиевых сплавов: теория и практика / С.С. Ермаков, А.В. Курбатов // Литейное производство. – 2016. – № 4. – С. 32-36.
2. Золотов, Л.И. Современные методы борьбы с окисными включениями в литых алюминиевых сплавах / Л.И. Золотов, М.П. Темкин // Цветные металлы. – 2020. – № 5. – С. 87-92.
3. Колобнев, И.Ф. Плавка и литье алюминиевых сплавов / И.Ф. Колобнев. – М.: Металлургия, 2011. – 512 с.
4. Матюшенко, М.Я. Проектирование литниково-питающих систем для стальных и цветных отливок / М.Я. Матюшенко. – М.: Машиностроение, 2008. – 256 с.

© Хайруллин И.И., 2025

Э.Д. СМЕРНОВ

emil.smirnov@bk.ru

Науч. руковод. – ст. препод. И.И. ШАЙХУТДИНОВА

Уфимский университет науки и технологий

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К УЛУЧШЕНИЮ КАЧЕСТВА ОТЛИВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Аннотация: в представленной статье рассматриваются современные технологические подходы к улучшению качества алюминиевых отливок. Алюминиевое литье широко применяется в различных отраслях, и повышение его качества является ключевым фактором для конкурентоспособности продукции. В статье анализируются методы управления процессами литья, включая контроль температуры, состав сплавов и применение новейших технологий, таких как 3D-печать и вакуумное литье. Рассматриваются также новые разновидности литейных форм и их влияние на механические свойства отливок. Результаты исследований показывают, что внедрение современных подходов позволяет значительно улучшить характеристики отливок из алюминиевых сплавов, сокращая количество дефектов и повышая их долговечность.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, отливка, технологический подход, легирование.

Алюминиевые сплавы широко применяются в различных сферах производства благодаря своим преимуществам, включающим малый вес, устойчивость к коррозии и хорошие механические свойства. Эти характеристики обуславливают их популярность в автомобильной, аэрокосмической, электротехнической и строительной отраслях. Однако для обеспечения высокого качества готовых изделий требуется тщательный контроль литейных процессов.

Несмотря на технологический прогресс, проблема дефектов в алюминиевых отливках остается значимой, так как даже незначительные изъяны могут снизить надежность и срок службы продукции. Поэтому совершенствование методов литья остается одной из ключевых задач как для науки, так и для промышленности.

В настоящей работе рассматриваются инновационные подходы к улучшению свойств алюминиевых отливок. Исследуются такие аспекты, как:

- оптимизация состава сплавов,
- модернизация процессов плавки и заливки,
- применение современных способов формования,
- внедрение новых материалов для литейных форм.

Основная цель статьи – не только проанализировать наиболее эффективные технологии, но и предложить практические решения для их реализации на

производстве. Результаты исследования позволят повысить качество отливок и снизить затраты на их изготовление, что в перспективе усилит конкурентоспособность алюминиевых изделий на рынке.

Для обеспечения высоких механических характеристик и эксплуатационной надежности алюминиевых отливок ключевое значение имеет грамотный подбор и модификация состава сплавов. Введение в расплав легирующих элементов (магния, кремния, меди) позволяет целенаправленно регулировать такие параметры, как прочностные показатели, коррозионная устойчивость и технологичность сварных соединений. [1] Практические исследования подтверждают, что даже незначительная корректировка химического состава может существенно улучшить эксплуатационные свойства готовых изделий.

Тепловые параметры играют определяющую роль в формировании структуры литых заготовок. Современные системы автоматизированного контроля температуры при заливке и термообработке обеспечивают равномерный тепловой режим, что минимизирует риск возникновения трещин и других структурных дефектов. Рациональный подбор температурных режимов способствует формированию оптимальной зеренной структуры, что положительно сказывается на комплексе механических свойств.

Среди технологических методов литья (под давлением, в песчаные или металлические формы) особое внимание уделяется совершенствованию производственных процессов. Внедрение автоматизированных литейных комплексов позволяет не только сократить цикл изготовления, но и существенно уменьшить вероятность образования технологических дефектов (пористости, усадочных раковин), одновременно повышая точность геометрических параметров. Дополнительный резерв для оптимизации заключается в компьютерном моделировании конструкции литейных форм, что способствует рациональному расходу металла и улучшению гидродинамики заливки.

Современные методы неразрушающего контроля (цифровая радиография, вихретоковый анализ) позволяют осуществлять мониторинг качества на всех стадиях производства. Перспективным направлением является интеграция систем технического зрения и нейросетевых алгоритмов для автоматизированного выявления дефектов, что существенно повышает эффективность производственного контроля.

Аддитивные технологии открывают новые возможности в литейном производстве. Использование 3D-печати для изготовления литейных форм и моделей позволяет реализовывать сложные геометрические конфигурации, недостижимые при традиционных методах, одновременно снижая материалоемкость производства. [2]

Экологический аспект производства приобретает все большую значимость. Разработка замкнутых технологических циклов с максимальной утилизацией производственных отходов и вторичным использованием алюминия соответствует принципам устойчивого развития и позволяет снизить себестоимость продукции.

Таким образом, системная модернизация литейного производства, включающая:

- научно обоснованное легирование сплавов;
- прецизионный контроль параметров литья;
- внедрение цифровых технологий контроля;
- использование аддитивных методов;
- экологизацию производственных процессов,

создает комплексные предпосылки для выпуска конкурентоспособной продукции с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Современные подходы к повышению качества алюминиевых отливок: практические решения:

1. Автоматизация контроля производственных процессов

Рекомендуется внедрение интегрированных систем мониторинга, включающих:

- сеть датчиков для непрерывного измерения температурных режимов, давления и других критических параметров;
- программные комплексы для анализа данных в реальном времени;
- системы статистического управления процессами (SPC) с автоматическим оповещением о выходе параметров за допустимые пределы.[3]

2. Совершенствование металлургических составов

Для оптимизации характеристик сплавов предлагается:

- проведение циклических лабораторных испытаний с оценкой механических и технологических свойств;
- разработка новых рецептур с применением компьютерного моделирования свойств сплавов;
- создание клиентоориентированных составов с учетом специфических требований заказчиков.

3. Модернизация технологического оборудования

Перспективные направления включают:

- обновление парка литейного оборудования автоматизированными системами;
- внедрение прецизионных систем терморегулирования;
- использование аддитивных технологий для производства сложных литейных форм;
- применение CAD/CAM систем для проектирования оснастки.

4. Применение инновационных материалов

Рекомендуемые мероприятия:

- исследование перспективных композитных материалов;
- разработка защитных покрытий с улучшенными эксплуатационными характеристиками;
- тестирование новых модификаторов структуры сплавов.

5. Оптимизация ресурсопотребления

Эффективные решения:

- создание замкнутых циклов переработки производственных отходов;
- внедрение системы учета материальных потоков;
- разработка мероприятий по снижению безвозвратных потерь.

6. Развитие кадрового потенциала

Ключевые инициативы:

- регулярное обучение персонала современным технологиям контроля качества;
- формирование экспертных групп по анализу дефектов;
- проведение тренингов по работе с новым оборудованием.

7. Система менеджмента качества

Необходимые меры:

- разработка четких стандартов качества для всех видов продукции;
- внедрение многоуровневой системы контроля;
- проведение регулярных производственных аудитов.

Выводы и перспективы

1. Комплексная модернизация производства, сочетающая технологические и организационные решения, позволяет достичь стабильного качества отливок.

2. Применение компьютерного моделирования и новых материалов открывает возможности для создания продукции с уникальными характеристиками.

3. Цифровизация процессов контроля обеспечивает раннее выявление отклонений и снижение производственного брака.

4. Инвестиции в профессиональное развитие сотрудников повышают эффективность внедрения инноваций.

5. Внедрение международных стандартов качества укрепляет конкурентные позиции предприятия.

Предложенные решения позволяют системно подойти к вопросу повышения качества алюминиевых отливок, обеспечивая устойчивое развитие предприятия в условиях высокой рыночной конкуренции.

Библиографический список

1. Трухов А.П. Технология литейного производства: Литье в песчаные формы. 2005 - 515 с.

2. Шайхутдинова И.И., Гайнцева Е.С. Применение информационных технологий при подготовке литейного производства. Литейное производство, 2024г. №1. С.31-36.

3. Шайхутдинова И.И. Алгоритмы машинного обучения при анализе дефектов отливок из алюминиевых сплавов. Прогрессивные литейные технологии: труды конференции. Под ред. Проф. В.Д. Белова и доц. А.В. Колтыгина – М: МИСИС, 2024. С. 484-491.

4. Бидуля П.Н. Технология литейного производства. Metallurgizdat, 1956.

© Смирнов Э.Д., 2025

И.Ф. ХУЗИЕВ

il.khuziev@ya.ru

Науч. руковод. — канд. техн. наук, доцент А.В. ЯХИН

Уфимский университет науки и технологий

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СВАРКИ ТРЕНИЕМ МАШИН ОБЩЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

Аннотация: разработана автоматизированная система управления и регистрации параметров для машин сварки трением общего применения (типа МСТ-35М). Система обеспечивает контроль ключевых параметров и позволяет гибко переключаться между режимами ротационной и инерционной сварки. Проведенные испытания подтвердили воспроизводимость результатов. Система демонстрирует потенциал для использования в научных исследованиях.

Ключевые слова: сварка трением, автоматизированная система управления, МСТ-35М, регистрация параметров, ротационная сварка, титановый сплав ВТ6, модернизация оборудования.

Введение.

Существующие машины для сварки трением общего применения (МСТ-23, МСТ-35 и др.) часто имеют ограниченный функционал и аналоговое управление, что приводит к нестабильности качества соединения. Целью работы стала разработка системы, позволяющей автоматизировать управление и регистрацию параметров сварки путем модернизации данных установок, а так же разработка системы управления и контроля для машин общего применения [1-3].

Разработанная система построена на основе персонального компьютера с специализированным программным обеспечением (рис.1), который через интерфейс связи соединен со шкафом автоматики. Шкаф включает программируемое реле, частотный преобразователь и тахометр. Система осуществляет сбор данных в реальном времени с датчиков:

- частоты вращения шпинделя;
- линейного перемещения (величины осадки);
- давления в пневмо- и гидравлической системах.

Управление процессом осуществляется через блок пневмораспределителей, который воздействует на механизмы зажатия заготовок, фрикционную муфту-тормоз и шпиндель.

Программное обеспечение позволяет управлять и контролировать цикл сварки трением, посредством записи во временную память данных полученных с датчиков контроля процесса, а так же эти данные в дальнейшем сохранять в текстовый формат .txt или же в табличный вариант формата данных типа .xlsx

(рис.2). Так же программа осуществляет видеозапись процесса сварки с момента его начала до момента остановки цикла, сохраняет видеофайл в формате .mp4, плюс ко всему позволяет совершать фотографию процесса сварки по нажатию на выводимое изображение камеры в интерфейс программы.

Установка параметров процесса сварки трением осуществляется через ввод данных в соответствующие поля программного обеспечения, а именно частота вращения электродвигателя, время нагрева и время проковки сварочного цикла. Эти введенные параметры можно сохранить, а так же в дальнейшей работе по осуществлению сварки трением автоматический ввести при помощи загрузки введенных ранее данных. Общая блок-схема логики работы программы показана на рисунке 3.

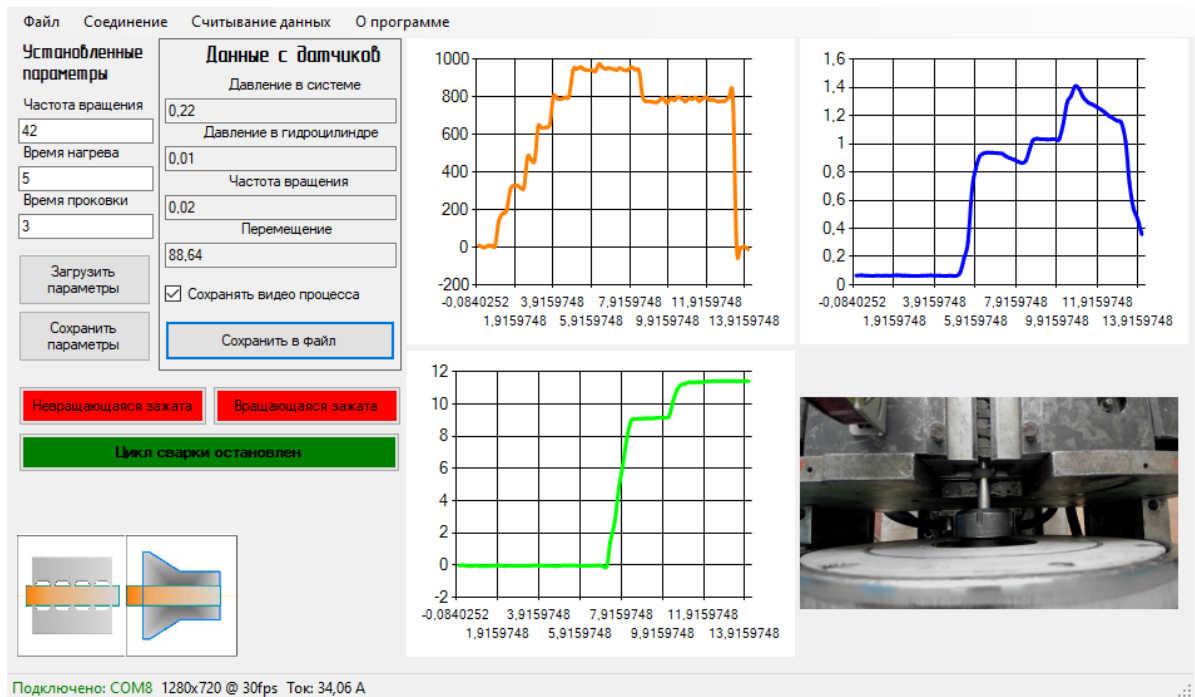


Рис. 1. Внешний вид пользовательского окна системы управления и контроля

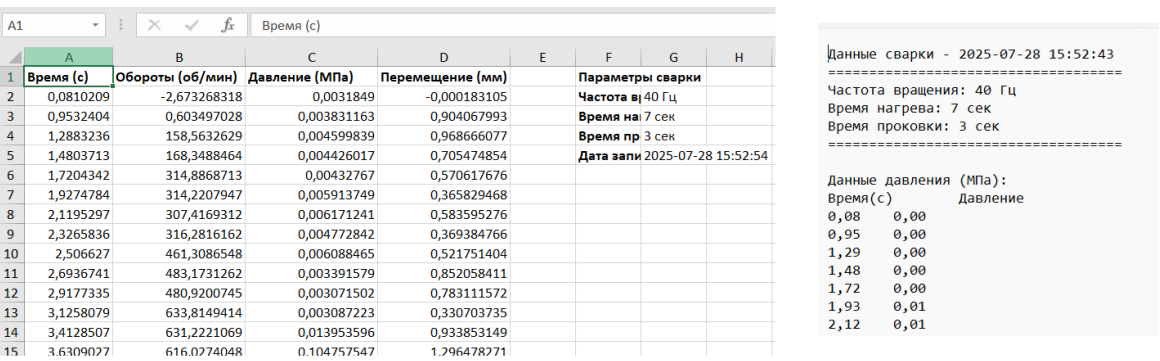


Рис. 2. Сохраненные данные сварочного процесса:
 а – данные сохраненные в Excel (.xlsx);
 б – данные сохраненные в текстовом формате (.txt)

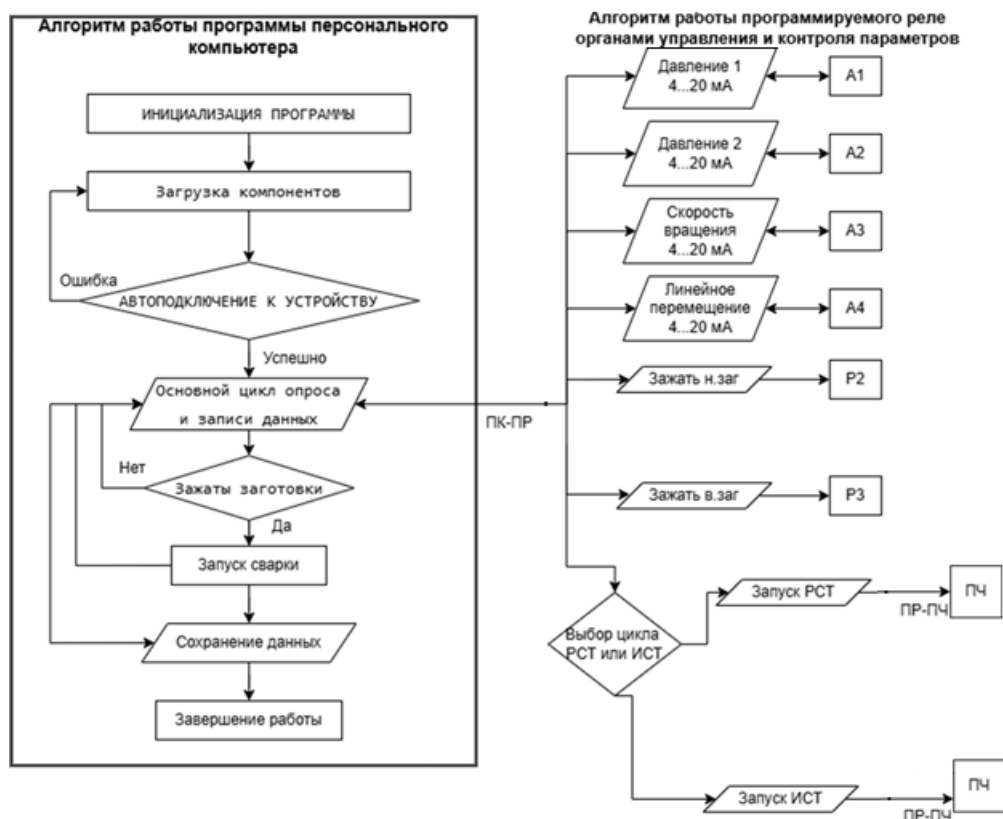


Рис. 3. Алгоритмы работ программы персонального компьютера и программируемого реле

Для проверки работоспособности системы было проведено 10 сварочных циклов, на рисунке 4 показаны некоторые образцы сваренных деталей из титанового сплава ВТ6. Анализ полученных сварных образцов показал высокую повторяемость процесса, это свидетельствует о штатной работе системы управления и подтверждает воспроизводимость результатов, что является ключевым преимуществом автоматизации.



Рис. 4. Сваренные образцы из титанового сплава ВТ6

Однако в процессе испытаний были выявлены проблемы, связанные не с системой управления, а с механической частью базовой машины МСТ-35М:

- проскальзывание деталей в зажимах при осуществлении стадии нагрева и осадки, что приводит к нарушению теплового режима и искажает кинематику процесса;

- несоответствие временных показателей в записи частоты вращения, вероятно, вызванное люфтами в механической передаче или запаздыванием срабатывания тормозной системы.

Разработанная система управления доказала свою эффективность, обеспечив стабильное и воспроизводимое качество сварки. Для полной реализации потенциала системы необходимо провести модернизацию механических компонентов машины МСТ-35М с целью устранения проскальзывания заготовок и улучшения синхронизации работы приводов, а так же проводить дальнейшую разработку системы управления с добавлением новых функций, которые позволят проводить научные исследования, например анализ цикла сварки трением сразу же после выполнения сварки и сохранением результатов анализа.

Библиографический список

1. Хузиев, И. Ф. Модернизация машины сварки трением МСТ-35 / И. Ф. Хузиев // Мавлютовские чтения : Материалы XVII Всероссийской молодёжной научной конференции. В 9-ти томах, Уфа, 21–23 ноября 2023 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2024. – С. 183-187. – EDN BYUCQG.

2. Хузиев, И. Ф. Цифровизация систем управления и контроля сварочной машины МСТ-35 / И. Ф. Хузиев, П. И. Бочкарев // Молодёжь и будущее авиации и космонавтики : Сборник аннотаций конкурсных работ XVI Всероссийского межотраслевого молодёжного конкурса научно-технических работ и проектов, Москва, 18–22 ноября 2024 года. – Москва: Издательство Перо, 2024. – С. 194. – EDN BVXXUJ.

3. Хузиев, И. Ф. Управление циклом ротационной сварки по произвольно заданному закону изменения частоты вращения двигателя / И. Ф. Хузиев, П. И. Бочкарев // Мавлютовские чтения : Материалы XVIII Всероссийской молодёжной научной конференции. В 9-ти томах, Уфа, 25–29 ноября 2024 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2025. – С. 251-254. – EDN UJJFPE.

© Хузиев И.Ф., 2025

А.Г. ХАЛИТОВ

alsynhalitov385@gmail.com

Науч. руковод. – докт. техн. наук, доцент. А.Ю. МЕДВЕДЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ ТРЕНИЕМ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ВТ6

Аннотация: в данной статье представлены результаты экспериментального исследования процесса ротационной сварки трением (РСТ) заготовок из титанового сплава ВТ6 в виде прутков. Рассмотрены физические основы процесса, оказывающие влияние на формирование соединения. Проведен анализ влияния основных технологических параметров, таких как скорость вращения, удельное осевое давление и время сварки на результат сварки.

Ключевые слова: сварка трением, ротационная сварка трением, сварочное оборудование, цикл сварки, параметры сварки, титановые сплавы, ВТ6.

Титановый сплав ВТ6 является основным конструкционным материалом в авиа- и ракетостроении, химическом машиностроении и медицине. Широкое применение находят изделия из пруткового проката данного сплава: оси, валы, штоки, элементы силового каркаса. Соединение таких элементов часто является критически важной технологической операцией.

Применение сварки трением позволяет не только соединять ограниченно свариваемые материалы, но и значительно снижать трудоемкость изготовления и уровень остаточных напряжений [1]. Отработанная технология сварки трением обеспечивает повторяемость геометрических характеристик сварных соединений, высокий уровень прочности и отсутствие дефектов в шве и околошовной зоне. Таким образом, ротационная сварка выполняется без объемного плавления в зоне сварки за счет тепла, выделяемого при трении, и может быть использована при соединении ограниченно свариваемых, разнородных и разноименных материалов как в состоянии, так и с последующей термической обработкой [2-4].

Основными преимуществами сварки трением являются [1]:

- возможность получения разноименных и разнородных сварных соединений, в том числе материалов, не свариваемых методами сварки плавлением;
- минимальный объем зоны термического влияния при сварке;
- минимальные значения остаточных напряжений при сварке;
- экологическая чистота технологического процесса;
- низкая себестоимость технологического процесса.

Применение метода сварки трением, по сравнению со сваркой плавлением, обеспечивает:

- возможность получения сварных соединений с прочностью, близкой к прочности основного материала, в том числе материалов, не свариваемых методами сварки плавлением;
- отсутствие в процессе сварки загазованности и ультрафиолетового излучения;
- отсутствие необходимости применения присадочного материала, защитного газа, вакуумной среды;
- низкий уровень остаточных напряжений;
- возможность автоматизации процесса сварки.

Материалом для исследования являлся титановый сплав ВТ6 с химическим составом, соответствующим ГОСТ 19807-91. Использовали прутки разной длины с диаметром 14,3-14,9мм (табл. 1).

Таблица 1

Исходные геометрические параметры заготовок

Образец	Длина вращающейся заготовки	Длина не вращающейся заготовки	Диаметр вращающейся заготовки	Диаметр не вращающейся заготовки
1(5)	96,6	65,2	14,3	14,9
2(8)	77,0	58,4	14,4	14,5
3(10)	90,6	91	14,9	14,7

Для выбора оптимальных режимов сварки получены сварные соединения в широком диапазоне технологических параметров. Основными технологическими параметрами ротационной сварки трением являются: давление нагрева P_n , время нагрева t_n , давление проковки $P_{пр}$, время проковки $t_{пр}$. Для получения сварных соединений применяли установку ротационной сварки трением МСТ-35 [5]. Параметры процесса варьировали в следующих диапазонах: $P_n = 2$ МПа, $P_{пр} = 2$ МПа, $t_n = 4$ с. Время проковки установлено постоянным – 3 с. Значения осадки для всех исследуемых режимов составили не менее 2,6 мм (табл. 2).

В работе исследованы три образца, сваренные при одинаковых основных параметрах: частота вращения 40 Гц, время нагрева 4 с, время проковки 3 с. Целью исследования была оценка стабильности процесса и идентификация возможных отклонений в ключевых технологических параметрах: скорости вращения, давлении и перемещении.

Таблица 2

Режимы сварки трением для ВТ6

Образец	Частота вращения, Гц	Время нагрева, с	Время проковки, с	Давление нагрева, МПа	Давление проковки, МПа	Осадка, мм
1(5)	40	4	3	2	2	2,6
2(8)	40	4	3	2	2	2,6
3(10)	40	4	3	2	2	-

На рисунке 1 показаны сварочные образцы титанового сплава ВТ6 в упрочненном состоянии под номером 5 и 8, а также в исходном состоянии номер 10.



Рис. 1. Сварные образцы

Первичный анализ циклограмм был проведен с применением табличного процесса EXCEL. При это строились графики изменения усилия, частоты вращения и перемещения за цикл сварки. Пример циклограмм представлен на рис. 2,3,4. По оси абсцисс указано время сварки, по осям ординат – слева частота вращения в об/мин, справа перемещение в мм и давление в барах.

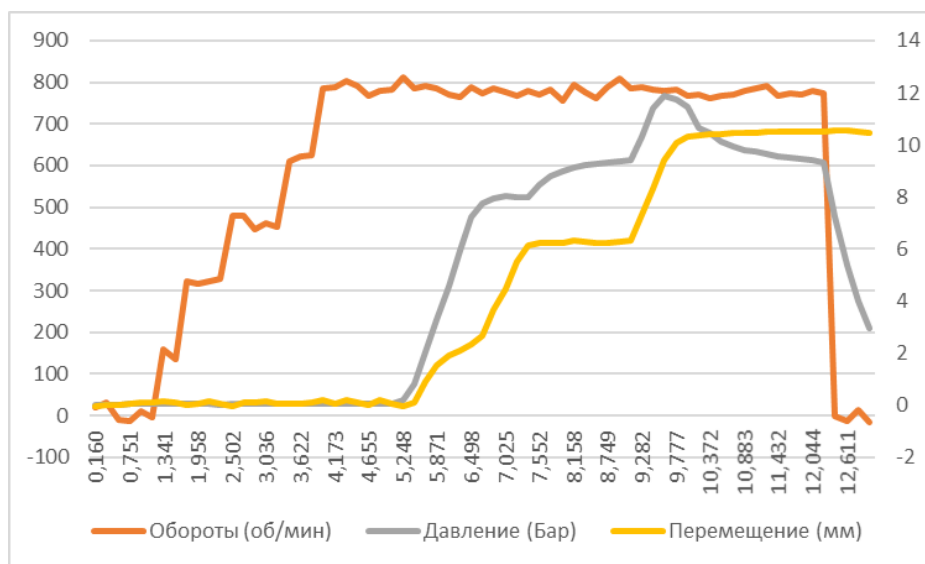


Рис. 2. 1(5) образец

В интервале 2–7,4 секунды следует активная фаза нагрева, характеризующаяся резким увеличением скорости вращения до рабочих значений 780-810 об/мин при одновременном монотонном нарастании давления до 8 бар и прогрессирующем осевом перемещении до 6,2 мм.

Переход к фазе проковки в момент 9 секунды чётко фиксируется по моментальному увеличению перемещения и достижением максимального значения давления 11,5 бар. В этот период происходит пластическая деформация разогретых материалов и формирование неразъёмного соединения.

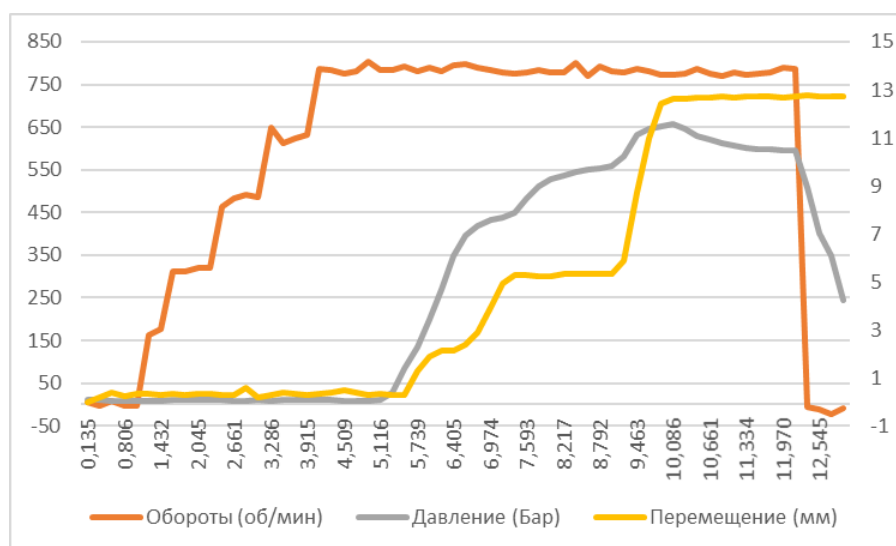


Рис. 3. 2(8) образец

Интервал 2-7 секунды следует активная фаза нагрева, характеризующаяся резким увеличением скорости вращения до рабочих значений 780-800 об/мин при одновременном росте давления до 7,8 бар и значительном осевом перемещении до 5,2 мм.

Фаза проковки начинается в момент времени 9 секунд, когда давление достигает максимального значения 11,5 бар и резким увеличением перемещения.

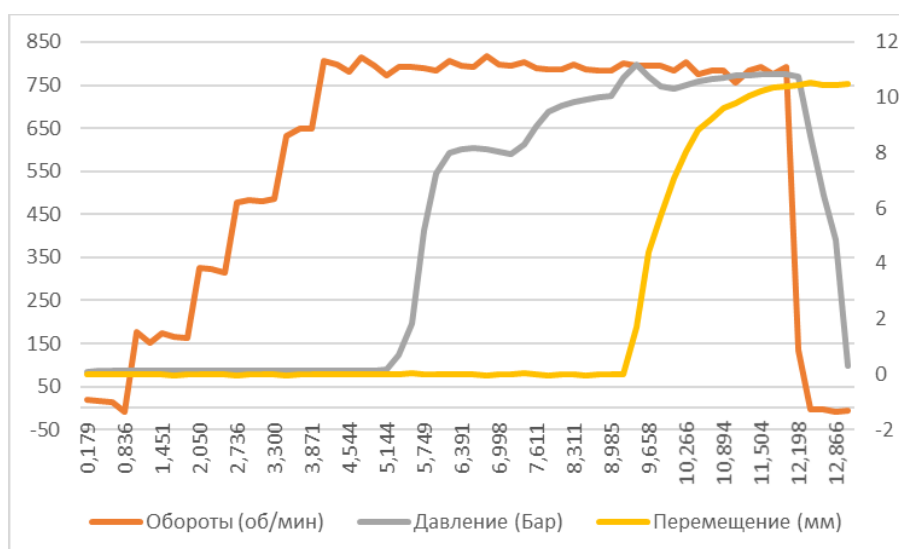


Рис. 4. 3(10) образец

В отличие от образцов №5 и №8, где осевое перемещение развивалось постепенно на протяжении всего процесса сварки, в образце №10 наблюдается принципиально иная картина динамики перемещения. До 9,4 секунды

перемещение практически отсутствует, сохраняясь вблизи нулевой отметки, тогда как в этот же момент времени образцы №5 и №8 уже демонстрировали значительное перемещение на уровне 6-12 мм. Резкий скачок перемещения в образце №10 с 0 до 10,41 мм за менее чем 2 секунды.

Все образцы продемонстрировали сходное поведение в фазе нагрева: равномерный рост скорости вращения до уровня 780–800 об/мин с последующей стабилизацией в фазе проковки. Завершение процесса характеризовалось снижением скорости вращения и давления, что соответствует типичному протеканию сварки трением.

Анализ давления показал его монотонное увеличение во всех случаях, однако зафиксированы различия в максимальных значениях:

- образец №1(5) – 9,4 бар,
- образец №2(8) – 10,5 бар,
- образец №3(10) – 10,8 бар.

Наибольшее давление отмечено у образца №10

Для всех трех образцов (№1(5), №2(8) и №3(10)) было проведено металлографическое исследование с целью изучения макро- и микроструктуры сварного соединения. Для этого каждый образец был разрезан в поперечном направлении (рис.5) относительно оси сварки для вскрытия зоны соединения. Полученные сечения подверглись тщательной подготовке, включающей шлифовку, полировку и травление специальным реактивом.



Рис. 5. Шлифы образцов

Визуальный осмотр и анализ при большом увеличении показывают полное проплавление соединяемых деталей без признаков непровара. Границы сварного шва и зоны термического влияния имеют четкие и плавные очертания.

Металл шва во всех образцах характеризуется плотной однородной структурой без наличия пор, раковин, трещин и неметаллических включений. Зона термического влияния имеет нормальную ширину и не содержит структурных изменений, свидетельствующих о перегреве или других термических дефектах. Наблюдается минимальное нарушение соосности.

Таким образом можно сделать вывод, что проведенные исследования процесса ротационной сварки трением титанового сплава ВТ6 подтвердили стабильность и воспроизводимость технологии при заданных параметрах. Анализ циклограмм показал, что несмотря на некоторые различия в динамике осевого перемещения между образцами, все три соединения продемонстрировали характерные для РСТ фазы нагрева и проковки с достижением необходимых температурно-деформационных условий. Максимальное давление в зоне сварки варьировалось в диапазоне 9,4-10,8 бар, что соответствует нормальному протеканию процесса.

Металлографические исследования подтвердили высокое качество всех полученных соединений - отсутствие дефектов типа непроваров, пор и трещин, однородную структуру металла шва и оптимальную ширину зоны термического влияния. Нарушение соосности соединенных деталей оказалось минимальным. Таким образом, примененные режимы сварки обеспечили формирование неразъемных соединений, отвечающих требованиям к конструкционным элементам из титанового сплава ВТ6. Нестандартный характер осадки в образце №3(10) требует дополнительного изучения, но не оказал негативного влияния на конечное качество соединения.

Библиографический список

1. Вилль В.И. Сварка металлов в твердой фазе. М.: Машиностроение, 1970. 176 с.
2. Сварка трением: справочник. Л.: Машиностроение, 1987. 235 с.
3. Лукин В.И., Ковальчук В.Г., Саморуков М.Л., Гриднев Ю.М., Жегина И.П., Котельникова Л.В. Особенности технологии сварки трением соединений из сплавов ВКНА-25 и ЭП975 // Сварочное производство. 2010. №5. С. 28-33.
4. Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М., Чабина Е.Б., Филонова Е.В. Взаимосвязь структуры и свойств высокожаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 25-30.
5. Хузиев, И. Ф. Модернизация машины сварки трением МСТ-35 / И. Ф. Хузиев // Мавлютовские чтения : Материалы XVII Всероссийской молодёжной научной конференции. В 9-ти томах, Уфа, 21–23 ноября 2023 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2024. – С. 183-187. – EDN BYUCQG.

© Халитов А.Г., 2025

Р.Р. ЮСУПОВ, И.Ф. ХУЗИЕВ

yusup.rav@yandex.ru, il.khuziev@ya.ru

Науч. руковод. – докт. техн. наук, доцент. А.Ю. МЕДВЕДЕВ

Уфимский университет науки и технологий

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ СТЕРЖНЕЙ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ 2-4 ММ

Аннотация: в статье рассматривается проблема создания биметаллических соединений для компонентов авиационной техники. Анализируется несоответствие существующего номенклатуры оборудования для сварки трением стержней малых диаметров (3-7 мм). Обоснована необходимость разработки новой специализированной установки. Представлена принципиальная схема разрабатываемого лабораторного стенда.

Ключевые слова: сварка трением, биметаллические соединения, малые диаметры, авиастроение, электроды свечей зажигания, лабораторный стенд, цифровая система управления.

Введение

Современное машиностроение, особенно в таких критических отраслях, как авиастроение, предъявляет повышенные требования к материалам, технологиям и оборудованию. Одной из актуальных задач является создание надежных биметаллических соединений для критических компонентов, таких как центральные электроды свечей зажигания газотурбинных двигателей (ГТД). Эти элементы работают в экстремальных условиях, характеризующихся высокими температурами и давлением, что требует использования комбинации материалов с разнородными свойствами.

Например, для обеспечения эрозионной стойкости и высокой электропроводности рабочая часть электрода выполняется из тугоплавкого вольфрама (температура плавления $\sim 3410^{\circ}\text{C}$), а крепежная часть – из жаропрочного никелевого сплава (например, ХН78Т), обладающего лучшей обрабатываемостью и коррозионной стойкостью. Однако соединение таких разнородных материалов традиционными методами сварки плавлением затруднено из-за высокой вероятности образования хрупких интерметаллидных фаз в зоне сплавления и значительной разницы в температурах плавления, что приводит к дефектам и снижению ресурса соединения.

Сварка трением, как метод сварки в твердой фазе, лишена этих недостатков. Локальный нагрев в зоне стыка, малая зона термического влияния и возможность точного контроля тепловложения делают ее идеальным кандидатом для решения данной задачи. Однако сварка стержней малых диаметров (3-7 мм) требует

реализации так называемого «жесткого» цикла с высокой частотой вращения, что является нетривиальной инженерной задачей. [1]

Проблема существующих решений

Проведенный анализ показал, что серийные отечественные установки для сварки трением, такие как МСТ-35М (рис.1) [2], рассчитаны на работу с заготовками диаметром от 16 мм и имеют ограничение по частоте вращения шпинделя (до 1000 об/мин). Проведенные исследования возможности адаптации такой машины для сварки малых диаметров выявили ее принципиальную непригодность для данных задач. [1]

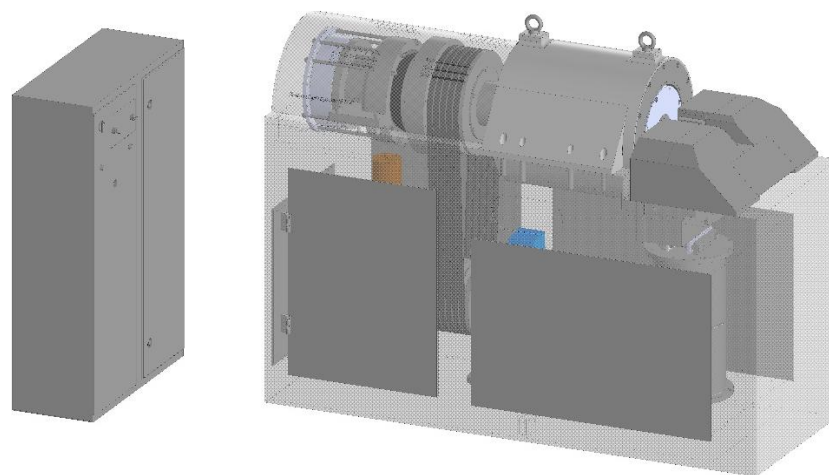


Рис. 1. Общий вид машины сварки трением МСТ-35М [2]

Как показали расчеты, для сварки стержня диаметром 5 мм по аналогии с известными режимами [1] при частоте 1000 об/мин время нагрева увеличивается с 0,9 до 9 секунд, а мощность процесса падает с 706,8 Вт до 70,6 Вт. Накопленной маховой энергии роторной системы МСТ-35М (3681 Дж) достаточно для сварки стержней диаметром до 8 мм в инерционном режиме, однако низкая скорость вращения не позволяет обеспечить требуемое качество соединения для разнородных пар. Дозированный ввод энергии затруднен из-за ее распределения между стыком и тормозной системой. Таким образом, для стержней диаметром 3-4 мм использование такого оборудования неэффективно, а для обеспечения высококачественного процесса необходима частота вращения не менее 10 000 – 20 000 об/мин. В связи с этим был проведен обзор существующих моделей некоторых машин сварки трением, данные представлены в табл.1.

Таблица 1

Сравнение технических характеристик оборудования для сварки трением малых диаметров

Технико-экономические характеристики продукта	ООО "КТИАМ" (ПСТ-12)	Harms+Wende (RSM410)	DUROPOWER (FW-15KH)	Wenzhou Unique Electric Co., Ltd (YE-C2.5S)	Разрабатываемый лабораторный стенд

1	2	3	4	5	6
Частота вращения	-	21300 об/мин	3800 об/мин	5000 об/мин	20000 об/мин
Усилие сварки	120 кН	25 кН	15 кН	25 кН	2.8–15 кН
Диаметр свариваемых заготовок	От 15 мм	От 17.5 мм	4–10 мм	5-12 мм	3–7 мм
Системы мониторинга	Нет	Частичный	Нет	ЧПУ + PLC	Цифровой (ПО+IoT)

Зарубежные аналоги, обладая высокими частотами вращения, либо не поддерживают требуемый диапазон малых диаметров (менее 10 мм), либо недоступны на российском рынке в текущих геополитических условиях. Китайские установки, работая с малыми диаметрами, существенно уступают по частоте вращения (3800-5000 об/мин), что негативно сказывается на качестве соединения.

Научно-техническое обоснование разработки новой установки

Для преодоления указанных ограничений предлагается разработка (новой) специализированной установки, обладающей следующими ключевыми характеристиками:

1. Высокооборотный шпиндель: Частота вращения до 20 000 об/мин является критически важным параметром. Высокая линейная скорость на периферии стержня малого диаметра обеспечивает интенсивное тепловыделение в зоне стыка, что позволяет сократить время цикла сварки до ≤ 10 секунд и минимизировать зону термического влияния. Это особенно важно для разнородных пар, предотвращая образование нежелательных интерметаллических фаз.

2. Давление осадки и контроль данного параметра: Диапазон удельного давления 200–300 МПа и усилие прижима 2,8–15 кН позволяют точно дозировать энергию, вводимую в соединение, и обеспечивать качественную осадку.

3. Защитная среда: Наличие герметичной камеры с возможностью подачи защитных газов (аргон, углекислый газ) исключает окисление материалов в процессе сварки, что критически важно для тугоплавких и активных металлов.

4. Цифровая система управления и контроля: Компьютеризированная система в реальном времени контролирует и регистрирует ключевые параметры: частоту вращения, осевое усилие, линейное перемещение и температуру. Это не только гарантирует стабильность технологического процесса, но и позволяет собирать данные для последующего анализа и оптимизации, а также интегрироваться в системы управления производством (IoT).

Перед проектированием новой установки сварки трением стержней малых диаметров было принято решение в разработке опытного лабораторного образца машины сварки трением, представленной на рис.2. Разработка лабораторного стенда для проведения опытов по сварке трением стержней малых диаметров необходимо для предварительной оценки возможности данной компоновки элементов будущего разрабатываемого станка. Стенд будет разработан на основе МРК-5 (машина шовной конденсаторной сварки) – установленной на кафедре

сварочных, литейных и аддитивных технологий в Уфимском университете науки и технологий.

Данный лабораторный стенд необходимо компоновать системой управления и регистрации, разработанной в компании ООО «Точка Трения». Система управления и контроля в своей сущности является однотипной (рис. 3), только необходимо менять модель частотного преобразователя и менять параметры работы программы, что потенциально дает возможность расширения возможности разработки систем управления для машин сварки трением разных конфигураций.

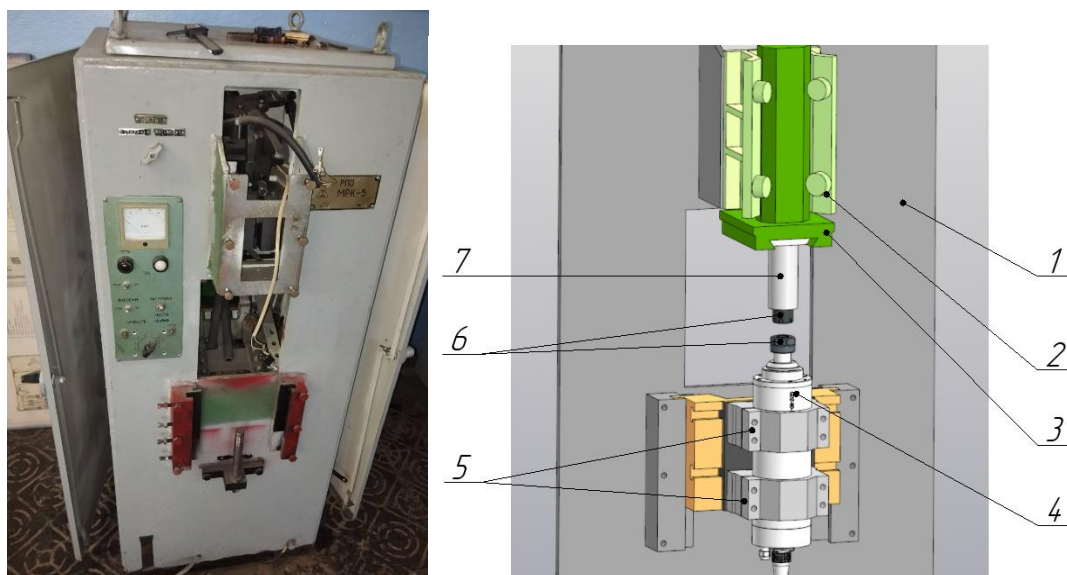


Рис. 2. Принципиальная схема разрабатываемого лабораторного стенда:

1 – станина, 2 – направляющая поршня, 3 – поршень пневматический для осуществления осадки, 4 – высоко-оборотистый мотор-шпиндель, 5 – крепления мотор-шпинделя, 6 – цанги зажимные типа ER20, 7 – патрон для зажатия неврещающей заготовки.

Ожидаемые результаты и перспективы внедрения

Создание опытного лабораторного стенда позволит отработать технологические режимы сварки биметаллических пар «вольфрам-никелевый сплав» и «медь-алюминий», что откроет для дальнейшей разработки отечественной установки сварки трением стержней малых диаметров.

Основным потенциальным потребителем технологии является авиационная промышленность, в частности, предприятия, специализирующиеся на производстве агрегатов для двигателестроения. Разрабатываемая установка позволит наладить отечественное производство высоконадежных биметаллических электродов для свечей зажигания ГТД, что соответствует стратегическим направлениям развития российской промышленности.

Библиографический список

1. Возможности инерционной сварки трением при изготовлении биметаллических электродов свечей зажигания двигателей / А. В. Яхин, А. Ю. Медведев, А. Н. Паутов, Е.А. Удалова, И.Ф. Хузиев, А.Г. Халитов // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2025. – № 3(320). – С. 132-142. – EDN WLSRRB.
2. Хузиев, И. Ф. Модернизация машины сварки трением МСТ-35 / И. Ф. Хузиев // Мавлютовские чтения : Материалы XVII Всероссийской молодёжной научной конференции. В 9-ти томах, Уфа, 21–23 ноября 2023 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2024. – С. 183-187. – EDN BYUCQG.

© Юсупов Р.Р., Хузиев И.Ф., 2025

УДК 666.3

Ж.Ф. ЗАРИФЖОНОВ

zhavlon1@yandex.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент. Е.С. ГАЙНЦЕВА

Уфимский университет науки и технологий

АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИФРАКЦИОННЫХ СМЕСЕЙ С УПРАВЛЯЕМОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ ФОТОПОЛИМЕРА

Аннотация: предложен способ аддитивного производства керамических изделий, решающий ключевые проблемы традиционных методов - высокую усадку и невозможность работы с полифракционными смесями. Технология основана на послойном формировании изделия в пористой подложке.

Ключевые слова: аддитивное производство, керамика, композиты, полифракционная смесь, фотополимерное связующее, послойное нанесение, фильтрация связующего.

Аддитивные технологии производства керамических и композитных деталей становятся всё более востребованными благодаря возможности изготовления сложной геометрии без использования традиционных форм. Однако традиционные методы, такие как стереолитография (SLA) и селективное лазерное спекание (SLS), сталкиваются с фундаментальными ограничениями при работе с полифракционными смесями [4].

Анализ современных патентных решений, в частности Патента RU2688697 [1] и Патента RU2701263C1 [2], Патент RU2817238C1 [3], а также последних

разработок в области фотополимерных композиций [4, 5] позволяет выявить два основных недостатка:

1. Низкая геометрическая точность конечного изделия. Суммарная усадка на этапах полимеризации связующего (до 4%), его удаления и спекания (до 26%) может достигать 30%. Это приводит к неконтролируемому короблению и искажению геометрии.

2. Невозможность получения качественных изделий из полифракционных смесей: широкое распределение размера частиц вызывает седиментацию, неоднородность состава, уменьшение плотности и ухудшение механических свойств

Целью данной работы является разработка и апробация усовершенствованного способа послойного синтеза, направленного на устранение указанных недостатков и обеспечение получения высокоплотных изделий из полифракционных смесей.

Подобные подходы к управляемой фильтрации и послойному формированию материала ранее обсуждались при изготовлении водоохлаждаемых пресс-форм и керамических стержней [6], что подтверждает перспективность интеграции аддитивных и традиционных процессов.

Сущность предлагаемого способа

Предлагаемое изобретение реализуется в двух вариантах, общим для которых является формирование изделия-сырца внутри специальной оболочки, выполняющей роль не только формы, но и активного технологического элемента – пористой подложки для фильтрации.

Общая последовательность операций для обоих вариантов:

1. Создание растворимой оболочки: на платформе построения послойно (высота слоя $H1 \approx 0.01$ мм) наносится материал будущей оболочки (растворяемый, выплавляемый или выжигаемый полимер), формируя пористую подложку (рис.1).

2. Нанесение керамической смеси: в полость созданного фрагмента оболочки подается слой (высота $H2$ от 0.1 до 5 мм) текучей пастообразной смеси, содержащей керамический порошок и фотополимерное связующее (рис.2).

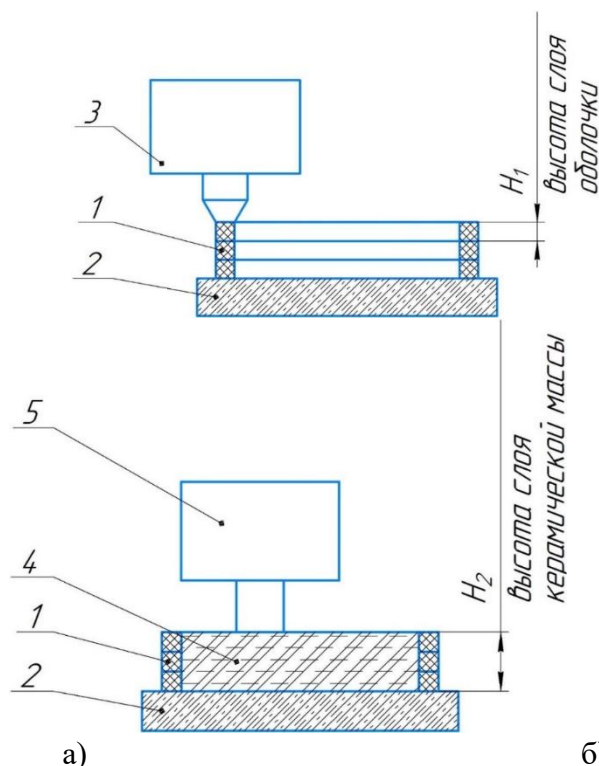


Рис. 1. Изготовление растворимой оболочки с пористой подложкой (а) и нанесение керамической смеси (б):

- 1 – фрагмента оболочки, 2 – пористая подложка, 3 – печатающая головка
4 – керамическая смесь; 5 – устройство нанесения смеси (экструдер);

Далее процессы для двух вариантов различаются.

Вариант 1: С использованием фотополимерного связующего

1. Фильтрация связующего: через поры подложки происходит удаление избыточного фотополимерного связующего из нанесенного слоя (рис.2). Процесс может интенсифицироваться вакуумным всасыванием.

2. Полимеризация внешних слоев оболочки: слой облучается УФ-излучением сквозь материал оболочки, что приводит к полимеризации и формированию твердого фрагмента изделия (рис.3).

3. Циклическое повторение: этапы 1–4 повторяются до полного формирования изделия-сырца в оболочке (рис.3).

4. Доводка и спекание: после построения открытые участки дополнительно облучаются УФ-светом. Затем оболочка удаляется, а изделие проходит спекания (рис.4).

Вариант 2: С использованием водной связующей системы

1. Фильтрация воды: через пористую подложку из нанесенного слоя удаляется дистиллированная вода (рис.6).

2. Циклическое повторение: этапы 1–3 повторяются до полного формирования сырого, но непрочного изделия-сырца в оболочке (рис. 7).

3. Инфильтрация фотополимером: вся конструкция пропитывается фотополимерным связующим, который заполняет поры между частицами порошка (рис.8).

4. Полимеризация и спекание: проводится УФ-облучение (как сквозь оболочку, так и сверху) для полимеризации связующего. Далее следует удаление оболочки и спекание.

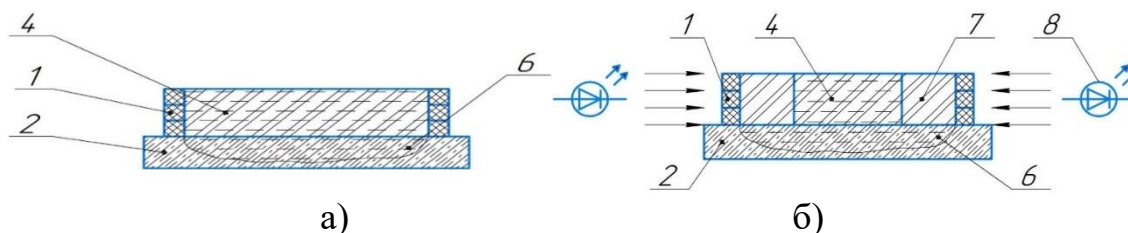


Рис. 2. Процесс фильтрации пористой подложкой связующего (а) и полимеризации внешних слоев оболочки (б):

1 – фрагмента оболочки; 2 – пористая подложка; 4 – керамическая смесь; 6 – удаленное фотополимерное связующие; 6 – удаленное фотополимерное связующие; 7 – полимеризованная зона фрагмента изделия; 8 – ультрафиолетовое излучения с длиной волны 395–405 нм;

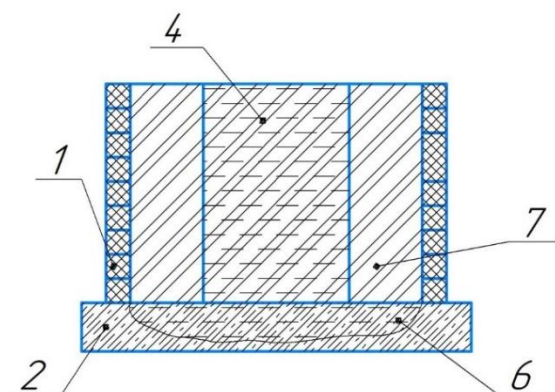


Рис. 3. Повторение вышеперечисленных этапов:

1 – фрагмента оболочки; 2 – пористая подложка; 4 – керамическая смесь; 6 – удаленное фотополимерное связующие; 7 – полимеризованная зона фрагмента изделия;

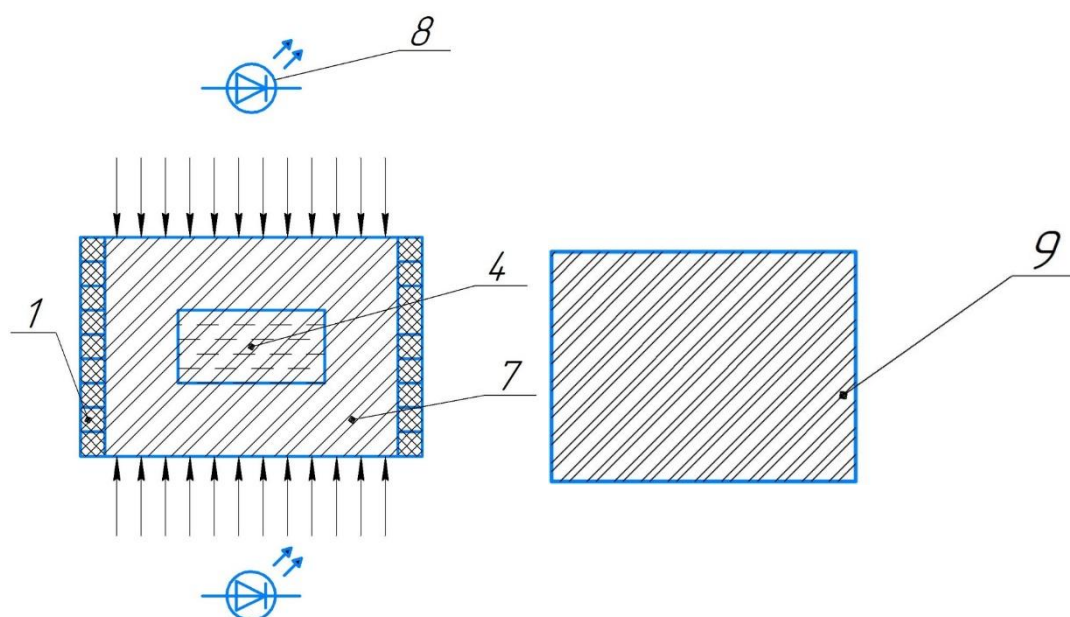


Рис. 4. Доводка и спекание:

1 – фрагмента оболочки; 4 – керамическая смесь; 7 – полимеризованная зона фрагмента изделия; 8 – ультрафиолетовое излучения с длиной волны 395–405 нм; 9 – готовое изделие после обжига;

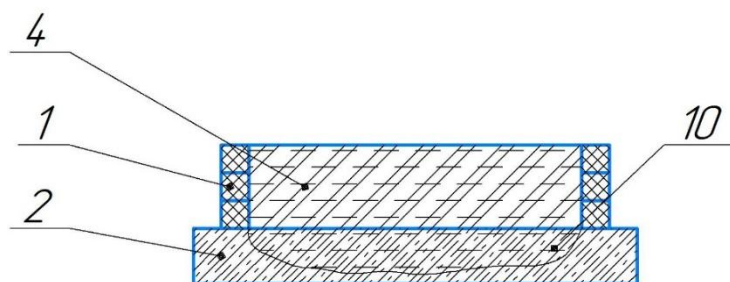


Рис. 5. Процесс фильтрации пористой подложки дистиллированной воды: 1 – фрагмента оболочки; 2 – пористая подложка; 4 – керамическая смесь; 10 – удаленная дистиллированная вода;

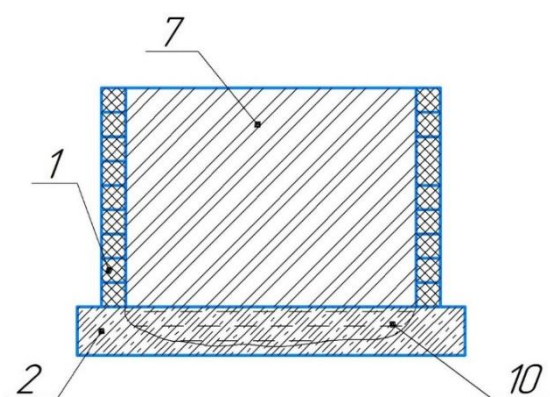


Рис. 6. Повторение вышеперечисленных этапов: 1 – фрагмента оболочки; 2 – пористая подложка; 7 – полимеризованная зона фрагмента изделия; 10 – удаленная дистиллированная вода;

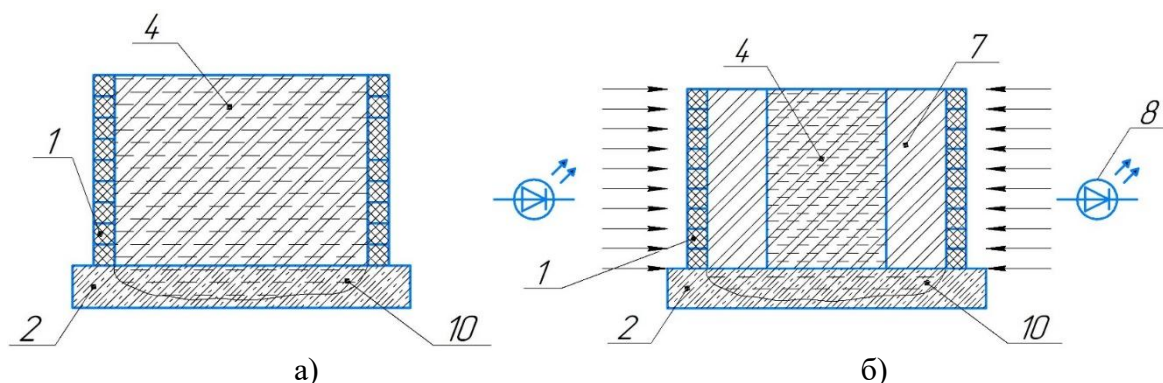


Рис. 7. Инфильтрация фотополимером (а), доводка и спекание (б): 1 – фрагмента оболочки; 2 – пористая подложка, 4 – изделие фотополимерным связующим; 7 – полимеризованная зона фрагмента изделия, 8 – ультрафиолетовое излучения с длиной волны 395–405 нм; 10 – удаленная дистиллированная вода;

Результаты экспериментов

Полученные результаты согласуются с данными, приведёнными в работах [6, 7], где также отмечено, что правильный выбор связующего и режима облучения существенно влияет на плотность и пористость керамических изделий.

Для апробации технологии были изготовлены керамические образцы по обоим вариантам способа. Результаты измерений плотности и пористости (табл.1)

Таблица 1

Результаты экспериментов

№	Варианты исполнения изделия	Воздействие при фильтрации керамической смеси от фотополимера	Плотность образцов, %	Открытая пористость образцов, %	Линейная усадка, %
1	Вариант 1	Нет	70	7	1,5
2	Вариант 1	Вакуумное всасывание	71	4	1,5
3	Вариант 2	Нет	70,7	7	1,5
4	Вариант 2	Вакуумное всасывание	71,4	4	1,5

Заключение

Разработанный способ послойного синтеза с использованием пористой подложки и фильтрации связующего показал свою эффективность в решении ключевых проблем аддитивного производства керамики.

Предложенная методика позволяет получать керамические изделия с повышенной плотностью (до 71,4%) и низкой открытой пористостью (4%).

Достигнуто значительное снижение линейной усадки (до 1,5%), что гарантирует высокую геометрическую точность конечных изделий.

Способ обеспечивает стабильное производство качественных изделий из полифракционных смесей, устраняя проблему седиментации.

Наличие двух вариантов реализации предоставляет технологическую гибкость в выборе материалов и процессов в зависимости от требуемых свойств изделия и имеющегося оборудования.

Библиографический список

1. Патент № 2688697 С1 Российская Федерация, МПК С04В 35/622, В33У 30/00, В28В 13/00. Способ и машина для изготовления сырых изделий из керамического и / или металлического материала по технологии аддитивного производства : № 2018125625 : заявл. 12.07.2018 : опубл. 22.05.2019 / К. Шапо, Р. Генъон.

2. Патент № 2701263 С1 Российская Федерация, МПК В28В 1/00, В22F 1/00, В22F 3/00. Способ и машина для изготовления изделий, сделанных из керамического или металлического материала, посредством технологии аддитивного производства: № 2018129992 : заявл. 17.08.2018 : опубл. 25.09.2019 / Р. Генъон, К. Шапо, М. Нгуен.

3. Патент № 2817238 С1 Российская Федерация, МПК С04В 35/634, В22F 10/12, В33У 10/00. Способ изготовления сложнопрофильных керамических, металлических и композитных изделий аддитивными технологиями: №

2023113972 : заявл. 26.05.2023 : опубл. 11.04.2024 / Р. Р. Ганиев, И. И. Ахметханов, А. С. Горюхин [и др.].

4. Патент № 2840266 С1 Российская Федерация, МПК В29С 64/124, В33У 10/00. Способ изготовления изделий из фотополимерных композиций аддитивной технологией : заявл. 16.08.2024 : опубл. 20.05.2025 / Р. Р. Ганиев, И. И. Ахметханов, Е. С. Гайнцева [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уфимский университет науки и технологий".

5. Технология изготовления изделий из фотополимерных композиций аддитивными технологиями / Р. Р. Ганиев, Е. С. Гайнцева, Ю. Д. Тошов [и др.] // Литейщик России. – 2025. – № 1. – С. 13-18.

6. Прягаев, В. М. Зависимость прочностных характеристик от температуры спекания керамических стержней на основе электрокорунда / В. М. Прягаев, Е. С. Гайнцева // Мавлютовские чтения: Материалы XVIII Всероссийской молодёжной научной конференции. В 9-ти томах, Уфа, 25–29 ноября 2024 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2025. – С. 239-244.

7. Технология изготовления керамических стержней методом аддитивных технологий / Р. Р. Ганиев, Е. С. Гайнцева, Ж. Ф. Зарифжонов [и др.] // Литейщик России. – 2024. – № 10. – С. 8-13.

© Зарифжонов Ж.Ф., 2025

УДК 621.74

В.М. ПРЯГАЕВ

pryagaevvadim@gmail.com

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент Е.С. ГАЙНЦЕВА

Уфимский университет науки и технологии

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ПОДЛОЖКИ АДДИТИВНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПЕЧАТИ КЕРАМИЧЕСКИМИ, МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ И КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Аннотация: в данной работе рассматривается использование фильтрационной подложки при печати в процессе инновационной аддитивной технологии с использованием керамических, металлических и композитных материалов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, SLA-печать, подложка, фильтрация, фильтрационная подложка, полимеры для печати.

В современном мире в условиях повышенных требований к конструкции и прочности изделий, приходится обращать внимание на различные материалы и

методы их обработки для получения изделий, удовлетворяющих этим требованиям. Так, в отрасли авиа- и двигателе- строения требуются достижения максимально большого переноса полезного объёма из пункта А в пункт Б. Чтобы этого достичь, инженеры стараются решить разные задачи и вопросы, одним из которых является повышение температур в рабочей зоне двигателей, порядка 1700 °С, благодаря чему увеличивается его результативная мощность и аппарат способен преодолеть путь из А в Б за меньшее время [1, 2].

На данный момент не все материалы могут выдержать такие высокие температуры, а для того, чтобы обойти использование крайне дорогих сплавов и материалов инженеры приходят к разным методикам, например, использование теплоаккумулирования протекаемого теплоносителя через охлаждаемый объект [2]. Это позволяет отводить лишнюю температуру от нагреваемой части детали и повышать его устойчивость к высокотемпературной среде использования. Для улучшения данной устойчивости теплоноситель обязан иметь возможность легко проникать в изделие, собирать на себя максимально возможное количество тепла, передаваемого от изделия, и так же беспрепятственно покидать пределы детали для дальнейшего путешествия по системе охлаждения.

Для создания формы таких изделий, работающих при повышенных нагрузках, внутри которых есть такие сложные пути на данный момент подходят только литейные технологии [3]. Для образования внутренних этих полостей-путей используются керамические стержни [4].

Для изготовления данных стержней требуются материалы химически устойчивые к материалу сплава и имеющие высокую огнеупорность. В качестве материала прекрасно подходят керамические составы. Они имеют высокую температуру плавления и могут быть удалены из полости отливки детали разными методами без разрушения отливки. Чтобы их изготовить в основном используют сложные и дорогостоящие пресс-формы, что делает стержни рентабельными только при массовом производстве [5]. Но что делать при запросе на малое количество отливок с сложной геометрией внутренней полости?

В этом случае могут помочь аддитивные технологии [6, 7]. А именно недавно предложенная технология послойного наращивания слоёв керамической суспензией в обечайки. Данная технология имеет возможность без использования дорогостоящих технологических процессов изготовить сырой стержень для последующей прокатки и получения готового керамического сержня.

Технология изготовления стержня с использованием аддитивных технологий с обечайкой включает в себя следующие этапы:

1. синтез обечайки в месте печати
2. заполнение обечайки керамической суспензией с примесью фотополимера
3. синтез последующих слоёв обечаек и заполнение их суспензией с фотополимером
4. засветка внешних слоёв изделия сквозь обечайку
5. удаление изделия с печатного стола
6. последующая засветка для отверждения всего внешнего контура
7. удаление обечайки

8. засыпка стержня в глинозём
9. полный цикл обжига

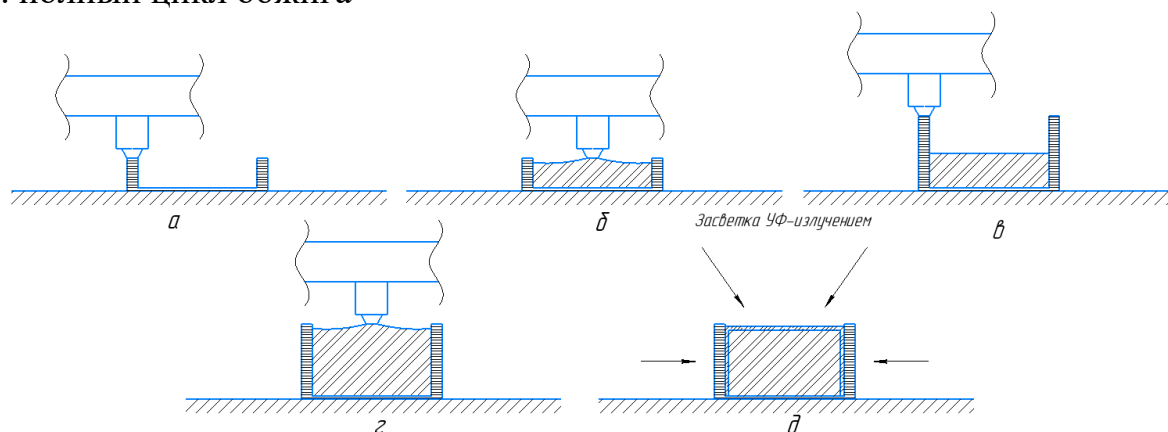


Рис. 1. Основные этапы технологии послойного наращивания с использованием обечаек:

а – печать обечайки; *б* – заполнение суспензией; *в* – печать следующего слоя обечайки; *г* – заполнение суспензией; *д* – закрепление внешнего слоя сквозь обечайку облучением УФ- излучением

При отработке данной технологии изготовили несколько изделий простой формы в виде плиток длиной 70, шириной 20 мм, высотой 5 мм и выявился недостаток: остаточные излишки фотополимера с связующим расширяются при обжиге и создают дефекты в виде вздутий, пор и трещин на поверхности стержня (Рис. 2).

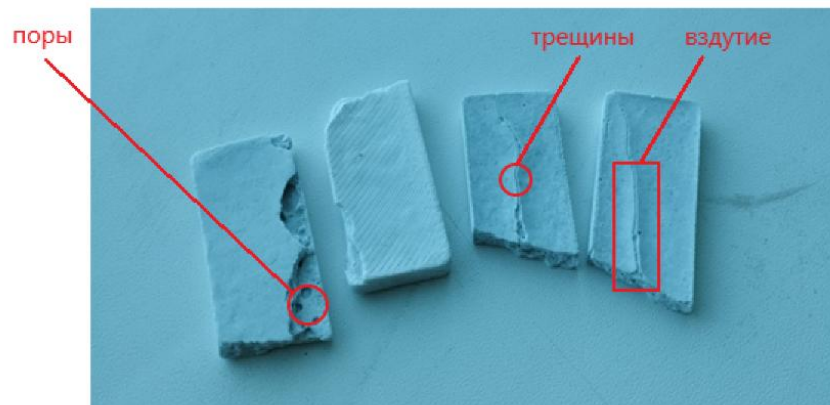


Рис. 2. Дефекты, выявленные при изготовлении деталей

Для решения этой проблемы был создан инновационный метод фильтрации излишек жидкой фазы суспензии через пористую подложку в процессе печати.

Благодаря этому методу стержни становятся более однородными и увеличивают точность внешнего контура стержня, который играет ключевую роль при формировании внутреннего контура отливки.

Суть данного метода заключается в фильтрации огнеупорной составляющей суспензии в теле синтезируемого стержня путём впитывания излишков жидкой составляющей суспензии в пористую подложку из схожего материала суспензии (Рис. 3).

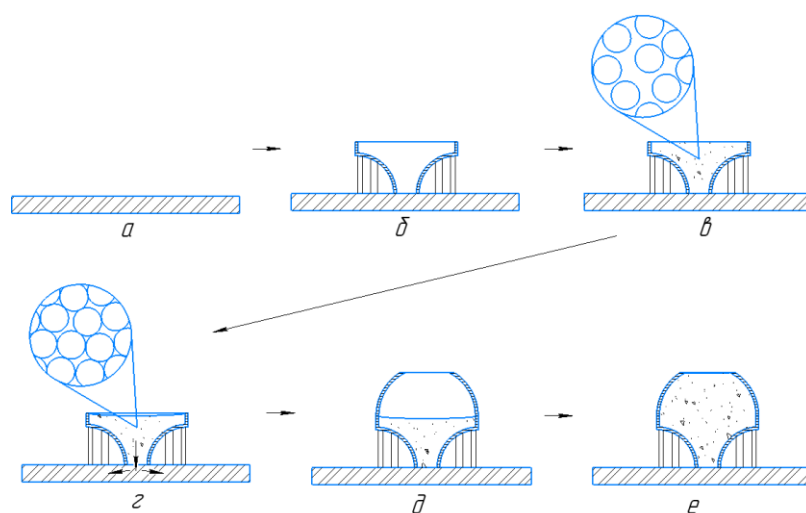


Рис. 3. Метод печати в обечайку с фильтрационной подложкой:

a – подложка устанавливается на стол; *б* – синтез обечайки на поверхности подложки; *в* – заполнение жидкой суспензией; *г* – процесс впитывания излишков жидкой суспензии в подложку; *д, е* – синтез последующих слоёв с оседанием жидкой фазы сквозь уже построенные слои.

Для отработки данного метода технология изготовления была изменена, без изменения сути – вместо послойного нанесения керамической суспензии в обечайку, была использована заливка суспензии.

Подложка изготавливается из того же материала, из которого делаются стержни путём уплотнения стержневой смеси в формах (рис.4).

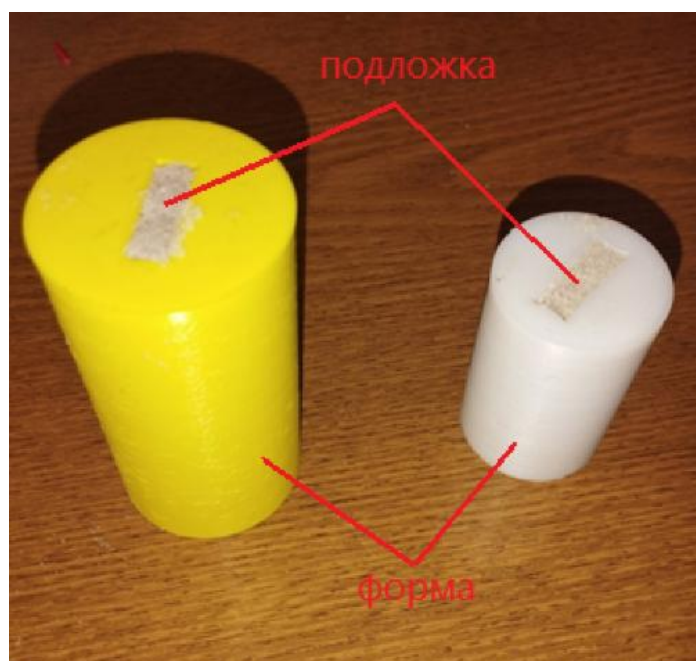


Рис. 4. Форма с подложками [5]

Далее изначально напечатанная обечайка устанавливается на подложку (Рис. 5).



Рис. 5. Обечайка, установленная на подложку [5]

После установки производится заливка жидкой суспензии в обечайку и полученный образец подвергается облучению УФ-излучением (Рис.6).

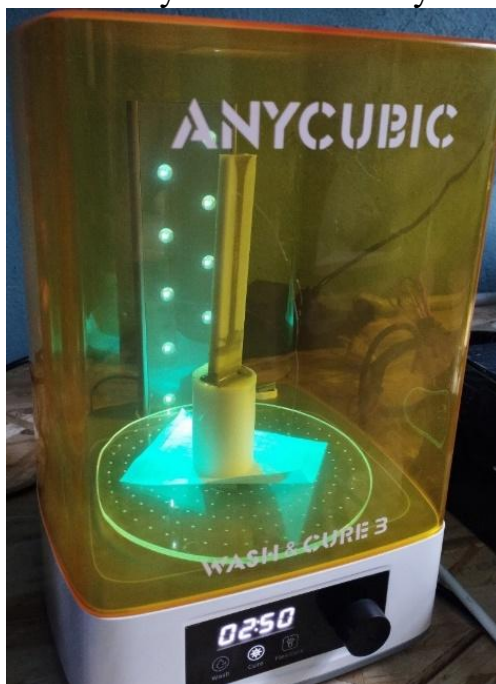


Рис. 6. Облучение УФ-излучением образца [5]

После полимеризации с дальнейшим удалением обечайки и обжигом был проведён визуальный осмотр образца (Рис. 7).



Рис. 7. Полученный образец [5]

После визуального осмотра не было выявлено видимых дефектов поверхности образцов.

Данный метод может относиться к любым суспензионным материалам, таким, как металлические порошки с примесью фотополимера с последующим спеканием или композитными материалами для уменьшения процента жидкой фазы в теле композитной детали.

Таким образом можно прийти к выводу, что использование подложки уменьшает количество образуемых дефектов у керамических стержней и данный метод является решением проблемы переизбытка жидкой фазы в теле синтезируемого стержня методом печати керамической суспензией в обечайки. Данный метод имеет свои недостатки и требует дальнейших работ, эксперименты проводятся.

Библиографический список

1. Технология изготовления изделий из фотополимерных композиций аддитивными технологиями / Р. Р. Ганиев, Е. С. Гайнцева, Ю. Д. Тошов [и др.] // Литейщик России. – 2025. – № 1. – С. 13-18.
2. Применение аддитивных технологий при изготовлении водоохлаждаемых пресс-форм для получения выплавляемых моделей / Р. Р. Ганиев, Е. С. Гайнцева, А. О. Деменок [и др.] // Литейщик России. – 2024. – № 6. – С. 6-11.
3. Прягаев, В. М. Зависимость прочностных характеристик от температуры спекания керамических стержней на основе электрокорунда / В. М. Прягаев, Е. С. Гайнцева // Мавлютовские чтения : Материалы XVIII Всероссийской молодёжной научной конференции. В 9-ти томах, Уфа, 25–29 ноября 2024 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2025. – С. 239-244.
4. Технология изготовления керамических стержней методом аддитивных технологий / Р. Р. Ганиев, Е. С. Гайнцева, Ж. Ф. Зарифжонов [и др.] // Литейщик России. – 2024. – № 10. – С. 8-13.
5. Мустаев, Руслан Рилевич. Разработка технологии послойного синтеза изделий из керамических материалов: выпускная квалификационная работа /

Мустаев Руслан Рилевич. – Уфа, 2024. – 73 с. – 15.04.01 Машиностроение. – Магистратура. – Очная. – <URL:http://e-library.ufa-rb.ru/dl/VKR/2024/VKR_Mustaev_R_R_MA279M.pdf>. – Текст: электронный

6. Патент № 2817238 С1 Российская Федерация, МПК С04В 35/634, В22F 10/12, В33У 10/00. Способ изготовления сложнопрофильных керамических, металлических и композитных изделий аддитивными технологиями : № 2023113972 : заявл. 26.05.2023 : опубл. 11.04.2024 / Р. Р. Ганиев, И. И. Ахметханов, А. С. Горюхин [и др.].

7. Патент № 2840266 С1 Российская Федерация, МПК В29С 64/124, В33У 10/00. Способ изготовления изделий из фотополимерных композиций аддитивной технологией : заявл. 16.08.2024 : опубл. 20.05.2025 / Р. Р. Ганиев, И. И. Ахметханов, Е. С. Гайнцева [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уфимский университет науки и технологий".

© Прягаев В.М., 2025

УДК 629.7.064.2

Е.Е. ЖЕРНОВКОВ

caimantheforest@gmail.com

Науч. руковод. – старший препод. А.Н. ПАУТОВ

Уфимский университет науки и технологий

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ЗАЩИТНОГО ГАЗА НА ПРОПЛАВЛЕНИЕ ПРИ СВАРКЕ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Аннотация: в научной статье рассматривается влияние различного состава защитного газа на проплавление при сварке неплавящимся электродом жаропрочных никелевых сплавов.

Ключевые слова: защитный газ, сварка, проплавление, неплавящийся электрод, жаропрочные никелевые сплавы.

В газотурбинных двигателях есть ряд деталей, в которых применяются жаропрочные материалы. В частности, это касается горячего тракта ГТД. В данной работе будет рассматриваться жаропрочный никелевый сплав ЭП718 – это высокопрочный сплав, предназначенный для работы при высоких температурах и в агрессивных средах. Этот материал часто используется в авиационных и газотурбинных двигателях.

Сплав может выдерживать температуры до 850–900 °С в постоянных рабочих условиях. ЭП718 обладает высокой устойчивостью к окислению при высоких температурах. Микроструктура сплава ЭП718 представляет собой монолитную структуру с высокодисперсным упрочнённым фазовым составом, который улучшает прочностные характеристики при высоких температурах. Однако обладает высокой стоимостью из-за дорогих легирующих элементов, а также меньшей гибкостью в сравнении с более дешевыми сплавами.

Таблица 1

Химический состав рассматриваемого материала – ЭП718 (XN45MBTiYBP)

Содержание элементов*, % (по массе)											
r		o	l	i		i	n		P	b	Z
4-16	,5- 3,5	- 5,2	,9- 1,4	,9- 2,4	0,01	0,3	0,6	0,1	0,015 ≤	,8- 1,5	0,02 ≤
*Ni – основа; Ce ≤ 0,03%; B ≤ 0,008%; Fe – остаток											

Работа проводится с целью уменьшения остаточных напряжений от сварки, для этого требуется уменьшить тепловложение, при этом сохранив нужное проплавление. Побочной целью является также снижение вероятности появления горячих трещин за счет снижения остаточных напряжений.

Сплав ЭП718 хорошо поддается сварке благодаря устойчивости к трещинам после термической обработки. (ВИАМ)

Однако сплав склонен к горячим трещинам, в частности ликвационным трещинам и микрофиссурам в зоне термического воздействия (ЗТВ). Ликвационные трещины возникают из-за расплава зерновых границ, вызванного сегрегацией элементов, таких как ниобий. Горячи появляются при неспособности металла выдерживать термические деформации, особенно при крупных зернах.

Ликвационные трещины

Ликвационные трещины возникают из-за расплава зерновых границ в ЗТВ, вызванного сегрегацией элементов, таких как углерод, ниобий, молибден и титан. Это особенно выражено при высоких скоростях нагрева. [1].

Микрофиссуры

Микрофиссуры появляются в ЗТВ, когда базовый металл не может компенсировать пластические деформации от термических циклов сварки. Это связано с образованием эвтектических фаз и карбидов на границах зерен. [2].

Возможные решения описанных проблем

Предварительный подогрев. Снижает перепад температур, а вместе с ним и рост градиентов напряжения между местом сварки и остальным конструктивным элементом. [3]

Сварка с экстремально малым подводом тепла. К этим способам относятся лазерная сварка или сварка электронным пучком. Данный способ очень требователен к точности сборки под сварку, а также типу сварного соединения. [4]

Изменение защитного газа. Для улучшения проплавляющей способности и уменьшения выгорания легирующих элементов по сравнению со сваркой в чистом аргоне. [5]

Для проведения экспериментальных работ было использовано оборудование источник питания Triton 400, горелка SR26 al 220, присадочная проволока ЭП – 533. Тип соединения ГОСТ 14771-76 С17.

Таблица 2

Состав применяемой присадочной проволоки ЭП - 533

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Cu	Nb
≤ 0.08	0.30 – 0.65	1.0 – 2.5	18.0 – 20.0	9.0 – 11.0	≤ 0.75	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.75	0.1 – 1.0

План эксперимента

1. Подготовка образцов
2. Сварка образцов
3. Термообработка
4. Разметка и разрезка образцов
5. Полировка и травление образцов
6. Проведение механических испытаний
7. Подведение результатов

Подготавливаем образцы размерами 100x200 мм из ЭП718 количеством 4 шт под сварку соединения С17.

Свариваем образцы на режимах серийного производства с использованием аргона и на подобранных опытным путём режимах для сварки в смеси аргона и 10% водорода, используя материалы и оборудование серийного производства.

Таблица 3

Используемые в эксперименте режимы

Режим Параметр	Серийного производства	Подобранный режим
Сила тока, А	90...130	70...80
Расход защитного газа в горелку, л/мин	14-16	14-16
Расход защитного газа на поддув, л/мин	8-10	8-10

Термообработка проходит в элеваторной печи по указанным в табл. 4 режимам.

Таблица 4

Режимы термообработки

Режим Параметр	Старение	Снятие напряжения

Температура загрузки	$\leq 500\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\leq 500\text{ }^{\circ}\text{C}$
Температура Выдержки 1	$(780\pm 10)\text{ }^{\circ}\text{C}$	$(500\pm 20)\text{ }^{\circ}\text{C}$
Температура Выдержки 2	-	$(850\pm 20)\text{ }^{\circ}\text{C}$
Температура Выдержки 3	-	$(1070\pm 10)\text{ }^{\circ}\text{C}$
Время выдержки	5ч $\pm$ 15 мин	50-60; 30-40; 60-70 мин
Расход аргона	8-10 л/мин	8-10 л/мин

Из образцов изготавливаются образцы с плечиками для механических испытаний на предел прочности, а также образцы на микроструктурный анализ.

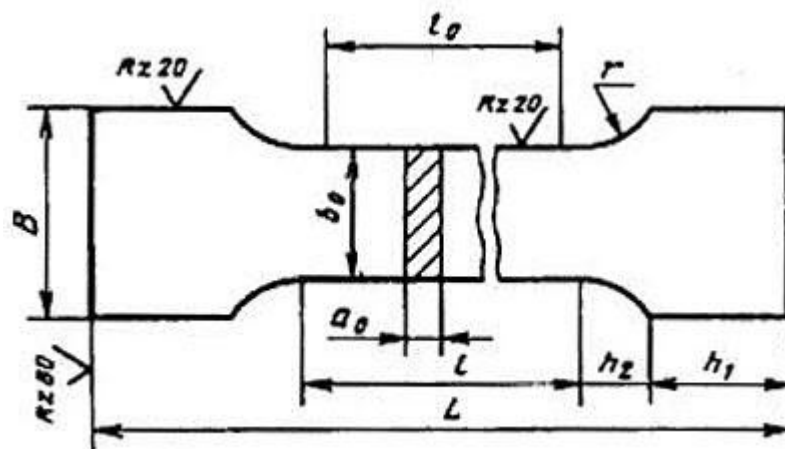


Рис. 1. Образец с плечиками для механических испытаний

Образцы для микроструктурного анализа полируются, а после травятся в реактиве «Круппа», в состав которого находят смесь 1 части серной кислоты, 2 частей 1 % водного раствора фуксина, приготовленного из насыщенного спиртового раствора. Образцы осматривались на микроскопе Altami MET 1С

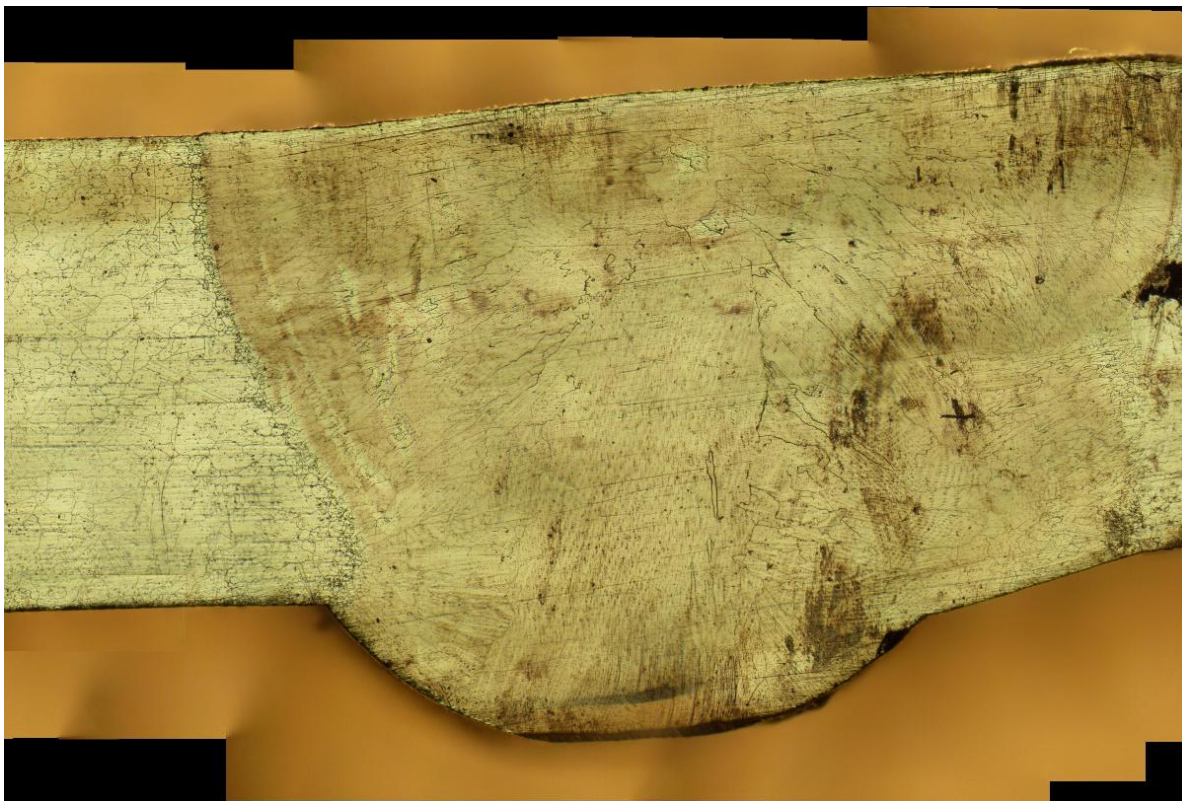


Рис. 2. Образец сваренный Н2+А2 смесью в один проход с разделкой кромок

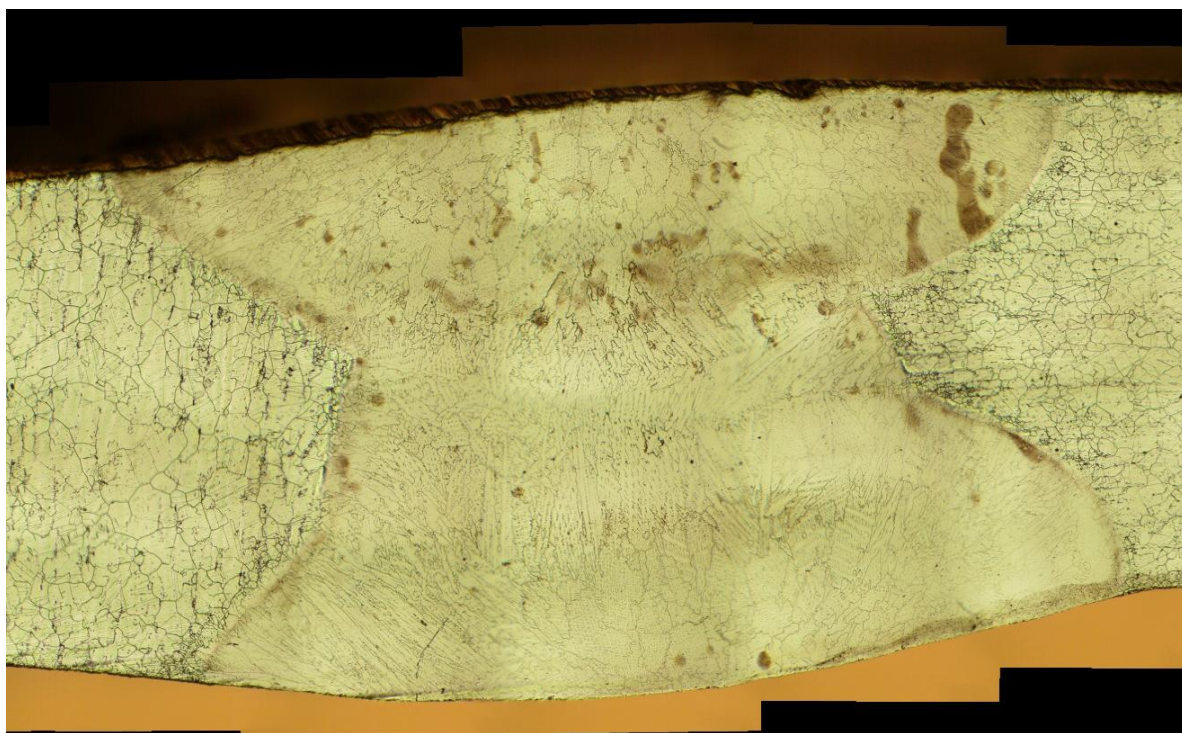


Рис. 3. Образец сваренный А2 смесью высшего сорта в 3 прохода с разделкой кромок

Механические испытания образцов с плечиками проводятся на разрывной машине LFM 600. Результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты механических испытаний

Тип образца		Образцы, сваренные А2+Н2 смесью	Образцы, сваренные А2 высшей категории
Параметр		Предел Прочности кгс/мм ²	
№ образца	1	116,7	110,2
	2	116,4	109,4
	3	116,3	114,0
	4	110,5	112,5
	5	115,1	116,6

Подведение итогов сравнение проплавления с использованием смеси и аргона высшего сорта.

Из проведенного эксперимента можно заметить, что аргоноводородная смесь позволяет значительно увеличить проплавление, по сравнению с аргоном высшего сорта. А значит и снизить тепловложение, при этом соединение не теряет в прочности, как показывают испытания.

В дальнейшем планируется провести более объемный эксперимент на материале ЭП708, а также с моделировать процесс в ANSYS и сравнить экспериментальные данные с теоретическими.

Библиографический список

1. Welding Processes Review/IOP Conference Series Materials Science and Engineering
2. Inconel 718 Overview/International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016
3. Патент № 2505616 С2 Российская Федерация, МПК С22С 19/05, В23К 35/22. Сварочный присадочный материал, применение сварочного присадочного материала и конструктивный элемент : № 2011122656/02 : заявл. 10.09.2009 : опубл. 27.01.2014 / Н. Аржакин.
4. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях/ Л.И. Сорокин
5. Дуговая сварка в среде защитных газов конструкционных, нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов/ ПИ 1.4.75-2000

© Жерновков Е.Е., 2025

Э.Р. ХИСАМУТДИНОВ, В.Р. ГАЛИМОВ

khisamutdinovehr@uust.ru

galimov.vr@mail.ru

Науч. руковод. – докт. техн. наук, проф. А.Ю. МЕДВЕДЕВ

Уфимский университет науки и технологий

ТЕХНОЛОГИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ НАПЛАВКИ ПОКРЫТИЙ НА ЗАПОРНУЮ АРМАТУРУ

Аннотация: в статье описывается электродуговая наплавка в импульсном режиме для восстановления геометрии изделия «Запорная арматура» из сплава Hastelloy C22 с минимальным перемешиванием основного металла и равномерным распределением химического состава наплавочного слоя.

Ключевые слова: роботизированная наплавка, импульсные режимы, сплав Hastelloy C22, запорная арматура.

Сущность наплавки состоит в нанесении сваркой либо другими способами на поверхность детали слоя, обладающего требуемым комплексом свойств [1]. Применяют наплавку либо для того, чтобы изготовить новую деталь с нужными свойствами, либо чтобы восстановить требуемые свойства после срока эксплуатации. Путём наплавки получают изделия с износостойкими, кислотоупорными, жаростойкими, антифрикционными и тому подобными свойствами. Наиболее распространены дуговые методы наплавки к ним относят: ручную дуговую покрытыми электродами, механизированную плавящимся электродом, плазменную, электрошлаковую, наплавку под слоем флюса и прочие.

Запорная арматура (клиновое задвижка) является элементом арматуры трубопроводов, которая нужна для запирающего потока рабочей среды (нефти, газа и т.д.). Строение задвижки представляет собой стальной или чугунный корпус и крышку, которые соединены между собой (рис. 1). Корпуса арматуры выполняются литыми, литосварными или штамповочными. От корпуса арматуры идут два присоединительных патрубков, при помощи которых арматура врезается в трубопровод. Область применения трубопроводной арматуры накладывает на нее особые требования. Арматура, которая используется в газовой и нефтяной отрасли, должна непременно быть герметичной, исходя из высокой пожаро- и взрывоопасности рабочей среды – газа, а в нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей отраслях из-за очень высокой химической агрессивности нефти должна иметь повышенную коррозионную стойкость [2].

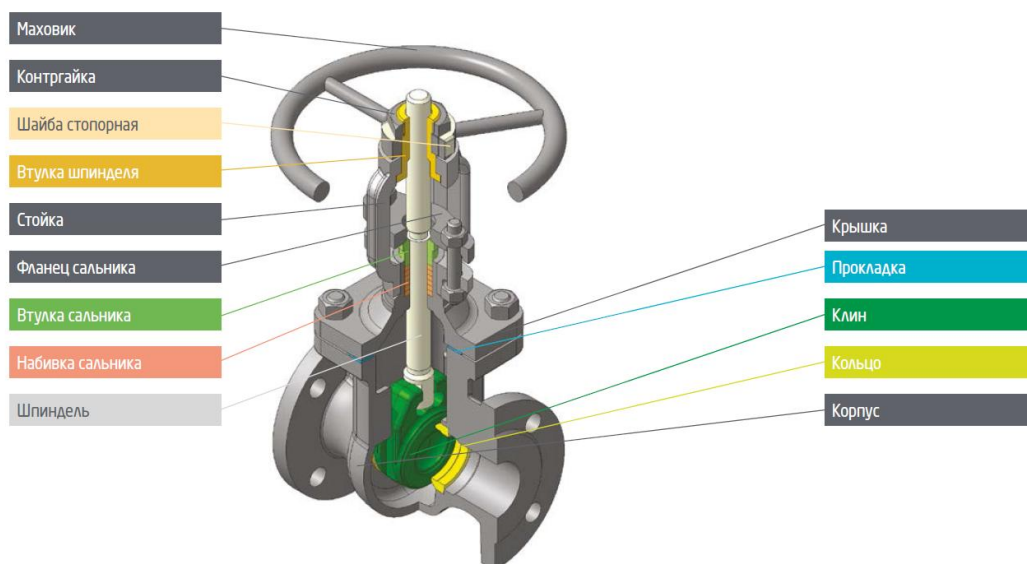


Рис. 1. Конструкция задвижка клиновая

В АО «Благовещенский арматурный завод» по базовой технологии изготовление клиновой задвижки проводится путём наплавки под слоем флюса материалами 20Х13, ЦН-12М, 04Х19Н1М3 на основной материал клина из 09Г2С, 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 15Х5М в несколько проходов, с дальнейшим постобработкой для predания нужной геометрии.



a

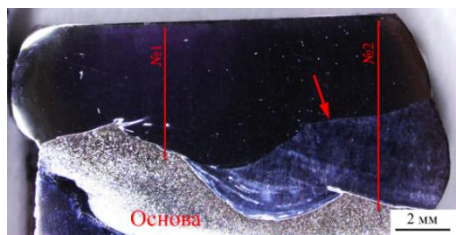
б

Рис. 2. Образцы по базовой технологии:

a – наплавка 20Х13 на сталь 09Г2С; *б* – наплавка ЦН-12М на сталь 09Г2С

Были исследованы образцы, полученные наплавкой под слоем флюса, на микротвёрдость с шагом замера 0,5 мм и измерен их локальный химический состав методом энергодисперсионной спектроскопии с шагом замера 0,5 мм.

По данной технологии получаются результаты с неравномерным химическим составом в наплавленном слое, с большим процентом перемешивания с основным материалом, и, имеющие из-за перегрева материала трещины.



а



б

Рис. 3. Шлифы из образцов по базовой технологии:

а – макроструктура с наплавкой из 20X13;

б – макроструктура с наплавкой из ЦН-12М

У исследовательской команды имеется опыт в области наплавочных работ с минимальным перемешиванием основного и наплавочного слоя и отработаны импульсные режимы с минимальным тепловложением [3-5]. В связи с описанной проблемой, целью работы было предложить технологию наплавки за один слой с большим диапазоном производительности, без брызг, с равномерным распределением химических элементов в наплавочном слое и с уменьшенным содержанием основного материала.

Работы осуществлялись в лаборатории роботизированной сварки: роботизированная рука ABB IRB 1600, источник питания ESAB AristoMIG5000i, вращатель CNC-150. Образцы до и после наплавки были отсканированы, в процессе наплавки осуществлялась скоростная съёмка в 600 кадров в секунду.

Наплавка осуществлялась проволокой Ø1,2 мм из сплава Hastelloy C22 колебательными движениями. Образец №1 (*рис. 4, а*) не имеет замковое соединение между началом и концом траектории, в то время как образец №2 (*рис. 4, б*) наоборот имеет участок проплавления. Полученные результаты наплавки двух колец были исследованы на химический состав и макроструктуру (*рис. 5*).



а



б

Рис. 4. Результаты наплавки:
а – образец №1, *б* – образец №2

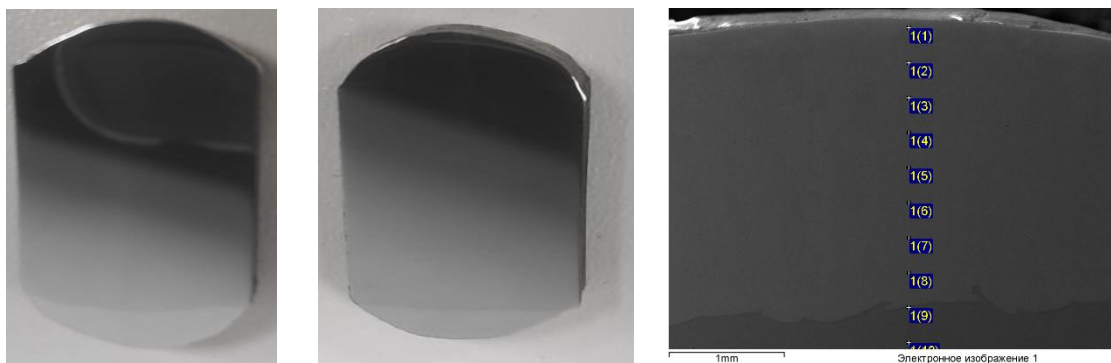


Рис. 5. Отполированные образцы под химический анализ и схема замеров

Результаты замеров содержания химических элементов представлены в таблице 1. Сравнение содержания характерных элементов (железо, никель, хром, молибден, вольфрам) показывает, что доля участия основного металла составляет не более 12-15%.

Таблица 1

Химический состав образцов

Материал	Химический элемент, %					
	Fe	Ni	Cr	Mo	W	Mn
Основной металл (09Г2С)	≈98	-	-	-	-	1,3-1,7
Проволока (ErNiCrMo-10)	2-6	50-60	20-22,5	12,5-14,5	2,5-3,5	<0.5
Наплавленный металл	15-20	46-51	19-20	9,5-14,5	2,6-3,0	<0,8

Замеры микротвердости выполнены с шагом 0,1 мм. Результаты замеров представлены в табл. 2. Результаты замеров показывают равномерное распределение твердости по все толщине наплавки, отклонения для образца №1 не превышают 20HV, а для образца № 2 – не более 15HV.

Таблица 2

Твёрдость полученных образцов

№ наплавки	Средняя твердость, HV	Максимальная твердость, HV	Минимальная твердость, HV
1	216	233	198
2	225	236	213

Был произведен сравнительный анализ режимов наплавки по базовой технологии и предлагаемой технологии. В табл. 3 показаны данные по автоматической наплавке под флюсом материалов 20Х13 и ЦН-12М. Значения красного цвета были определены косвенным расчётным путём.

Таблица 3

Сравнение энергетических параметров предлагаемого и базовых технологий

Параметр	Значение		
	Предлагаемое решение	Наплавка под флюсом 20Х13	Наплавка под флюсом ЦН-12М
Диаметр электрода, мм	1,2	3-4	3-4
Сила тока, А	98-100	400-500	300-450
Напряжение на дуге, В	18,5-19	32-38	36-38
Скорость подачи проволоки, м/мин	2,8	1,6-2	1,5-2
Скорость наплавки, мм/с	2,5	10-20	8-20
Количество слоев	1	>3	>3
Высота слоя, мм	2-3	6-7	7-8
Тепловая мощность, Вт	1450<	12500-18600	10500-15400
Погонная энергия, Дж/мм	570	≈1000	≈860

Предлагаемый вариант может обеспечить пониженное тепловложение в 1,5-2 раза, необходимые геометрические значения за один слой, отсутствие необходимости в подогреве (для некоторых материалов), отсутствие остаточных деформаций и минимальные припуска на механическую обработку.

Библиографический список

1. Сварка. Резка. Контроль: Справочник. В 2-х томах / под. общ. ред. С24 Н.П.Алешина, Г.Г. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2004. – Т.2 – 480 с.
2. Гошко, А. И. Арматура трубопроводная целевого назначения. Выбор. Эксплуатация. Ремонт / А. И. Гошко. – М. : Машиностроение, 2003. – 432 с
3. Галимов, В. Р. Разработка технологии автоматической однопроводной сварки плавящимся электродом жаропрочных никелевых сплавов / В. Р. Галимов, Э. Р. Хисамутдинов // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста: Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции, Уфа, 16–17 ноября 2023 года. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2024. – С. 141-144. – EDN JBYQYW
5. Оценка энергетической эффективности процесса импульсно-дуговой наплавки плавящимся электродом ЭП533 диаметром 1 мм / А. Ю. Медведев, Р. В. Никифоров, В. Р. Галимов [и др.] // Сварка и диагностика. – 2024. – № 4. – С. 45-50. – DOI 10.52177/2071-5234_2024_04_45. – EDN LSVCBS.
6. Применение роботизированной сварки плавящимся электродом для сварки узлов газотурбинных двигателей толщиной 3 мм / А. Ю. Медведев, В. Р. Галимов, Р. В. Никифоров, А. В. Туров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 45-50. – DOI 10.15593/2224-9877/2023.2.05. – EDN LIGTQM.

А.А. САИТОВА

alsu.saitova.04@mail.ru

Науч. руковод. – ст. препод. И.И. ШАЙХУТДИНОВА

Уфимский университет науки и технологий

ПОСТРОЕНИЕ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННОЙ ДИАГРАММЫ ИСИКАВЫ ПО ДЕФЕКТУ УСАДОЧНОЙ ПОРИСТОСТИ

Аннотация: в условиях возрастающей сложности технологических, производственных и управленческих систем ключевой задачей становится не просто устранение нежелательных событий (дефектов, сбоев, рисков), а выявление и систематизация их глубинных причин. Диаграмма Исикавы, также известная как «диаграмма "рыбья кость"» или причинно-следственная диаграмма, представляет собой мощный инструмент структурированного группового мышления для решения этой задачи. Актуальность исследования обусловлена ее универсальностью, наглядностью и способностью интегрироваться в современные методологии. С развитием технологий и появлением новых инструментов аналитики диаграмма Исикавы находит применение во всё более широком спектре областей, от производства до услуг и образования.

Ключевые слова: усадочная пористость, диаграмма Исикавы, дефект, отливка, качество.

Диаграмма Исикавы – это графический инструмент, позволяющий классифицировать и визуализировать все возможные причины конкретной проблемы или достижения определенного результата. Ее основная цель — не просто перечислить, а систематизировать причины по категориям, выявить причинно-следственные связи между ними и определить корневые (ключевые) причины для их последующего устранения.

Диаграмма строится по принципу «от общего к частному» (Рис. 1):

- Голова рыбы (следствие): Правая часть диаграммы. Четко сформулированная проблема или нежелательный эффект (например, «Снижение посещаемости сайта на 20%», «Высокий процент брака детали»).

- Хребет (основная ось): Горизонтальная стрелка, направленная к «голове». Символизирует прямой путь к проблеме.

- Основные кости (категории причин): Крупные ветви (стрелки), отходящие от хребта. Представляют основные группы/классы причин. Классические категории для производственного процесса – 5М (или 6М):

- Man (Люди): Квалификация, мотивация, усталость.
- Machines (Оборудование): Износ, настройка, точность.
- Materials (Материалы): Качество сырья, поставщики.
- Methods (Методы): Технологические инструкции, регламенты.

- Measurements (Измерения): Калибровка приборов, методика контроля.
- Environment (Окружающая среда, Management — Управление): Температура, влажность, освещенность или стиль руководства (в зависимости от контекста).

- Вторичные и третичные кости: Более мелкие ветви, отходящие от основных. Детализируют причины внутри каждой категории, углубляясь до корневых.

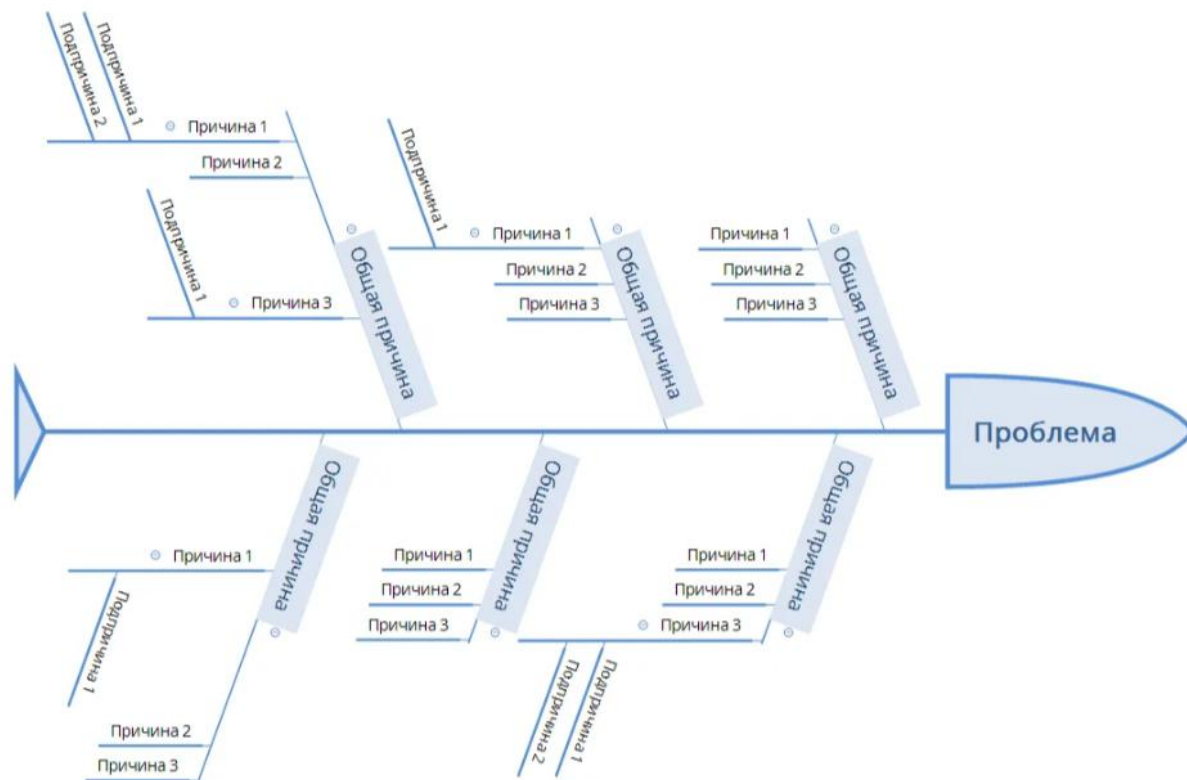


Рис. 1. Графический вид причинно-следственной диаграммы Исикавы ("рыбий скелет")

Простота. Чтобы провести анализ, не нужны специальные знания в статистике, достаточно собрать данные для аналитики.

Визуализация. Простая схема в виде рыбьего скелета понятно и наглядно показывает связи между проблемой и возможными причинами.

Универсальность. Инструмент подойдет для малого и крупного бизнеса, для разных отраслей и отделов внутри компании. С помощью «рыбьей кости» получится изучить любую проблему.

Удобство. Нарисовать рыбий скелет можно на листе обычной бумаги. Метод Исикавы доступен и распределенным командам: можно использовать готовые шаблоны.

Командная работа. Исикава рекомендовал привлекать к работе над «рыбьей костью» тех, кто знаком с бизнес-процессами, в том числе рядовых рабочих и инженеров. Они лучше всех знают, какие проблемы есть на практике, а вот

руководство может упускать их из виду. Кроме того, анализ помогает взглянуть на проблему комплексно, во взаимосвязи с разными аспектами.

Исключительно качественный характер анализа. Метод не предполагает количественной оценки, так как основан на качественном анализе. Диаграмма помогает выявить что может быть причиной, но не отвечает на вопрос насколько значима каждая из причин.

Субъективность и риск ошибочных выводов. Качество диаграммы напрямую зависит от знаний, опыта и беспристрастности участников. Группа может упустить важную причину из-за недостаточной компетенции или, наоборот, заикнуться на решении одной.

Высокие затраты на организацию. Нужно собрать команду специалистов из разных подразделений, структурировать идеи, оформить диаграмму. На практике это может занять продолжительное время. В условиях ограниченных ресурсов такой подход может оказаться неэффективным.

Области применения: управление качеством (анализ дефектов продукции, несоответствий), безопасность (расследование инцидентов и несчастных случаев), менеджмент (анализ проектных рисков, срывов сроков, снижения прибыли), маркетинг (изучение причин падения продаж или лояльности клиентов), наука и образование (структурирование исследовательских гипотез, анализ неудач экспериментов), здравоохранение (диагностика системных сбоев в работе отделения).

Практическая значимость заключается в:

- Системном подходе: переход от сиюминутного «латания дыр» к комплексному решению;
- Визуализации: Простота восприятия сложных взаимосвязей;
- Коллективном участии: Повышение вовлеченности команды и учет разных точек зрения;
- Профилактике: Выявление слабых мест системы для предотвращения повторения проблем.

Работа с диаграммой Исикавы проводится в несколько этапов:

- 1) Выявление и сбор всех факторов и причин, каким-либо образом влияющих на исследуемый результат.
- 2) Группировка факторов по смысловым и причинно-следственным блокам.
- 3) Ранжирование этих факторов внутри каждого блока.
- 4) Анализ полученной картины.
- 5) «Освобождение» факторов, на которые мы не можем влиять.
- 6) Игнорирование малозначимых и непринципиальных факторов.

Чтобы более эффективно выявить и добавить возможные причины в состав основных, а также более конкретно детализировать возможные первопричины ответвлений «основной кости» традиционно применяют метод стимулирования генерации творческих идей, известный как «мозговой штурм». Типичным применением такого метода является выполнение рисунка диаграммы руководителем команды, который первым определяет основные проблемы и

просит о помощи у группы сотрудников с целью определения основных причин, которые схематично обозначено на основной кости диаграммы, и их детализации. Группа предоставляет предложения пока, в конечном счёте, будет заполнена вся причинно-следственная диаграмма. После завершения обсуждения решают, что является наиболее вероятной корневой причиной проблемы.

Необходимо построить причинно-следственную диаграмму Исикавы для анализа дефекта усадочной пористости в отливках.

Проблемой (следствием) является: образование усадочной пористости в отливке.

Основные категории причин (адаптированная 6М):

- Материал (Сплав);
- Модельно-литейная оснастка (Оснастка);
- Технология (Метод);
- Оборудование;
- Персонал (Люди);
- Измерения/Контроль.

Детализация по "костям":

- 1) Материал (сплав):
 - Высокая склонность сплава к усадке (широкий интервал кристаллизации)
 - Неправильный химический состав (отклонение от рецептуры)
 - Высокое содержание газов (водород, кислород) в шихте или расплаве
- 2) Оснастка:
 - Неэффективная конструкция литниковой системы
 - Наличие термических узлов (массивные сечения рядом с тонкими)
 - Недостаточная газопроницаемость формы
- 3) Технология:
 - Слишком высокая температура заливки (усиленная усадка)
 - Слишком низкая температура заливки (ранняя кристаллизация в питателях)
 - Неправильная температура формы
 - Неверная скорость заливки
 - Отсутствие или неправильное применение холодильников/теплоизоляторов
- 4) Оборудование
 - Неточный контроль температуры (неисправные термопары, пирометры)
 - Нестабильная работа плавильной печи (колебания температуры, состава)
- 5) Персонал:
 - Недостаточная квалификация (незнание принципов направленного затвердевания, ошибки при сборке формы)
 - Нарушение технологических инструкций, отступление от режимов

заливки

- Небрежность (пропуск установки холодильников, прибылей)
- 6) Измерения
- Отсутствие или неверный входной контроль шихтовых материалов
- Недостаточный контроль химического состава сплава перед заливкой
- Недостовверный контроль температуры расплава и формы

Визуальная диаграмма представлена на рис. 2.



Рис. 2. Причинно-следственная диаграмма Исикавы для анализа дефекта усадочной пористости в отливках

Данная диаграмма служит структурированным руководством для проведения мозгового штурма с участием технологов, литейщиков, металлургов. Она помогает системно охватить все возможные источники проблемы и к ликвидации причин дефекта.

Диаграмма Исикавы, несмотря на свою кажущуюся простоту, остается эффективным научно-практическим инструментом. Ее сила – ое мышление и переводить хаотичный анализ проблемы в структурированный, логичный формат. В современном контексте метод не утратил актуальности, а адаптировался, став интегральной частью более сложных аналитических и управленческих экосистем. Ключ к успешному применению лежит в понимании ее как процесса, а не просто рисунка – процесса совместного поиска истины, основанного на фактах и системном взгляде на организацию.

В рамках данного научного доклада была проделана работа по установлению причин дефекта усадочной пористости в отливках и построению причинно-следственной диаграммы Каору Исикавы. Раскрыли сущность метода исследования и определения причинно-следственных взаимосвязей между факторами и последствиями в исследуемой ситуации или проблеме.

Библиографический список

1. Управление литейным производством с использованием CALS-технологий [Электронный ресурс] / Г. Г. Куликов, Е. С. Гайнцева [и др.]; Учебн. электрон. издание. Уфа: УГАТУ, 2012. 1 электрон. опт. диск (CDROM).
2. Возможность применения экспертных систем в CALS-технологиях литейного производства / С. П. Павлинич, А. С. Горюхин, А. Г. Сусенков, Е. С. Гайнцева // Вестник УГАТУ: науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2011. Т. 15, № 2 (42). С. 158-163.
3. Шайхутдинова И.И., Гайнцева Е.С. Применение информационных технологий при подготовке литейного производства. Литейное производство, 2024г. №1. С.31-36.
4. Шайхутдинова, И. И. Интеллектуальные системы в литейном производстве / И. И. Шайхутдинова // Эпистемологические основания современного образования: актуальные вопросы продвижения фундаментального знания в учебный процесс: Материалы II Международной научно-практической конференции Борисоглебского филиала ФГБОУ ВО "ВГУ", Борисоглебск, 15 октября – 16 2021 года. – Москва: Издательство "Перо", 2021. – С. 703-706.

© Саитова А.А., 2025

УДК 621.74

И.С. СУФИЯНОВ

sufyanov2222@mail.ru

Науч. руковод. – ст. препод. И.И. ШАЙХУТДИНОВА

Уфимский университет науки и технологий

РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОТЛИВОК

Аннотация: в статье рассматривается актуальная задача повышения эффективности контроля качества литейного производства. Целью исследования является разработка функциональной модели процесса контроля качества отливок, позволяющей систематизировать и формализовать все этапы проверки, от входного сырья до выпуска готовой продукции. Модель строится на основе методологии функционального моделирования IDEF0, которая обеспечивает наглядное представление последовательности операций, информационных и материальных потоков, а также распределения ресурсов и ответственности.

Ключевые слова: контроль качества отливок, функциональное моделирование, IDEF0, литейное производство, снижение брака, управление качеством.

Контроль качества отливок – это комплекс мероприятий, направленных на проверку соответствия геометрических параметров, структуры, механических и эксплуатационных свойств отливок требованиям конструкторской и технологической документации [1]. Процесс носит многоуровневый характер и может быть условно разделен на следующие взаимосвязанные этапы:

1. Входной контроль – проверка качества шихтовых материалов и оснастки.
2. Операционный контроль – наблюдение за соблюдением технологических параметров на каждой стадии процесса (подготовка смесей, заливка, выбивка).
3. Приёмочный контроль готовой продукции – наиболее объемный этап, включающий:
 - 3.1. Визуальный осмотр и обмер (выявление явных дефектов: заливы, недоливы, коробление).
 - 3.2. Измерение геометрических размеров и шероховатости поверхности.
 - 3.3. Неразрушающий контроль (дефектоскопия) для выявления внутренних дефектов (раковины, трещины).
 - 3.4. Лабораторные испытания (металлографический, химический анализ, механические испытания на образцах-свидетелях).
4. Документирование результатов – оформление актов, протоколов испытаний, паспортов на партию.

Выполнение контроля регламентируется обширной нормативной базой, которая в модели IDEF0 выступает в роли управлений. К ним относятся:

Система стандартов ГОСТ (например, ГОСТ 26645-85 «Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров и припуски на механическую обработку»).

Технические условия (ТУ) на конкретные виды отливок.

Внутренние технологические инструкции и регламенты предприятия.

Стандарты на методы неразрушающего контроля (ГОСТ Р 56542-2015 и др.).

Механизмами процесса являются сотрудники отдела технического контроля (ОТК), контрольно-измерительный инструмент (штангенциркули, калибры), сложное оборудование (рентгеновские и ультразвуковые дефектоскопы, координатно-измерительные машины (КИМ)), лабораторное оборудование для металлографии и механических испытаний.

Для разрабатываемой модели были определены:

Цель моделирования: Выявление структуры, последовательности операций и информационно-материальных потоков в процессе контроля качества отливок для последующего анализа его эффективности и определения потенциальных зон автоматизации.

Точка зрения: Технолог отдела технического контроля (ОТК). Данный выбор обусловлен необходимостью отражения именно технологической последовательности операций, требований к ресурсам и нормативам, а не, например, финансовых или управленческих аспектов.

Контекстная диаграмма представляет систему «Контроль качества отливки» как единый функциональный блок (A0) в её взаимодействии с внешней средой (Рис. 1).

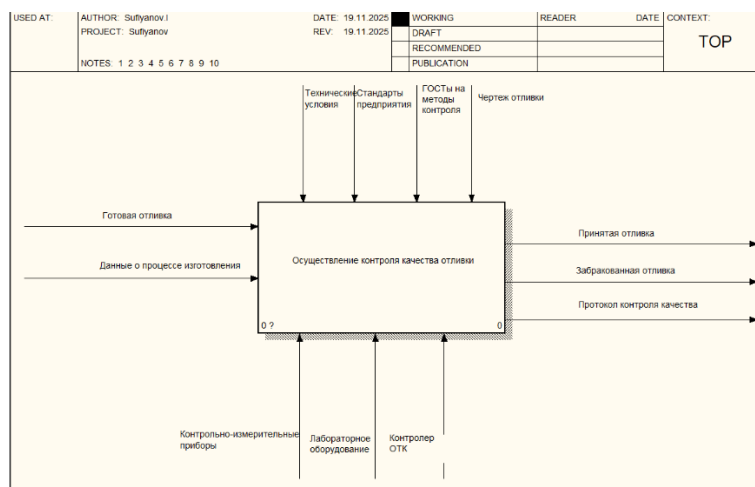


Рис. 1. Осуществление контроля качества отливки

Вход (I): «Партия отливок», «Заявка на контроль».

Управление (C): «Комплект КД и ТД на отливку», «ГОСТы и ТУ», «Внутренние регламенты ОТК».

Выход (O): «Акт контроля качества (итоговый)», «Партия годных отливок», «Партия забракованных отливок», «Отчет о дефектах».

Механизм (M): «Персонал ОТК», «Контрольно-измерительный инструмент и оборудование».

Данная диаграмма задает границы моделируемой системы.

Работа A0 была декомпозирована на пять основных подпроцессов, отражающих логическую последовательность контроля (Рис. 2):

- A1: Подготовить и организовать проведение контроля. Включает получение заявки, ознакомление с документацией, планирование работ, подготовку оборудования.
- A2: Провести визуально-измерительный контроль. Выполняется осмотр отливок, проверка основных размеров и массы.
- A3: Провести неразрушающий контроль (НК). Направлен на выявление внутренних и поверхностных дефектов с помощью дефектоскопического оборудования.
- A4: Провести лабораторные испытания (при необходимости). Включает отбор образцов и проведение механических, металлографических или химических испытаний.
- A5: Оформить и утвердить результаты контроля. Заключительный этап: анализ всех данных, заполнение итоговой документации, маркировка партии.

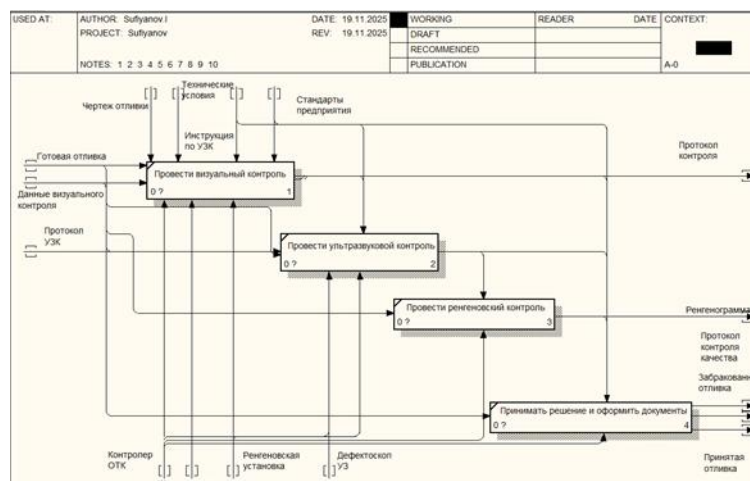


Рис. 2. Декомпозиция контекстной диаграммы процесса «Осуществление контроля качества отливки»

На диаграмме отображены потоки между работами: например, отливки, прошедшие A2, поступают на A3; предварительные данные от A2, A3, A4 являются входом для A5.

Построенная модель позволила провести системный анализ процесса контроля качества. В качестве ключевых выводов можно отметить:

1. Модель наглядно демонстрирует последовательную, местами параллельную, организацию процесса, выделяя четкие интерфейсы между этапами.
2. Выявлена сильная зависимость процесса от ручного труда, особенно на этапах A2 (обмер) и A5 (оформление бумажных актов). Это создает риски человеческой ошибки и увеличивает временные затраты.
3. Поток информации от этапов контроля (A2, A3, A4) к этапу оформления (A5) носит преимущественно бумажный или разрозненный электронный характер, что замедляет принятие итогового решения.

На основе анализа сформулированы предложения по оптимизации:

- Автоматизация измерений: Внедрение автоматизированных измерительных комплексов на базе КИМ для этапа A2, что повысит точность, скорость и обеспечит цифровую регистрацию данных.
- Цифровизация документооборота: Разработка или внедрение специализированного ПО для ОТК, которое позволит создавать электронные маршрутные карты контроля, автоматически агрегировать данные с приборов (дефектоскопов, испытательных машин) и формировать итоговые отчеты (A5), интегрированные с общей системой управления предприятием (ERP).
- Сквозной идентификатор: Введение маркировки отливок (например, QR-кодом), которая будет сопровождать изделие на всех этапах контроля, упрощая отслеживание и привязку данных.

Реализация данных мер, наглядно представленная в виде модернизированной модели «как должно быть», позволит сократить цикл контроля, повысить его объективность и снизить трудоемкость.[2]

В ходе выполнения работы была достигнута поставленная цель – разработана функциональная модель процесса контроля качества отливок с использованием методологии IDEF0 и CASE-средства AllFusion Process Modeler (BPWin).

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Создана формализованная, легкая для восприятия и анализа документация сложного технологического процесса.

2. Модель служит эффективным инструментом коммуникации между специалистами различного профиля (технологами, метрологами, IT-специалистами).

3. Проведенный на основе модели анализ выявил потенциальные зоны неэффективности и сформулировал конкретные предложения по цифровой трансформации процесса, что соответствует трендам развития Индустрии 4.0.

Библиографический список

1. Шайхутдинова, И. И. Методы искусственного интеллекта при выявлении дефектов отливок / И. И. Шайхутдинова // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2024. – С. 190-191.

2. Шайхутдинова, И. И. Применение информационных технологий в литейном производстве / И. И. Шайхутдинова, Е. С. Гайнцева // Литейное производство. – 2024. – № 1. – С. 31-36.

© Суфиянов И.С., 2025

СЕКЦИЯ 2.5. МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

УДК 62-1

В.А. ВЕРЕТЕНОВА

a.verenova@mail.ru

Науч. руковод. – ст. преп. ЕА. ФИЛОНИНА

Уфимский университет науки и технологий

ТЕХНОЛОГИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДЕТАЛИ «ГНЕЗДО ПОДШИПНИКА» ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация: в работе рассматривается проведение сравнительного анализа точности измерений геометрических параметров детали «Гнездо подшипника» ГТД на координатно-измерительной машине (КИМ) и опто-электронной системе контроля – измерительном микроскопе для определения оптимального способа контроля.

Ключевые слова: контрольно-измерительные машины (КИМ), оптический измерительный микроскоп, сравнительный анализ точности.

Современные производственные процессы требуют высокоточного контроля геометрических параметров деталей, что обеспечивается применением специализированного измерительного оборудования. Контрольно-измерительные машины являются высокоточными машинами. Их основное назначение – проведение точных измерений и сканирование поверхностей деталей. В данной работе выполнен сравнительный анализ точности измерений, полученных при использовании двух принципиально разных видов измерительной техники: координатно-измерительной машины (КИМ) контактного типа и оптического измерительного микроскопа.

В качестве объекта метрологического анализа была взята деталь «Гнездо подшипника», функционирующая в составе узла «Сопловой аппарат ступени 3 свободной турбины» авиационного газотурбинного двигателя.

Были проведены измерения основных геометрических параметров детали, включая радиус, два угловых размера относительно главной оси до центра отверстия, позиционное отклонение отверстия и диаметры.

Координатно-измерительные машины (КИМ) – это стационарные устройства портального типа, которые измеряют габариты, форму и расположение элементов деталей со сложной геометрией.

Конструкция координатно-измерительной машины включает массивную гранитную плиту прямоугольной формы. На ней смонтирован подвижный портал с траверсой, оснащённой измерительным щупом. Для плавного и точного перемещения портала и траверсы используются воздушные подшипники, скользящие по гранитным направляющим.

Геометрические параметры детали измерены на координатно-измерительной машине модели UNIVERSAL X.7.7 где X от 7 до 15, с шагом 1.

Параметры модели UNIVERSAL X.7.7 характеризуются следующими метрологическими показателями: максимальный диапазон измерений по осям X, Y, Z достигает 700 - 1500 мм, 700 мм и 700 мм соответственно. Погрешности измерений варьируются в зависимости от конфигурации оборудования. В нашем случае использовалась измерительная головка PH10M или MQ с датчиком TP200 предельная погрешность (MPE_p) составляет ± 1.8 мкм. Для пространственных измерений погрешность (MPE_E) вычисляется по формуле: $\pm(1.8 + 0.003 \cdot L/1000)$ мкм, где L -измеряемый размер в миллиметрах.

Видеоизмерительные установки консольной конструкции OGP (измерительный микроскоп) представляют собой специализированные измерительные микроскопы, используемые для точного контроля геометрических параметров деталей. Видеоизмерительная система использует видеокамеру и зум-объектив для проведения измерений оптическим способом. Увеличенное изображение детали можно наблюдать на экране, а не в окуляре.

Конструкция измерительного микроскопа включает: векторную подсветку, рабочий стол, дистанционную кнопку аварийной остановки, джойстик, контроллер системы, контактный датчик и магазин датчиков.

Для измерения геометрических параметров детали применялся консольный измерительный микроскоп OGP серии Sprint MVP 300.

Измерительная система Sprint MVP 300 обладает следующими техническими характеристиками. Рабочая зона оборудования составляет 300 мм по горизонтальным осям X и Y, при этом вертикальный диапазон оси Z ограничен 150 мм. Точность позиционирования устройства варьируется в зависимости от направления измерения: для перемещений вдоль осей X и Y погрешность не превышает значения, рассчитываемого по формуле: $\pm(1,8+6L/1000)$ мкм). При определении положения в двумерной плоскости XY максимальная погрешность $\pm(2,5+6L/1000)$ мкм. Для вертикальных измерений по оси Z с использованием оптического сенсора допустимое отклонение составляет $\pm(3,8+8L/1000)$ мкм. Минимальный дискретный шаг измерений данной модели соответствует 0,5 мкм.

Перед выполнением измерений была составлена программа, которая разрабатывается индивидуально в соответствии с контролем определенных параметров детали.

После выполнения измерительных операций на координатно-измерительной машине и измерительном микроскопе программное обеспечение сформировало протоколы измерений.

Протоколы измерений включают обязательный набор параметров: название проверяемого элемента, номинальный размер, фактическое измеренное значение, технические допуски и вычисленное отклонение от номинального значения.

Для анализа точности измерений проведено сравнение отклонений, полученных с помощью координатно-измерительной машины (КИМ) и измерительного микроскопа. Все данные систематизированы в сводной таблице, а

основании которой выполнено графическое представление результатов для визуальной оценки расхождений между двумя методами измерений.

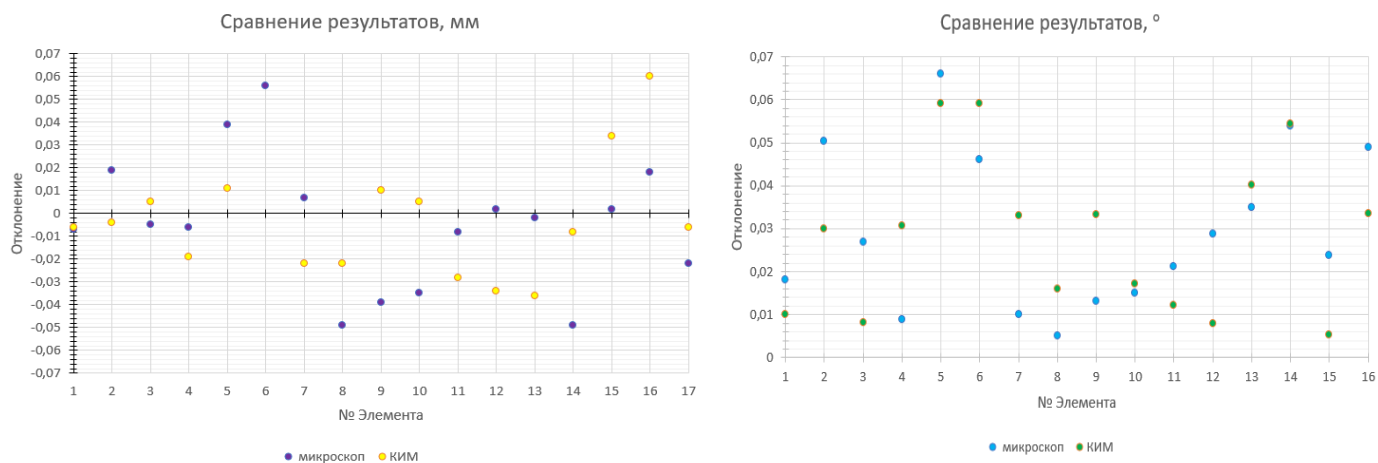


Рис. 1. Графики сравнения результатов двух измерительных машин

Сравнительный анализ графиков измерений подтвердил более высокую точность показаний координатно-измерительной машины (КИМ) в сравнении с результатами, полученными при помощи измерительного микроскопа. Нижеприведённые графические зависимости позволяют количественно оценить разницу между методами измерений.

Практический опыт измерений свидетельствует о существенных преимуществах координатно-измерительных машин перед микроскопическими методами контроля. Во-первых, контроль детали требует значительно меньше времени по сравнению с использованием измерительного микроскопа. Во-вторых, измерение сложных объемных деталей, как «гнездо подшипника», на микроскопе существенно затруднено. Так как во время проведения измерений на микроскопе на результаты влияют вариации светопропускания, коэффициенты преломления и отражающие свойства материала. Детали плоской формы более удобны для контроля на измерительном микроскопе, но при этом существует вероятность возникновения субъективной погрешности измерений.

Библиографический список

1. Волошина, Н. А. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. Практикум. В 2 томах. Том 1 / Н. А. Волошина, О. В. Филипович, Н. А. Балакина, Г. В. Невар. – Санкт-Петербург: Лань, 2024. – 192 с.
2. Женатова, М.Д. Измерения на координатно-измерительных машинах / М.Д. Женатова, Е.С. Маркосян // Проблемы современной науки и образования. – 2014. – № 2. – С. 13-15.
3. Марков Н.Н. Конструкция, расчет и эксплуатация контрольно-измерительных инструментов и приборов. М., Машиностроение, 1993, с.298.

4. Гапшис А.А., Каспарайтис А.Ю., Модестов М.Б. и др. Координатные измерительные машины и их применение. М., Машиностроение, 1988. с.102.

© Веретенова А.А., 2025

УДК 004.89

Р.В. ГЕРАСИМОВА

lana.gerasimova.04@mail.ru

Науч. руковод. – старший преподаватель А.Ф. САФИНА

Уфимский университет науки и технологий

СЛУЖБА ЗАБОТЫ О КЛИЕНТАХ В КОМПАНИИ «УФАНЕТ» КАК ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ УСЛУГ И ПРОФИЛАКТИКИ ОТТОКА

Аннотация: в статье рассмотрены функции и принципы деятельности Службы заботы о клиентах (СЗК) компании «Уфанет» как ключевого элемента системы управления качеством услуг и работы с абонентским оттоком. Показано, каким образом СЗК внедряет практики эмоционального сервиса, использует анализ обращений и обратной связи, взаимодействует со смежными Подразделениями и снижает коммерческие риски. Особое внимание уделено соответствию процессов требованиям национальных стандартов ГОСТ Р 51814.1-2011, ГОСТ Р 53723-2009, ГОСТ Р 10006-2017 и др.), которые регламентируют качество обслуживания, работу с претензиями, управление процессами и организационными рисками. Представлены примеры применения модулей удержания, возврата и профилактики оттока, а также анализ речевых модулей и процедур, применяемых специалистами СЗК.

Ключевые слова: Служба заботы о клиентах; управление качеством услуг, клиентский отток; удержание абонентов; телекоммуникационные услуги, эмоциональный сервис; анализ обращений; обратная связь; процесс РСО; профилактика оттока; возврат клиентов; управление рисками; работа с жалобами, межфункциональное взаимодействие; сервисная деятельность; стандарты обслуживания, качество связи; менеджмент процессов.

Современные телекоммуникационные компании работают в условиях высокой конкуренции, высокой чувствительности потребителей к цене и постоянно растущих требований к уровню сервиса. В таких условиях управление клиентским оттоком становится стратегически важным направлением, определяющим устойчивость компании на рынке. В «Уфанет» эту функцию выполняет Служба заботы о клиентах (СЗК), ориентированная на своевременное вычисление причин недовольства, удержание абонентов, возврат ранее неактивных пользователей и системное повышение качества услуг. Работа СЗК основана на

принципах эмоционального сервиса и аналитике обращений, а также на использовании нормативно-технической базы, включающей ГОСТы, регламентирующие требования к качеству обслуживания, ведению претензионной работы, управлению процессами и организационными рисками.

СЗК взаимодействует как с физическими, так и с юридическими лицами и выполняет четыре ключевые функции: удержание клиентов, возврат пользователей, профилактику оттока и межфункциональное сотрудничество со смежными службами компании. Основой её работы является выявление истинной причины обращения, что достигается через эмпатию, активное слушание и корректную работу с возражениями. Эти подходы соответствуют положениям ГОСТ Р 51814.1-2011, который определяет ориентацию на клиента, персонализацию сервиса и обязательность установления причин неудовлетворённости потребителя.

Центральным инструментом работы СЗК является процесс «Работа с оттоком» (РСО). Он используется, когда абонент сообщает о намерении уйти к конкуренту или заменить проводной интернет мобильным. Процесс должен быть создан оператором первой линии непосредственно в момент разговора, что соответствует требованиям ГОСТ Р 53723-2009 о фиксации обращений в момент их поступления. Работа с оттоком включает анализ истории взаимодействия, диагностирование причин неудовлетворённости, применение трёхуровневой системы удержания (через ценности, лояльность и условия), вовлечение смежных подразделений для технического или организационного решения проблемы и обязательное документирование результата. Так выстраивается процессный подход, отражённый в ГОСТ Р 10006-2017: каждый процесс имеет входы и выходы, параметры результативности и стандартизированные действия исполнителей.

Помимо обработки оттока важной задачей является работа с обратной связью. Обращения клиентов обрабатываются в течение пяти рабочих дней, классифицируются, анализируются, а выявленные системные проблемы передаются в соответствующие сервисные или технические подразделения. Такой порядок соответствует ГОСТ Р 54293-2010, регламентирующему организацию работы с жалобами, устранение причин несоответствий и предоставление обратной связи клиенту.

СЗК обеспечивает удержание до 85 % абонентов, изначально выразивших намерение прекратить сотрудничество с компанией. Основные причины таких обращений - цена, качество работы услуг, сервис или оборудование. Сотрудники службы анализируют историю взаимодействия с клиентом, предлагают варианты решения, разъясняют преимущества услуг и опираются на ценности компании. Такая модель соответствует требованиям ГОСТ Р ИСО 9001-2015, где управление удовлетворённостью потребителей рассматривается как ключевой элемент системы менеджмента качества.

Служба также занимается возвратом клиентов, прекративших пользоваться услугами. Абоненты, находящиеся в неактивности от 30 дней, включаются в программу повторного вовлечения; для расширения охвата используется инструмент «Роботел». Направление профилактики оттока включает анализ домов

с массовыми жалобами выявление абонентов с устаревшим оборудованием, оценку обращений после подключения или после работы сервисных инженеров, отслеживание триггеров речи на горячей линии и активность конкурентов. При обнаружении массовой проблемы создаётся процесс «Проблемный дом», в который включаются технические подразделения. Эта модель соответствует принципам управления рисками, обозначенным в ГОСТ Р 51901-2002.

Отдельное направление деятельности - работа с юридическими лицами. В случае расторжения или приостановления договора для корпоративных клиентов фиксируются причины обращения, определяется, можно ли повлиять на ситуацию, а также ведётся детальное документирование каждого случая. Такой порядок отражает требования ГОСТ Р 6.30-2003 к ведению организационно-распорядительной документации, а также ГОСТ Р 56199-2014, описывающего стандарты качества услуг для корпоративных клиентов.

Стандарты общения сотрудников СЗК включают регламентированное выявление истинной причины обращения применение активного слушания. корректное разъяснение возможностей услуги и аккуратную работу с эмоциональным состоянием клиента. Сотрудники избегают необоснованных обещаний и строго следуют процедуре направлений в СЗК. Эти требования соответствуют ГОСТ Р 58432-2019, в котором определены профессиональные компетенции и требования к персоналу сферы обслуживания.

Работа СЗК обеспечивает снижение клиентского оттока, рост лояльности, повышение качества услуг, сокращение повторных обращений, улучшение взаимодействия между подразделениями и повышение прозрачности работы сервиса. Деятельность службы соответствует принципам ГОСТ Р ИСО 9001, включая управление обратной связью, несоответствиями, претензиями и постоянным улучшением процессов. В результате СЗК становится ключевым элементом системы управления качеством, обеспечивая стандартный и воспроизводимый формат работы с клиентами. Сочетание процессного управления, нормативной базы стандартов и эмоционального сервиса формирует устойчивую модель удовлетворенности клиентов и усиливает конкурентоспособность компания «Уфанет» на телекоммуникационном рынке.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 51814.1-2011. Качество обслуживания. Общие требования. – Введ. 2012-07-01. – М.: Стандартиформ, 2011. – 12 с.
2. ГОСТ Р 53723-2009. Услуги связи. Порядок обслуживания потребителей. – Введ. 2010-07-01. – М.: Стандартиформ, 2009. – 20 с.
3. ГОСТ Р 10006-2017. Менеджмент проектов. Процессы проектного управления. – Введ. 2018-03-01. – М. : Стандартиформ, 2017. – 28 с.

© Герасимова Р.В., 2025

УДК 621.317.088

Н.А. ГУРЬЯНОВ

yogenenko@yandex.ru

Науч. руковод. – к.х.н., доц. А.В. БАННОВА

Уфимский университет науки и технологий

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КАЛИБРОВКИ МИКРОМЕТРА МК 047-033-2025

Аннотация: ранее ООО «Газпром нефтехим Салават» разработал методику калибровки гладких микрометров МК 047-033-2015. Анализ данной методики показал отсутствие положений прежней версии ГОСТ ISO/IEC 17025 – 2009. Такие важные требования по обеспечению достоверности измерений, прослеживаемости, оценки неопределённости измерений не были учтены. С выходом новой версии ГОСТ ISO/IEC 17025 – 2019 требования к калибровочным лабораториям ещё более ужесточились, особенно к персоналу, требования к беспристрастности, метрологической прослеживаемости и к расчётам неопределённости измерений.

Ключевые слова: калибровка, прослеживаемость измерений, микрометр, ГОСТ ISO/IEC 17025 – 2019.

В интересах ООО «Газпром нефтехим Салават» разработана методика калибровки гладкого микрометра МК 047-033-2025 в соответствии с ГОСТ ISO/IEC 17025 – 2019. С 1 сентября 2019 года в силу вступила новая редакция ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий», которая устанавливает требования к лабораториям при планировании и осуществлении действий, а значит, на них лежит и вся ответственность.

Методика калибровки микрометра

Область распространения

Настоящая методика калибровки распространяется на микрометры с ценой деления 0,01 и 0,001 типа МК предназначенные для измерения наружных размеров ГОСТ 6507-90 «Микрометры. Технические условия. Методика устанавливает порядок калибровки микрометров, предназначенных для относительных и абсолютных измерений линейных размеров.

Нормативные ссылки

В настоящей методике использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ 6507-90 «Микрометры. Технические условия»;

ГОСТ ISO / IEC 17025-2019 «Межгосударственный стандарт. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий».

Технические требования

Калибруемые микрометры с ценой деления 0,01 и 0,001 типа МК должны соответствовать техническим требованиям, установленным в ГОСТ 6507-90 «Микрометры. Технические условия»;

Средства измерений для калибровки микрометров и вспомогательное оборудование представлено в табл. 1.

Таблица 1

Средства калибровки и вспомогательное оборудование

Операция	Средства калибровки и их нормативно-технические характеристики
Типов МК, МЛ, МП, МТ с верхним пределом измерения до 50 мм классов точности 1 и 2;	Плоскопараллельные концевые меры длины; образцовые 5-го разряда по ГОСТ 8.166-75 или класса точности 2 по ГОСТ 9038-83
Типа МК с верхним пределом измерения более 50 мм	Образцовые 4-го разряда по ГОСТ 8.166-75 или класса точности 1 по ГОСТ 9038-83
Класс точности 1	
Класс точности 2	Образцовые 5-го разряда по ГОСТ 8.166-75 или класса точности 2 по ГОСТ 9038-83
Определение отклонения от параллельности измерительных поверхностей и погрешности микрометров типа МЗ	Меры с цилиндрическими измерительными поверхностями
Определение отклонения от параллельности измерительных поверхностей и погрешности микрометров типа МЗ	Меры с цилиндрическими измерительными поверхностями
Определение отклонения длины от номинальной и отклонения от параллельности (плоскопараллельности) измерительных поверхностей установочных мер	Плоскопараллельные концевые меры длины образцовые 4-го разряда по ГОСТ 8.166-75 или класса точности 1 по ГОСТ 9038-83; горизонтальный оптиметр по ГОСТ 5405-75 или оптико-механическая машина типа ИЗМ по ГОСТ 10875-76

Требования к условиям проведения калибровки

При проведении калибровки температура воздуха в помещении должна быть $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$.

Требования к квалификации персонала

Весь персонал лаборатории, как постоянный, так и привлекаемый, который может повлиять на деятельность лаборатории, должен действовать беспристрастно, быть компетентным и должен работать в соответствии с системой менеджмента лаборатории.

Лаборатория должна документировать требования к компетентности персонала для каждой функции, влияющей на результаты лабораторной

деятельности, в том числе требования к образованию, квалификации, профессиональной подготовке, техническим знаниям, навыкам, опыту.

Лаборатория должна гарантировать, что персонал обладает компетентностью для выполнения лабораторной деятельности, за которую он несет ответственность, и для оценки значимости отклонений.

Руководство лаборатории должно довести до каждого сотрудника его обязанности, ответственность и полномочия.

Лаборатория должна иметь процедуру (ы) и вести записи по: а) определению требований к компетентности; б) подбору персонала; с) подготовке персонала; d) наблюдению за персоналом: е) наделению персонала полномочиями; f) мониторингу компетентности персонала.

Лаборатория должна уполномочить персонал на выполнение конкретной лабораторной деятельности, включая (но не ограничиваясь) следующее: а) разработку, изменение, верификацию и валидацию методов, б) анализ результатов, в том числе заявлений о соответствии или мнений и интерпретаций; с) подготовку отчетов о результатах, их проверку и утверждение.

Требования по обеспечению безопасности

При проведении калибровки должны быть выполнены требования безопасности труда при работе с измерительным инструментом.

Требования к беспристрастности

Лабораторная деятельность должна осуществляться беспристрастно, а также структурироваться и управляться таким образом, чтобы обеспечивать беспристрастность.

Руководство лаборатории должно принять обязательства по беспристрастности.

Лаборатория должна нести ответственность за беспристрастность своей лабораторной деятельности и не должна допускать коммерческое, финансовое или иное давление, ставящее беспристрастность под угрозу.

Лаборатория должна идентифицировать риски для своей беспристрастности на постоянной основе. Это должно включать риски, которые возникают в процессе ее деятельности, в результате ее отношений или отношений ее персонала. Вместе с тем такие отношения не обязательно представляют собой риск для беспристрастности лаборатории.

П р и м е ч а н и е – Отношения, которые угрожают беспристрастности лаборатории, могут основываться на праве собственности, управлении, руководстве, персонале, общих ресурсах, финансах, договорах, маркетинге (включая брэндинг) и комиссионных выплатах или на других видах стимулирования в отношении новых заказчиков. При обнаружении риска для беспристрастности лаборатория должна быть в состоянии продемонстрировать то, как она устраняет или минимизирует такой риск.

Метрологическая прослеживаемость

Лаборатория должна установить и поддерживать метрологическую прослеживаемость результатов своих измерений, связывая их с соответствующей

основой для сравнения посредством документированной непрерывной цепи калибровок, каждая из которых вносит свой вклад в неопределенность измерений.

Оценивание неопределенности измерений

Лаборатория, выполняющая калибровки, в том числе собственного оборудования, должна оценивать неопределенность измерений для всех калибровок.

Операции калибровки

При проведении калибровки микрометра должны быть выполнены следующие операции:

- внешний осмотр;
- опробование;
- установка шкалы микрометра на нуль;
- определение (контроль) метрологических характеристик (определение погрешности шага и профиля микровинта;
- определение отклонения от параллельности и плоскостности измерительных поверхностей;
- погрешности расположения штрихов измерительных шкал;
- погрешности деформации скобы, возникающей под действием измерительного усилия и т.д.).

Микрометры, находящиеся в эксплуатации, калибруются по погрешностям показаний и по отклонениям от параллельности измерительных плоскостей.

Условия калибровки и подготовка к ней

На правильность калибровки микрометров влияет температурный режим, при котором проводилась калибровка. Допустимые по ГОСТ 6507-90 отклонения температуры от 20 градусов при калибровке микрометров приведены в табл. 2.2.

Микрометр и установочные меры, подлежащие калибровке, выдерживались в помещении, где проводилась калибровка не менее 3 часов.

Таблица 2

Допустимые отклонения температуры от 20 °С.

СИ	Пределы измерения, мм		
	До 150	От 150 до 500	От 500 до 600
Микрометр	4	3	2
Установочные меры	3	2	1

Проведение калибровки

1. Внешний осмотр

При проведении внешнего осмотра было установлено соответствие микрометра требованиям ГОСТ 6507-90 в части формы измерительных поверхностей микрометра и установочной меры, качества поверхностей, оцифровки и штрихов шкал, комплектности. Измерительные поверхности микрометра очищались от смазки (этиловым спиртом).

2. Опробование

При опробовании проверили плавность перемещения барабана микрометра вдоль стебля; отсутствие вращения микрометрического винта, закрепленного стопорным устройством, обеспечивающим измерительное усилие (при этом показания микрометра не должны изменяться); неизменность положения закрепленной пятки.

3. Установка микрометра на нуль

Микрометр установили на нуль или соответствующее начальное показание шкалы 25 мм и т.д. с помощью установочных мер в зависимости от интервалов измерений микрометра.

Вращая измерительный барабан за трещётку зажали выбранную установочную меру. В положении плотного соприкосновения измерительных поверхностей микрометра (измерительного винта и пятки) или измерительных поверхностей с установочной мерой, соответствующей начальному показанию шкалы (0; 25; 50 мм. и т.д.) закрепили стопор микровинта вращением винта стопора по часовой стрелке до прочного зажатия (рис. 1).

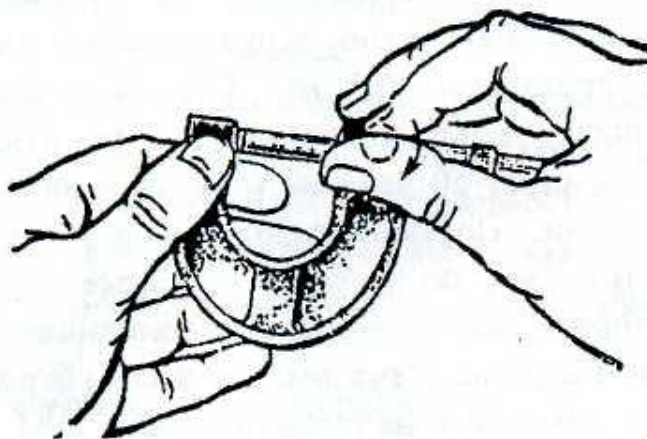


Рис. 1. Закрепление винтового стопора гладкого микрометра

Разъединили барабан и микровинт, для чего охватили левой рукой барабан за накатный выступ, а правой установочный колпачок повернули против часовой стрелки (на себя) до появления осевого люфта барабана на микровинте (рис. 2).

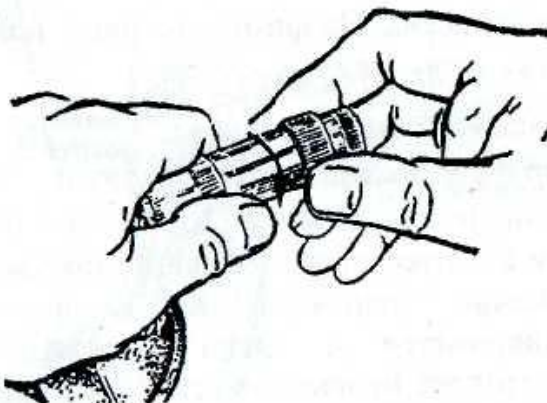


Рис. 2. Освобождение барабана микрометра

Совместили нулевой штрих шкалы барабана с продольным штрихом шкалы стебля, для чего скобу микрометра охватить левой рукой, как показано на (рис. 3), причем пальцами левой руки удерживали барабан в положении совпадения

нулевых штрихов, а правой вращали установочный колпачок по часовой стрелке до полного закрепления барабана на микровинте.

Освободили стопор микровинта, вращая его против часовой стрелки.

Проверили правильность выполненной установки микрометра, для этого отвести микровинт от пятки, вращая его за трещотку против часовой стрелки на

3-4 оборота и затем вращая измерительный барабан за трещотку снова подвели микровинт к пятке. В этом положении нулевой штрих шкалы барабана должен совпасть с продольным штрихом шкалы стебля, а срез барабана должен находиться над нулевым штрихом шкалы стебля. Погрешность установки (отсчет по точной шкале) не должна превышать одного деления точной шкалы (10 мкм).

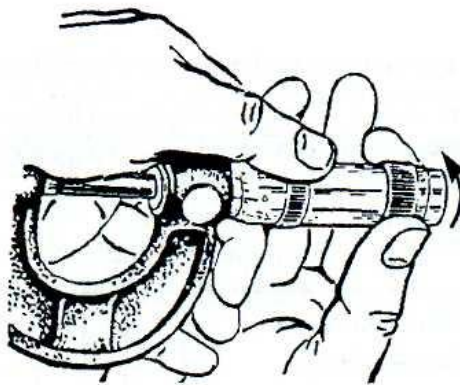


Рис. 3. Закрепление барабана микрометра установочным колпачком

Если установка с первого раза не удалась, то ее повторяют до тех пор, пока не будет достигнута необходимая точность совпадения нулевых штрихов. Если погрешность установки не будет обеспечена, то микрометр считается не пригодным к использованию.

В основе измерительной системы микрометра лежат винт с гайкой. Гайка соединена со скобой, а винт с измерительным барабаном. Качество измерительной системы зависит от точности изготовления резьбы на гайке и винте и их сопряжения. Так как изготовить резьбу с высокой точностью на всей длине измерительной системы невозможно, то погрешности микрометра на разных участках предела измерения будут разные. Поэтому оценки погрешностей (систематической и случайных), определенные в какой-то определенной точке диапазона измерений не будут соответствовать погрешностям в других точках диапазона. В следствии этого для качественной оценки пригодности микрометра необходимо определить погрешности через некоторые интервалы по всему диапазону измерения.

Для этого назначаются размеры, по которым будет проведена калибровка микрометра. Число реперных точек должно быть не менее шести, и располагаться они должны равномерно по шкале. Например, если микрометр имеет диапазон измерения от 0 до 25 мм, то в качестве опорных точек можно выбрать 0, 5, 10, 15, 20 и 25 мм.

Показания микрометра проверяются по каждому контролируемому размеру. Соответствующие размеры устанавливаются с помощью плоскопараллельных мер

длины (плиток). Для получения более достоверных результатов измерений каждое измерение повторяют 10 раз. Среднее арифметическое значение повторных измерений снижает влияние случайных погрешностей измерений.

4. Определение погрешностей

Так как целью работы является определение погрешностей, то в качестве результата измерений можно определять не численное значение результата измерения размера плоскопараллельных мер длины, а значение погрешности, снимаемое по точной шкале. Это уменьшит время работы и упростит расчеты.

Значение погрешности снимается со шкалы микрометра следующим образом (рис. 4.):

- если осевая линия грубой шкалы выше нулевой риски на шкале барабана, то погрешность имеет положительное значение, а если ниже – то отрицательное.
- величина погрешности определяется в микрометрах.

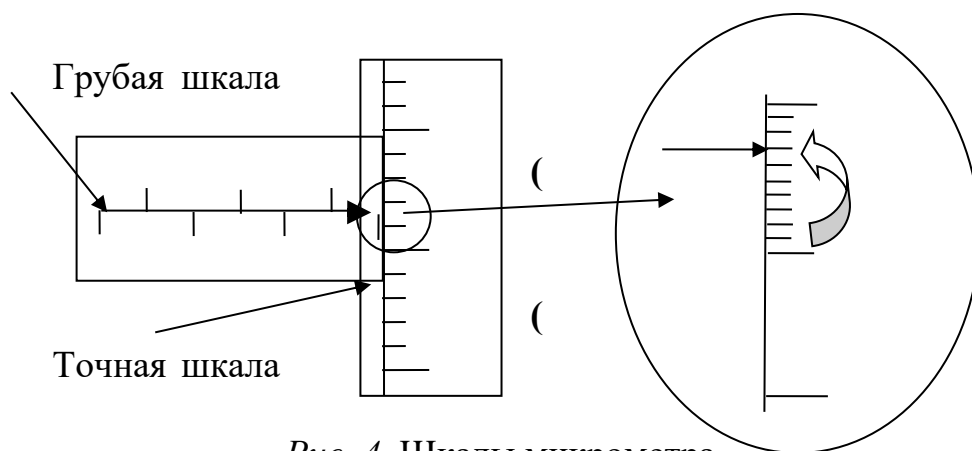


Рис. 4. Шкалы микрометра

Результаты измерений заносятся в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерений показаний микрометра.

№	Значения меры					
	0 мм	5 мм	10 мм	15 мм	20 мм	25 мм
1	0,00	5,01	10,00	15,00	20,00	25,00
2	0,00	5,01	10,01	15,01	20,00	25,00
3	0,015	5,00	10,01	15,01	20,00	25,00
4	0,01	5,00	10,00	15,00	20,01	25,00
5	0,00	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00
6	0,00	5,00	10,00	15,00	20,00	25,01
$X_{\text{ср}}, \text{мм}$	0,00	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00
$\Delta x, \text{мм}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$U_A, \text{мм}$	0,0033	0,0037	0,0037	0,0037	0,0018	0,0018
$U_B, \text{мм}$	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023

Обработка результатов измерений

Пользуясь статистическими методами обработки результатов, определим погрешности измерения для каждой исследуемой точки шкалы следующим образом:

а) вычисляется среднее арифметическое значение измерений

$$x_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

где n - число измерений;

x_i - значение каждого измерения (случайная величина);

б) рассчитывается абсолютная погрешность: $\Delta x = X_i - Q$,

Q – значение меры.

в) вычисляется неопределённость типа А по формуле:

$$U_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{ср}})^2}$$

г) рассчитывается неопределённость типа В по формуле:

$$U_B = \frac{a}{\alpha},$$

где a – диапазон изменения погрешности [1], α – коэффициент $\alpha = \sqrt{3}$ [2].

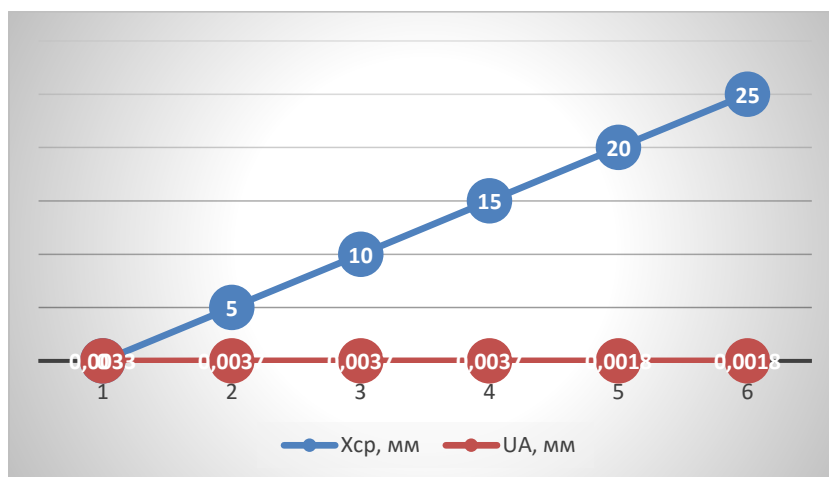


Рис. 5. График зависимости математического ожидания и значения неопределённости типа А.

Анализ графика позволяет оценить качество микрометра и выполненной работы:

- ширина полосы $\Delta x_{\text{ср}}$ говорит о качестве микрометра – о стабильности его показаний – чем уже полоса, тем качественнее микрометр. Участок графика от 0 до 15 мм показывает, что в этом диапазоне микрометр менее стабилен – чаще использовался и резбa изнашивалась.

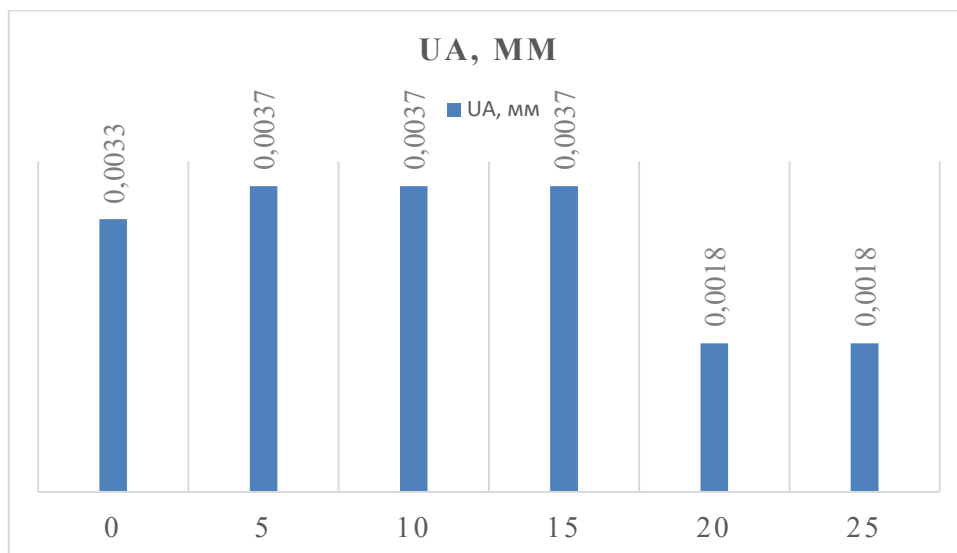


Рис. 6. Диаграмма зависимости математического ожидания и значения неопределённости типа А.

Математическая обработка результатов измерений может быть произведена на компьютере с помощью прикладных программ.

5. Определение отклонения от параллельности измерительных поверхностей микрометра

Отклонения от параллельности измерительных поверхностей микрометра измеряются в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Разность размеров в двух противоположных точках будет характеризовать непараллельность рабочих плоскостей. Для измерения составляется блок концевых мер, равный примерно среднеарифметическому размеру между наибольшим и наименьшим размерами, измеряемыми микрометром. Например, для микрометра с пределами измерений 0-25 рекомендуется для проверки непараллельности брать размер 12...13 мм. При составлении блока концевых мер измерительные поверхности должны быть обезжирены, протерты с помощью замшевого материала и тщательно притерты друг к другу.

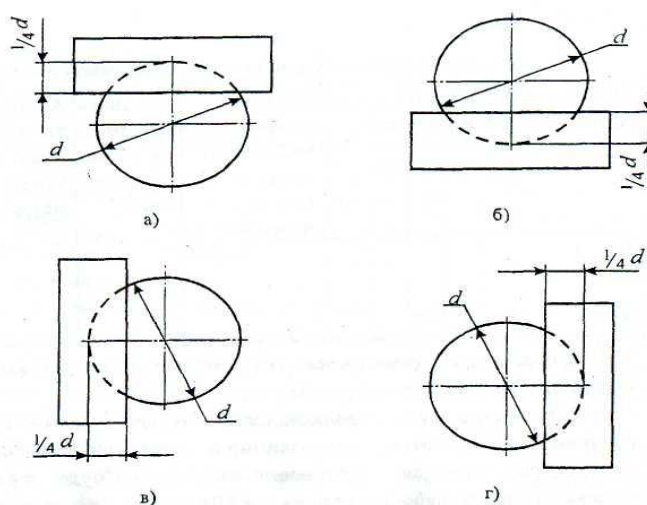


Рис. 7. Касание измерительной поверхности микровинта с концевой мерой при проверке параллельности:
а – сверху; б – снизу; в – спереди; г – сзади

Измерение и отсчет аналогичны методу определения погрешности показаний микрометра, только касание измерительных поверхностей микрометра с блоком плиток ограничивается сегментом высотой приблизительно 1/4 диаметра микрометра. Схема расположения концевой меры при калибровке микрометра с измерительной поверхностью микровинта представлена на рис. 6. Для повышения точности отсчета показаний следует пользоваться увеличительным стеклом, позволяющим определить значение с погрешностью до 25 % от цены деления шкалы. Результаты измерений и расчетов оформляются в соответствии с табл. 4.

Таблица 4

Результаты измерений отклонения от параллельности измерительных поверхностей.

	Верх, мм	Низ, мм	Право, мм	Лево, мм
1	12,01	12,00	12,01	12,00
2	12,00	12,005	12,01	12,00
3	12,005	12,005	12,00	12,005
4	12,00	12,005	12,00	12,005
5	12,00	12,01	12,01	12,00
6	12,005	12,00	12,00	12,01
Х _{ср} , мм	12,0033	12,0042	12,005	12,0033
Δ, мм	Х _{ср_в} - Х _{ср_н}		Х _{ср_п} - Х _{ср_л}	
Δ, мм	- 0,0009		0,0017	

Заключение о годности микрометра

Микрометр считается годным для работы, если ни одно значение контролируемых параметров не превышает допустимых по ГОСТ 6507-90.

К контролируемым параметрам относятся:

- Δх_{ср} – предельная погрешность микрометра (табл. 5),
- Δ - показатель непараллельности измерительных поверхностей (табл. 5).

Таблица 5

Допустимые погрешности микрометра по ГОСТ 6507-90.

Верхний предел измерений, мм	Допустимая погрешность микрометра, мкм	Допустимая непараллельность измерительных поверхностей, мкм
5, 10, 25	±4	±2
50	±4	±2,5
75, 100	±5	±3
125, 200	±5	±4
225, 250, 300	±5	±6

Если отклонение превышает допустимое, но имеет один знак, микрометр следует настроить, и заключение давать с учетом перенастройки. Если настройкой

добиться показаний микрометра в пределах допустимых отклонений не удастся, микрометр подлежит браковке.

Если отклонения от параллельности измерительных поверхностей превышают допустимые по ГОСТ 6507-90, а погрешности показаний микрометра удовлетворяют требованиям ГОСТ 6507-90 или этим требованиям не могут удовлетворять после перенастройки, следует дать заключение, что требуется исправление (доводка) измерительных поверхностей.

Таким образом, сравнивая результаты эксперимента с нормами допустимых отклонений по ГОСТ 6507-90, дается заключение о годности микрометра.

Представление отчетов о результатах

Результаты должны быть рассмотрены и утверждены до их выдачи. Результаты должны быть представлены точно, четко, недвусмысленно и объективно, как правило, в форме отчета (например, свидетельство (сертификат) о калибровке или акт отбора образцов) и должны включать в себя всю информацию, согласованную с заказчиком и необходимую для интерпретации результатов, а также всю информацию, требуемую в соответствии с применяемым методом. Все оформленные отчеты должны быть сохранены в качестве технических записей.

В целях минимизации возможности неправильного понимания или неправильного использования информации каждый отчет должен включать как минимум следующую информацию, если у лаборатории нет обоснованных причин не выполнять это требование: а) название (например, «Свидетельство (сертификат) о калибровке»); б) наименование и адрес лаборатории; в) место осуществления лабораторной деятельности, в том числе если она осуществлялась на площадях заказчика, либо на участках, удаленных от постоянных производственных площадей лаборатории, либо на соответствующих временно используемых или мобильных объектах; д) уникальную идентификацию, для того чтобы все его составляющие воспринимались как часть общего отчета, и четкую идентификацию конца отчета; е) наименование и контактные данные заказчика; ф) идентификацию применяемого метода; г) описание, однозначную идентификацию и при необходимости состояние образца; h) дату получения образца (ов) для испытаний или объекта калибровки и дату отбора образца (ов), когда это имеет важное значение для достоверности и применения результатов; i) дату (ы) осуществления лабораторной деятельности; j) дату выдачи отчета; k) ссылку на план и метод отбора образцов, использованные лабораторией или другими органами, если это важно для достоверности или применения результатов; l) заявление о том, что результаты относятся только к объектам, прошедшим испытания, калибровку или отбор; m) результаты, где это применимо, с единицами измерения; n) дополнения, отклонения или исключения из метода; o) идентификацию лиц (а), утвердивших (его) отчет; p) однозначную идентификацию результатов, полученных от внешних поставщиков.

Лаборатория должна нести ответственность за всю информацию, представленную в отчете, за исключением случаев, когда информация предоставляется заказчиком. Данные, предоставленные заказчиком, должны быть

четко идентифицированы. Кроме того, в случае если информация предоставлена заказчиком и она может повлиять на достоверность результатов, в отчет должно быть включено заявление об ограничении ответственности лаборатории. В случае если лаборатория не осуществляет и не несет ответственности за стадию отбора образцов (например, образец был предоставлен заказчиком), в отчете должно быть отражено, что полученные результаты относятся к предоставленному заказчиком образцу.

Специальные требования к свидетельствам (сертификатам) о калибровке

В дополнение к требованиям, перечисленным выше в сертификаты о калибровке должны быть включены следующие сведения: а) значение неопределенности измерений для результата измерений, представленное в тех же единицах, что и измеряемая величина, или в относительном по отношению к измеряемой величине виде (например, в процентах).

П р и м е ч а н и е – В соответствии с ISO/IEC Guide 99 результат измерения, как правило, выражается одним измеренным значением величины с указанием единицы измерения и неопределенности измерений: б) сведения об условиях (например, условиях окружающей среды), при которых выполнялись калибровки и которые могли оказать влияние на результаты измерений; с) заявление о том, каким образом обеспечивается метрологическая прослеживаемость измерений; d) результаты, полученные до и после регулировки или ремонта, если таковые проводились; е) заявление о соответствии требованиям или спецификациям при необходимости; f) мнения и интерпретации при необходимости.

Если лаборатория отвечает за деятельность по отбору образцов, свидетельства (сертификаты) о калибровке должны соответствовать требованиям.

Свидетельство (сертификат) о калибровке или калибровочная этикетка не должны содержать никаких рекомендаций по выбору межкалибровочных интервалов, кроме тех случаев, когда это было согласовано с заказчиком.

Управление несоответствующей работой

В тех случаях, когда оценка показывает, что несоответствующая работа может повториться или есть сомнения в отношении соответствия деятельности лаборатории собственной системе менеджмента, лаборатория должна обеспечить выполнение корректирующих действий.

Библиографический список

1. ГОСТ 6507-90. Межгосударственный стандарт. Микрометры. Технические условия. – М.: ИПК «Издательство стандартов», 2004.
2. Захаров И.П. Неопределённость измерений для чайников и ...начальников: учеб. пособие, 2-е изд. – Санкт-Петербург: Политехника-Сервис, 2014. – 52 с.

© Гурьянов Н.А., Баннова А.В., 2025

УДК 621.317.088

Н.А. ГУРЬЯНОВ

yogenenko@yandex.ru

Науч. руковод. – к.х.н., доц. А.В. БАННОВА

Уфимский университет науки и технологий

ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЗУБЬЕВ ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА

Аннотация: средства измерений параметров ЭЗЗ поверяются, как правило, в соответствии с распространяющимися на них методиками поверки на основе локальных поверочных схем, не всегда обеспечивающих прослеживаемость передачи размера единицы длины от эталона рабочим средством измерения, причём их место в системе передачи единицы длины должным образом не регламентировано.

Ключевые слова: измерения, зубчатое колесо, радиальное биение, прослеживаемость.

Эффективное функционирование любого предприятия зависит от ряда взаимосвязанных процессов и во многом определяется системой менеджмента качества. Ранее в серии работ нами была дана оценка системы качества на промышленном предприятии [1], был разработан паспорт процесса «Входной контроль качества оборудования» [2], изучен входной контроль изделий [3], проведён анализ качества выпускаемых изделий из полимеров и композитов [4], изучен контроль качества сварных швов и соединений [5], проведён контроль качества продукции на производстве автопластика [6], проведена оценка стоимости разработки и внедрения мобильного приложения [7], проанализирована деятельность предприятия ИП «Кофе у камина» с точки зрения удовлетворённости потребителей [8], дана оценка роли стандартизации в экономике [9]. Основной составляющей в СМК всех процессов является метрологическое обеспечение производственных процессов. Нами были разработаны методики оценки метрологического обеспечения [10], проведена автоматизация измерительных процессов и разработана методика расчета эффективности [11], также разработана методика оценки метрологического обеспечения и предложений по улучшению качества метрологического обеспечения на АО «УАПО» [12], для этого проведены измерения микрометрами [13] и газоанализаторами [14].

Зубчатые колеса широко применяются в машиностроении и являются важными компонентами в различных отраслях. Спрос на зубчатые колеса и их производство постоянно растут из-за увеличивающейся конкуренции и повышенных требований к качеству и надежности на мировом рынке. В настоящее время миллионы различных зубчатых колес выпускаются по всему миру. Особое внимание уделяется качеству и надежности авиационных зубчатых колес, используемых в редукторах вертолетов современных моделей. Для улучшения

результатов, стабильности и надежности вертолетов, таких как Ми-8/14/17/24/26 и другие, принадлежащие холдингу “Вертолеты России”, необходимо обеспечить долговечность редукторов вертолетов и применять современные технологии при изготовлении зубчатых колес.

Цилиндрические зубчатые колеса редукторов – наиболее распространенные и качественные элементы, используемые для передачи значительных мощностей при ограниченных габаритах и весе. При изготовлении цилиндрических зубчатых колес необходимо обеспечивать высокую точность зубчатого венца в соответствии с требованиями стандарта (5 – 4 – 4 согласно ГОСТ 1643-81 [1]), низкую шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев $R_a < 0,16$ мкм), поверхностей зубьев, отсутствие термических дефектов и трещин, а также характеристики поверхностного слоя, обеспечивая износостойкость и долговечность шестерен. Вышеперечисленные условия являются важнейшими для обеспечения надежности полетов, надежной работы механизмов и передачи вращающего момента на лопасть вертолета.

А) Измерение штангенциркулем наружных диаметров d_a зубчатых колес, ширину колес и диаметром посадочных отверстий.

Получены данные:

Наружный диаметр $d_a = 80,01$ мм

Ширина венца $b = 30,04$ мм

Б) Подсчитано число зубьев $z=15$

В) Подсчитан модуль m зубчатого колеса $m = \frac{d_a}{z+2}$ и округлен результат до целого:

$$\text{Модуль } m = \frac{80,01 \text{ мм}}{15+2} = 4,7064 \approx 5$$

Г) Рассчитано по формуле номинальных значений толщин зубьев по постоянной хорде S_c и высот зубьев до постоянной хорды h_c .

$$S_c = 1,387 * m = 6,935 \text{ мм}$$

$$h_c = 0,7476 * m = 3,738 \text{ мм}$$

Д) Замерено штангензубомером толщины зубьев по постоянной хорде $S_{C \text{ действ}}$ на пятнадцати находящихся вблизи зубьев колес.

$S_{C \text{ действ 1}}$	6,26 мм	$S_{C \text{ действ 9}}$	6,22 мм
$S_{C \text{ действ 2}}$	6,22 мм	$S_{C \text{ действ 10}}$	6,22 мм
$S_{C \text{ действ 3}}$	6,20 мм	$S_{C \text{ действ 11}}$	6,32 мм
$S_{C \text{ действ 4}}$	6,21 мм	$S_{C \text{ действ 12}}$	6,23 мм
$S_{C \text{ действ 5}}$	6,21 мм	$S_{C \text{ действ 13}}$	6,22 мм
$S_{C \text{ действ 6}}$	6,32 мм	$S_{C \text{ действ 14}}$	6,32 мм
$S_{C \text{ действ 7}}$	6,24 мм	$S_{C \text{ действ 15}}$	6,31 мм
$S_{C \text{ действ 8}}$	6,24 мм		

Е) Рассчитали доверительную границу погрешености:

$$S_{c \max} = 6,32 \text{ мм}; S_{c \min} = 6,20 \text{ мм}; S_{c \text{ ср}} = 6,25 \text{ мм}.$$

Доверительная граница систематической погрешности результата измерений при $P = 0,95$:

$$\Theta = 2,14 \cdot \sqrt{(6,32 - 6,20)^2 + (6,32 - 6,25)^2 + (6,25 - 6,20)^2} = 0,3158 \text{ мм.}$$

Вычислили СКО среднего арифметического значения $S_{\text{ср}}$:

$$S_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{1}{15 \cdot 14} \sum_{i=1}^n (6,26 - 6,25)^2 + (6,22 - 6,25)^2 + (6,20 - 6,25)^2 + (6,21 - 6,25)^2 + (6,21 - 6,25)^2 + (6,32 - 6,25)^2 + (6,24 - 6,25)^2 + (6,24 - 6,25)^2 + (6,22 - 6,25)^2 + (6,22 - 6,25)^2 + (6,32 - 6,25)^2 + (6,23 - 6,25)^2 + (6,22 - 6,25)^2 + (6,32 - 6,25)^2 + (6,31 - 6,25)^2} =$$

$$0,0115 \text{ мм}$$

$$\frac{\Theta}{S_{\text{ср}}} = \frac{0,3158}{0,0115} = 27,46$$

$27,46 > 8$, поэтому случайной составляющей погрешности пренебрегаем и за доверительную границу погрешности принимаем половину цены деления прибора:

$$S_{\text{с действ}} = (6,25 \pm 0,01) \text{ мм}$$

Ж) Сведения о степени точности и конфигурации соединения зубчатого колеса использовались при расчете его характеристик по ГОСТ 1643-81 «Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски».

8 А

Радиальное биение зубчатого венца относительно оси вращения $F_r = 50 \text{ мкм}$;

Верхнее (наименьшее) разница в толщине зуба $E_{CS} = 160 \text{ мкм}$;

Допуск на толщину зуба по постоянной хорде $T_C = 140 \text{ мкм}$;

Нижнее (наибольшее) разница в толщине зуба $E_{CS} + T_C = 160 \text{ мкм} + 140 \text{ мкм} = 300 \text{ мкм}$.

Предельные значения толщины зуба по постоянной хорде :

$$S_{C \text{ MAX}} = S_C - E_{CS} = 6935 \text{ мкм} - 160 \text{ мкм} = 6775 \text{ мкм} ;$$

$$S_{C \text{ MIN}} = S_C - (E_{CS} + T_C) = 6935 \text{ мкм} - 300 \text{ мкм} = 6635 \text{ мкм} ;$$

Были проведены сравнения результатов измерения толщины зуба с установленными предельными значениями. $S_{C \text{ MAX}}$ и $S_{C \text{ MIN}}$.

При $S_{C \text{ MAX}} \geq S_{\text{с действ}} \geq S_{C \text{ MIN}}$ зубчатое колесо обеспечивает требуемый боковой зазор в передаче, то оно пригодно для использования.

$$6775 \text{ мкм} \geq 6260 \text{ мкм} \leq 6635 \text{ мкм}$$

$$6775 \text{ мкм} \geq 6220 \text{ мкм} \leq 6635 \text{ мкм}$$

$$6775 \text{ мкм} \geq 6220 \text{ мкм} \leq 6635 \text{ мкм}$$

$$6775 \text{ мкм} \geq 6210 \text{ мкм} \leq 6635 \text{ мкм}$$

$$6775 \text{ мкм} \geq 6221 \text{ мкм} \leq 6635 \text{ мкм}$$

$$6775 \text{ мкм} \geq 6320 \text{ мкм} \leq 6635 \text{ мкм}$$

$$6775 \text{ мкм} \geq 6240 \text{ мкм} \leq 6635 \text{ мкм}$$

$$6775 \text{ мкм} \geq 6240 \text{ мкм} \leq 6635 \text{ мкм}$$

$$6775 \text{ мкм} \geq 6220 \text{ мкм} \leq 6635 \text{ мкм}$$

$$6775 \text{ мкм} \geq 6220 \text{ мкм} \leq 6635 \text{ мкм}$$

$$6775 \text{ мкм} \geq 6320 \text{ мкм} \leq 6635 \text{ мкм}$$

$$\begin{aligned}
6775 \text{ мкм} &\geq 6230 \text{ мкм} \leq 6635 \text{ мкм} \\
6775 \text{ мкм} &\geq 6220 \text{ мкм} \leq 6635 \text{ мкм} \\
6775 \text{ мкм} &\geq 6320 \text{ мкм} \leq 6635 \text{ мкм} \\
6775 \text{ мкм} &\geq 6310 \text{ мкм} \leq 6635 \text{ мкм}
\end{aligned}$$

Вывод: с учетом доверительной границы погрешности требуемый боковой зазор в передаче не обеспечен, зубчатое колесо негодно.

12 А

Радиальное биение зубчатого венца относительно оси вращения $F_r = 200$ мкм.

Верхнее (наименьшее) разница в толщине зуба $E_{CS} = 220$ мкм.

Допуск на толщину зуба по постоянной хорде $T_C = 400$ мкм.

Нижнее (наибольшее) разница в толщине зуба $E_{CS} + T_C = 220 \text{ мкм} + 400 \text{ мкм} = 620 \text{ мкм}$.

Были рассчитаны максимальные значения толщины зуба на основе постоянной хорды с помощью соответствующих формул:

$$S_{C \text{ MAX}} = S_C - E_{CS} = 6935 \text{ мкм} - 220 \text{ мкм} = 6715 \text{ мкм};$$

$$S_{C \text{ MIN}} = S_C - (E_{CS} + T_C) = 6935 \text{ мкм} - 620 \text{ мкм} = 6315 \text{ мкм};$$

При $S_{C \text{ MAX}} \geq S_{C \text{ действ}} \geq S_{C \text{ MIN}}$ зубчатое колесо обеспечивает требуемый боковой зазор в передаче, то оно пригодно для использования.

$$\begin{aligned}
6715 \text{ мкм} &\geq 6260 \text{ мкм} \leq 6315 \text{ мкм} \\
6715 \text{ мкм} &\geq 6220 \text{ мкм} \leq 6315 \text{ мкм} \\
6715 \text{ мкм} &\geq 6220 \text{ мкм} \leq 6315 \text{ мкм} \\
6715 \text{ мкм} &\geq 6210 \text{ мкм} \leq 6315 \text{ мкм} \\
6715 \text{ мкм} &\geq 6221 \text{ мкм} \leq 6315 \text{ мкм} \\
\mathbf{6715 \text{ мкм}} &\geq \mathbf{6320 \text{ мкм}} \geq \mathbf{6315 \text{ мкм}} \\
6715 \text{ мкм} &\geq 6240 \text{ мкм} \leq 6315 \text{ мкм} \\
6715 \text{ мкм} &\geq 6240 \text{ мкм} \leq 6315 \text{ мкм} \\
6715 \text{ мкм} &\geq 6220 \text{ мкм} \leq 6315 \text{ мкм} \\
6715 \text{ мкм} &\geq 6220 \text{ мкм} \leq 6315 \text{ мкм} \\
\mathbf{6715 \text{ мкм}} &\geq \mathbf{6320 \text{ мкм}} \geq \mathbf{6315 \text{ мкм}} \\
6715 \text{ мкм} &\geq 6230 \text{ мкм} \leq 6315 \text{ мкм} \\
6715 \text{ мкм} &\geq 6220 \text{ мкм} \leq 6315 \text{ мкм} \\
\mathbf{6715 \text{ мкм}} &\geq \mathbf{6320 \text{ мкм}} \geq \mathbf{6315 \text{ мкм}} \\
\mathbf{6715 \text{ мкм}} &\geq \mathbf{6310 \text{ мкм}} \leq \mathbf{6315 \text{ мкм}}
\end{aligned}$$

Вывод: с учетом доверительной границы погрешности требуемый боковой зазор обеспечивается только для 4-х зубьев колеса, поэтому зубчатое колесо негодно.

5 Н

Радиальное биение зубчатого венца относительно оси вращения $F_r = 8$ мкм.

Верхнее (наименьшее) разница в толщине зуба $E_{CS} = 9$ мкм.

Допуск на толщину зуба по постоянной хорде $T_C = 30$ мкм.

Нижнее (наибольшее) разница в толщине зуба как $E_{CS} + T_C = 9 \text{ мкм} + 30 \text{ мкм} = 39 \text{ мкм}$.

Предельные значения толщины зуба по постоянной хорде:

$$S_{C \text{ MAX}} = S_C - E_{CS} = 6935 \text{ мкм} - 9 \text{ мкм} = 6926 \text{ мкм} ;$$

$$S_{C \text{ MIN}} = S_C - (E_{CS} + T_C) = 6935 \text{ мкм} - 39 \text{ мкм} = 6896 \text{ мкм} ;$$

Было проведено сравнение полученных измерений толщины зуба с их максимально допустимыми значениями $S_{C \text{ MAX}}$ и $S_{C \text{ MIN}}$.

При $S_{C \text{ MAX}} \geq S_{C \text{ действ}} \geq S_{C \text{ MIN}}$ зубчатое колесо обеспечивает требуемый боковой зазор в передаче, то оно пригодно для использования.

$$6926 \text{ мкм} \geq 6260 \text{ мкм} \leq 6896 \text{ мкм}$$

$$6926 \text{ мкм} \geq 6220 \text{ мкм} \leq 6896 \text{ мкм}$$

$$6926 \text{ мкм} \geq 6220 \text{ мкм} \leq 6896 \text{ мкм}$$

$$6926 \text{ мкм} \geq 6210 \text{ мкм} \leq 6896 \text{ мкм}$$

$$6926 \text{ мкм} \geq 6221 \text{ мкм} \leq 6896 \text{ мкм}$$

$$6926 \text{ мкм} \geq 6320 \text{ мкм} \leq 6896 \text{ мкм}$$

$$6926 \text{ мкм} \geq 6240 \text{ мкм} \leq 6896 \text{ мкм}$$

$$6926 \text{ мкм} \geq 6240 \text{ мкм} \leq 6896 \text{ мкм}$$

$$6926 \text{ мкм} \geq 6220 \text{ мкм} \leq 6896 \text{ мкм}$$

$$6926 \text{ мкм} \geq 6220 \text{ мкм} \leq 6896 \text{ мкм}$$

$$6926 \text{ мкм} \geq 6320 \text{ мкм} \leq 6896 \text{ мкм}$$

$$6926 \text{ мкм} \geq 6230 \text{ мкм} \leq 6896 \text{ мкм}$$

$$6926 \text{ мкм} \geq 6220 \text{ мкм} \leq 6896 \text{ мкм}$$

$$6926 \text{ мкм} \geq 6320 \text{ мкм} \leq 6896 \text{ мкм}$$

$$6926 \text{ мкм} \geq 6310 \text{ мкм} \leq 6896 \text{ мкм}$$

Вывод: с учетом доверительной границы погрешности требуемый боковой зазор в передаче не обеспечен, зубчатое колесо негодно.

6 Е

Радиальное биение зубчатого венца относительно оси вращения $F_r = 28 \text{ мкм}$.

Верхнее (наименьшее) разница в толщине зуба $E_{CS} = 22 \text{ мкм}$.

Допуск на толщину зуба по постоянной хорде $T_C = 40 \text{ мкм}$.

Нижнее (наибольшее) разница в толщине зуба

$$E_{CS} + T_C = 22 \text{ мкм} + 40 \text{ мкм} = 62 \text{ мкм}.$$

Предельные значения толщины зуба по постоянной хорде:

$$S_{C \text{ MAX}} = S_C - E_{CS} = 6935 \text{ мкм} - 22 \text{ мкм} = 6913 \text{ мкм} ;$$

$$S_{C \text{ MIN}} = S_C - (E_{CS} + T_C) = 6935 \text{ мкм} - 62 \text{ мкм} = 6873 \text{ мкм} ;$$

Было проведено сравнение полученных измерений толщины зуба с их максимально допустимыми значениями $S_{C \text{ MAX}}$ и $S_{C \text{ MIN}}$.

При $S_{C \text{ MAX}} \geq S_{C \text{ действ}} \geq S_{C \text{ MIN}}$ зубчатое колесо обеспечивает требуемый боковой зазор в передаче, то оно пригодно для использования.

$$6913 \text{ мкм} \geq 6260 \text{ мкм} \leq 6873 \text{ мкм}$$

$$6913 \text{ мкм} \geq 6220 \text{ мкм} \leq 6873 \text{ мкм}$$

$$6913 \text{ мкм} \geq 6220 \text{ мкм} \leq 6873 \text{ мкм}$$

$$6913 \text{ мкм} \geq 6210 \text{ мкм} \leq 6873 \text{ мкм}$$

$$6913 \text{ мкм} \geq 6221 \text{ мкм} \leq 6873 \text{ мкм}$$

$$6913 \text{ мкм} \geq 6320 \text{ мкм} \leq 6873 \text{ мкм}$$

$$6913 \text{ мкм} \geq 6240 \text{ мкм} \leq 6873 \text{ мкм}$$

$$\begin{aligned}
6913 \text{ мкм} &\geq 6240 \text{ мкм} \leq 6873 \text{ мкм} \\
6913 \text{ мкм} &\geq 6220 \text{ мкм} \leq 6873 \text{ мкм} \\
6913 \text{ мкм} &\geq 6220 \text{ мкм} \leq 6873 \text{ мкм} \\
6913 \text{ мкм} &\geq 6320 \text{ мкм} \leq 6873 \text{ мкм} \\
6913 \text{ мкм} &\geq 6230 \text{ мкм} \leq 6873 \text{ мкм} \\
6913 \text{ мкм} &\geq 6220 \text{ мкм} \leq 6873 \text{ мкм} \\
6913 \text{ мкм} &\geq 6320 \text{ мкм} \leq 6873 \text{ мкм} \\
6913 \text{ мкм} &\geq 6310 \text{ мкм} \leq 6873 \text{ мкм}
\end{aligned}$$

Вывод: с учетом доверительной границы погрешности требуемый боковой зазор в передаче не обеспечен, зубчатое колесо негодно.

7 D

Радиальное биение зубчатого венца относительно оси вращения $F_r = 40$ мкм.

Верхнее (наименьшее) разница в толщине зуба $E_{cs} = 35$ мкм.

Допуск на толщину зуба по постоянной хорде $T_c = 60$ мкм.

-Подсчитать Нижнее (наибольшее) разница в толщине зуба как

$$E_{cs} + T_c = 35 \text{ мкм} + 60 \text{ мкм} = 95 \text{ мкм} .$$

Подсчитали предельные значения толщины зуба по постоянной хорде по формулам :

$$S_{C \text{ MAX}} = S_C - E_{cs} = 6935 \text{ мкм} - 35 \text{ мкм} = 6900 \text{ мкм} ;$$

$$S_{C \text{ MIN}} = S_C - (E_{cs} + T_c) = 6935 \text{ мкм} - 95 \text{ мкм} = 6840 \text{ мкм} ;$$

Было проведено сравнение полученных измерений толщины зуба с их максимально допустимыми значениями $S_{C \text{ MAX}}$ и $S_{C \text{ MIN}}$.

При $S_{C \text{ MAX}} \geq S_{C \text{ действ}} \geq S_{C \text{ MIN}}$ зубчатое колесо обеспечивает требуемый боковой зазор в передаче, то оно пригодно для использования.

$$\begin{aligned}
6900 \text{ мкм} &\geq 6260 \text{ мкм} \leq 6840 \text{ мкм} \\
6900 \text{ мкм} &\geq 6220 \text{ мкм} \leq 6840 \text{ мкм} \\
6900 \text{ мкм} &\geq 6220 \text{ мкм} \leq 6840 \text{ мкм} \\
6900 \text{ мкм} &\geq 6210 \text{ мкм} \leq 6840 \text{ мкм} \\
6900 \text{ мкм} &\geq 6221 \text{ мкм} \leq 6840 \text{ мкм} \\
6900 \text{ мкм} &\geq 6320 \text{ мкм} \leq 6840 \text{ мкм} \\
6900 \text{ мкм} &\geq 6240 \text{ мкм} \leq 640 \text{ мкм} \\
6900 \text{ мкм} &\geq 6240 \text{ мкм} \leq 6840 \text{ мкм} \\
6900 \text{ мкм} &\geq 6220 \text{ мкм} \leq 6840 \text{ мкм} \\
6900 \text{ мкм} &\geq 6220 \text{ мкм} \leq 6840 \text{ мкм} \\
6900 \text{ мкм} &\geq 6220 \text{ мкм} \leq 6840 \text{ мкм} \\
6900 \text{ мкм} &\geq 6320 \text{ мкм} \leq 6840 \text{ мкм} \\
6900 \text{ мкм} &\geq 6230 \text{ мкм} \leq 6840 \text{ мкм} \\
6900 \text{ мкм} &\geq 6220 \text{ мкм} \leq 6840 \text{ мкм} \\
6900 \text{ мкм} &\geq 6320 \text{ мкм} \leq 6840 \text{ мкм} \\
6900 \text{ мкм} &\geq 6310 \text{ мкм} \leq 6840 \text{ мкм}
\end{aligned}$$

Вывод: с учетом доверительной границы погрешности требуемый боковой зазор в передаче не обеспечен, зубчатое колесо негодно.

9 C

Радиальное биение зубчатого венца относительно оси вращения

$$F_r = 80 \text{ мкм.}$$

Верхнее (наименьшее) отклонение толщины зуба $E_{cs} = 70 \text{ мкм.}$

Допуск на толщину зуба по постоянной хорде $T_c = 140 \text{ мкм.}$

Нижнее (наибольшее) отклонение толщины зуба:

$$E_{cs} + T_c = 70 \text{ мкм} + 140 \text{ мкм} = 210 \text{ мкм.}$$

Предельные значения толщины зуба по постоянной хорде:

$$S_{C \text{ MAX}} = S_C - E_{cs} = 6935 \text{ мкм} - 70 \text{ мкм} = 6865 \text{ мкм} ;$$

$$S_{C \text{ MIN}} = S_C - (E_{cs} + T_c) = 6935 \text{ мкм} - 140 \text{ мкм} = 6795 \text{ мкм.}$$

Было проведено сравнение полученных измерений толщины зуба с их максимально допустимыми значениями $S_{C \text{ MAX}}$ и $S_{C \text{ MIN}}$.

При $S_{C \text{ MAX}} \geq S_{C \text{ действ}} \geq S_{C \text{ MIN}}$ зубчатое колесо обеспечивает требуемый боковой зазор в передаче, то оно пригодно для использования.

$$6865 \text{ мкм} \geq 6260 \text{ мкм} \leq 6795 \text{ мкм}$$

$$6865 \text{ мкм} \geq 6220 \text{ мкм} \leq 6795 \text{ мкм}$$

$$6865 \text{ мкм} \geq 6220 \text{ мкм} \leq 6795 \text{ мкм}$$

$$6865 \text{ мкм} \geq 6210 \text{ мкм} \leq 6795 \text{ мкм}$$

$$6865 \text{ мкм} \geq 6221 \text{ мкм} \leq 6795 \text{ мкм}$$

$$6865 \text{ мкм} \geq 6320 \text{ мкм} \leq 6795 \text{ мкм}$$

$$6865 \text{ мкм} \geq 6240 \text{ мкм} \leq 6795 \text{ мкм}$$

$$6865 \text{ мкм} \geq 6240 \text{ мкм} \leq 6795 \text{ мкм}$$

$$6865 \text{ мкм} \geq 6220 \text{ мкм} \leq 6795 \text{ мкм}$$

$$6865 \text{ мкм} \geq 6220 \text{ мкм} \leq 6795 \text{ мкм}$$

$$6865 \text{ мкм} \geq 6320 \text{ мкм} \leq 6795 \text{ мкм}$$

$$6865 \text{ мкм} \geq 6230 \text{ мкм} \leq 6795 \text{ мкм}$$

$$6865 \text{ мкм} \geq 6220 \text{ мкм} \leq 6795 \text{ мкм}$$

$$6865 \text{ мкм} \geq 6320 \text{ мкм} \leq 6795 \text{ мкм}$$

$$6865 \text{ мкм} \geq 6310 \text{ мкм} \leq 6795 \text{ мкм}$$

Вывод: с учетом доверительной границы погрешности требуемый боковой зазор в передаче не обеспечен, зубчатое колесо негодно.

11 В

Радиальное биение зубчатого венца относительно оси вращения

$$F_r = 160 \text{ мкм.}$$

Верхнее (наименьшее) разница в толщине зуба $E_{cs} = 140 \text{ мкм.}$

Допуск на толщину зуба по постоянной хорде $T_c = 300 \text{ мкм.}$

Нижнее (наибольшее) разница в толщине зуба:

$$E_{cs} + T_c = 140 \text{ мкм} + 300 \text{ мкм} = 440 \text{ мкм.}$$

Предельные значения толщины зуба по постоянной хорде:

$$S_{C \text{ MAX}} = S_C - E_{cs} = 6935 \text{ мкм} - 140 \text{ мкм} = 6795 \text{ мкм} ;$$

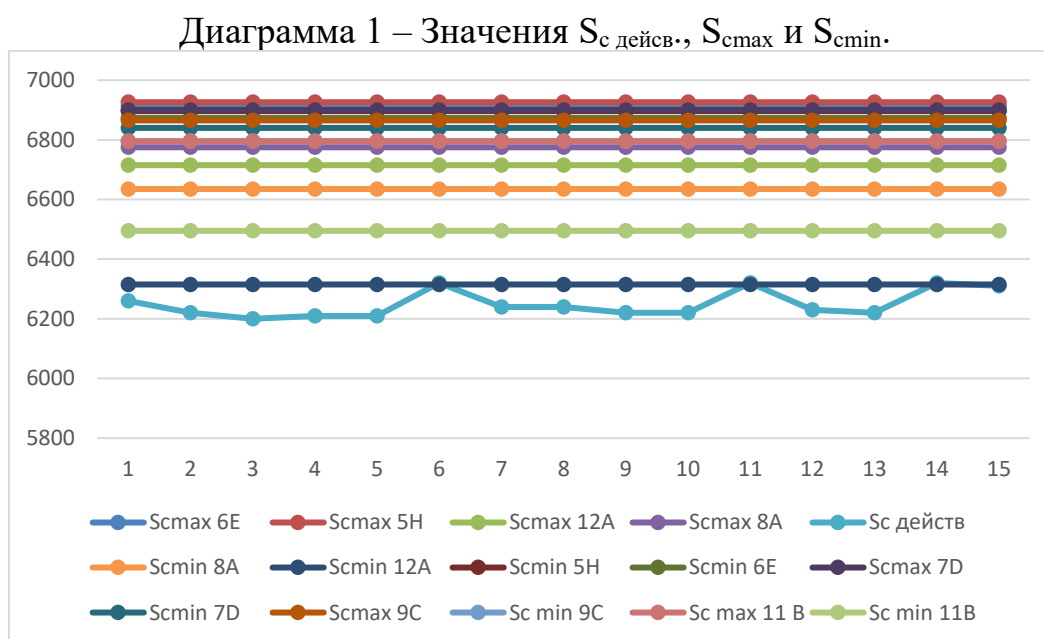
$$S_{C \text{ MIN}} = S_C - (E_{cs} + T_c) = 6935 \text{ мкм} - 440 \text{ мкм} = 6495 \text{ мкм} ;$$

Было проведено сравнение полученных измерений толщины зуба с их максимально допустимыми значениями $S_{C \text{ MAX}}$ и $S_{C \text{ MIN}}$.

При $S_{C \text{ MAX}} \geq S_{C \text{ действ}} \geq S_{C \text{ MIN}}$ зубчатое колесо обеспечивает требуемый боковой зазор в передаче, то оно пригодно для использования.

$6795 \text{ мкм} \geq 6260 \text{ мкм} \leq 6495 \text{ мкм}$
 $6795 \text{ мкм} \geq 6220 \text{ мкм} \leq 6495 \text{ мкм}$
 $6795 \text{ мкм} \geq 6220 \text{ мкм} \leq 6495 \text{ мкм}$
 $6795 \text{ мкм} \geq 6210 \text{ мкм} \leq 6495 \text{ мкм}$
 $6795 \text{ мкм} \geq 6221 \text{ мкм} \leq 6495 \text{ мкм}$
 $6795 \text{ мкм} \geq 6320 \text{ мкм} \leq 6495 \text{ мкм}$
 $6795 \text{ мкм} \geq 6240 \text{ мкм} \leq 6495 \text{ мкм}$
 $6795 \text{ мкм} \geq 6240 \text{ мкм} \leq 6495 \text{ мкм}$
 $6795 \text{ мкм} \geq 6220 \text{ мкм} \leq 6495 \text{ мкм}$
 $6795 \text{ мкм} \geq 6220 \text{ мкм} \leq 6495 \text{ мкм}$
 $6795 \text{ мкм} \geq 6320 \text{ мкм} \leq 6495 \text{ мкм}$
 $6795 \text{ мкм} \geq 6230 \text{ мкм} \leq 6495 \text{ мкм}$
 $6795 \text{ мкм} \geq 6220 \text{ мкм} \leq 6495 \text{ мкм}$
 $6795 \text{ мкм} \geq 6320 \text{ мкм} \leq 6495 \text{ мкм}$
 $6795 \text{ мкм} \geq 6310 \text{ мкм} \leq 6495 \text{ мкм}$

Вывод: с учетом доверительной границы погрешности требуемый боковой зазор в передаче не обеспечен, зубчатое колесо негодно.



На диаграмме видны 3 точки пересечения $S_{с \text{ действ.}}$ и $S_{с \text{ min}}$ только для 12А, что говорит о том, что в учебном колесе требуемый боковой зазор в передаче не обеспечен, зубчатое колесо негодно.

Библиографический список

1. Сайпанова К.Э., Баннова А.В., Бакиева Г.Р., Хакимов Р.М. Оценка системы качества на промышленном предприятии // В сборнике: Актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2023. С. 83-89.

2. Сайпанова К.Э., Баннова А.В., Бакиева Г.Р., Хакимов Р.М. Разработка паспорта процесса «Входной контроль качества оборудования» // В сборнике:

Актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2023. С. 101-106.

3. Сайпанова К.Э., Баннова А.В., Бакиева Г.Р., Хакимов Р.М. Входной контроль изделий // В сборнике: Актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2023. С. 90-100.

4. Хакимов Р.М., Баннова А.В., Рукомойников А.А. Анализ качества выпускаемых изделий из полимеров и композитов // В сборнике: Актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2023. С. 114-121.

5. Хакимов Р.М., Баннова А.В., Галиахметов Р.Н. Контроль качества сварных швов и соединений // В сборнике: Актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2023. С. 122-128.

6. Хакимов Р.М., Баннова А.В., Нурутдинов А.А. Контроль качества продукции на производстве автопластика // В сборнике: Актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2023. С. 134-138.

7. Басырова Р.Р., Баннова А.В., Бакиева Г.Р., Хакимов Р.М. Оценка стоимости разработки и внедрения мобильного приложения // сборнике: Актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2023. С. 36-42.

8. Басырова Р.Р., Баннова А.В., Бакиева Г.Р., Хакимов Р.М. Анализ деятельности предприятия ИП «Кофе у камина» с точки зрения удовлетворённости потребителей // В сборнике: Актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2023. С. 43-48.

9. Габдрахманова Н.И., Баннова А.В., Бакиева Г.Р., Хакимов Р.М. Роль стандартизации в экономике // В сборнике: Актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2023. С. 49-56.

10. Кадырбердина Ю.А., Баннова А.В., Бакиева Г.Р., Хакимов Р.М. Методика оценки метрологического обеспечения // сборнике: Актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2023. С. 57-65.

11. Кадырбердина Ю.А., Баннова А.В., Бакиева Г.Р., Хакимов Р.М. Автоматизация измерительных процессов. методика расчёта эффективности // В сборнике: Актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2023. С. 66-72.

12. Кадырбердина Ю.А., Баннова А.В., Бакиева Г.Р., Хакимов Р.М. Разработка методики оценки метрологического обеспечения и предложений по улучшению качества метрологического обеспечения на АО «УАПО» // В сборнике: Актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2023. С. 73-82.

13. Бакиров И.Р., Баннова А.В., Бакиева Г.Р., Хакимов Р.М. Измерения микрометромтрами // В сборнике: Актуальные вопросы аппаратостроения.

Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2023. С. 30-35.

14. Янбаева А.Д., Баннова А.В., Бакиева Г.Р., Хакимов Р.М. Газоанализаторы // В сборнике: Актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2023. С. 107-113.

© Гурьянов Н.А., Баннова А.В., 2025.

УДК 621.317.088

Н.А. ГУРЬЯНОВ

yogenenko@yandex.ru

Науч. руковод. – к.х.н., доц. А.В. БАННОВА

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ. МЕТОДИКА РАСЧЁТА ЭФФЕКТИВНОСТИ

Аннотация: развитие экономики и производства невозможно без автоматизации всех измерительных процессов. Дана методика расчёта эффективности при внедрении новых средств измерений.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, измерения, автоматизация измерительных процессов, качество, менеджмент качества.

Для улучшения качества измерений и метрологического обеспечения в целом одной из основных задач является получение требуемой точности, правильности и достоверности измерений [1]. Для достижения цели ранее нами были предложены расчёты по оценке текущей экономической ситуации в направлении развития рынка материалов [2], методика оценки рисков по безопасности труда при создании новых материалов [3], оценка всего метрологического обеспечения при производстве изделий из композиционных материалов [4], были изучены инструменты управления качеством при производстве композиционных материалов [5], проведена оценка рисков микро- и минидефектов при производстве материалов [6], определены особенности внутреннего аудита системы менеджмента качества на промышленном предприятии и разработаны корректирующие мероприятия [7-9], применена система 5 S для уменьшения потерь и улучшения качества выпускаемой продукции на предприятии [10], проведено улучшение качества продукции завода пластмассовых изделий [11], а также инструменты управления качеством в производстве продукции (работ и услуг) и оценка эффективности их внедрения [12], такие как резьбовые калибр-

пробки как инструмент контроля качества в аппаратостроении [13], микрометрический нутромер для абсолютных измерений глубин отверстий [14], измерение наружных поверхностей относительным методом [15] и измерение и контроль показателей точности зубчатого колеса нормалеммером [16].

Автоматизация измерительных процессов – важная часть метрологического обеспечения производства. Дана методика расчёта эффективности при внедрении новых средств измерений [17].

С целью устранения недостатков при оценке метрологического обеспечения:

- 1) автоматизация процесса измерения, внедрение ИИС, АСКУЭ;
- 2) ревизия и оптимизация парка контрольного, измерительного и испытательного оборудования (КИИО), в соответствии с принципом «необходимо и достаточно»;

- 3) совершенствование процедур поверки, калибровки, ремонта оборудования предлагаем внедрить автоматизированную систему калибровки измерительных каналов контролёров давления (АСК ИК) стоимостью 1 700 000 руб.



Рис 1. Автоматический калибратор-контролёр давления «АГК».

Автоматическое создание и обслуживание измерительных преобразователей (датчиков) давления, манометров на всех этапах производства и испытаний, а также высокоточное измерение давления. Поверка и калибровка СИ избыточного и абсолютного давления в автоматическом и полуавтоматическом режиме: калибраторы давления, датчики, эталонные и технические манометры с классом точности 0,02 и грубее в диапазоне 0...100 МПа.

До того, как внедрили АСК ИК, процесс калибровки проводился вручную.

Состав бригады был следующий: Ч = 4 оператора, работа в 2 смены ($n_{см} = 2$), длительность смены $t_{см} = 8$ ч., процесс выполнения работы Д = 72 ч.

Количество отработанных часов на одного оператора в месяц:

$$t_{10} = 176 \text{ ч.}$$

Среднемесячная заработная плата одного оператора:

$$ЗП_0 = 25\,000 \text{ руб.}$$

В АСК ИК работает один специалист, выполняющий необходимые операции при следующих условиях:

- 1) количество часов в месяц на одного специалиста:

$$t_{1с} = 176 \text{ ч;}$$

- 2) предварительные работы:

$$t_{под.} = 2 \text{ ч;}$$

- 3) прямое подключение эталона из одного шкафа управления в другой:

$$t_{\text{лпз}} = 0,2 \text{ ч}$$

(всего шкафов $N_{\text{шк}} = 10$ шт., в каждом шкафу $N_{\text{к}} = 160$ ИК);

4) длительность калибровки одного канала:

$$t_{\text{лк}} = 10 \text{ с};$$

5) время для оценки результатов работы АСК:

$$t_{\text{ор}} = 1,6 \text{ ч};$$

6) Среднемесячная заработная плата одного специалиста:

$$ЗП_{\text{с}} = 50\,000 \text{ руб.}$$

Сравнительные эксплуатационные затраты на калибровку измерительных каналов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительные эксплуатационные затраты на калибровку измерительных каналов, руб.

Наименование статьи	Обозначение	Величина	
		Базовая СК ИК	Новая АСК ИК
1. Фонд заработной платы	ФЗП	654 500	28 523
2. Единый социальный налог на ФЗП	ЕСН	196 350	8 557
3. Затраты на ремонт	$C_{\text{рем.}}$	3 560	2 140
4. Стоимость энергии	$C_{\text{эн.}}$	8 000	4 000
5. Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам.}}$	42 840	14 167 руб.
6. Прочие затраты	$C_{\text{пр.}}$	10 000	5 000
ИТОГО:		915 250	62 387

Сопутствующие капитальные затраты на базовые и новые СИ представлены следующим образом:

Стоимость транспортировки СИ:

$$K_{\text{тр.}}^{\text{б}} = 3\,600 \text{ руб.}; K_{\text{тр.}}^{\text{н}} = 4\,400 \text{ руб.};$$

Затраты на монтаж СИ:

$$K_{\text{мон.}}^{\text{б}} = 6\,800 \text{ руб.}; K_{\text{мон.}}^{\text{н}} = 11\,200 \text{ руб.};$$

Затраты вспомогательного оборудования для настройки СИ:

$$K_{\text{нал.}}^{\text{б}} = 5\,700 \text{ руб.}; K_{\text{нал.}}^{\text{н}} = 6\,900 \text{ руб.};$$

Нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений:

$$E_{\text{н}} = 0,2.$$

Сравнительные эксплуатационные затраты на калибровку измерительных каналов, руб.:

1. Расчёт ФЗП при ручной калибровке.

Срок выполнения работ, выполняемых командой:

$$t_{бр} = Ч * Д * t_{см} * n_{см} = 4 * 72 * 8 * 2 = 4608 \text{ ч.}$$

ФЗП для оплаты работы бригады:

$$\Phi ЗП_{бр} = \frac{t_{бр}}{t_{1о}} * ЗП_o = \frac{4608}{176} * 25\,000 = 654\,500 \text{ руб.}$$

2. Расчёт ФЗП при АСК ИК.

Срок выполнения работ, выполняемых специалистом:

$$t_c = t_{под.} + N_{шк.} * t_{1пз} + N_{шк.} * N_k * t_{1к} + t_{ор} = 2 + 10 * 0,2 + 10 * 160 * \frac{10}{3600} + 1,6 = 10,04 \text{ ч.}$$

ФЗП для оплаты специалиста:

$$\Phi ЗП_c = \frac{t_c}{t_{1с}} * ЗП_c = \frac{10,04}{176} * 50\,000 \text{ руб.} = 28\,523 \text{ руб.}$$

3. Расчёт ЕСН:

$$\text{ЕСН базовой СК ИК: } 0,3 * 654\,500 \text{ руб.} = 196\,350 \text{ руб.}$$

$$\text{ЕСН новой СК ИК: } 0,3 * 28\,523 \text{ руб.} = 8\,557 \text{ руб.}$$

4. Рассчитаем стоимость энергии:

$$C_{эн}^б = 2000 \text{ Вт} * 4 \text{ руб.} = 8000 \text{ руб.}$$

$$C_{эн}^н = 1000 \text{ Вт} * 4 \text{ руб.} = 4000 \text{ руб.}$$

5. Приобрели оборудование стоимостью 1 700 000 руб., средний срок службы – 10 лет.

Определим ежемесячные амортизационные отчисления:

Сделаем расчет годовой амортизации:

$$100 \% / 10 \text{ лет} = 10 \%$$

В результате, 10 % от стоимости оборудования вычитается из стоимости оборудования каждый год, с полной амортизацией через 10 лет.

Определим годовую амортизацию:

$$1\,700\,000 \text{ руб.} * 10 \% = 170\,000 \text{ руб.,}$$

Это означает, что 170 000 руб. будут учитываться в качестве амортизации каждый год, покрывая полную стоимость покупки оборудования в течение 10 лет.

Рассчитаем ежемесячную сумму амортизационных отчислений:

$$170\,000 / 12 \text{ мес.} = 14\,167 \text{ руб.}$$

6. Эксплуатационные расходы на ручную калибровку в базовой версии:

$$C_{эб} = \Phi ЗП_{бр} + ЕСН_{бр} + C_{рем.} + C_{эн.} + C_{ам} + C_{пр.} = (654\,500 + 196\,350 + 3\,560 + 8\,000 + 42\,840 + 10\,000) \text{ руб.} = 915\,250 \text{ руб.}$$

Эксплуатационные расходы на калибровку новой АСК ИК:

$$C_{эн} = \Phi ЗП_c + ЕСН_c + C_{рем.} + C_{эн.} + C_{ам} + C_{пр.} = (28\,523 + 8\,557 + 2\,140 + 4\,000 + 14\,167 + 5\,000) \text{ руб.} = 62\,387 \text{ руб.}$$

7. Сопутствующие капитальные вложения при использовании:

- базового СИ:

$$K_{б} = K_{тр}^б + K_{мон}^б + K_{нал}^б = (3\,600 + 6\,800 + 5\,700) \text{ руб.} = 16\,100 \text{ руб.}$$

- нового СИ:

$$K_{н} = K_{тр}^н + K_{мон}^н + K_{нал}^н = (4\,400 + 11\,200 + 6\,900) \text{ руб.} = 22\,500 \text{ руб.}$$

8. Годовая экономическая выгода от ресурсосбережения у потребителя Си выглядит следующим образом:

$$\mathcal{E}\Phi_{\text{год}} = (C_{\text{эб}} - C_{\text{эн}}) - E_{\text{н}} * (K'_{\text{н}} - K'_{\text{б}}) = (915\,250 - 62\,387) - 0,2 * (22500 - 16\,000) = 851\,563 \text{ руб.}$$

9. В итоге экономическая эффективность составит:

$$\mathcal{E}_{\text{б}} = \frac{851\,563 \text{ руб.}}{915\,250 \text{ руб.}} \cdot 100 \% = 93\%.$$

$$\mathcal{E}_{\text{н}} = \frac{851\,563 \text{ руб.}}{62\,387 \text{ руб.}} \cdot 100 \% = 1\,364\%$$

Таблица 2. Экономическая эффективность для базовой СК ИК Э_б и новой АСК ИК Э_н.

Экономическая эффективность	
Базовая СК ИК	Новая АСК ИК
93%	1 364%

Сравнив полученные результаты Э_б и Э_н, можно сделать вывод, что внедрив автоматизированную систему калибровки измерительных каналов контроллеров давления, экономическая эффективность вырастит в 14 раз.

Таблица 3. Расчёт прибыли по годам.

Затраты, руб.	Прибыль, руб.		
	1 год	2 год	3 год
1 700 000	- 848 437	- 3 126	854 689

Таким образом, при внедрении автоматического калибратора-контроллера давления «АГК» срок окупаемости составит 3 года.

Библиографический список

1. Басырова Р.Р., Баннова А.В., Бакиева Г.Р., Хакимов Р.М. Проведение измерений абсолютным методом // Актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2022. С. 129-136.

2. Бакиева Г.Р., Баннова А.В. Текущая экономическая ситуация и направления развития рынка строительных (керамических) материалов // В сборнике: Актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2022. С. 170-174.

3. Баннова А.В., Бакиева Г.Р., Хакимов Р.М. Разработка методики «Оценка рисков по безопасности труда при создании новых материалов» // В сборнике: Актуальные вопросы современного материаловедения. Материалы VIII Международной молодежной научно-практической конференции. Уфа, 2021. – С. 22-28.

4. Аминова Д.Ф., Хакимов Р.М., Баннова А.В., Бакиева Г.Р. Метрологическое обеспечение при производстве изделий из композиционных материалов // В сборнике: Современные технологии композиционных материалов. Материалы VI Всероссийской научно-практической молодежной конференции с международным участием. Уфа, 2021. – С. 20-24.

5. Шигапова А.Ф., Хакимов Р.М., Баннова А.В., Бакиева Г.Р. Инструменты управления качеством при производстве композиционных материалов // В сборнике: Современные технологии композиционных материалов. Материалы VI Всероссийской научно-практической молодежной конференции с международным участием. Уфа, 2021. – С. 173-176.

6. Басырова Р.Р., Баннова А.В., Бакиева Г.Р., Хакимов Р.М. Оценка рисков микро- и минидефектов при производстве материалов // В сборнике: Современные технологии композиционных материалов. Материалы VII Всероссийской научно-практической молодежной конференции с международным участием. Отв. редактор У.Ш. Шаяхметов. Уфа, 2022. С. 33-37.

7. Хакимов Р.М., Баннова А.В., Нурутдинов А.А. Особенности внутреннего аудита системы менеджмента качества // В сборнике: Актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2022. С. 142-146.

8. Хакимов Р.М., Баннова А.В., Галияхметов Р.Н. Организация и проведение внутреннего аудита СМК на промышленном предприятии // В сборнике: актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2022. С. 147-150.

9. Хакимов Р.М., Баннова А.В., Тулькубаев Р.З., Исхаков Я.Р. Внутренний аудит системы менеджмента качества и разработка корректирующих мероприятий на АО «УАП «ГИДРАВЛИКА» // В сборнике: Актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2022. С. 151-154.

10. Хакимов Р.М., Баннова А.В., Хафизова Ю.А. Применение системы 5 S для уменьшения потерь и улучшения качества выпускаемой продукции на предприятии // Актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2022. С. 155-157.

11. Бакиева Г.Р., Баннова А.В., Хакимов Р.М. Улучшение качества продукции завода пластмассовых изделий // В сборнике: актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2022. с. 85-90.

12. Бакиева Г.Р., Баннова А.В. Инструменты управления качеством в производстве продукции (работ и услуг) и оценка эффективности их внедрения // StudNet. 2022. Т. 5. № 2.

13. Рузанова А.А., Баннова А.В., Бакиева Г.Р., Хакимов Р.М. Резьбовые калибр-пробки как инструмент контроля качества в аппаратостроении // В сборнике: актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2022. С. 106-112.

14. Кадырбердина Ю.А., Баннова А.В., Бакиева Г.Р., Хакимов Р.М. Микрометрический нутромер для абсолютных измерений глубин отверстий // Актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2022. с. 113-119.

15. Габдрахманова Н.И., Басырова Р.Р., Баннова А.В., Бакиева Г.Р., Хакимов Р.М. Измерение наружных поверхностей относительным методом //

Актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2022. с. 120-128.

16. Сайпанова К.Э., Баннова А.В., Бакиева Г.Р., Хакимов Р.М. Измерение и контроль показателей точности зубчатого колеса нормалеммером // В сборнике: Актуальные вопросы аппаратостроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Уфа, 2022. С. 97-105.

17. Голиков Ю.А. Экономика метрологического обеспечения // Учебно-методическое пособие. – г. Новосибирск: СГГА, 2009. – 180 с.

© Гурьянов Н.А., Баннова А.В., 2025.

УДК 006.91:004.9

В.Ю. ИВАНОВА

aexcreme@yandex.ru

Науч. руковод. – старший преподаватель Е.А. ФИЛОНИНА

Уфимский университет науки и технологий

СОДЕРЖАНИЕ И СТРУКТУРА СМАРТ-СТАНДАРТА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ И СТАНДАРТИЗАЦИИ

Аннотация: исследование фокусируется на концепции, содержании и структуре смарт-стандартов, которые представляют собой инновационное решение для преодоления трудностей, связанных с цифровизацией. В статье проводится сравнение смарт-стандартов с обычными документами и объясняется их ключевая роль: они позволяют разным компьютерным программам работать совместно и обрабатывать информацию автоматически, без участия человека.

Ключевые слова: смарт-стандарт; атрибут; контейнер данных; машиночитаемость; информационная модель.

Смарт-стандарт представляет собой переход к новому этапу развития стандартизации, позволяющему преодолеть ограничения статических текстовых документов. Согласно определению в ПНСТ-864, ключевая характеристика такого стандарта – это его представление в цифровом виде, который может быть прочитан и понят машиной. Данное свойство позволяет автоматизировать работу с документами. Стандарт перестает быть просто справочным текстом, который нужно читать человеку. Он превращается в работающий цифровой инструмент, который программы могут использовать самостоятельно для расчетов и проверок.

Концепция смарт-стандартизации основывается на следующих принципах:

Точность и однозначность. Требования должны быть сформулированы так, чтобы их нельзя было понять по-разному. И специалист, и компьютерная

программа должны считывать один и тот же смысл – это помогает избежать ошибок при работе;

- Модульность. Процесс разделения стандарта на логически связанные части (модули) обеспечивает возможность их многоразового использования, гибкого обновления и настройки структуры под определенные нужды;

- Автоматическое исполнение. Содержание документа упорядочивается таким образом, чтобы обеспечить его применение в автоматизированных процессах (проверка соответствия, генерация кода);

- Контроль версий. Необходимо фиксировать любое изменение в документе. Это гарантирует, что мы всегда работаем с актуальными данными, ничего не потеряли и не нарушили работу системы на всех этапах;

- Совместимость. Возможность свободно обмениваться данными и работать совместно с другими стандартами и цифровыми моделями в общей системе.

Чтобы уточнить терминологию, используемую в ПНСТ-864, приведем список ключевых понятий, дополнив их прикладными примерами (см. Табл. 1).

Таблица 1

Термины структуры смарт-стандарта

Термин	Определение	Пример использования
Атрибут	Свойство объекта, определяющее ее качественные или количественные параметры в цифровой среде стандарта.	В системах управления трафиком для объекта класса «Участок дороги» атрибут «Лимит скорости» принимает дискретные значения (напр., «60 км/ч»), а для объекта «Светофор» – атрибут состояния («Красный» / «Зеленый»).
Контейнер данных	Набор связанных сведений, который выполняет транспортную функцию в рамках информационной модели.	В авиастроении контейнер «Свойства композита» объединяют атрибуты: модуль упругости, плотность, температура размягчения. Данные записаны так, что системы моделирования понимают их сразу, без необходимости ручного ввода или перевода.
Информационная модель	Совокупность данных, описывающая структуру и поведение предметной области, которая ориентируется на машинную обработку.	В системах управления производством (PLM) эта модель позволяет передавать инженерные данные (геометрия, допуски, технологии) на всех этапах ЖЦ изделия.

Суть SMART-стандарта заключается в том, что он понятен машине. Информация в документе имеет специальную разметку, благодаря которой компьютерные системы могут не просто показывать текст на экране, но и анализировать его, выделяя нужные данные и взаимосвязи. Это обеспечивает точность: любой элемент – будь то правило или метод испытания – обеспечен скрытым описанием (метаданными). Это позволяет системе безошибочно понимать назначение параметров, например, отличать «рабочий допуск» от «предельного отклонения».

По своей структуре SMART-стандарт напоминает конструктор из взаимосвязанных модулей. Такое разделение упрощает создание новых документов: их можно собирать из уже готовых и проверенных частей. Все элементы связаны активными ссылками, которые объединяют требования и нормы в единую информационную сеть, давая пользователю полный контекст по любому вопросу.

Ключевой момент – перевод требований на язык логики и математических моделей. Это позволяет автоматически проверять документацию на ошибки и противоречия еще на этапе её создания. Глубокое взаимодействие с заводскими программами (системами проектирования и управления) превращает обычный текст в рабочие данные, которые напрямую используются в производстве. Кроме того, смарт-стандарты умеют подстраиваться под задачи: они могут отображаться в виде текста, программного кода или 3D-модели, а встроенная система контроля версий гарантирует, что используется только актуальная информация.

Библиографический список

1. ПНСТ 864 – 2023. Умные (SMART) стандарты. Общие положения. – Введ. 2023 – 11 – 01. – Москва : Стандартиформ, 2023. – 20 с.
2. ГОСТ Р 1.0 – 2012. Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения. – Введ. 2013 – 01 – 01. – Москва : Стандартиформ, 2013. – 20 с.
3. ГОСТ Р 1.2 – 2016. Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила разработки, утверждения, обновления, отмены и применения. – Введ. 2017 – 01 – 01. – Москва : Стандартиформ, 2016. – 35 с.

© Иванова В.Ю., 2025

УДК 53.089.6

Я.А. КЛОКОВА

klovayana05@mail.ru

Науч. руковод. – старший преподаватель А.Ф. САФИНА

Уфимский университет науки и технологий

МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТЬ ПРИ КАЛИБРОВКЕ ИНДИКАТОРА ТИПА ИЧ 2

Аннотация: в данной работе рассмотрены теоретические основы поверки, калибровки и метрологической прослеживаемости. Разработана методика калибровки индикатора типа ИЧ 2, проведена оценка его основных метрологических характеристик и расчет расширенной неопределенности измерений.

Ключевые слова: калибровка, поверка, индикатор ИЧ 2, неопределенность измерений, метрологическая прослеживаемость, средство измерений.

Обеспечение единства измерений является одной из ключевых задач в современной промышленности. Основой для этого служат такие процедуры, как поверка и калибровка средств измерений.

Целью работы является исследование метрологической прослеживаемости на примере калибровки индикатора типа ИЧ 2.

Для достижения цели были поставлены такие задачи:

- изучить общие теоретические сведения в области поверки, калибровки и метрологической прослеживаемости;
- разработать методику калибровки индикатора типа ИЧ 2;
- провести калибровку индикатора и оценить расширенную неопределенность результатов;
- проанализировать обеспечение метрологической прослеживаемости в процессе калибровки.

Состояние единства измерений характеризуется тем, что их результаты выражаются в признанных единицах и не превышают допустимых отклонений по точности. Законодательная метрология, определяющая обязательные технические и правовые нормы, служит основой для поддержания этого единства. Основной механизм обеспечения единства – это передача эталонных значений единиц величин рабочим измерительным средствам посредством поверки и калибровки.

Основными нормативными документами в области калибровки средств измерений являются:

- ГОСТ Р 8.879-2014. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению;

- ГОСТ Р 8.800-2015. Государственная система обеспечения единства измерений. Основные положения;
- ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий;
- ГОСТ Р 577-68. Индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм. Технические условия.

Калибровка – совокупность операций, устанавливающих соотношение между значением величины, полученным с помощью данного средства измерения, и соответствующим значением величины, определенным с помощью эталона, с целью определения действительных метрологических характеристик прибора. Калибровка носит добровольный характер и результаты оформляются сертификатом о калибровке. Важной составляющей калибровки средств измерений является оценка неопределенности измерений.

Неопределенность измерений – параметр, связанный с результатом измерения, характеризующий рассеяние значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине.

Выделяют два типа оценок неопределенности:

- Тип А. Оценка, основанная на статистическом анализе серии наблюдений;
- Тип В. Оценка, полученная не статистическими методами (например, на основе данных из сертификатов о калибровке).

При калибровке оценка неопределенности является неотъемлемой частью процесса, она включает:

- выявление источников неопределенности;
- количественную оценку неопределенности;
- расчет суммарной и расширенной неопределенности;
- представление результатов.

Проведение цепи калибровок позволяет оценить метрологическую прослеживаемость результатов измерений.

Метрологическая прослеживаемость – это свойство результата измерения, в соответствии с которым результат может быть соотнесен с основой для сравнения через документированную непрерывную цепь калибровок, каждая из которых вносит вклад в неопределенность измерений.

Отечественный подход регулируется Государственной эталонной базой РФ, прослеживаемость обеспечивается через обязательную поверку средства измерений, которая документально связывает его с Государственным первичным эталоном.

Зарубежный подход регулируется международными стандартами. Акцент делается на калибровке аккредитованными лабораториями, которые обеспечивают прослеживаемость к национальным или международным эталонам. Ключевым документов является сертификат о калибровке, содержащий результаты и оценку неопределенности.

В данной работе рассматривается проведение калибровки индикатора часового типа ИЧ 2.

Индикатор часового типа ИЧ 2 – механический измерительный прибор, который позволяет выполнять относительные измерения линейных размеров. Его основные функции включают проверку биения, параллельности и плоскостности поверхностей. Широко применяется в машиностроении, металлообработке и приборостроении.

принцип действия основан на преобразовании линейного перемещения измерительного стержня во вращательное движение стрелки с помощью зубчатой передачи. Метрологические характеристики «Индикатор часового типа ИЧ 2» представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные метрологические характеристики

Диапазон измерений	0-10 мм
Цена деления	0,01 мм
Присоединительный диаметр гильзы	8h8 мм
Измерительное усилие	1,5 Н
Класс точности	2

В процессе выполнения данной работы была разработана методика калибровки на основе нормативных документов ГОСТ Р 8.879-2014, ГОСТ 577-68 и МИ 2192-92.

Условия проведения калибровки:

- температура: $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$;
- акклиматизация оборудования: не менее 2 часов;
- относительная влажность: 50-60%.

Для проведения калибровки индикатора часового типа ИЧ 2 применяют следующие средства калибровки:

1. Эталоны длины:
 - Набор концевых мер длины 2-ого разряда;
 - Диапазон мер: от 1 до 10 мм.
2. Вспомогательное оборудование:
 - Стойка или установка для крепления индикатора;
 - Прибор для измерения усилия.
3. Контрольно-измерительные приборы:
 - Измерительный микроскоп или лупа для контроля штрихов шкалы;
 - Щупы для контроля расстояния между стрелкой и циферблатом.
4. Вспомогательные средства:
 - Чистящие средства для обработки поверхностей;
 - Этиловый спирт для обезжиривания.

Все средства калибровки должны быть поверены и иметь действующие свидетельства о поверке.

Проведение калибровки индикатора часового типа ИЧ 2 состоит из следующих этапов:

1. Внешний осмотр: проверяется состояние корпуса, стекла, стрелки, циферблата и измерительного наконечника. Отсутствие механических повреждений и коррозии.

2. Опробование: проверяется плавность хода измерительного стержня, возврат стрелки к нулевой отметке, работа механизма подстройки.

3. Определение метрологических характеристик:

а) Определение измерительного усилия: измеряется усилие на измерительном стержне в различных точках диапазона;

б) Определение погрешности показаний: с помощью концевых мер длины проверяют погрешность на основных отметках шкалы;

в) Определение вариаций показаний: проверяют разность показаний при многократном подводе измерительного наконечника к одной и той же мере;

г) Проверка взаимодействия деталей: контролирует влияние бокового нажима на стержень показания индикатора.

4. Оформление результатов: все данные вносят в протокол калибровки, выносится заключение о пригодности индикатора к применению.

Оценка метрологической прослеживаемости требует проведения цепи калибровок средств измерений вышестоящих по ступени и оценки неопределенности результатов измерений. Данная работа в настоящее время продолжается.

Библиографический список

1. МИ 2192-92. ГСИ. Индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм. Методика поверки, 1 июля 1992 г. 11 с.

2. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий, 1 сентября 2019 г. 32 с.

3. РМГ 29-2013. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения, 1 января 2015 г. 60 с.

4. ГОСТ Р 8.879-2014. ГСИ. Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению, 1 сентября 2015 г. 12 с.

© Клокова Я.А., 2025

УДК 53.088

Я.А. КЛОКОВА

klokovayana05@mail.ru

Науч. руковод. – старший преподаватель А.Ф. САФИНА

Уфимский университет науки и технологий

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ НА ПРИМЕРЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Аннотация: в данной работе проведена оценка сходимости и воспроизводимости результата измерений сопротивления резистора номиналом 100 Ом с использованием мультиметра МУ-68 и мультиметра-калибратора АКПП-2201. Измерительный процесс проверен на стабильность, смещение и линейность.

Ключевые слова: измерение, сопротивление, резисторы, качество, точность, стандарты.

Точные и надежные измерения играют ключевую роль в производстве и контроле качества продукции. В частности, качество измерения сопротивления критически важно, поскольку напрямую влияет на результаты исследований и работоспособность электрических схем.

Важность оценки процесса измерения сопротивления резистора подчеркивается рядом ключевых аспектов:

- получение точных и достоверных данных. Неправильная интерпретация показаний или неправильное отношение к учету внешних факторов могут привести к неправильным измерениям и ложным выводам.
- обеспечение надежности и бесперебойной работы электрических систем и компонентов. Точное определение сопротивления резистора является ключевым фактором для обеспечения надежности и стабильности работы электронных устройств.
- снижение влияния случайных ошибок на конечные результаты измерений. Для этой цели используется статистический анализ полученных данных.
- внедрение автоматизации в процессы измерений. Это позволяет улучшить режим работы резистора при мониторинге и проводить статистическую обработку экспериментальных данных, что в конечном итоге способствует повышению точности измерений.

Целью работы является анализ качества процесса измерения сопротивления резисторов и определение уровня точности и надежности методов измерения сопротивления.

Для достижения этой цели были определены следующие задачи:

- провести обзор литературы в области качества процесса измерения;

- изучить нормативные документы по оценке качества измерительных процессов;
- измерение сопротивления резисторов для оценки качества измерительного процесса;
- проанализировать полученные результаты.

Основные нормативные документы в области качества измерительных процессов:

- ГОСТ Р 58046-2017. Системы менеджмента качества предприятий авиационной, космической и оборонной отраслей промышленности. Перспективное планирование качества продукции. Руководство по анализу процессов измерений

- ГОСТ Р 51814.5-2005 Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов.

- ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений. Стандарт распространяется на методы измерений непрерывных (в смысле принимаемых значений в измеряемом диапазоне) величин, дающие в качестве результата измерений единственное значение.

- ГОСТ Р ИСО 10012-2008. Менеджмент организации. Системы менеджмента измерений. Требования к процессам измерений и измерительному оборудованию. Данный стандарт устанавливает общие требования к обеспечению и демонстрации соответствия метрологическим требованиям и нормам процессов измерений и измерительного оборудования.

Качество – это набор характеристик измерений, которые определяют их точность, надежность и пригодность для данной цели.

В данной работе объектом исследования является измерение сопротивления резисторов с номинальным значением 100 Ом и предельными отклонениями $\pm 5\%$. Резисторы предназначены для преобразования тока в напряжение и наоборот, а также для ограничения тока, поглощения электрической энергии и выполнения других функций по перераспределению электрической энергии. Сопротивление можно измерить с помощью следующих измерительных приборов: мультиметр; омметр; электронные измерительные приборы (такие как LCR-метр); калибраторы сопротивления. В данной работе для измерений использовались приборы МУ-68 и АКИП-2201. Оба прибора предназначены для контроля и оценки измерительных процессов, но имеют различия в функциональности и точности. Основные метрологические характеристики приборов представлены в таблице 1

Основные метрологические характеристики

Характеристика	МУ-68	АКИП-2201
Разрешение	0,1 Ом	0,1 Ом
Основная погрешность	$\pm 0,8\%$ от измеряемого значения	$\pm 0,6\%$ от измеряемого значения
Диапазон измерений	0,1 Ом - 10 МОм	1 Ом - 100 кОм
Метод измерений	Ручной	Ручной
Температурная стабильность	$\pm 0,05\%/^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,1\%/^{\circ}\text{C}$
Время измерения	3-5 сек	<1 сек

К основным показателям качества измерений относится:

- Точность. Этот аспект характеризует степень близости ошибок в измерениях к нулю.
- Правильность. Этот показатель отражает, насколько хорошо полученные результаты соответствуют истинному значению измеряемой величины.
- Сходимость. Этот параметр показывает, насколько близки друг к другу результаты, полученные одним и тем же прибором и оператором в одинаковых условиях.
- Воспроизводимость. Этот критерий показывает степень схождения результатов измерений, которые были получены в разных условиях: в разное время, в разных местах и с использованием разных методов и инструментов измерения.

Анализа качества измерительного процесса в соответствии с ГОСТ Р 51814.5-2005 необходимо провести в следующем порядке:

1. Сначала измерительный процесс проверяют на стабильность. Для этого используют контрольные карты Шухарта (карты средних арифметических значений и размахов). В случае нестабильности процесса необходимо провести анализ, выяснить причины изменчивости и устранить их. В случае стабильности измерительного процесса переходят к следующему этапу.

2. На втором этапе оценивают смещение процесса, т.е. определяют, насколько результаты измерений отклоняются от истинного значения. В случае существенности смещения его учитывают при дальнейшей обработке. Здесь же определяют линейность смещения с помощью коэффициента корреляции.

3. На третьем этапе оценивают сходимость и воспроизводимость процесса, т.е. проверяют насколько близки друг другу результаты повторных измерений, полученные в одних и тех же условиях, выполненных одним и тем же средством

измерения, методом, оператором и разными средствами измерений, методами, операторами.

Процесс анализа качества измерения резисторов включает:

1. Проверка процесса измерения на стабильность. Для этой цели была отобрана выборка общим объемом 80 резисторов (20 выборок по 4 изделия в каждом). На основе измеренных данных были построены контрольные карты средних арифметических значений и интервалов. Анализ контрольных карт показал не стабильность процесса измерения сопротивления по обеим характеристикам.

2. Определение смещения процесса измерения, а также линейность смещения. Для решения данной задачи было выполнено десять повторных измерений. На основе полученных данных в процессе измерения было рассчитано относительное смещение, которое составило для МУ-68 – 2,4 %. Это значение меньше рекомендуемого предела равного 10%, а для АКИП-2201 – 38 %, что больше рекомендуемого предела. При оценке линейности смещения также было проведено 10 повторных измерений на 5 образцах. В результате был рассчитан относительный коэффициент корреляции, равный 0,00118 для МУ-68 и 0,007 для АКИП-2201. Значение коэффициента указывает на то, что линейная связь между величинами практически отсутствует, поэтому данный результат не учитывается в дальнейших расчетах.

3. Определение сходимости и воспроизводимости результатов измерений методом средних и размахов. При участии трех операторов было измерено 10 образцов. В результате обработки данных приемлемость процесса измерения составила 40% для МУ-68, а для АКИП-2201 составила 47%, что свидетельствует о том, что процесс нуждается в улучшении. Так же был определен процент полной изменчивости параметра образца: для МУ-68 составила 91,32%, а для АКИП-2201 составила 88,13%. Результаты изменчивости, зависимой от операторов, составила для МУ-68 – 14,74%, а для АКИП-2201 – 25,77%, что свидетельствует о значительном влиянии операторов на измерительный процесс.

Таким образом, проведенный анализ выявил нестабильность исследуемых резисторов, что проявилось в повышенной относительной изменчивости результатов ($PV=7,558\%$ для МУ-68 и $PV=13,316\%$ для АКИП-2201).

Библиографический список

1. ГОСТ Р 58046-2017. Системы менеджмента качества предприятий авиационной, космической и оборонной отраслей промышленности. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, 29 декабря 2017. 40 с.

2. ГОСТ Р 51814.5-2005. Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов. М.: Издательство стандартов, 2005. 54 с.

3. ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Постановлением Госстандарта России, 23 апреля 2002. 97 с.

4. ГОСТ Р ИСО 10012-2008. Менеджмент организации. Системы менеджмента измерений. Требования к процессам измерений и измерительному оборудованию. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, 18 декабря 2008. 26 с.

5. ISO/IEC Guide 99:2007. Международный словарь по метрологии. Основные и общие понятия и соответствующие термины. М.: Изд-во «ISO/IEC», 2007. 90 с.

© Клокова Я.А., 2025

УДК 006.065

Е.В. КУЗНЕЦОВА

Fatigue@yandex.ru

Науч. руковод. – кандидат техн. наук А.А. ЛОСКУТНИКОВ

Уфимский университет науки и технологии

ОСОБЕННОСТИ СЕРТИФИКАЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ – РАЗРАБОТЧИКОВ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Аннотация: в статье проводится анализ действующей системы сертификации разработчиков авиационной техники гражданского назначения в Российской Федерации (РФ) с акцентом на нормативно-правовую базу, инфраструктурные и организационные требования, а также практические особенности сертификационной деятельности. Особое внимание уделено проблемам российских предприятий малого и среднего бизнеса, связанным с отсутствием сертифицированной (аккредитованной) испытательной базы и административными барьерами. А также предлагаются методические рекомендации для эффективной подготовки к процедуре сертификации.

Ключевые слова: сертификация авиационной техники, разработчик авиационной техники, Росавиация, нормативно-правовая база, авиационная техника гражданского назначения, безопасность полетов.

1. Введение

Сертификация является неотъемлемой частью жизненного цикла авиационной техники и одной из ключевых гарантий её летной годности и безопасности эксплуатации. В условиях растущей зависимости РФ от собственных технологий и импортозамещающих решений роль отечественных разработчиков

гражданской авиационной техники выходит на новый уровень, требуя от них не только инновационной компетенции, но и детального знания регуляторных процедур.

Актуальность темы обусловлена рядом факторов: усилением государственной политики по развитию авиационной промышленности, необходимостью адаптации российских стандартов к международным нормам и объективными технологическими вызовами, связанными с ограничениями на доступ к зарубежным компонентам и технической помощи. В этих условиях анализ особенностей и проблем сертификации предприятий-разработчиков авиационной техники гражданского назначения крайне важен для обеспечения технологического суверенитета.

2. Регулирование в РФ

Система сертификации авиационной техники в РФ регулируется множеством документов, ключевым среди которых является Федеральный закон №60-ФЗ Воздушный кодекс РФ, определяющий общие требования к обеспечению безопасности полетов. На ведомственном уровне основной регламентирующий документ – Федеральные авиационные правила «Сертификация авиационной техники, организаций разработчиков и изготовителей. Часть 21» (ФАП-21), утверждённые приказом Министерства транспорта Российской Федерации.

Сертификации подлежат как сами летательные аппараты и их компоненты (сертификация типа), так и организации, разрабатывающие и производящие их (сертификация разработчика).

Особую роль в процессе сертификации типа играет статус разработчика. Согласно ФАП-21 (пункт 21.15) если Заявитель на получение сертификата типа авиационной техники не имеет статуса разработчика, то заявка на получение сертификата типа должна быть подана одновременно с заявкой на получение сертификата разработчика. Наличие у предприятия лицензии на разработку авиационной техники говорит лишь о том, что организация имеет законное право осуществлять соответствующий вид коммерческой деятельности, в то время как сертификат разработчика подтверждает способность организации выполнять разработку гражданской авиационной техники в рамках области действия сертификата с надлежащим качеством и безопасностью. Наличие сертификата разработчика подтверждает наличие у предприятия компетенций, инфраструктуры и документов, позволяющих участвовать в процедуре сертификации типа. Сертификацию юридических лиц в качестве разработчика авиационной техники выполняет Росавиация в соответствии с ФАП-21 (раздел J).

3. Процесс сертификации Разработчика: пошаговый разбор

Процесс сертификации разработчика состоит из следующих этапов:

- подача заявки в Росавиацию;
- проведение выездной проверки;

- получение сертификата разработчика.

Организация подаёт заявку на получение сертификата разработчика в соответствии с процедурами ФАП-21 (форма и образец заявки размещены на официальном сайте Росавиации www.favt.gov.ru). К заявке, содержащей информацию о заявителе и заявляемую область действия сертификата, прикладываются три основных внутренних нормативных документа организации:

- руководство по качеству – в соответствии с пунктом 21.239 (b) ФАП-21;
- руководство разработчика – в соответствии с пунктом 21.243 (a) ФАП-21;
- руководство по управлению безопасностью полетов (только для разработчиков воздушного судна и компонентов 1 класса (авиационный двигатель, вспомогательный двигатель, воздушный винт, оборудование управления и контроля беспилотного авиационного средства)) – в соответствии с 21.243 (c) ФАП-21.

Росавиация в течение 30 дней с момента получения заявки формирует рабочую группу по проекту сертификации разработчика, запрашивает, при необходимости, дополнительную документацию.

После рассмотрения заявки Росавиация назначает время проведения аудита организации-заявителя. В рамках аудита комиссия Росавиации и Авиарегистр РФ (привлекаемый Росавиацией в качестве экспертного органа для проведения оценки соответствия требованиям ФАП-21) проверяет функционирование процедур, указанных в руководствах, а также соответствие внутренней нормативной документации заявителя требованиям ФАП-21. По результатам аудита выставляются замечания, которые организация должна устранить в срок, установленный в зависимости от степени значимости несоответствия. Для устранения замечаний оформляется план мероприятий, по результатам выполнения которого организацией-заявителем оформляется и направляется в Росавиацию отчет об устранении замечаний с приложением всех откорректированных и вновь разработанных в рамках устранения замечаний внутренних нормативных документов.

После рассмотрения отчета и направленной документации, Росавиацией принимается решение о возможности оформления Сертификата разработчика. Сведения о разработчике и номер выданного одобрительного документа размещаются на официальном сайте Росавиации.

4. Обязанности держателя сертификата разработчика

Разработчик взаимодействует с Росавиацией не только на этапе получения сертификата разработчика, но и на всех стадиях жизненного цикла изделия. Обязанности держателя сертификата разработчика установлены в пункте 21.265 ФАП-21, из которых основные:

- поддержание системы обеспечения качества авиационной техники и системы управления безопасностью полетов в соответствии с внутренними нормативными документами и ФАП-21;

- контроль соответствия сертифицированной авиационной техники требованиям летной годности и охраны окружающей среды и отсутствие небезопасных состояний этой техники;
- классификация модификаций авиационной техники в качестве главных или второстепенных изменений;
- информирование Росавиации о событиях, которые привели или могут привести к угрозе безопасности полетов, обо всех изменениях в системе обеспечения качества авиационной техники и системе управления безопасностью полетов, обеспечение разработки и представление в Росавиацию технических решений для издания Директив летной годности.

Также в целях осуществления государственного контроля за разработчиком в соответствии с требованиями части 7 статьи 37 Воздушного кодекса РФ Росавиация проводит проверки организации-разработчика в соответствии с пунктами 21.257, 21.258 ФАП-21 (с периодичностью один раз в три года).

5. Рекомендации для организаций-разработчиков

Основные требования к разработчику авиационной техники изложены в разделе J ФАП-21. В значительной мере указанные там основные требования конкретизированы в Контрольной карте проверки заявителя в целях получения Сертификата разработчика гражданской авиационной техники на соответствие требованиям ФАП-21 (размещена на официальном сайте Росавиации www.favt.gov.ru). Контрольная карта является основным инструментом контроля соответствия разработчика применимым к нему требованиям. В следствие чего, перед подачей заявки на получение сертификата разработчика рекомендуется провести полный анализ всей внутренней нормативной документации организации на соответствие контрольным картам, заполнить их в целях самоконтроля и выявления недостающих процедур.

6. Выводы

В РФ существуют следующие специфические требования к разработчикам авиационной техники гражданского назначения:

- разработчиком может являться только юридическое лицо вне зависимости от объема разработки;
- разработчик подлежит обязательной сертификации в Росавиации;
- разработчик должен в обязательном порядке взаимодействовать с независимой инспекцией (по факту ей является военное представительство Министерства обороны РФ согласно положению о взаимодействии Росавиации и Управления военных представительств Министерства обороны РФ), что накладывает на «начинающего» разработчика дополнительные обязательства по заключению договора с Министерством обороны РФ;
- разработчик для подтверждения соответствия требованиям ФАП-21 должен иметь собственную испытательную базу, аккредитованную Росавиацией, либо взаимодействовать с крупными испытательными лабораториями, уже имеющими свидетельство об аккредитации;

– следствием дорогостоящих процедур по аккредитации испытательной базы становится рост финансовой нагрузки на разработчика. Стоимость программы сертификации может превышать десятки миллионов рублей, а срок процедуры – 2–3 года.

Система сертификации в РФ является важным элементом обеспечения безопасности эксплуатации авиационной техники. Для эффективной адаптации отечественных компаний к требованиям основного государственного регулятора необходимо развитие инфраструктуры испытаний, совершенствование документооборота и меры господдержки для разработчиков всех уровней.

Библиографический список

1. Федеральный закон № 60-ФЗ Воздушный кодекс Российской Федерации [принят Государственной Думой 19 февраля 1997 г.: одобрен Советом Федерации 5 марта 1997]

2. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 17.06.2019 № 184 «Об утверждении Федеральных авиационных правил "Сертификация авиационной техники, организаций разработчиков и изготовителей. Часть 21»

3. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 13.04.2022 № 135 «Об утверждении требований к сертификационным центрам и испытательным лабораториям, порядка аккредитации сертификационных центров и испытательных лабораторий, требований к реестру аккредитованных сертификационных центров, испытательных лабораторий и порядка ведения такого реестра»

4. Положение о взаимодействии Федерального агентства воздушного транспорта, Управления военных представительств Министерства обороны Российской Федерации, назначаемых и назначенных Независимыми инспекциями в организациях и на предприятиях промышленности Российской Федерации, при разработке, производстве и сертификации авиационной техники гражданского назначения. Федеральное агентство воздушного транспорта (Росавиация): официальный сайт. – Москва, 2025. – <https://favt.gov.ru/dejatelnost-sertificatsia-aviacionnoi-tehniki-jurlitsa-razrabotciki-izgotoviteli/> (дата обращения 03.11.2025).

5. Контрольная карта проверки Заявителя в целях получения (расширения, подтверждения, изменения) Сертификата разработчика гражданской авиационной техники на соответствие требованиям Федеральных авиационных правил «Сертификация авиационной техники, организаций разработчиков и изготовителей. Часть 21», Федеральное агентство воздушного транспорта (Росавиация): официальный сайт. – Москва, 2025. – <https://favt.gov.ru/dejatelnost-sertificatsia-aviacionnoi-tehniki-jurlitsa-razrabotciki-izgotoviteli/> (дата обращения 03.11.2025).

© Кузнецова Е.В., 2025

Д.В. МЕЩАНИНОВА

darimv04@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Э.В. САФИН

Уфимский университет науки и технологий

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БАРЬЕРОВ ИСКРОЗАЩИТЫ СЕРИИ SIB: МЕТОДЫ ПОВЕРКИ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Аннотация: работа посвящена анализу метрологического обеспечения барьеров искрозащиты серии SIB, применяемых на взрывоопасных производственных объектах. Рассматриваются нормативные требования, методы поверки и средства измерений, обеспечивающие контроль критических параметров устройств. Особое внимание уделяется формированию комплекса эталонного оборудования в соответствии с ГОСТ 22261-94 и другими нормативными документами.

Ключевые слова: барьер искрозащиты, средства измерений, поверка, метрологическое обеспечение, взрывобезопасность, эталонное оборудование.

Взрывоопасные производства, такие как нефтегазовая, химическая и фармацевтическая отрасли, предъявляют повышенные требования к безопасности технологического оборудования. Ключевую роль в обеспечении взрывобезопасности играют барьеры искрозащиты, которые ограничивают энергию электрических цепей, поступающих во взрывоопасные зоны. Их исправность и точность метрологических характеристик напрямую влияют на безопасность персонала и оборудования.

Целью данной работы является анализ методов и средств поверки барьеров искрозащиты серии SIB, а также разработка рекомендаций по их метрологическому обеспечению. В качестве нормативной базы использованы ГОСТ 22261-94 «Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия» [1], методики поверки и описания типа средств измерений.

Барьеры искрозащиты серии SIB предназначены для обеспечения искробезопасной цепей, связывающих оборудование во взрывоопасных зонах (датчики, исполнительные механизмы) с приборами управления в безопасной зоне. Они выполняют две основные функции:

1. Ограничение энергии (тока, напряжения и мощности), передаваемой во взрывоопасную зону, до уровня ниже минимальной энергии воспламенения.
2. Гальваническая развязка, обеспечивающая электрическую изоляцию между цепями безопасной и взрывоопасной зон.

Устройства серии SIB имеют маркировку взрывозащиты [Ex ia] ПС и предназначены для передачи унифицированных сигналов 0...20 мА с поддержкой HART-протокола.

Поверка барьеров искрозащиты включает контроль следующих критических параметров.

- Максимальное выходное напряжение (U_o) и ток (I_o);
- Сопротивление изоляции;
- Электрическая прочность изоляции;
- влияние внешних факторов на метрологические параметры.

Для проведения поверки используются эталонные средства измерений, соответствующие требованиям ГОСТ 22261-94:

- Калибратор-измеритель унифицированных сигналов ЭЛЕМЕР-ИКСУ-3000;
- Источник питания постоянного тока PSP-405;
- Прибор контроля параметров воздушной среды Метеометр МЭС-200А.

Методика поверки МП 206.1-159-2018 регламентирует условия проведения работ: температура $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, влажность 45-80%, атмосферное давление 84 - 106,7 кПа [1].

Основные этапы поверки включают:

- 1) внешний осмотр;
- 2) определение основной приведённой погрешности;
- 3) измерение сопротивления изоляции;
- 4) проверку электрической прочности изоляции.

В ходе поверки проводились измерения выходного тока при заданных значениях входного сигнала. Основная приведённая погрешность вычислялась по формуле:

$$\delta = \frac{x - x_{\text{эт}}}{x_{\text{н}}} \times 100\%,$$

где x – измеренное значение тока;

$x_{\text{эт}}$ – эталонное значение;

$x_{\text{н}}$ – нормирующее значение.

Устройство признавалось годным, если погрешность не превышала установленных значений. Все измерения проводились с использованием эталонного оборудования, прослеживаемого к государственным эталонам.

Поверка барьеров искрозащиты серии SIB является критически важным этапом обеспечения их функциональности и безопасности. Соблюдение нормативных требований, использование эталонных средств измерений и строгое следование методикам поверки позволяют гарантировать надёжную работу устройств во взрывоопасных зонах.

Применение современных калибраторов и измерительных приборов, соответствующих требованиям ГОСТ 22261-94, обеспечивает необходимую точность контроля критических параметров барьеров искрозащиты, что способствует повышению уровня промышленной безопасности на опасных производственных объектах.

Библиографический список

1. ГОСТ 22261-94 «Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия».
2. Федеральный закон №102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».
3. МП 206.1-159-2018 «Барьер искрозащиты. Методика поверки».
4. Описание типа средств измерений «Барьеры искрозащиты серии SIB».

© Мещанинова Д.В., 2025

УДК 621.45.034

О.Р. МУЛЮКИН

oskar.mrakobes@mail.ru

Науч. руковод. – к.т.н., доцент А.Н. ИЛЬИН

Уфимский университет науки и технологий

РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОНТРОЛЯ ПЛАМЕНИ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТУ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СВЕЧИ ЗАЖИГАНИЯ

Аннотация: проблема надежного контроля пламени в камерах сгорания газового оборудования остается актуальной в связи с широким применением газовых технологий в энергетике, промышленности и бытовой сфере. Газовое оборудование применяется в бытовых плитах, отопительных котлах, системах генерации электроэнергии и газоперекачивающих установках. Однако газ требует повышенного внимания к безопасности – при случайном погасании пламени возможно накопление газа с последующим взрывом при повторном воспламенении. Этого не случится, если газовые приборы оборудованы системой безопасности Gas Control.

В работе представлены промежуточные результаты исследования по разработке нового метода контроля пламени в камерах сгорания газотурбинных установок. Проведен комплексный анализ существующих методов контроля, выявлены их системные недостатки и предложено принципиально новое решение.

Ключевые слова: контроль пламени, камера сгорания, газотурбинная установка, полупроводниковая свеча зажигания, температурный коэффициент сопротивления, система безопасности.

Анализ существующих методов контроля пламени:

Термоэлектрические методы основаны на измерении температуры в КС с помощью термопар. При наличии пламени термопара вырабатывает напряжение термо-ЭДС, которое удерживает электромагнитный клапан в открытом положении

[1]. Однако данный метод довольно инерционен и требует необходимости размещения в высокотемпературной зоне.

Оптические методы используют ИК и УФ фотодатчики для регистрации характерного излучения пламени. Спектр излучения факела пламени имеет специфические характеристики в ультрафиолетовой и инфракрасной областях [5]. Однако оптические датчики подвержены закопчиванию и снижению чувствительности в процессе эксплуатации.

Методы ионизационных токов (устройство ДПИ-1500) основаны на регистрации тока, протекающего через ионизированную зону пламени [3]. Контрольный электрод размещается непосредственно в КС, что приводит к его быстрому разрушению при высоких температурах.

Акустические методы включают струйные датчики и ультразвуковые системы [1]. Ультразвуковой метод основан на изменении распространения УЗ волны через зону горения. Недостатком является сложность выделения полезного сигнала на фоне промышленных помех.

Электромагнитные методы, такие как способ с магнитным зондом [4], основаны на измерении ЭДС индукции, возникающей при взаимодействии с электропроводной компонентой газового потока. Требуют создания сложной аппаратуры и системы обработки сигналов.

Основным недостатком рассмотренных методов является необходимость встраивания дополнительной аппаратуры в конструкцию камеры сгорания, что может приводить к изменению ее характеристик.

Предлагаемое решение:

В качестве альтернативного решения предложен метод, основанный на измерении сопротивления полупроводникового элемента свечи зажигания. Установлено, что полупроводниковые материалы свечей (рутил, карбид кремния) обладают выраженным отрицательным температурным коэффициентом сопротивления.

В ходе экспериментальных исследований, проведенных сотрудниками каф. СиМ под руководством доцента Ильина А.Н., получены зависимости электрического сопротивления свечи от температуры нагрева. Экспериментально подтверждена высокая чувствительность метода к изменению температурного режима.

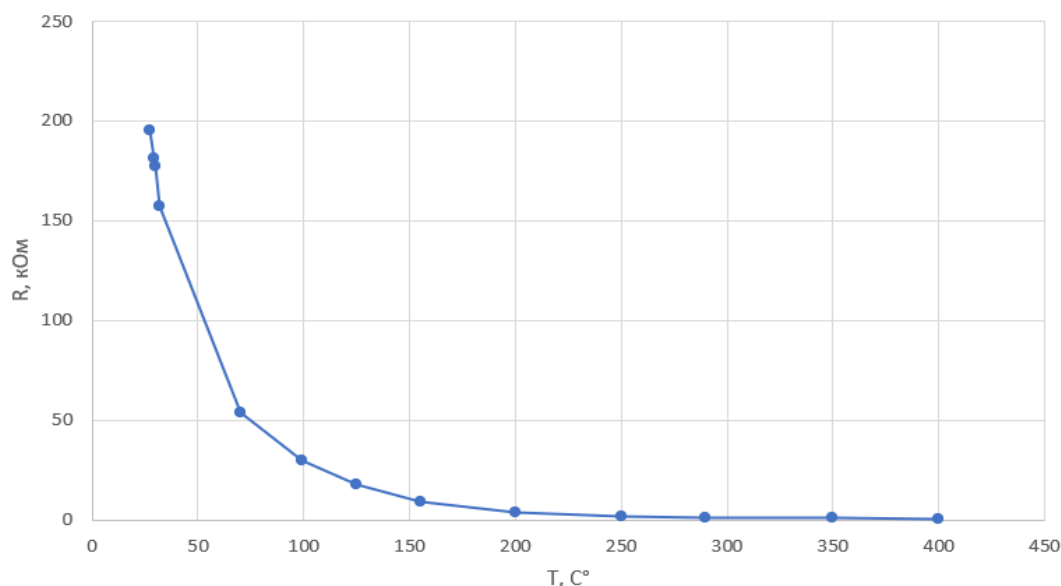


Рис. 1. Зависимость сопротивления от температуры в полупроводниковом элементе свечи

Разработана принципиальная электрическая схема устройства контроля, в настоящее время создается испытательная установка для исследований в условиях, приближенных к реальной эксплуатации.

Практическая значимость: Предлагаемый метод позволяет исключить размещение дополнительных датчиков в камере сгорания, используя штатный элемент конструкции – свечу зажигания. Это повышает надежность системы контроля и снижает стоимость эксплуатации.

Библиографический список

1. Ильинский, В. М. Системы контроля авиационных силовых установок / В. М. Ильинский. – Москва: Транспорт, 1980. – 88 с.
2. Алемасов, В. Е. Теория ракетных двигателей / В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегаллин, А. П. Тишин. – Москва: Машиностроение, 1980. – 536 с.
3. Соловьев, В. А. Способ измерения токов в плазме : пат. 1778715 Рос. Федерация: № 4906432/28 ; заявл. 28.01.1991 ; опубл. 30.11.1992, Бюл. № 44.
4. Щуров, Ю. П. Способ диагностики аномальных режимов функционирования реактивных двигателей : пат. 2145718 Рос. Федерация / Ю. П. Щуров, Н. М. Пушкин ; опубл. 20.02.2000, Бюл. № 5.
5. Шибанов, Г. П. Автоматизация испытаний и контроля авиационных ГТД / Г. П. Шибанов, Р. И. Адгамов, С. В. Дмитриев [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1977. – 280 с.

© Мулюкин О.Р., 2025

А.И. НИГМАТУЛЛИНА

nigmatullina.ayguzel@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Э.В. САФИН

Уфимский университет науки и технологий

ИСПЫТАНИЕ СТАНКОВ НА ТОЧНОСТЬ В АККРЕДИТОВАННОЙ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Аннотация: в данной статье рассматривается сравнение традиционных и современных подходов к проведению испытаний в аккредитованных лабораториях.

Ключевые слова: испытание на точность, станок, аккредитованная лаборатория, интернет вещей, технология больших данных.

Важнейшим параметром, определяющим качество и техническое совершенство станков, является их точность [1]. Для оценивания точности проводятся различные экспериментальные исследования, испытания и проверки, как самих станков, так и их отдельных компонентов.

Испытание станков на точность в аккредитованной испытательной лаборатории может осуществляться как с применением традиционных методов, так и современных подходов.

Жизненный цикл испытаний станков на точность при традиционном подходе:

1. Планирование испытаний

Проводится анализ исходных данных и нормативно-технических документов. На основе этого анализа разрабатывается план проведения испытаний, включая выбор методов испытаний и средств измерений.

2. Подготовка оборудования

На данном этапе станки, средства измерений и эталоны настраиваются перед проведением испытаний, чтобы обеспечить точность и надежность результатов.

3. Проведение испытаний станков

Испытания проводятся в соответствии с разработанным планом и стандартами, такими как ГОСТ 8-82 [2] и ГОСТ 22267-76. Все полученные результаты регистрируются для анализа.

4. Анализ результатов

На данном этапе данные обрабатываются вручную для оценки результатов испытаний.

5. Отчетность

По результатам испытаний подготавливаются отчеты, а также осуществляется архивирование всех документов.

6. Обратная связь и улучшение

Улучшение процессов испытаний на основании полученной информации.

Жизненный цикл испытаний станков на точность при современном подходе:

1. Планирование испытаний

Использование программного обеспечения для разработки плана проведения испытаний.

2. Подготовка оборудования

Применение современных автоматизированных и автоматических средств измерений, а также интеграция искусственного интеллекта и концепции Интернета вещей (IoT) для мониторинга состояния оборудования [4].

3. Проведение испытаний станков

Сбор и анализ данных, получаемых от датчиков машин.

4. Анализ результатов

Использование методов машинного обучения для обработки и анализа данных.

5. Отчетность

Автоматизированная генерация отчетов и их электронное архивирование с использованием SMART-формата, технологий больших данных (Big Data) и др. [5].

6. Обратная связь и улучшение

Внедрение системы обратной связи для быстрого реагирования на несоответствия.

Возможности традиционного и современного подходов применительно к разным аспектам испытаний станков на точность:

– **Точность**

Традиционный метод обеспечивает среднюю степень точности (погрешности от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров), в то время как современный метод отличается высокой точностью (погрешности от долей микрометров до нескольких микрометров) [3].

– **Скорость**

Современный подход обеспечивает более высокую скорость проведения испытаний, обеспечивает сокращение сроков их проведения.

– **Автоматизация**

При традиционном подходе чаще всего применяются простые средства измерений, которые не требуют специальных указаний по применению, а также малопроизводительные и требующие высокой квалификации оператора высокоточные средства измерений с ручным управлением. В современном подходе акцент сделан на использование современных автоматизированных и автоматических средств измерений (таких, например, как измерительная система QC20-W ballbar, КИМ и другие).

– **Человеческий фактор**

При традиционном подходе человеческий фактор оказывает значительное влияние на результаты испытаний, тогда как в современном подходе, это влияние минимизировано за счет автоматизации процессов измерений и испытаний.

– **Обработка данных**

При традиционном подходе полученные данные обрабатываются вручную или на компьютерах с использованием универсального программного обеспечения, в то время как при современном подходе этот процесс автоматизирован, используется специализированное программное обеспечение, возможно применение искусственного интеллекта [5].

Таким образом, испытания станков и другого технологического оборудования на точность являются важной процедурой для обеспечения высокого качества выпускаемых изделий. Для оценки точности станков необходимо применять современные подходы, позволяющие существенно повысить качество и эффективность процессов в аккредитованных испытательных лабораториях.

Библиографический список

1. Схиртладзе, А.Г. Технологическое оборудование машиностроительных производств: Учеб. пособие для машиностроит. спец. вузов / А.Г. Схиртладзе, В.Ю. Новиков; под ред. Ю.М. Соломенцева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001 – 407 с.
2. ГОСТ 8-82 «Станки металлорежущие. Общие требования к испытаниям на точность» от 27 ноября 1991 г. № 1813.
3. ГОСТ 22267-76 «Станки металлорежущие. Схемы и способы измерений геометрических параметров».
4. Андиева, Е.Ю. Цифровая трансформация в лабораториях: перспективы и возможности // Международный научный журнал «ВЕСТНИК НАУКИ» Том 2 – 2024 – № 6 – С. 1586-1596.
5. Леванович, С. SMART-формат: простая работа с документами // Стандарты и качество – 2024 – № 10 – С. 56-58.

© Нигматуллина А.И., 2025

К.И. ПАСТУХОВА

pastuh0vakseniya@yandex.ru

Науч. руковод. – старший преподаватель А.Ф. САФИНА

Уфимский университет науки и технологий

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО РАЗМЕРА ДЕТАЛИ

Аннотация: в работе проведен статистический анализ качества измерения линейного размера вала с использованием микрометров МК-25 и МР-25. Оценены стабильность процесса, смещение, сходимость и воспроизводимость измерений. Результаты показали допустимость процесса измерения, но выявили влияние операторов и нестабильность образцов. Рекомендовано обучение операторов и замена образцов для повышения точности измерений.

Ключевые слова: качество измерений; статистический анализ; измерительный процесс; микрометр; сходимость и воспроизводимость; контрольные карты; точность измерений.

В современных условиях быстро развивающегося производства высокая точность измерений имеет решающее значение, особенно при наличии жесткой конкуренции. В связи с активным внедрением автоматизированных систем управления производством повышаются требования к надежности методов контроля и оценки качества измерений. Это имеет особую важность для производительности машин, механизмов, систем, напрямую связанных с критическим параметром – линейным размером детали.

Таким образом, оценка качества процесса измерения размера детали является довольно важной задачей, требующей внимания как со стороны науки, так и со стороны производственной отрасли. Решение данной проблемы поможет повысить качество выпускаемой продукции и оптимизировать производственные процессы.

Цель работы – проведение статистического анализа качества процесса измерения линейного размера детали для определения приемлемости данного процесса.

Для достижения данной цели были сформулированы следующие задачи:

- Выполнить литературный анализ в области качества измерительных процессов;
- Изучить нормативные документы в области качества измерительных процессов;
- Провести эксперимент по оценке качества процесса измерения вала;
- Провести анализ полученных результатов.

Измерительный процесс – процесс преобразования значения измеряемого параметра в результат измерений с помощью средств измерения, который регулируется методикой выполнения измерения.

Для проведения анализа измерительных процессов применяют следующие основные нормативные документы:

- ГОСТ Р 58046-2017 Системы менеджмента качества предприятий авиационной, космической и оборонной отраслей промышленности;
- ГОСТ Р 51814.5-2005 Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов;
- ГОСТ Р ИСО 5725-2 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений;
- ГОСТ Р ИСО 10012 Менеджмент организации. Системы менеджмента измерений. Требования к процессам измерений и измерительному оборудованию.

Качество – степень соответствия присущих характеристик требованиям.

Критериями качества измерительного процесса выступают точность и достоверность измерений (рис. 1).

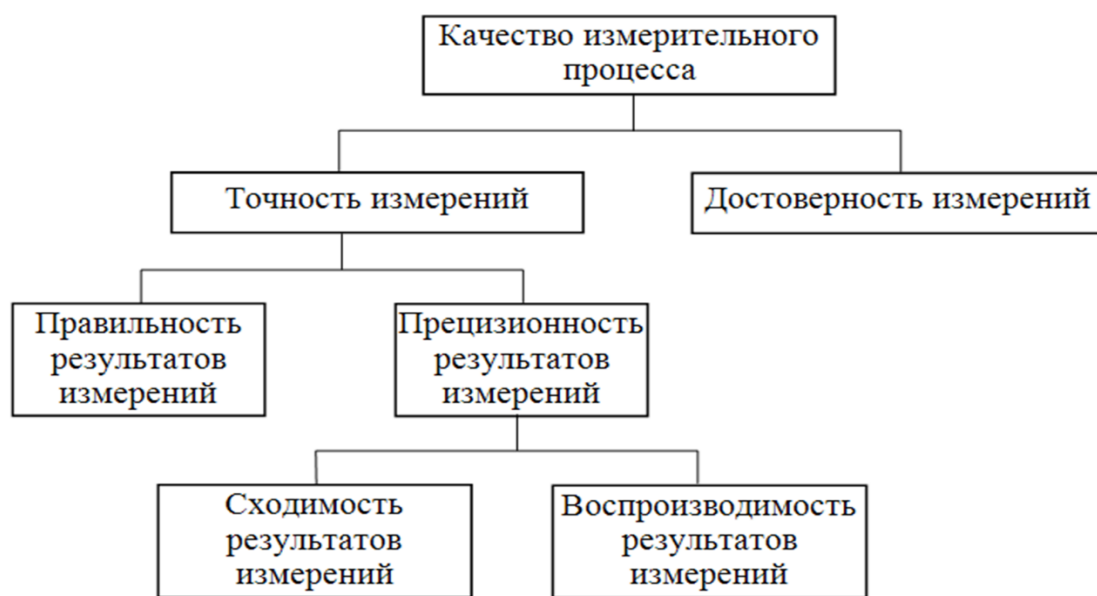


Рис. 1. Критерии качества измерительного процесса

В соответствии с ГОСТ Р 51814.5-2005 анализ измерительного процесса проводится в следующем порядке:

1) На первом этапе исследуют измерительный процесс на стабильность с помощью простых контрольных карт (средних и размахов). Если по результатам анализа процесс является нестабильным, то необходимо выяснить причины вариабельности и принять меры по их устранению.

2) На втором этапе оценивают смещение процесса от истинного значения измеряемого параметра. При наличии существенного смещения оно учитывается при дальнейшей обработке.

- 3) Определяют сходимость и воспроизводимость результатов измерений.
- 4) Составляют отчёт о состоянии измерительного процесса.

В рамках выполнения данной работы был проведен анализ качества измерения детали «Вал».

Вал – это наружный (охватываемый) элемент детали. Рассматриваемый вал изготовлен из конструкционной стали и имеет следующий размер $\varnothing 6,3j_8$, предельные отклонения которого равны $\pm 0,110$ мм.

Для контроля геометрических параметров детали «Вал» могут использоваться различные измерительные средства, включая:

- Линейки;
- Штангенциркули;
- Микрометры (гладкие и рычажные);
- Инструментальные микроскопы.

В условиях крупносерийного производства широкое применение имеют гладкие предельные калибры-скобы, удобные для быстрого и точного контроля диаметра. Их использование позволяет эффективно проверять соответствие размеров установленным допускам, что повышает стабильность качества выпускаемой продукции.

Для измерения детали «Вал» мы использовали гладкий микрометр МК-25 и рычажный микрометр МР-25. Данные приборы имеют одинаковый диапазон измерений (0-25 мм), а также ряд различий:

- Цена деления: для МК-25 – 0,01 мм; для МР-25 – 0,001 мм;
- Погрешность измерения: для МК-25 – $\pm 0,004$ мм; для МР-25 – $\pm 0,002$ мм;
- Тип отсчетного устройства: для МК-25 – механический; для МР-25 – механический или цифровой;
- Применение: для МК-25 – общепромышленные измерения; для МР-25 – прецизионные измерения, лабораторные работы;
- Класс точности: для МК-25 – 2 класс; для МР-25 – 1 класс.

В процессе анализа качества измерения вала были выполнены следующие действия:

1) Проведена оценка стабильности процесса измерения детали «Вал». Для этого было отобрано 20 выборок с мгновенным объемом выборки, равным 4. На основе измеренных данных были построены контрольные карты для средних арифметических значений и размахов. Анализ контрольных карт подтвердил стабильность процесса как по среднему арифметическому значению, так и по размаху.

2) Проанализированы смещение от истинного значения измеряемой величины и линейность смещения измерительного процесса. При определении смещения измерительного процесса было выполнено 10 повторных измерений. В результате расчетов относительное значение смещения составило для МК-25 – 0,9%; для МР-25 – 2,4%, что не превышает рекомендованное приемлемое значение, равное 10. При определении линейности смещения также было проведено 10 повторных измерений 5 образцов, по результатам которых был вычислен

относительный коэффициент корреляции, равный для МК-25 $R=0,498955$; для МР-25 $R=0,498951$. Это указывает на слабую линейную связь между величинами и не будет учитываться в дальнейших расчетах.

3) Определение сходимости и воспроизводимости результатов измерений. Были измерены 10 образцов тремя операторами, а результаты обработаны с использованием метода дисперсий. По итогам обработки была определена приемлемость измерительного процесса, которая составила для МК-25 – 25,997 %; для МР-25 – 1,095 %, что свидетельствует о допустимости данного процесса измерения для МР-25, а для МК-25 измерительный процесс может быть приемлем в зависимости от важности применения, стоимости средств измерительной техники и т.п. Также была определена изменчивость параметра образца для МК-25, составила 97,292 %; для МР-25 50,828 %, что свидетельствует о нестабильности образцов. Результаты изменчивости, обусловленной взаимодействием операторов и образцов для МК-25, составила 8,241 %; для МР-25 26,150 %, что свидетельствует о значительном влиянии операторов на измерительный процесс.

Таким образом, процесс измерения детали «Вал» с помощью гладкого микрометра МК-25 и рычажного микрометра МР-25 требует обучения операторов и замены нестабильных образцов на стабильные.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 58046-2017 «Системы менеджмента качества предприятий авиационной, космической и оборонной отраслей промышленности».
2. ГОСТ Р 51814.5-2005 «Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов».
3. ГОСТ Р ИСО 5725-2 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений».
4. ГОСТ Р ИСО 10012 «Менеджмент организации. Системы менеджмента измерений. Требования к процессам измерений и измерительному оборудованию».

© Пастухова К.И., 2025

К.И. ПАСТУХОВА

pastuh0vakseniya@yandex.ru

Науч. руковод. – старший преподаватель А.Ф. САФИНА

Уфимский университет науки и технологий

МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТИЗА СБОРОЧНОГО ЧЕРТЕЖА ИЗДЕЛИЯ «ЭТАЛОН»

Аннотация: на примере сборочного чертежа высокоточного изделия «Эталон» рассмотрена методика проведения метрологической экспертизы. Проведён анализ размерных цепей, допусков, посадок и контролепригодности. Результаты показали, что чертёж в целом является метрологически грамотным, однако выявлены отдельные зауженные допуски, требующие технического обоснования.

Ключевые слова: метрологическая экспертиза, сборочный чертеж, изделие "Эталон", допуски, размерные цепи, контролепригодность, метрологическое обеспечение, качество продукции, ГОСТ, техническая документация, высокоточное изделие, посадки, нормативные документы, единство измерений, конструкторская документация.

В современных условиях интенсивного развития высокотехнологичных отраслей промышленности, таких как авиастроение, приборостроение, а также робототехника, обеспечение высокого качества продукции является одной из ключевых задач. Неотъемлемой частью системы управления качеством выступает метрологическое обеспечение, центральное место в котором занимает метрологическая экспертиза.

Проведение метрологической экспертизы позволяет не только выявлять и предотвращать потенциальные метрологические проблемы на этапах проектирования и производства, но и способствует существенному повышению качества выпускаемой продукции, оптимизации технологических процессов и снижению производственных затрат.

Таким образом, комплексный подход к организации метрологической экспертизы, включающий анализ конструкторской и технологической документации, оценку соответствия средств измерений и методик выполнения измерений установленным требованиям, является необходимым условием для создания конкурентоспособной продукции, отвечающей как национальным, так и международным стандартам. Дальнейшее развитие методологии и практики метрологической экспертизы, включая внедрение автоматизированных систем поддержки принятия решений, остается актуальной задачей, требующей внимания со стороны научного сообщества и производственной отрасли.

Цель работы – проведение метрологической экспертизы сборочного чертежа изделия «Эталон».

Для достижения цели были сформулированы задачи:

- изучить теоретические основы и нормативно-правовую базу метрологической экспертизы;
- раскрыть содержание и описать порядок проведения метрологической экспертизы технической документации;
- дать общую характеристику объекта исследования – изделия «Эталон»;
- провести метрологическую экспертизу сборочного чертежа изделия «Эталон»;
- оформить результаты проведенной экспертизы в соответствии с установленными требованиями.

Метрологическая экспертиза документации – анализ и оценка правильности установления, применения и соблюдения в технической документации метрологических требований, правил и норм в области обеспечения единства измерений.

Для проведения метрологической экспертизы применяют следующие нормативные документы:

- ГОСТ 8.417-2002 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Единицы величин;
- ГОСТ Р 8.1024-2023. Национальный стандарт Российской Федерации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическая экспертиза технической документации. Основные положения;
- ГОСТ Р 58931-2020 Система обеспечения единства измерений на предприятиях авиационной промышленности. Метрологическая экспертиза технических заданий, конструкторской и технологической документации. Организация и порядок проведения.

Техническая документация – совокупность документов, которые в зависимости от их назначения содержат данные, необходимые и достаточные для обеспечения каждой стадии жизненного цикла продукции.

Конструкторская документация – совокупность конструкторских документов, содержащих данные, необходимые для проектирования (разработки), изготовления, контроля, приемки, поставки, эксплуатации, ремонта, модернизации, утилизации изделия.

Метрологическая экспертиза (МЭ) сборочного чертежа имеет свои особенности, так как этот документ определяет не отдельную деталь, а взаимосвязь и взаимное расположение всех элементов в готовом изделии. При проведении МЭ необходимо убедиться, что все требования к сборочному чертежу гарантируют получение изделия с нужными эксплуатационными характеристиками и что эти требования можно контролировать.

МЭ сборочного чертежа направлена на оценку тех параметров, которые влияют на функциональность и собираемость всего узла:

1. Проверка размерных цепей и допусков.

Анализ замыкающих звеньев. Главная задача – проверить правильность расчета и назначения допусков на размеры, определяющие функциональность изделия. Эксперт анализирует, как допуски отдельных деталей (входящих в сборку) влияют на конечный (замыкающий) размер или параметр, указанный на сборочном чертеже.

Взаимная увязка допусков. Оценивается, обеспечивают ли допуски, установленные на деталях, необходимую точность собираемого узла. Если допуски деталей слишком велики, это может привести к браку на этапе сборки или к снижению качества изделия.

Контроль посадок. Проверяется правильность выбора и обозначения посадок для сопрягаемых поверхностей, а также соответствие этих посадок функциональному назначению узла.

2. Проверка габаритных, установочных и присоединительных размеров.

Особое внимание уделяется размерам, которые определяют взаимодействие собираемого изделия с другими узлами, системами и фундаментом. Проверяется нормированы ли эти размеры и их предельные отклонения.

3. Оценка контролепригодности в сборе.

Эксперт определяет, возможно ли проконтролировать ключевые параметры и характеристики уже собранного изделия с помощью стандартных средств и методов. Также проверяется наличие указаний о контрольных точках, отверстиях или других конструктивных элементах, которые необходимы для контроля.

4. Проверка технических требований к сборке.

Анализируется корректность и однозначность текстовых записей, касающихся процессов, требующих изменения или контроля.

В целом МЭ сборочного чертежа должна обеспечивать, функционирование сборочного узла как задумано, а все критически важные параметры могут быть достоверно измерены, как на этапе изготовления отдельных деталей, так и после окончательной сборки.

В ходе выполнения данной работы была проведена МЭ сборочного чертежа изделия «Эталон».

«Эталон» является высокоточным элементом оснастки, конструктивно сложным, и предназначено для обеспечения прецизионного позиционирования или контроля в технологическом процессе.

В процессе проведения метрологической экспертизы сборочного чертежа изделия были выполнены следующие действия:

1. Анализ координатных и габаритных размеров.

Были рассмотрены габаритные и присоединительные размеры, а также координаты отверстий и критический паз. Для координатных размеров допуск $\pm 0,01$ мм является чрезвычайно жестким. Необходимо обоснование, почему нельзя использовать стандартный 8-й или 9-й квалитет. Для габаритного размера допуск составляет ± 1 мм, что является корректным для нефункциональных размеров. Для присоединительных размеров допуск $\pm 0,1$ мм соответствующий 12 квалитету является корректным. Для критического паза допуск $\pm 0,01$ мм также является достаточно жестким.

2. Анализ допусков формы и расположения.

Значения и Базы четко обозначены и являются корректными.

3. Анализ размеров с посадками.

Использован основной допуск Н7 для отверстия, и он является корректным, контролируется калибрами-пробками.

4. Оценка контролепригодности.

Все параметры контролепригодны, но некоторые требуют высокоточных средств измерения.

5. Анализ технических требований.

Четко идентифицированы размеры, требующие специального надзора и контроля в процессе эксплуатации.

Подводя итоги метрологической экспертизы, сборочный чертеж изделия «Эталон» в целом является метрологически грамотным и полным.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 58931-2020. Система обеспечения единства измерений на предприятиях авиационной промышленности. Метрологическая экспертиза технических заданий, конструкторской и технологической документации. Организация и порядок проведения. – Введ. 2021-07-01. – М. : Стандартинформ, 2020. – IV, 18 с.

2. ГОСТ Р 8.1024-2023. Национальный стандарт Российской Федерации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическая экспертиза технической документации. Основные положения. – Введ. 2024-07-01. – М. : Стандартинформ, 2023. – 16 с.

3. ГОСТ 8.417-2002. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Единицы величин. – Введ. 2003-09-01. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 22 с.

© Пастухова К.И., 2025

Р.А. СИНИЦЫН

Rus.Alex.Sin@yandex.ru

Науч. руковод. – старший преподаватель Е.А. ФИЛОНИНА

Уфимский университет науки и технологий

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПОВЕРКИ ДОЗИМЕТРА ДРК-1

Аннотация: статья посвящена вопросам применения дозиметра ДРК-1 при измерении ионизирующего излучения. Анализируется принцип работы дозиметра ДРК-1 и его метрологические характеристики. Рассматриваются операции на этапах поверки дозиметра и применяемые нормативные документы.

Ключевые слова: Метрологическое обеспечение, поверка, дозиметр рентгеновского излучения, единство измерений.

В современном мире возрастает оснащенность медицинских учреждений оборудованием для проведения рентгеновских и радиологических исследований. Для этих целей применяется лазерное, электронное и компьютерное оборудование. Поэтому в медицинских учреждениях, где осуществляется лучевая терапия и диагностика с помощью рентгеновского излучения, обязательно соблюдение норм радиационной безопасности. Для измерения радиации используют дозиметры. Радиационная безопасность медицинского персонала регламентируется ФЗ «О радиационной безопасности населения» [1], а также специальными нормативными документами.

Дозиметрия представляет собой процесс измерения поглощенной дозы ионизирующего излучения или ее мощности благодаря специальным измерительным приборам.

Дозиметр рентгеновского излучения ДРК-1 (Рисунок) – переносной прибор, который применяется при проведении медицинских исследований, в которых используются все типы рентгеновских аппаратов кроме томографов, маммографов и дентальных аппаратов для оценки нужной дозы для облучения пациента. Помимо прочего, прибор используется для проверки на устойчивость работы рентгеновских аппаратов, с помощью контроля повторяемой дозы радиации при однотипных измерениях в течение заданного промежутка времени [5].

Дозиметры, как средства измерений, используемые в сфере регулирования государством в области измерительной точности, должны подвергаться поверке, абсолютно все без каких-либо оговорок и исключений. Поверке подлежат все вновь выпускаемые, выходящие из ремонта и находящиеся в эксплуатации дозиметры.

Стандарты к осуществлению организации, порядку проведения поверки и форма представления результатов определяются Приказом Минпромторга России № 2510 от 31.07.2020 [6].

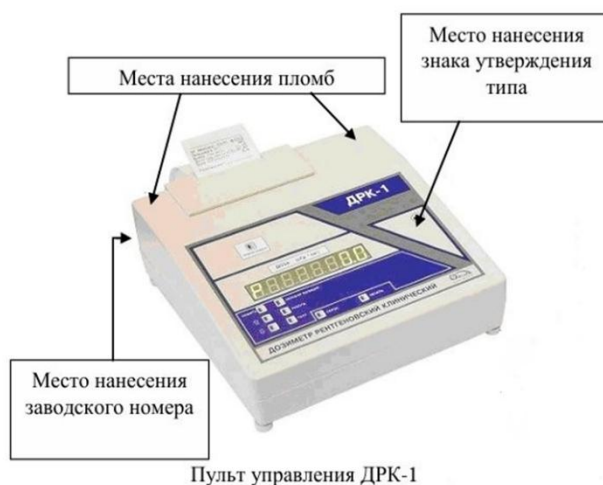


Рис. 1. Места нанесения заводского номера, пломб, знака утверждения типа на дозиметр ДРК-1

Поверка дозиметра происходит с демонтажом или без него и анодном напряжении в 100 кВ. Определение основной относительной погрешности выполняется на основе диапазонов произведений поглощенной дозы на площадь: первая поверяемая точка: от 25 до 30 сГр·см², вторая точка: от 280 до 320 сГр·см², третья точка: от 3000 до 3500 сГр·см² и четвертая точка: от 8000 до 10000 сГр·см².

При поверке ДРК-1 выполняются следующие действия: опробование, внешний осмотр, определение основной относительной погрешности произведения поглощенной дозы на площадь, оформление результатов.

Относительная погрешность поверяемого дозиметра определяется по формуле:

$$\delta_1 = \frac{N_1 - K \times N_3}{K \times N_3};$$

где N_1 – показания дозиметра, который проходит поверку, сГр·см²;

N_3 – показания дозиметра, который является стандартом, сГр·см²;

K – принимаемое во внимание значение, которое рассматривает возвратное рассеяние рентгеновского излучения от идеальной камеры при проведении калибровки без использования демонтажных работ и которое учитывает уменьшение уровня излучения подвергаемой калибровке камеры.

Плановые дозиметрические мероприятия осуществляются для уменьшения риска получения сотрудниками медицинского учреждения опасной дозы радиации. Также, осуществление данного контроля за фоном радиации в основных помещениях работы медицинского учреждения соединенных с ним территориях позволяет осуществить защиту пациентов от облучения радиацией.

Библиографический список

1. РМГ 120-2013 «Общие требования к выполнению калибровочных работ»
2. Руководство по эксплуатации ФВКМ.412113.017РЭ «Дозиметр рентгеновского излучения клинический ДРК-1».
3. Близнюк, У. А. Клиническая дозиметрия: учеб. пособие / У. А. Близнюк, Е. Н. Лыкова. — Москва: ООП физического факультета МГУ, 2019.
4. ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий».
5. Тимофеева, А.А., Шуруева, А.Р., Современные методы и средства индивидуальной дозиметрии ионизирующих излучений для лечебно-профилактических учреждений//. Молодой исследователь Дона. – 2022. – № 1(34).
6. Приказ Минпромторга РФ № 2510 от 31.07.2020 г. Об утверждении порядка проведения поверки средств измерений, требований к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке.

© Синицын Р.А., 2025

УДК 62-1

Т.П. СОЛЯННИКОВА

s_tanya_15@mail.ru

Науч. руковод. – ст. преп. Е.А. ФИЛОНИНА

Уфимский университет науки и технологий

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЦИФРОВИЗАЦИИ СТАНДАРТОВ

Аннотация: внедрение стандарта, понимаемого и машиной, и человеком – сложный процесс, он реализуется с помощью различных инструментов и платформ и осуществляется путем строгого упорядочивания всех терминов, их свойств и связей между ними – графов знаний.

Ключевые слова: SMART-стандарт; цифровая платформа; графы знаний; граф понятий и связей.

В настоящее время развитие всех сфер деятельности человека невозможно без использования документов, устанавливающих требования и содержащих накопленный опыт и знания – стандартов. Число таких документов постоянно возрастает. В традиционном виде они имеют ограничения, связанные с возможностью управления, автоматизации, совместимости с информационными технологиями. В связи с этим актуальной становится задача разработки и применения SMART-стандартов.

Многие предприятия уже активно вводят в применение SMART-стандарты. Например, в рамках реализации Стратегии цифровой трансформации государственной корпорации «Роскосмос» на период до 2025 года и перспективу до 2030 года. Для того, чтобы значительно повысить производительность, качество, и, наоборот, уменьшить время, затраченное на создание ракетно-космической техники, операционные издержки для ракетно-космической отрасли требуется переход на регулирование и контроль жизненного цикла продукции в электронном формате. Такая практика показывает новую ступень развития производства.

Для того, чтобы разработать, а в дальнейшем и использовать SMART-стандарты, на национальном уровне требуется официально установить ход регулирования такого вида цифровых документов, содержащие в себе требования к их созданию и последовательности применения, в национальной системе стандартизации. В Российской Федерации в 2021 году был сформирован Проектный технический комитет «Умные (SMART) стандарты» (ПТК 711) для выполнения запросов и регулирования в данной сфере. На сегодняшний день разработано три проекта предварительных национальных стандартов (ПНСТ) серии «Умные (SMART) стандарты»:

- ПНСТ 864–2023 «Умные (SMART) стандарты. Общие положения», стандарт вступил в силу 1 февраля 2024 года [1], документ вводит понятие SMART-стандарта, определяет его цели и закладывает основу для дальнейшего обмена нормативными документами в цифровом формате;

- Проект ПНСТ «Умные (SMART) стандарты. Классификация объектов стандартизации. Общие положения» (разработчик – ООО «ИндигоСофт»), находится на этапе разработки и согласования на публичном обсуждении;

- ПНСТ 1016-2025 Умные (SMART) стандарты. «Архитектура и форматы данных», утвержден 27 августа 2025 года и вступит в силу с 1 февраля 2026 года (разработчик – АО «Кодекс»). Документ описывает структуру информации внутри стандарта, её принципы и иерархию, а также механизм адресного обращения к отдельной информации, содержащейся в SMART-стандарте.

Для работы со SMART-стандартами требуются определенные инструменты, направленные на создание, применение такого рода стандартов, цифровые документы, содержащие текстовые, графические данные, которые рассчитаны на восприятие человеком, а также машинопонимаемую информацию. Использование инструментов позволяет осуществлять работу с нормативными документами, в том числе чтение, поиск, подбор нужной технической документации и сохранение документов в заданном формате.

В настоящее время существует несколько платформ для реализации работы со SMART-стандартами. Цифровая платформа «Техэксперт» от Консорциума «Кодекс» предоставляет инструменты для создания и применения и управления SMART-стандартов [3]:

- Система управления нормативной и технической документацией;
- Система управления требованиями;
- Конструктор нормативных документов.

Для структурирования данных и знаний в SMART-стандартах используют графы знаний, они играют важную роль при получении рекомендаций и ответах при принятии решений на различных этапах и устанавливают прогнозы дальнейших действий с нормативными документами. Такая графовая структура данных представляет знания в виде сети сущностей (объектов) и наличия связей между ними. Структура графа состоит из узлов (сущностей), рёбер (отношений) и свойств (характеристика сущностей), позволяет объединять данные из разрозненных источников, создавая согласованное и взаимосвязанное представление информации в организации. Они моделируют логические высказывания и графические изображения в общем ключе, так и наполнять подобную структуру конкретными объектами, которые могут потребоваться в частных случаях или для конкретного продукта. Графы знаний способны описывать сложные, скрытые связи между сущностями, проявляя таким образом машинопонимаемый формат. Он, в свою очередь, отвечает за поиск ответов на вопросы и выявление связей для дальнейшей работы с точной и подходящей документацией.

Создание машинопонимаемого стандарта может осуществляться вручную, при этом разработчики пользуются инструментами, направленными на редактирование графов знаний. Для того чтобы автоматизировать процесс построения такого вида документа, используют методы анализа естественного языка, например, Large Language Models (LLM). Однако, его использование имеет ряд затруднений в виде дороговизны и требование постоянного контроля оператора над процессом и его взаимодействие с документом [2].

Метод двух связанных предметно-ориентированных форматов – связанных предметно-ориентированных языков также служит для формирования SMART-стандарта. При его применении работа осуществляется по размеченному и строго структурированному тексту с наличием в этом тексте смысловых элементов – концептов и связей. Такой формат позволяет полноценно работать с нужными фрагментами.

Чтение и структурирование графов знаний доступно не всему профессиональному сообществу и требует специальных знаний. Для интерпретации «умного» стандарта на сегодняшний момент разрабатываются два пути:

- Сеть понятий и строгих формулировок на машинопонимаемом уровне;
- Граф понятий и связей на человекочитаемом уровне, узлы такого графа представляют собой текст на естественном языке. В этом случае каждый узел человекочитаемого фрагмента соответствует узлу машинопонимаемого графа знаний. Схема общего представления таких графов отображена на рисунке (рис.1):

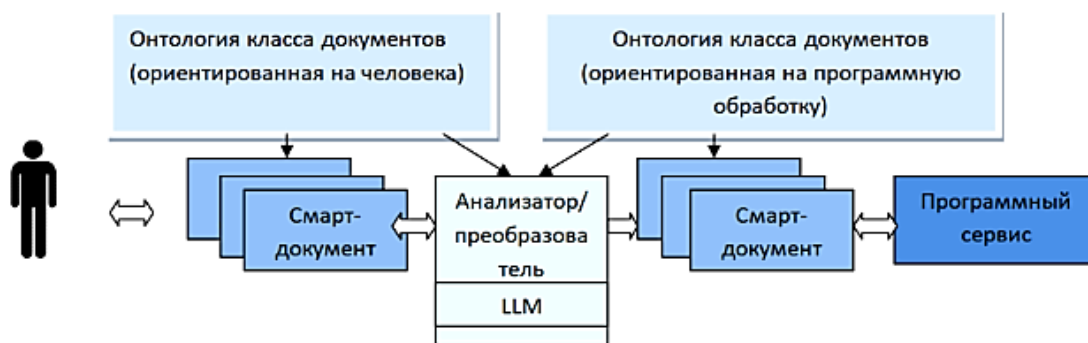


Рис. 1. Схема интерпретации SMART-стандарта

Для реализации такой среды предлагается использовать платформу IASPaas. Именно на ней применяют ориентированные графы с относящимися к его содержанию свойствами и характеристиками. Такая форма работы подразумевает сходимость с другими платформами, при этом требуемую информацию можно экспортировать в нужном формате для использования в другой среде.

Работа над постоянным повышением эффективности использования SMART-стандартов продолжается и уже показывает результаты внедрения. В дальнейшем ожидается утверждение ряда нормативных документов, создание новых и совершенствование уже используемых платформ, а также расширение применения цифровой стандартизации.

Библиографический список

1. ПНСТ 864-2023. Предварительный национальный стандарт российской федерации умные (SMART) стандарты. Общие положения: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2024-02-01 / федеральное агентство по техническому регулированию. – изд. Официальное. – Санкт-Петербург: «Кодекс», 2023. – 16 с
2. Вопросы создания машинопонимаемых SMART-стандартов на основе графов знаний / Е. А. Шалфеева, E. Shalfeeva, В. В. Грибова, V. Gribova // Информатика и автоматизация. – 2024. – № 4. – С. 969-988. – ISSN 2713-3192 – Текст: электронный// Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/365093>
3. Цифровая платформа «Техэксперт» – Санкт-Петербург, 2024. –URL: <https://cntd.ru/techexpert/>. – текст: электронный

© Соляникова Т.П., 2025

УДК 62-1

Т.П. СОЛЯННИКОВА

s_tanya_15@mail.ru

Науч. руковод. – старш. преп-ль. Е.А. ФИЛОНИНА

Уфимский университет науки и технологий

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ SMART-СТАНДАРТИЗАЦИИ

Аннотация: в работе рассматриваются перспективы развития отечественной smart-стандартизации: первые нормативные документы, информационная система, направленная на воплощение идеи SMART, а также поставленные цели, достижение которых планируется в ближайшее время.

Ключевые слова: цифровизация стандартов; SMART-стандарт; проектный технический комитет; предварительный национальный стандарт; информационная система; платформа «Техэксперт»; Консорциум «Кодекс».

Развитие цифровизации стандартизации в России началось в июле 2021 года, когда был основан первый технический комитет в этой области – ПТК 711 «Умные (SMART) стандарты».

Одним из важных аспектов приоритетного использования SMART-стандартов – является удобство. Помимо единой системы, с помощью которой предприятия имеют возможность доступа к нормативной информации, необходимо учитывать предотвращение лишних потерь времени, затраченное на поиск, анализ, подбор требований, для решения определенной задачи, и ошибок, которые могут возникнуть на каждом этапе использования нормативных документов.

Первым стандартом, который направлен на регулирование среды работы умных (SMART) стандартов, является предварительный национальный стандарт РФ №864-2023. Этот документ включает общие положения по использованию данных, содержащихся в документах по стандартизации, в форме умных (SMART) стандартов на этапах их жизненного цикла с учетом основополагающих стандартов и стандартов ЕСКД на электронные документы [1].

Для работы технического комитета создана единая цифровая система на базе платформы «Техэксперт». Она обеспечивает информирование и быстрый доступ к нормативным документам. Для данной платформы поставлена задача, достижение которой планируются на ближайшее время – автоматизация процессов анализа, обсуждения проектов документов, заложенных в одной системе, а также создание сводных отчетов [3].

Важную роль в развитии отечественной smart-стандартизации играет Консорциум «Кодекс». Он возглавляет технический комитет ПТК 711, сотрудничает с зарубежными организациями в области SMART-стандартов, развивает программное обеспечение для построения независимой IT-инфраструктуры российских предприятий. Немаловажным вкладом

Консорциум является наращивание качества и количества содержимого в SMART-стандартах для понимания, исполнения, интерпретирования машинами, работа над увеличением роли машинного обучения и искусственного интеллекта при анализе документов, автоматического выделения главных требований, терминов и их классификации. Консорциум «Кодекс» на платформе «Техэксперт» занимается разработкой инструментов для цифровой стандартизации и интеграции разных классификаторов.

SMART-система – это информационная система, способная обрабатывать SMART-стандарты, а также предлагать пользователям SMART-сервисы, основанные на обработке содержимого стандартов [4]. Информационной средой являются информационные системы, направленные на обработку и представление информации в форме, воспринимаемой человеком. Также SMART-стандарты реализуют и сами разработчики прикладных сервисов, путем контроля соответствия нормативным требованиям [2].

Инструменты для создания и применения SMART-стандартов создавались постепенно и продолжают совершенствоваться. Среди таких инструментов Профессиональные справочные системы (ПСС), которые уже активно используют множество компаний и специалистов. ПСС преследуют цель создания «умных» человекоориентированных сервисов для более эффективной работы с документами. К инструментам, которые активно используются, относится и система управления нормативной и технической документацией (СУ НТД). Он обеспечивает сотрудников организации единой системой.

Нужно учитывать, что «умными» документами должны быть не только внешние, но и внутренние документы предприятия. Для этого используется Конструктор нормативных документов. Он сокращает время, затраченное на разработку внутренних документов, и выполняет требование по структурированности, направленное на внедрение SMART-стандартизации.

При реализации концепции SMART-стандартизации необходимо учитывать следующие аспекты [5]:

- Данные из нормативных документов, представленных в концепции SMART, должны быть понимаемы с возможностью полноценной работы не только человеком, но и машиной;
- Регулирование структуры стандартов, для самостоятельного «понимания» данных машиной;
- Унификация и стандартизация формата данных при обмене документов между информационными системами.

На рисунке показана структура SMART-стандарта (рис.1).

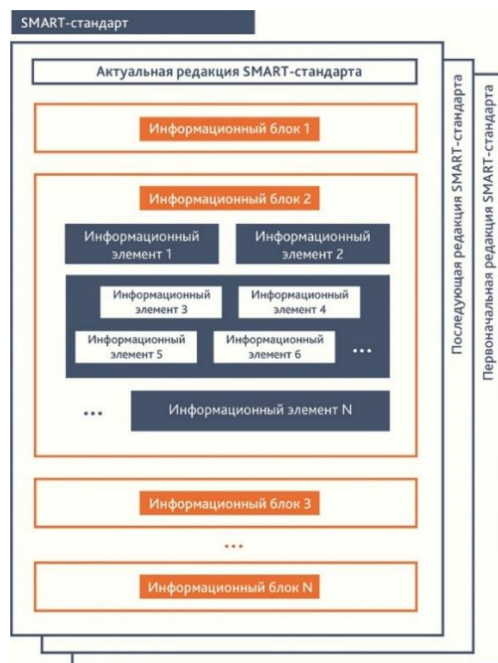


Рис. 1. Схема логической структуры SMART-стандарта

В настоящее время концепция SMART-стандартизации активно развивается. Если в 2021 году, данная сфера только начала зарождение, то сегодня происходит процесс постановки конкретных задач и предложены платформы для реализации. На ближайшие три года запланирована апробация концепции цифровой стандартизации, которая будет направлена на изучение применения smart-стандартов и анализ обратной связи от пользователей.

Библиографический список

1. ПНСТ 864-2023. Предварительный национальный стандарт российской федерации умные (SMART) стандарты. Общие положения: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2024-02-01 / федеральное агентство по техническому регулированию. – изд. Официальное. – Санкт-Петербург: «Кодекс», 2023. – 16 с.
2. «Умные (SMART) стандарты. Архитектура и форматы данных»: стандарт в деталях – Москва, 2025. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1305126566/>. – текст: электронный
3. Зачем нужен SMART-стандарт? – Москва, 2023. – URL: <https://cntd.ru/cifrovaya-transformacia/read/smart-standard-what-for/>. – текст: электронный
4. Умные (SMART) стандарты лучшие практики цифровой стандартизации в российской федерации - Москва, 2023. – URL: <https://cntd.ru/smart-standards/>. – текст: электронный
5. Дмитриева С. Ю. Умные (SMART) стандарты: первые итоги./ Дмитриева С. Ю. – Санкт-Петербург, 2024. - № 3-4. – С. 1-2.

СМАРТ-СТАНДАРТЫ КАК ЭЛЕМЕНТ ПРОЦЕССА ЦИФРОВИЗАЦИИ

Аннотация: в данной работе рассматривается концепция SMART-стандартов как следующего этапа развития технического регулирования. Рассмотрены определение и сущность SMART-стандарта, понятия архитектуры, модульной структуры.

Ключевые слова: smart-стандарт, цифровизация промышленности, машиночитаемые данные, информационные объекты, цифровое производство, управление жизненным циклом.

Смарт-стандарт – это цифровая версия документа по стандартизации, созданная специально для автоматической обработки. Его данные структурированы так, что компьютеры могут самостоятельно их считывать, понимать и использовать.

Смарт-стандарты представляют собой естественное развитие традиционной стандартизации в условиях цифровой трансформации промышленности. Они преодолевают ограничение бумажных и электронных документов – необходимость участия человека для интерпретации и применения требований [1].

Разработка смарт-стандарта стандарта преследует три ключевые цели:

- создание единой модели данных для всей предметной области, охватываемой серией стандартов «Умные (SMART) стандарты»;
- установление унифицированного формата данных, который обеспечит совместимость и эффективную работу со SMART-стандартами в различных информационных системах;
- формирование методической базы для всех участников процесса, включая общие принципы и практические рекомендации по преобразованию традиционного текста (предназначенного для человека) в машиночитаемое содержание SMART-формата.

Серия Умные (SMART) стандарты предназначена для использования в следующих направлениях:

- создание SMART-стандартов: регламентирует непосредственную разработку новых «умных» стандартов;

- разработка специализированного программного обеспечения: создание информационных систем, предназначенных для управления всем жизненным циклом SMART-стандартов – от их создания до внедрения и обновления;

- внедрение в производственные и инжиниринговые системы: обеспечивает основу для построения прикладных сервисов, таких как системы автоматизированного проектирования и моделирования, программы для контроля соответствия продукции установленным нормам и другие интеллектуальные системы.

Архитектура SMART-стандарта – это комплекс принципов, обеспечивающих целостность и машиночитаемость его содержания. Она гарантирует, что стандарт, выраженный в виде формализованной модели данных, будет корректно «понят» и использован программным обеспечением [1].

В отличие от простого текста, где термины могут трактоваться неоднозначно, архитектура SMART-стандарта формализует словарь. Каждому понятию присваивается уникальный идентификатор и четкое, машиночитаемое определение, исключающее двусмысленности. Это обеспечивает «общий язык» для всех систем, которые будут работать со стандартом. Именно архитектурные решения обеспечивают способность стандарта сохранять функциональность при использовании в различных программно-аппаратных комплексах и производственных контекстах.

Архитектура смарт-стандарта имеет следующие особенности:

- семантическая модель данных обеспечивает однозначную интерпретацию требований системами разных производителей;

- иерархическая организация позволяет осуществлять навигацию по связанным требованиям и параметрам;

- модульная структура поддерживает независимое обновление отдельных разделов стандарта;

- версияльность гарантирует отслеживаемость изменений и воспроизводимость процессов [2].

SMART-стандарт формируется путем преобразования информации из традиционного документа по стандартизации в машиночитаемый формат. Этот процесс предполагает структуризацию как формализованных данных, так и несистематизированных сведений исходного документа. Основным инструментом преобразования выступают информационные объекты SMART-стандарта. В содержание информационных объектов не включаются: официальные издания документов национальной системы стандартизации, элементы их официального оформления (электронные подписи, логотипы, наименования уполномоченных издателей) и электронные копии, точно воспроизводящие макет официальных бумажных изданий.

Ключевым отличием смарт-стандартов от традиционных документов является наличие системы семантических связей, которые превращают

разрозненные требования в единую логическую сеть. Эти связи обеспечивают целостность данных и позволяют автоматизировать сложные процессы анализа и контроля.

Применяют три типа связей, отличающихся по назначению [1]:

- иерархические;
- ссылочные;
- связи соответствия.

Иерархические связи формируют логическую структуру SMART-стандарта путем организации информационных объектов в древовидную структуру. Эти связи определяют вложенность и соподчинение объектов, обеспечивая целостность стандарта.

Ссылочные связи устанавливают отношения между информационными объектами, обеспечивая основу для создания SMART-сервисов и решения практических задач. Связи могут быть как внутренними (в пределах одного стандарта), так и внешними (между разными стандартами). Прямые связи применяются при возможности редактирования исходного объекта. Ссылка добавляется непосредственно в содержимое исходного объекта. Обратные связи используются, когда исходный объект недоступен для редактирования (например, содержит электронную подпись). Ссылка создается в связанном объекте, который размещается в редактируемой части стандарта. Данный подход обеспечивает гибкость в установлении связей между объектами при различных ограничениях на их редактирование [2].

Связи соответствия обеспечивают сопоставление фрагментов человекочитаемого содержания информационного объекта с их машиноинтерпретируемыми представлениями. Данный тип связей создает семантическую связь между визуальным представлением информации и ее структурированной машиночитаемой версией. Это помогает людям и программам видеть одну и ту же информацию в разных форматах.

Внедрение смарт-стандартов осуществляет переход от частичной автоматизации к комплексной цифровизации промышленности. Благодаря машиночитаемому формату смарт-стандарты становятся источником структурированных данных для систем искусственного интеллекта. Анализируя историю применения стандартов и их влияние на качество продукции, алгоритмы машинного обучения могут выявлять скрытые зависимости и оптимизировать нормативные требования, так же они позволяют в реальном времени улавливать критические параметры процессов. Это значительно снижает риски брака и повышает устойчивость производственных систем.

Библиографический список

1. ПНСТ 864-2023. Умные (SMART) стандарты. Общие положения. – Введ. 2023-12-15. – М.: Стандартиформ, 2023. – 12 с.

2. Смарт-стандарты – основа технологического суверенитета и лидерства [Электронный ресурс] // РИА Стандарты и качество. – 2023. – URL: <https://ria-stk.ru/stq/adetail.php?ID=231350> (дата обращения: 25.05.2024).

© Токарева О.И., 2025

УДК 621.828.4

А.А. ХАТМУЛЛИНА

hamilina@mail.ru

Науч. руковод. – ст. преп. Е.А.ФИЛОНИНА

Уфимский университет науки и технологий

КОМПЛЕКС МЕРОПРИЯТИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИИ ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДЕТАЛИ «КОЛЬЦО УПЛОТНИТЕЛЬНОЕ» ДЛЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ И ПНЕВМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Аннотация: в работе представлен комплекс мероприятий, направленный на совершенствование технологий технического контроля уплотнительных колец, применяемых в гидравлических и пневматических системах. Особое внимание уделено внедрению современных методов измерений, гармонизации с требованиями российских стандартов, включая ГОСТ ГОСТ Р 8.563–2009, а также актуализации методик контроля в соответствии с изменениями в законодательстве об обеспечении единства измерений. Предложенные решения способствуют повышению надёжности изделий, соответствию международным требованиям и снижению рисков отказов в эксплуатации.

Ключевые слова: уплотнительное кольцо, технический контроль, метрологическое обеспечение, методика измерений, гидравлические устройства, пневматические устройства, калибровка, прослеживаемость.

Цель исследования – разработка и систематизация комплекса мероприятий, направленных на повышение точности, достоверности и эффективности технического контроля уплотнительных колец в контексте требований действующего законодательства и нормативной базы Российской Федерации.

Актуальность темы обусловлена возрастающими требованиями к герметичности и надёжности гидравлических и пневматических систем, широко применяемых в машиностроении, авиационной и нефтегазовой промышленности. С 1 марта 2025 года вступили в силу изменения в Федеральный закон №102-ФЗ

«Об обеспечении единства измерений» [1], что потребовало адаптации методик контроля деталей к новым требованиям, в том числе к прослеживаемости измерений и обязательной аттестации методик. В этой связи совершенствование технологий контроля деталей приобретает особую значимость.

Основные направления совершенствования технического контроля:

- внедрение аттестованных методик измерений, соответствующих требованиям ГОСТ Р 8.563–2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений» [2]: методики должны быть внесены в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений;

- контроль геометрических параметров уплотнительных колец в соответствии с ГОСТ 6150–84 «Кольца резиновые уплотнительные круглого сечения. Основные параметры и размеры» [3]: измерения диаметра и сечения должны проводиться с использованием средств измерений, прошедших поверку и обеспечивающих прослеживаемость к государственным эталонам.

- совершенствование методов контроля физико-механических характеристик резиновых материалов в соответствии с ГОСТ 25804.1–83 «Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на стойкость к климатическим факторам» [4]: внедрение оборудования с автоматизированным сбором и обработкой данных повышает воспроизводимость результатов.

- регулярная калибровка измерительного оборудования, применяемого при контроле, с последующим признанием результатов калибровки в рамках поверки, как это предусмотрено изменениями в ФЗ №102 [1]: это особенно актуально при использовании зарубежных приборов, допускаемых при условии обеспечения прослеживаемости к российским эталонам.

- повышение квалификации персонала, задействованного в процессе технического контроля, с акцентом на знание требований ГОСТ, новых методик и законодательных норм в области метрологии.

Практические преимущества внедрения комплекса мероприятий:

- повышение точности и достоверности результатов контроля;
- снижение процента брака и отказов в эксплуатации;
- соответствие продукции требованиям технических регламентов и международных стандартов;

- усиление доверия со стороны заказчиков и надзорных органов.

Предложенный комплекс мероприятий позволяет не только соответствовать требованиям обновлённого законодательства в области метрологии, но и значительно повысить качество и надёжность уплотнительных колец.

Важно подчеркнуть, что изменения в ФЗ №102 не отменяют ранее выданные документы и результаты поверок, оставляя переходный период для адаптации предприятий к новым условиям [1]. Внедрение системного подхода к техническому контролю в соответствии с российскими ГОСТ и современными метрологическими требованиями способствует укреплению конкурентоспособности отечественной продукции на внутреннем и внешнем рынках.

Библиографический список

1. Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» №102-ФЗ: [принят Государственной думой 11 июня 2008 года: одобрен 18 июня 2008 года (ред. от 08.08.2024)]. – Москва: Проспект; Санкт-Петербург: Кодекс, 2008.
2. ГОСТ Р 8.563–2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений. – Введ. 2010–07–01. – М.: Стандартинформ, 2010.
3. ГОСТ 6150–84. Кольца резиновые уплотнительные круглого сечения. Основные параметры и размеры. – Введ. 1986–01–01. – М.: Издательство стандартов, 1986.
4. ГОСТ 25804.1–83. Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на стойкость к климатическим факторам. – Введ. 1984–01–01. – М.: Издательство стандартов, 1984.

© Хатмуллина А.А., 2025

УДК 62-1

А.А. ХАТМУЛЛИНА

xamilina@mail.ru

Науч. руковод. – ст. препод. каф. СиМ, Е.А.ФИЛОНИНА

Уфимский университет науки и технологий

ИЗМЕНЕНИЯ В ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВЕ ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Аннотация: в данной научной работе рассматриваются актуальные изменения в законодательстве, касающиеся метрологического обеспечения и единства измерений в России. Основное внимание уделяется новым правилам использования зарубежного измерительного оборудования, обновленной системе классификации поверок и ужесточению требований к измерительным методикам. Значительный акцент сделан на практическом применении обновленных нормативных актов в контексте геофизических исследований.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, единство измерений, поверка, калибровка, методики измерений, зарубежное измерительное оборудование, геофизические исследования

Цель исследования – выявление и упорядочение изменений в законодательстве, которые служат для повышения эффективности обеспечения в области метрологии.

Актуальность темы обусловлена необходимостью усиления контроля качества измерений, гармонизации с международными стандартами и повышения точности измерительных систем. С 1 марта 2025 г. вступили в силу обновленные положения ФЗ №102 «Об обеспечении единства измерений» [1].

Основные изменения включают:

- применение иностранных средств измерений, при условии прослеживаемости этих средств к российским эталонам;
- уточнения в классификации видов поверки, включая первичную и повторную;
- новые и более строгие требования к методам измерений;
- порядок признания результатов калибровки и использование их при поверке средств измерений;
- использование «Амнистии» для определенных средств измерений, которые допущены к применению до 1993 года, то есть до вступления в силу ФЗ №102 [2].

Особое внимание уделяется использованию иностранных средств измерений. Теперь они могут применяться легально, но только при соблюдении требований прослеживаемости к российским государственным первичным эталонам [1].

Также изменения коснулись видов поверки. По нововведению, после ремонта проводится не первичная, а периодическая поверка, которая устраняет правовую неопределенность в области метрологии, поскольку первичная поверка не проводится несколько раз после каждого ремонта средства измерения [2].

Методики измерений теперь должны соответствовать строгим требованиям:

- обязательная аттестация;
- внесение в Федеральный информационный фонд;
- соблюдение ГОСТ Р 8.563–2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений» от 15.04.2010 г. [1].

В области геофизики эти изменения имеют особое значение:

- требуется регулярная калибровка оборудования;
- необходимо обновление методик измерений;
- важно ведение документации;
- требуется повышение квалификации персонала.

Практические преимущества для геофизических исследований:

- повышение точности измерений;
- унификация методик;
- улучшение качества данных;
- соответствие международным стандартам.

Обобщая все вышесказанное, можно утверждать, что изменения, внесенные в ФЗ №102, не затрагивают разрешительные документы, выданные до их вступления в силу. Результаты поверки остаются действительными до завершения установленного срока. Кроме того, данные поправки способствуют улучшению метрологической системы в России и повышают эффективность государственного управления в области обеспечения единства измерений.

Цель исследования заключается в систематизации и анализе законодательных изменений, направленных на повышение эффективности метрологического обеспечения. Актуальность темы определяется необходимостью усиления контроля качества измерений, приведения российской системы в соответствие с международными стандартами и повышения точности измерительных систем.

С 1 марта 2025 года вступили в силу обновленные положения Федерального закона №102 «Об обеспечении единства измерений» [1].

Основные изменения в законодательстве касаются следующих аспектов:

- введение правил, регулирующих использование иностранного измерительного оборудования с обязательной прослеживаемостью к российским эталонам;
- уточнение классификации типов поверок, включая первичную и повторную;
- ужесточение требований к методическим подходам в области измерений;
- регламентация процедуры признания результатов калибровки при поверке;
- установление льготного режима для оборудования, допущенного к применению до 1993 года [2];

Использование зарубежного измерительного оборудования теперь разрешено при условии соблюдения требований прослеживаемости к российским государственным первичным эталонам [1].

После ремонта средства измерения проводится периодическая, а не первичная поверка. Это устраняет правовую неопределенность в метрологической сфере, так как первичная поверка не может проводиться многократно после каждого устранения неисправности [2].

Требования к методическим подходам в области измерений:

- обязательная аттестация методик;
- внесение данных в Федеральный информационный фонд;
- соответствие стандарту ГОСТ Р 8.563–2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений» [1].

Изменения в сфере геофизики подразумевают:

- регулярную калибровку оборудования;
- регулярное обновление методик измерений;
- заполнение и ведение необходимой документации;
- повышение квалификации сотрудников;
- преимущества в практике;
- увеличение точности измерительных данных;
- унификацию используемых методик;
- улучшение качества получаемых результатов и их соответствие международным стандартам;

Внесенные изменения в ФЗ №102 не касаются ранее выданных разрешительных документов, и результаты поверок остаются действительными до

окончания их срока действия. Эти изменения способствуют улучшению метрологической системы в России и повышению эффективности государственного управления в сфере обеспечения единства измерений.

Библиографический список

1. Российская Федерация. Законы. Об обеспечении единства измерений: Федеральный закон №102-ФЗ: [принят Государственной думой 11 июня 2008 года: одобрен 18 июня 2008 года (ред. От 08.08.2024)]. – Москва: Проспект; Санкт-Петербург: Кодекс, 2008.

2. Новости Росстандарт –
https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/presscenter/news?portal:isSecure=true&navigationalstate=JBPNs_r00ABXczAAZhY3Rpb24AAAABAA5zaW5nbGVVOZXdzVmllldwACaWQAAAAABAQ5NzIwAAdfX0VPRl9f&portal:componentId=88beae40-0e16-414c-b176-d0ab5de82e16

© Хатмуллина А.А., 2025

УДК 621.039

К.Н. ШАРАФУТДИНОВА

sharafytdinovak18@mail.ru

Науч. руковод. – ст. преп. Е.А. ФИЛОНИНА

Уфимский университет науки и технологий

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КАЛИБРОВКИ МАНОМЕТРА МП-4УФ С ОЦЕНКОЙ РАСШИРЕННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Аннотация: в статье рассмотрена задача разработки специализированной методики калибровки манометра деформационного типа МП4-Уф. Приведено обоснование необходимости такой разработки, связанное с обеспечением единства измерений давления в высокоответственных отраслях промышленности.

Ключевые слова: калибровка; манометр; неопределенность измерений; расширенная неопределенность; методика калибровки; средство измерений давления; единство измерений; метрологическое обеспечение.

Обеспечение единства измерений является фундаментальной задачей метрологии и обязательным условием функционирования современной экономики. Прослеживаемость результатов измерений к национальным эталонам, реализуемая через процедуры поверки и калибровки, выступает ключевым инструментом достижения этой цели. В высокоответственных отраслях, таких как нефтегазовая, энергетическая и химическая промышленность, достоверность измерений

давления напрямую влияет на безопасность, качество продукции и эффективность технологических процессов.

Манометры деформационного типа, к которым относится модель МП4-Уф, широко распространены в эксплуатации. Однако существующие методики их калибровки зачастую носят обобщенный характер и не учитывают в полной мере специфику конструкции, а также не содержат комплексного подхода к оценке всех значимых источников неопределенности. Это приводит к проблеме несопоставимости результатов, получаемых в различных метрологических лабораториях.

Разрешение указанного противоречия видится в создании специализированной методики калибровки, адаптированной для манометров МП4-Уф и включающей современные подходы к оценке расширенной неопределенности, что и определяет цель данной работы.

Согласно ГОСТ Р 8.879-2014, калибровка средств измерений – это совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений. Методика калибровки – документ, регламентирующий эту процедуру.

Для манометров, как средств измерений давления, калибровку обычно проводят методом прямого сличения показаний калибруемого прибора и эталона, подвергающихся воздействию одних и тех же значений давления в идентичных условиях окружающей среды.

Ключевым аспектом современной калибровки является оценка неопределенности измерений. Неопределенность измерения – параметр, связанный с результатом измерения, характеризующий дисперсию значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине. Оценивание неопределенности включает идентификацию источников неопределенности (как по типу А – статистическими методами, так и по типу В – иными методами), количественную оценку их вкладов и суммирование с целью получения суммарной стандартной и расширенной неопределенности.

Разработанная методика калибровки манометра МП4-Уф включает следующие этапы:

- 1) Подготовка к калибровке: визуальный осмотр манометра, проверка комплектности. Монтаж манометра на эталонную установку (например, грузопоршневой манометр). Приведение всей системы в равновесное состояние при нормальных условиях (температура $20 \pm 5^\circ\text{C}$, относительная влажность 30-80%).

- 2) Проведение измерений: методом прямого сличения снимаются показания калибруемого манометра и эталона в заданных точках диапазона измерений (0%, 25%, 50%, 75%, 100% от верхнего предела измерения) как при возрастании, так и при убывании давления. Количество циклов измерений – не менее трех для оценки повторяемости.

- 3) Обработка результатов: для каждой точки определяется погрешность как разность между показанием калибруемого манометра и действительным значением

давления, установленным эталоном. Рассчитывается среднее значение погрешности и ее стандартное отклонение.

4) Оценка расширенной неопределенности: формируется бюджет неопределенности, включающий вклады от: неопределенности эталона (указывается в его свидетельстве о калибровке), неопределенности из-за повторяемости показаний калибруемого манометра (тип А), неопределенности из-за разрешающей способности манометра, неопределенности из-за влияния температуры и других значимых факторов (тип В). Суммарная стандартная неопределенность вычисляется как корень квадратный из суммы квадратов всех стандартных неопределенностей. Расширенная неопределенность U получается умножением суммарной стандартной неопределенности на коэффициент охвата $k=2$, что соответствует вероятности охвата примерно 95%.

Таким образом, разработанная методика позволяет не только определить погрешность манометра МП4-Уф в рабочих точках, но и количественно оценить надежность полученных результатов через значение расширенной неопределенности, это обеспечивает метрологическую прослеживаемость и повышает доверие к результатам измерений давления, выполняемых с помощью данного типа средств измерений. Внедрение методики в практику метрологических служб промышленных предприятий будет способствовать повышению уровня метрологического обеспечения и качества выпускаемой продукции.

Библиографический список

1. ГОСТ 8.271-77. Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений давления. Термины и определения. – Введ. 1979-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1977 – 32 с.

2. ГОСТ 8.879-2014. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению. – Введ. 2015-09-01. – М.: Стандартиформ, 2014. – 16 с.

3. ГОСТ Р 8.905-2015. Государственная система обеспечения единства измерений. Манометры показывающие. Рабочие средства измерений. Метрологические требования и методы испытаний. – Введ. 2016-08-01. – М.: Стандартиформ, 2015 -21 с.

4. ГОСТ 34100.1-2017 / ISO/IEC Guide 98-1:2009. Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководства по выражению неопределенности. – Введ. 2018-09-01. – М.: Стандартиформ, 2017. – 40 с.

© Шарафутдинова К.Н., 2025

СЕКЦИЯ 2.6 АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 620.172.216

А.Р. САЙДУГАНОВ, Д.А. АХМЕДЬЯНОВА, Е.С. НИКОНОВ
andrewsai@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. С.Г. ГОНЧАРОВА

Уфимский университет науки и технологий

АНАЛИЗ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ СХЕМ ДИНАМОМЕТРОВ С УЧЕТОМ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация: в статье проведен анализ динамометров различных типов с учетом их конструктивного исполнения и принципов действия. Рассмотрены следующие группы приборов: механические (рычажные, пружинные, гидравлические); электромеханические (с емкостным, тензорезисторным, индуктивным, пьезоэлектрическим и вибрационно-частотным преобразователями); оптико-механические (с зеркальным и интерференционным указательными устройствами); радиоизотопные (абсорбционные и рассеянного излучения).

Ключевые слова: машиностроение, обработка металла резанием, динамометр, сила резания, тангенциальная составляющая.

В современном машиностроительном производстве оптимизация процессов механической обработки металла остается одной из ключевых задач, напрямую влияющих на экономическую эффективность, качество продукции и ресурсосбережение. Одним из важнейших параметров, определяющих соответствие технологическим требованиям процессу резания, является сила резания - векторная величина, отражающая совокупное воздействие обрабатываемого материала на режущий инструмент [1-4].

Точное измерение составляющих силы резания (P_x , P_y , P_z) позволяет:

- обоснованно выбирать геометрические параметры режущего инструмента;
- назначать рациональные режимы резания (скорость, подачу, глубину);
- прогнозировать износ инструмента и предотвращать его преждевременный выход из строя;
- оценивать эффективность новых инструментальных и обрабатываемых материалов;
- верифицировать математические модели процессов резания. Уменьшать штучно-калькуляционное время обработки, снижать упругие деформации, тем самым повышая точность обработки.

На протяжении десятилетий для измерения сил резания применяются динамометры - специализированные измерительные системы, преобразующие

механическую нагрузку в регистрируемый сигнал. Однако современные требования машиностроительного производства – повышение точности, быстродействия, многофункциональности, интеграции в цифровые производственные среды – ставят перед разработчиками динамометров новые вызовы.

Актуальность разработки новой принципиальной схемы динамометра обусловлена следующими факторами:

1. Рост требований к точности измерений. Современные прецизионные операции (тонкое точение, фрезерование микрорельефов) требуют разрешения на уровне долей ньютона.

2. Необходимость многокомпонентных измерений. Для полного анализа процесса резания критически важно синхронно фиксировать все три составляющие силы (P_x , P_y , P_z) с минимальной взаимовлияющей погрешностью.

3. Динамический характер нагрузок. Нестационарные процессы (прерывистое резание, вибрации) требуют широкого динамического диапазона и полосу пропускания динамометра (до нескольких килогерц).

4. Интеграция в цифровые системы. Динамометр должен обеспечивать совместимость с промышленными протоколами передачи данных (OPC UA, MTConnect) и ПО для анализа (LabVIEW, MATLAB).

5. Миниатюризация и гибкость к переналадке. Для применения на станках разных типов (токарных, фрезерных, шлифовальных) необходима модульная конструкция с возможностью быстрой переналадки.

6. быстродействие, не нарушать жесткость шпиндельных и суппортных узлов

Задачи исследования:

1. Анализ существующих принципов построения динамометров (механических, гидравлических, тензометрических, пьезоэлектрических и т.д.).

2. Выбор оптимального метода преобразования усилия в электрический сигнал с учетом требований к диапазону, точности и быстродействию.

3. Подобрать схему измерительного канала, включая первичный преобразователь, усилитель и АЦП.

4. Моделирование упругого элемента динамометра для минимизации деформаций и перекрестных влияний.

5. Обоснование требований к материалам и технологиям изготовления для обеспечения долговечности в условиях вибраций и температурных перепадов.

6. Смоделировать упругий элемент для минимизации погрешностей.

7. Подобрать материалы, устойчивые к вибрациям и температурным перепадам.

8. Протестировать прототип в реальных условиях.

Представленная работа направлена на создание научно обоснованной принципиальной схемы динамометра, которая станет основой для проектирования приборов нового поколения, способных обеспечить качественный скачок в исследовании и оптимизации процессов механической обработки металлов [5].

На практике динамометры делят на два вида: стационарные и переносные.

Стационарные, именуемые также образцовыми, применяют главным образом для поверки переносных рабочих приборов. Их отличительная черта – наличие государственного свидетельства с таблицей, отражающей зависимость показаний индикатора от нагрузки в контрольных точках.

Среди рабочих динамометров выделяют три конструктивных типа: пружинный, гидравлический и электрический.

По способу регистрации силы различают:

- стрелочные (для статических нагрузок);
- счетные;
- записывающие (динамографы).

При этом стрелочные модели используют преимущественно при измерении статических усилий, тогда как счетные и записывающие предназначены для работы с переменными усилиями.

Классификация основных видов средств измерения силы резания (динамометров) приведена на рис. 1.

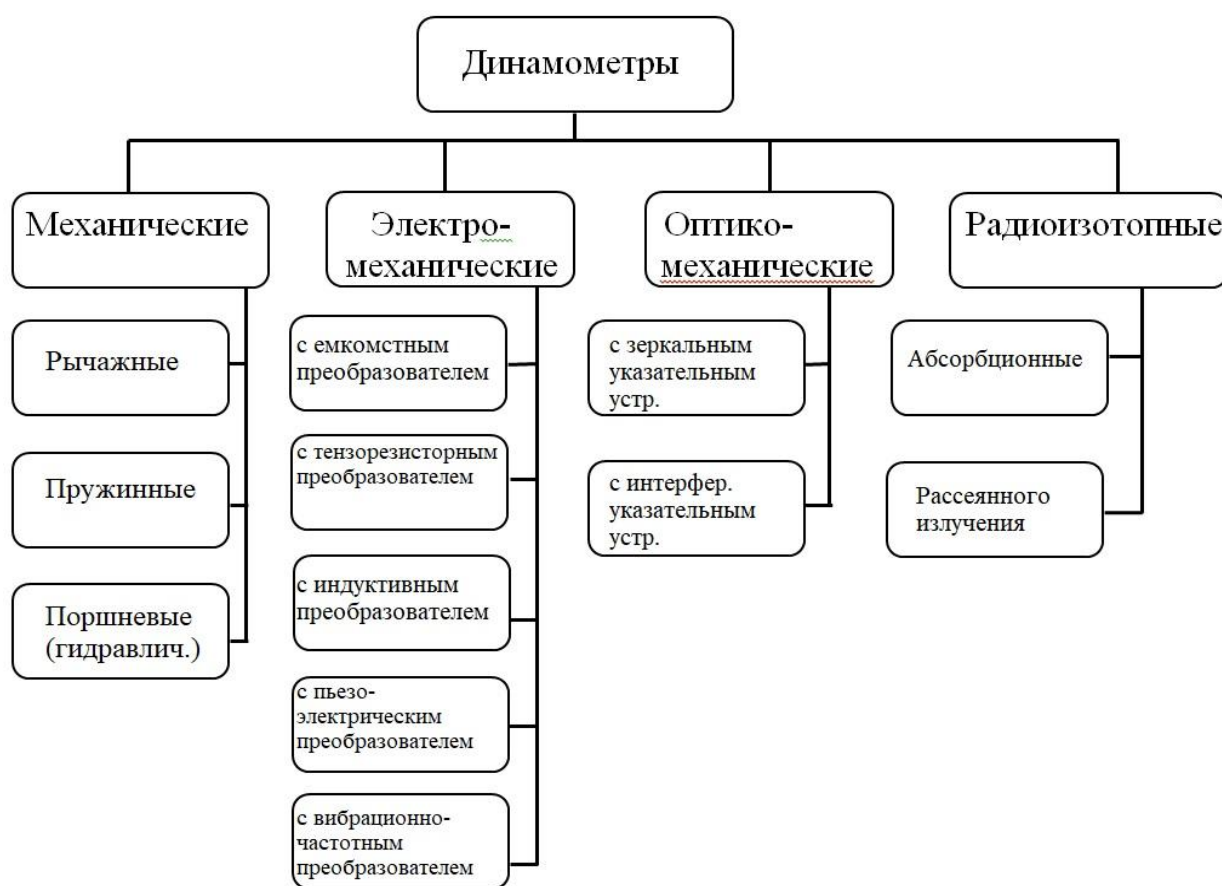


Рис. 1. Классификация основных видов динамометров (средств измерения силы резания)

Далее фокусируемся на электро-механических динамометрах (рис. 2–6), поскольку они наиболее полно отвечают современным требованиям машиностроительного производства. Ключевые обоснования: высокая точность и разрешающая способность; многокомпонентность измерений с минимальной взаимовлияющей погрешностью; широкий динамический диапазон и полоса

пропускания; интеграция в цифровые производственные среды; миниатюризация и адаптивность конструкции; совместимость с методами верификации и моделирования; экономическая эффективность в долгосрочной перспективе.

Таким образом, электро-механические динамометры – единственный тип, сочетающий точность, быстродействие, многокомпонентность, цифровую интеграцию и адаптивность, необходимые для оптимизации современных процессов механической обработки металлов. Механические и гидравлические аналоги уступают по ключевым параметрам и не соответствуют заявленным в тексте требованиям к приборам нового поколения.

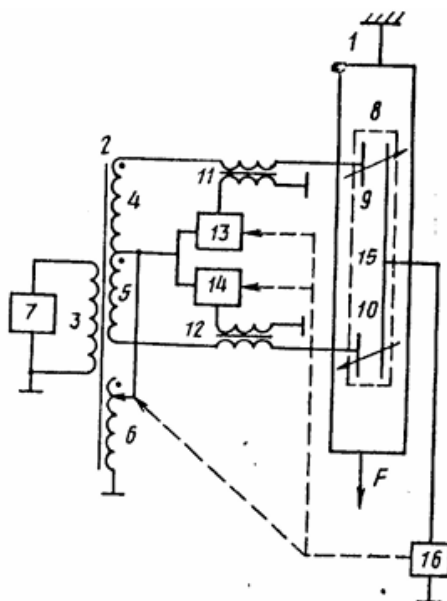


Рис. 2. Схема емкостного динамометра [6]

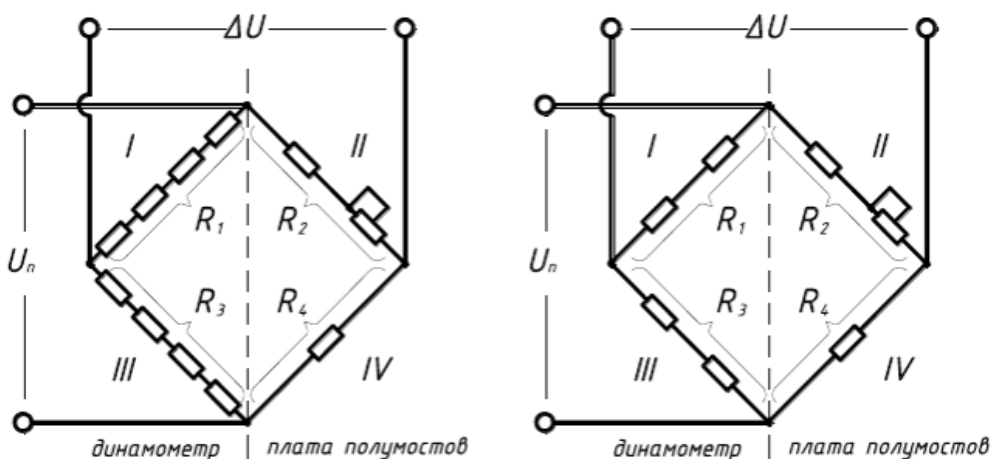


Рис. 3. Схема соединения тензорезисторов УДМ-600 [7, 8]

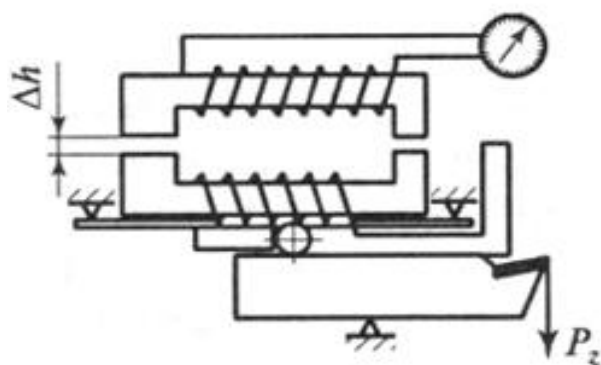


Рис. 4. Схема с индуктивным преобразователем

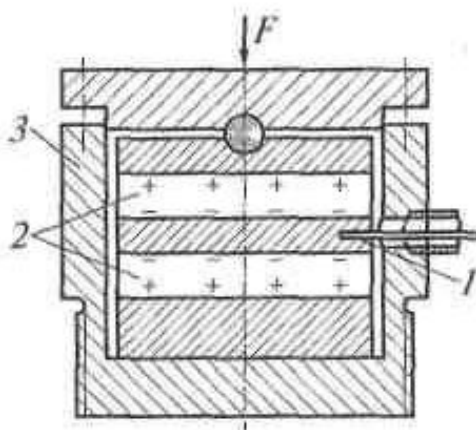


Рис. 5. Пьезоэлектрические динамометр со схемой преобразователя типа ДТ (1 – выводной электрод; 2 – кварцевые пластины; 3 – корпус);

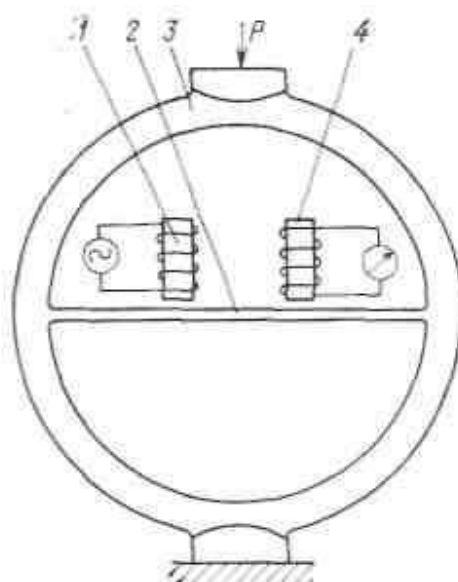


Рис. 6. Схема вибрационно-частотного преобразователя:
1 – генератор-возбудитель; 2 – упругая перемычка; 3 – упругое кольцо;
4 – электромагнитный преобразователь колебаний

Электро-механические динамометры – наиболее перспективный тип приборов для измерения сил резания. Они превосходят механические и гидравлические аналоги по точности, быстродействию, многокомпонентности и возможности цифровой интеграции.

В результате, дальнейшие исследования будут заключаться в разработке нового электромеханического динамометра для повышения эффективности механической обработки металлов.

Библиографический список

1. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
2. Вульф, А.М. Резание металлов / А.М. Вульф. – Л.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
3. Резников, Н.И. Учение о резании металлов / Н.И. Резников. – М.: Машгиз, 1947. – 588 с.
4. Полетика М.Ф. Приборы для измерения сил резания. М., Машгиз, 1962.
5. Самойлов, В. Б. Модернизация системы для измерения сил резания на базе динамометров серии УДМ / В. Б. Самойлов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2019. – № 5(128). – С. 91-103.
6. Патент SU 1627868 A1 СССР. Емкостный динамометр: № 1345070, кл. G 01 L 1/14, 1985: / А.М. Кузовников: // <https://patentimages.storage.googleapis.com/95/8d/a6/6db70969f6c989/SU1627868A1.pdf> (дата обращения: 10.10.2025).
7. Руководство к универсальному динамометру УДМ конструкции ВНИИ. М., ВНИИ, 1983.
8. Шуляк, Я. И. Модернизация установки измерения сил резания на базе динамометра УДМ-600 / Я. И. Шуляк, С. Г. Васильев // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. – 2016. – № 1. – С. 1-12.

© Сайдуганов А.Р., Ахмедьянова Д.А., Никонов Е.С., 2025

Э.Ф. ГАБИДУЛЛИН, А.В. СОБАЧКИНА, Н.Г. РЕКА
sobachkina2004@bk.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. П.П. ЧЕРНИКОВ

Уфимский университет науки и технологий

МОБИЛЬНЫЙ РОБОТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОНОМНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СТАНКОВ

Аннотация: в работе рассматривается инновационный подход к организации производственных процессов в механообработке, основанный на применении мобильных роботизированных комплексов для обслуживания групп технологического оборудования. Представлены технические решения, позволяющие интегрировать функции загрузки-выгрузки, контроля качества и управления инструментом в единой мобильной системе.

Ключевые слова: Мобильный роботизированный комплекс; механообработка; автоматизация; ЧПУ; навигация; машинное зрение; резание металлов; методы неразрушающего контроля.

Современное машиностроение переживает этап фундаментальной трансформации, в ходе которой традиционные подходы к организации производственных процессов всё чаще обнаруживают свои ограничения в условиях растущей глобальной конкуренции. Классическая модель, предполагающая закрепление оператора за отдельными станками или их группами, не всегда справляется с современными вызовами. Проведенные исследования показывают, что оператор станка с ЧПУ тратит до 30 % рабочего времени на вспомогательные операции — установку заготовок, контроль качества и замену инструментальной оснастки. При этом простой оборудования из-за человеческого фактора достигает 20–25 % от общего фонда времени [1].

Существующая практика фрагментарной автоматизации лишь усугубляет проблему. Предприятия часто приобретают разрозненные системы: роботизированные ячейки, стационарное измерительное оборудование, системы мониторинга состояния инструмента. Такой подход не только увеличивает капитальные затраты, но и создает серьёзные сложности с интеграцией, существенно снижая общую эффективность инвестиций в автоматизацию.

В качестве альтернативы предлагается мобильный роботизированный комплекс, способный автономно обслуживать группу из 5–6 станков с ЧПУ. Данная разработка реализует принцип централизованного обслуживания, при котором универсальная мобильная система выполняет весь комплекс вспомогательных операций. Важнейшим достижением стало преодоление традиционного компромисса между мобильностью и точностью выполнения операций.

Организация производственной ячейки реализована по кластерному принципу. Технологическое оборудование располагается по дуге окружности радиусом 6–8 метров или в линейной конфигурации, что обеспечивает оптимизацию маршрутов перемещения комплекса. Каждый станок оснащается унифицированными интерфейсами взаимодействия, включающими стандартизированные зоны загрузки с направляющими элементами, протоколы связи OPC UA, систему визуальных маркеров для идентификации и магнитные метки для точного позиционирования (Рис. 1) [2]. Складская система организована по трехуровневой схеме, включающей основной склад, инструментальный склад и буферные зоны в непосредственной близости от станков для обеспечения оперативного доступа.

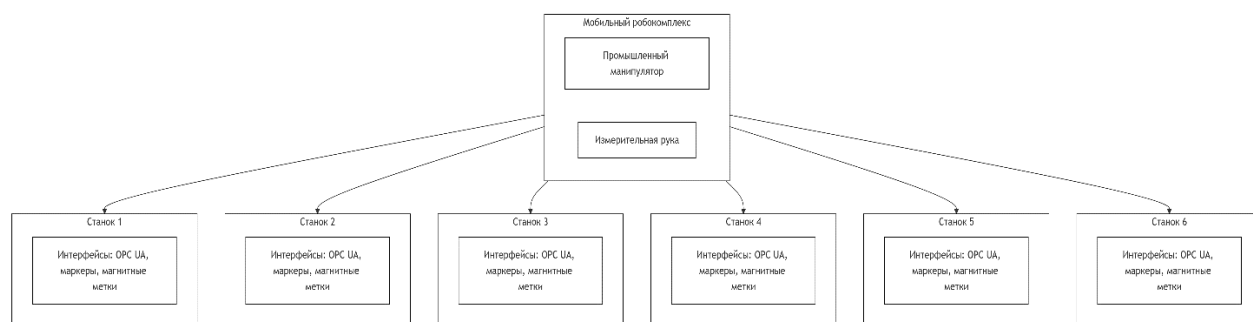


Рис. 1. Линейная конфигурация производственной ячейки

Для иллюстрации принципа работы комплекса приведена структурная схема (Рис. 2), которая отображает основные компоненты системы, их взаимодействия и последовательность сигналов. Схема подчеркивает многоуровневую навигацию, манипуляторные подсистемы, датчики и управление, обеспечивающие автономность и точность операций.

Манипуляторная система комплекса построена по принципу функционального разделения. Грузоподъемные операции обеспечиваются промышленным роботом Yaskawa Motoman GP12, обладающим грузоподъемностью 12 кг при сохранении повторяемости позиционирования $\pm 0,02$ мм [5]. Прецизионные измерения выполняются с использованием измерительной руки Hexagon Absolute Arm 87, обеспечивающей точность измерений $\pm 0,02$ мм [6]. Подобное архитектурное решение позволило достичь оптимального баланса между производительностью и точностью при сохранении приемлемого уровня затрат.

Одной из наиболее сложных инженерных задач стало обеспечение точного позиционирования в условиях производственного цеха. Разработанное решение представляет собой многоуровневую систему навигации. Первый уровень основан на технологии 3D LIDAR SLAM с точностью $\pm 2\text{--}3$ см [7], второй уровень использует UWB-метки с точностью $\pm 10\text{--}30$ см [8], третий уровень задействует визуальные маркеры с точностью ± 1 см, тогда как финальное позиционирование обеспечивается магнитными метками и механическими упорами, гарантирующими точность ± 1 мм. При выполнении операций вблизи станка комплекс стабилизируется с помощью системы домкратов, что позволяет проводить

измерения, сопоставимые по точности со стационарным измерительным оборудованием.

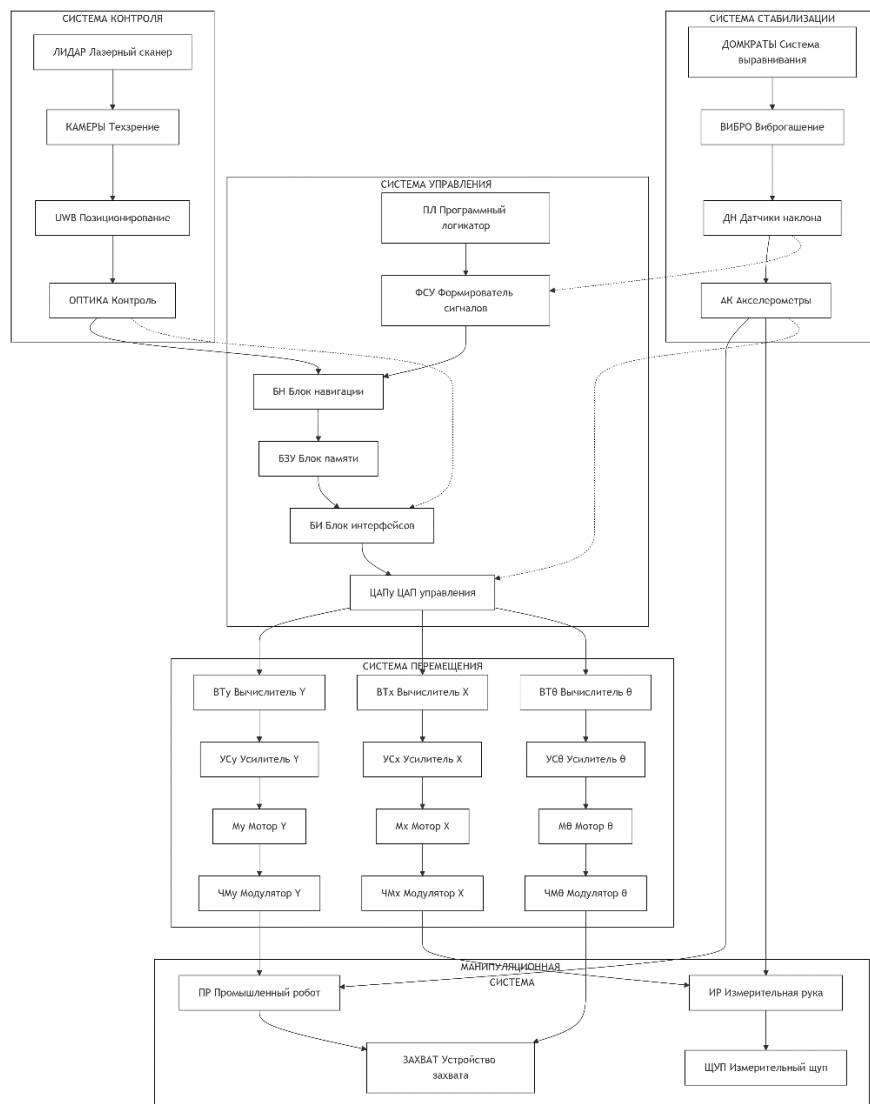


Рис. 2. Структурная схема мобильного роботизированного комплекса

Значительным достижением стала реализация in-process контроля для токарно-фрезерных станков, оснащенных противопинделем. Разработанная методика позволяет выполнять измерения детали непосредственно в токарном патроне без ее извлечения. Данный подход обеспечивает сокращение времени контроля на 50–70 % [3], исключает погрешности перебазирования и позволяет оперативно корректировать режимы обработки.

Система управления инструментом построена на принципах предиктивного обслуживания. Прямые методы контроля, включая оптический анализ режущей кромки, реализуются роботизированной системой. Косвенные методы, такие как виброакустический анализ и мониторинг мощности шпинделя, выполняются системой ЧПУ технологического оборудования [2]. Математическое описание процессов износа включает классическую модель прогрессивного износа (1) [9]:

$$h = K \cdot V_a \cdot f^b \cdot T^c, \quad (1)$$

где h – ширина ленточного износа, мм;
 K – эмпирический коэффициент;
 V – скорость резания, м/мин;
 f – подача, мм/об;
 T – время резания, мин.

Практическая реализация данных моделей позволяет использовать 85–95 % ресурса инструмента вместо традиционных 70–80 %, обеспечивая экономию до 20–30 % на расходе инструментального оснащения.

Основу системы управления составляет алгоритм динамического планирования, использующий многофакторную модель приоритезации заданий [4], где учитываются остаточное время обработки, степень износа инструмента и приоритет детали с адаптивными весовыми коэффициентами (2). Алгоритм осуществляет постоянный мониторинг состояния станков, прогнозирует время завершения операций с точностью 80–90 % и оперативно выполняет перепланирование при возникновении нештатных ситуаций.

$$P = w_1 \cdot T + w_2 \cdot W + w_3 \cdot Q, \quad (2)$$

где P – приоритет задания;
 w_1, w_2, w_3 – весовые коэффициенты;
 T – остаточное время обработки, мин;
 W – степень износа инструмента, %;
 Q – приоритет детали.

Типовой рабочий цикл включает следующие этапы: за 2–3 минуты до завершения обработки комплекс инициирует движение к станку, выполняет точное позиционирование, осуществляет открытие защитного ограждения, проводит контроль детали в патроне, при необходимости извлекает обработанное изделие, устанавливает новую заготовку и запускает исполнительную программу. Весь технологический цикл занимает минимальное время.

Экономический анализ демонстрирует высокую эффективность проекта: при стоимости комплекса 12–15 млн рублей (включая 3–5 млн рублей на закупку промышленного робота Yaskawa Motoman GP12, измерительной руки Hexagon Absolute Arm 87 и мобильной платформы, а также 7–10 млн рублей на проектирование, разработку системы навигации, интеграцию ПО, адаптацию под конкретное производство и пусконаладочные работы), обеспечивается многофункциональность решения. Годовая экономия составляет 7,2 млн рублей на оплате труда (эквивалент 4 операторов), 1,5–2 млн рублей благодаря снижению брака за счет автоматизированного in-process контроля качества, который минимизирует ошибки человеческого фактора, исключает погрешности перебазирования деталей и позволяет оперативно корректировать режимы обработки, тем самым снижая уровень брака на 10–15 % от общего объема производства, а также 1 млн рублей за счет оптимизации расхода инструмента благодаря предиктивному обслуживанию с использованием оптического анализа режущей кромки, виброакустического мониторинга и математических моделей износа, что позволяет использовать 90–95 % ресурса инструмента вместо традиционных 70–80 % и сократить затраты на замену оснастки на 20–30 % [3].

Срок окупаемости составляет 1,5–2 года, что для проектов подобной сложности считается отличным показателем.

Внедрение комплекса требует выполнения определенных подготовительных мероприятий: технологическое оборудование должно быть оснащено интерфейсами OPC UA, требуется обеспечить ровное покрытие пола в цехе с допуском $\pm 2\text{--}3$ мм/м, необходима развертка надежной беспроводной сети. Персонал проходит переподготовку с переходом от функций операторов к обязанностям техников-наладчиков. Рекомендуется поэтапное внедрение, начинающееся с 2–3 станков в течение 1–2 месяцев с последующим масштабированием на полную ячейку за 3–6 месяцев [1].

Перспективы развития системы связаны с повышением интеллектуальности алгоритмов планирования, расширением номенклатуры обслуживаемого оборудования и интеграцией с системами цифровых двойников. По существу, создается основа для перехода к полностью автоматизированным производствам нового поколения, характеризующимся гибкостью, эффективностью и способностью к быстрой адаптации к изменяющимся рыночным требованиям [4].

Библиографический список

1. Астахов, В. П. Автоматизация технологических процессов в машиностроении : учебное пособие / В. П. Астахов. – Москва : Машиностроение, 2018. – 256 с.
2. Бутковский, А. Г. Интеллектуальные системы управления в машиностроении : учебное пособие / А. Г. Бутковский. – Санкт-Петербург : Политехника, 2017. – 240 с.
3. Иванов, И. А. Экономика автоматизации и роботизации производства : монография / И. А. Иванов. – Москва : Экономика, 2019. – 200 с.
4. Соколов, И. А. Интеллектуальные системы управления производственными процессами : учебное пособие / И. А. Соколов. – Москва : Машиностроение, 2020. – 280 с.
5. Технический паспорт промышленного робота Yaskawa Motoman GP12 : техническая документация / Yaskawa Electric Corporation. – 2021. – 45 с.
6. Руководство по эксплуатации измерительной руки Hexagon Absolute Arm 87 : техническая документация / Hexagon AB. – 2022. – 68 с.
7. Вишняков, Ю. Д. Системы машинного зрения в робототехнике : учебное пособие / Ю. Д. Вишняков. – Москва : Техносфера, 2019. – 288 с.
8. Иванов, С. В. Беспроводные сети в автоматизации : учебное пособие / С. В. Иванов. – Санкт-Петербург : Лань, 2018. – 220 с.
9. Диев, И. С. Теория резания металлов : учебник / И. С. Диев. – Москва : Высшая школа, 1988. – 320 с.

© Габидуллин Э.Ф., Собачкина А.В., Черников П.П., Река Н.Г., 2025

УДК 621.9

М.Э. ЗАЛИЕВ

marat030201@gmail.com

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент С.И. ФЕЦАК

Уфимский университет науки и технологий

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПАЛЕТИЗАЦИИ КОРОБОК С ПРОДУКЦИЕЙ АО «БАШСПИРТ»

Аннотация: в данной работе представлены технические предложения по автоматизации процесса палетизации коробок с продукцией на АО «Башспирт». Проведен анализ существующей системы палетизации, выявлены ее недостатки и определены ключевые требования к автоматизированной системе. Предложены варианты технических решений, включающие использование промышленных роботов-палетизаторов.

Ключевые слова: оптимизация, палетизатор, коробка, технические предложения, внедрение, производственный процесс, упаковка, робототехника, автоматизация.

В современном мире, где стремление к автоматизации и эффективности определяет развитие технологий, робототехника занимает одно из центральных мест. Введение робототехнических решений открывает новые горизонты для повышения производительности, улучшения качества жизни и решения глобальных проблем, подчеркивая ее значимость как ключевого фактора прогресса.

Робототехника нужна нам по множеству причин, охватывающих широкий спектр сфер жизни и деятельности. Роботы могут выполнять монотонную, утомительную или опасную работу гораздо быстрее и эффективнее, чем люди. Это освобождает людей от этих задач и позволяет им сосредоточиться на более креативной или стратегической деятельности. Также использование роботов приводит к увеличению объема производства и снижению издержек.

Положительным качеством роботов является то, что они способны выполнять операции с высокой точностью и повторяемостью, что уменьшает количество брака и повышает качество продукции. Роботы позволяют оптимизировать планировку цехов, логистику и другие процессы, что приводит к повышению общей эффективности.

Акционерное Общество «Башспирт» входит в топ-5 производителей крепкого алкоголя в России. Продукция представлена в 89 регионах страны. АО «Башспирт» выпускает широкий ассортимент продукции. Это водки, бальзамы, настойки, биттеры, джин, минеральные воды, натуральные уксусы. Спирт выпускается на собственном спиртовом заводе по уникальной технологии, не имеющей аналогов в

России. В производстве спирта применяются ферментные препараты биологического происхождения.

Для оптимизации производственного процесса и поддержания конкурентоспособности на рынке компания нуждается в введении методов автоматизации. В ходе анализа текущего состояния на заводе были выявлены области для улучшения, которые могут быть оптимизированы для повышения эффективности:

- Проблема переключивания коробок на палеты в произвольном порядке и дальнейшая их обмотка;
- Сканирование коробок при укладке их на палеты;
- Обнаружение брака, сколов на бутылках и примесей в продукции.

В данной работе разберем первую проблему компании. Для ее решения была выдвинута конкретная идея о роботизированной установке, которая будет принимать коробку с продукцией, ориентировать ее и помещать на палету.

Для оптимального поиска решения в первую очередь решили опираться на опыт других компаний, связанных с разработкой и интеграцией промышленного оборудования для автоматизации производства.

Роботизированный комплекс от компании «ARTECH»

Выбор компании «ARTECH» для заимствования идеи обусловлен ведущей ролью в области производства оборудования для молочной, алкогольной, космической и др. промышленности, и их способностью создавать современные решения.

Роботизированный комплекс укладки коробок с упаковочными материалами на поддон от компании «ARTECH» (рис. 1) работает по следующему принципу:

1. Робот подает пустой поддон в зону паллетирования с помощью захватной системы, имеющей инструмент для работы с поддонами.
2. Коробки выходят из двух машин групповой упаковки на рабочую точку. В зависимости от выбранного типа продукта робот укладывает короба на поддон вакуумной захватной системой согласно ранее созданной схеме укладки.
3. Схема укладки для каждого нового типа продукта создается в специальной программе-генераторе схемы укладки на пульте робота. Программирование робота при переходе на новый вид продукции не требуется.

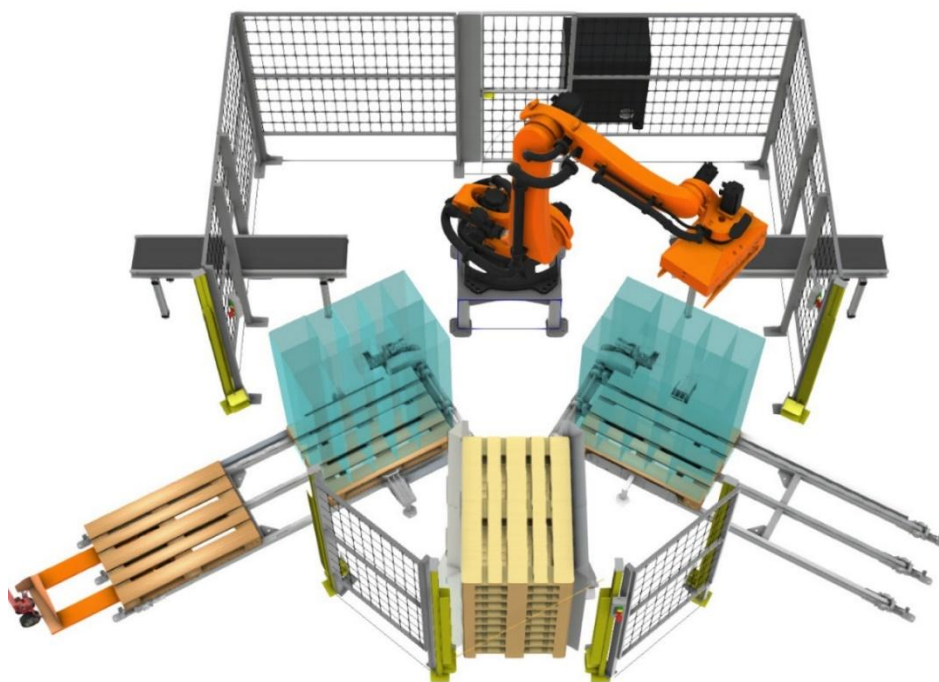


Рис. 1. Компоновка РТК от компании «ARTECH»

Внедренная роботизированная система стала эффективным способом увеличения производительности. Таким образом была получена производительность в 400 коробок в час за счет обслуживания двух линий фасовки.

В данном решении используется промышленный робот KUKA KR120 R3200 PA (рис. 2). - робот паллетайзер, позволяет легко перемещать грузы массой до 120 кг, быстро и точно складывать высокие паллеты. Конструкция 5-осевого робота-палетоукладчика позволяет складывать паллеты на высоту до 3195 мм.

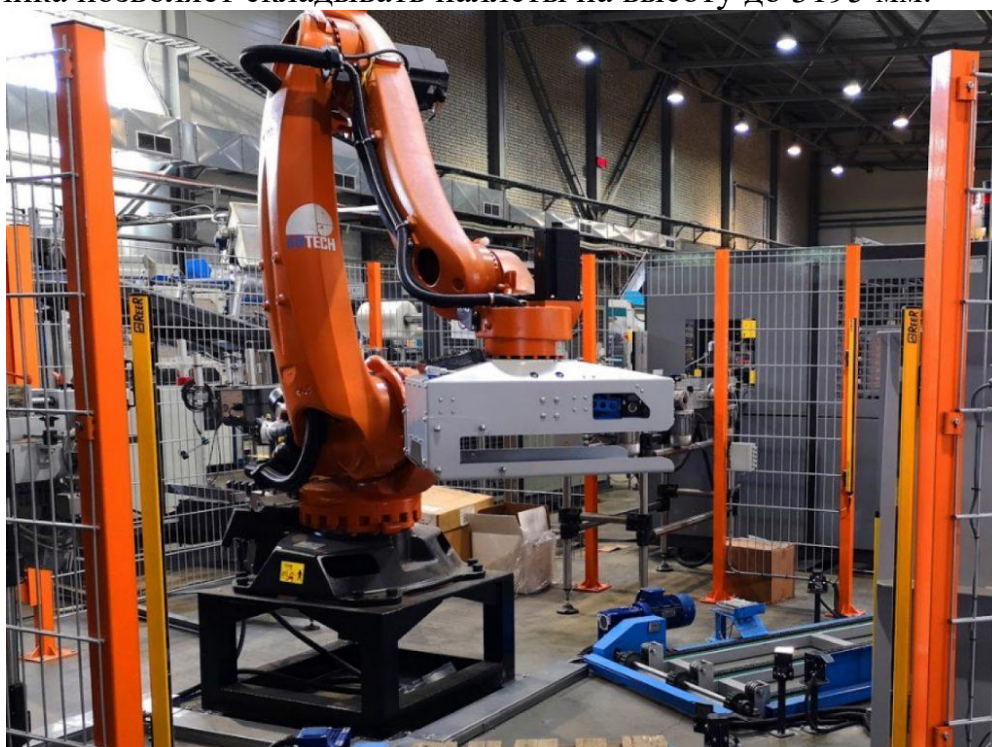


Рис. 2. Робот KUKA KR120 R3200 PA

Недостатки данного решения следующие:

- Неоднозначность позиционирования коробок на палету;

- Ухудшение работы в совокупности с обычным ленточным конвейером;
- Необходимость подналадки схвата робота для разных габаритов коробок.

Роботизированный комплекс от компании «METRA ROBOTICS»

Роботизированный комплекс укладки коробок с упаковочными материалами на поддон от компании «METRA ROBOTICS» (рис. 3) работает по следующему принципу:

1. Диспенсер паллет хранит запас пустых поддонов. По требованию системы управления, когда робот-паллетизатор готов принять новую паллету, диспенсер выдает одну паллету на конвейер для поддона.
2. Коробки с продукцией перемещаются к роботу-паллетизатору. На конвейере установлены датчики для подсчета количества коробок.
3. Паллетизация коробок происходит роботом-паллетизатором, который оснащен захватом. Робот складывает коробки на паллету. Робот-паллетизатор продолжает укладку коробок на поддон до тех пор, пока не будет достигнута заданная высота или количество коробок на поддоне.
4. После завершения укладки конвейер для поддонов перемещает заполненный поддон к паллетообмотчику.
5. Паллетообмотчик обматывает загруженный паллет стретч-пленкой.

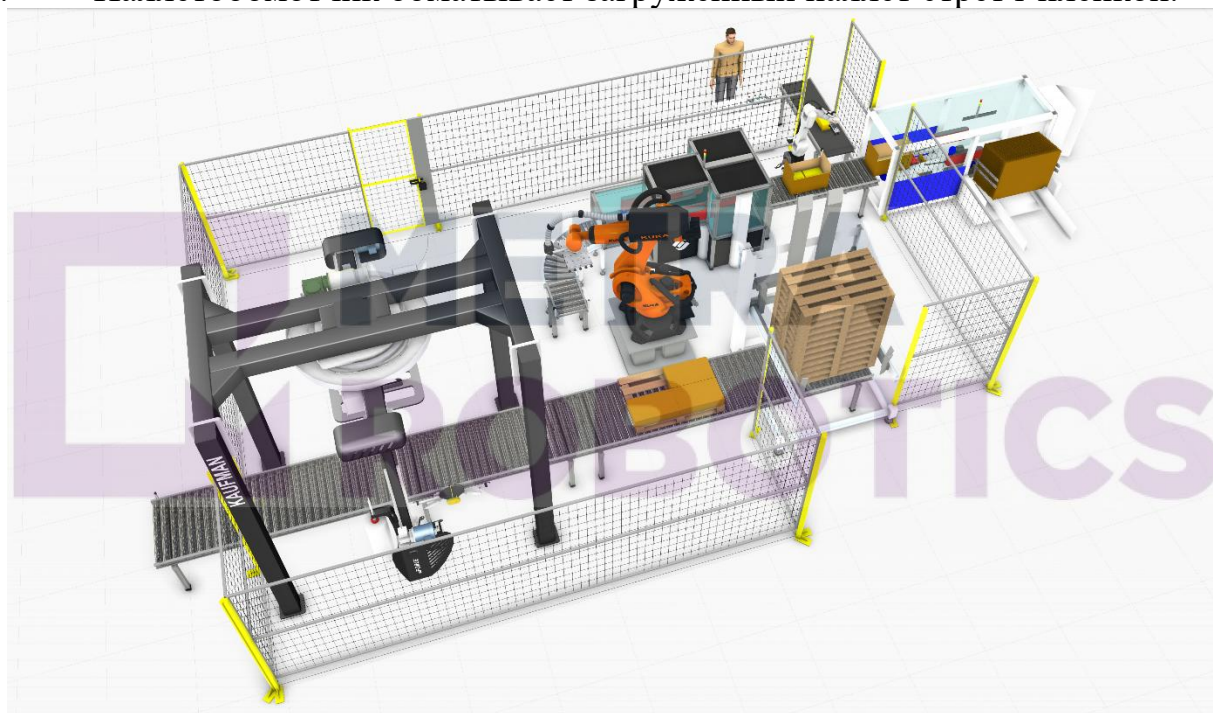


Рис. 3. Компонировка РТК от компании «METRA ROBOTICS»

Выбор компоновки

Рассмотрев различные варианты автоматизации процесса паллетизации коробок, наиболее перспективным был признан вариант от компании «METRA ROBOTICS». Этот выбор обусловлен рядом ключевых преимуществ:

- оптимальное сочетание стоимости, производительности, надежности. Это позволяет создать эффективный и экономически обоснованный РТК по паллетизации.

- важным преимуществом выбранного решения является возможность гибкости для выполнения других задач. При необходимости, комплекс может быть адаптирован для паллетизации лотков других размеров, типов, или даже для работы с другими видами продукции. Эта гибкость обеспечивает защиту инвестиций и позволяет использовать робота в будущем для решения различных задач, возникающих на производстве.

Однако, для оптимальной адаптации к поставленным задачам, в данную компоновку необходимо внести следующие корректировки:

- для повышения пропускной способности и обеспечения непрерывной работы системы, необходимо добавить второй конвейер, работающий параллельно с существующим. Это позволит роботу чередовать загрузку с двух конвейеров, минимизируя время простоя.

- выбор другого типа диспенсера паллет: Существующий диспенсер паллет, интегрированный в компоновку «METRA ROBOTICS», рассчитан на обслуживание только одного конвейера. В связи с добавлением второго конвейера, необходимо заменить его на диспенсер паллет, способный обслуживать два конвейера одновременно. Это обеспечит своевременную подачу пустых паллет на оба конвейера.

При внесении указанных корректировок, компоновка будет оптимально соответствовать требованиям к РТК, обеспечивая высокую производительность, надежность и гибкость системы.

Техническое предложение компоновки робототехнического комплекса

На основании проведенного анализа двух типов компоновки РТК, можно сделать заключение, что вариант от компании «METRA ROBOTICS» является наиболее предпочтительным. Однако, для достижения оптимальной эффективности и соответствия требованиям проекта, предлагается внести в него ряд существенных дополнений и модификаций. Смоделированная компоновка РТК (рис. 4).

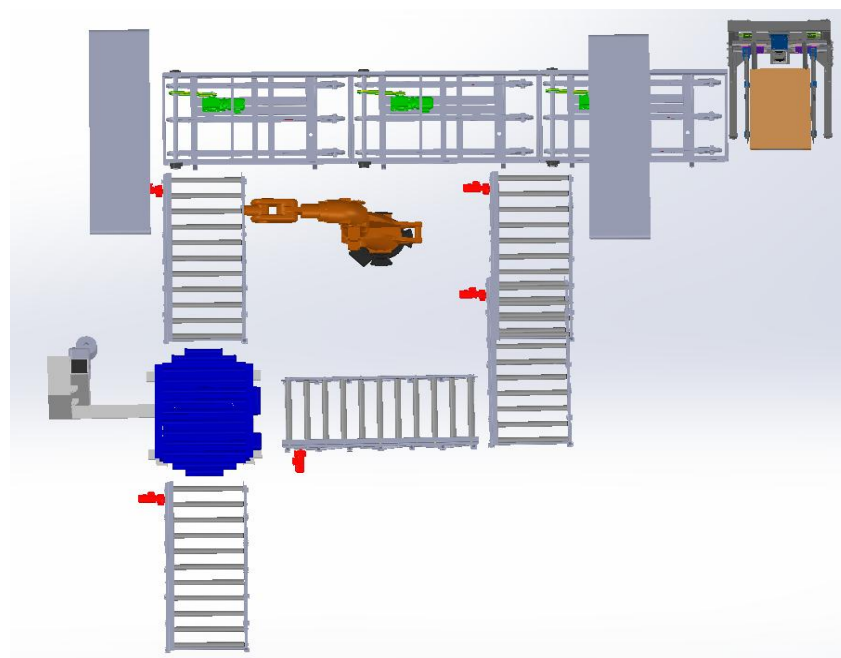


Рис. 4. Смоделированная компоновка РТК

Алгоритм работы роботизированной установки

В ходе сравнительного анализа был выбран третий вариант. Для него был составлен алгоритм работы.

1. Коробки с продукцией перемещаются по двум параллельным ленточным конвейерам, обеспечивая непрерывную подачу к зоне работы робота-паллетизатора.

2. Диспенсер паллет (рис. 5) автоматически выдает пустые паллеты на два параллельных роликовых конвейера (рис. 6), предназначенных для транспортировки паллет. Датчики, расположенные в зоне загрузки паллет, подтверждают наличие паллеты и готовность к работе робота.



Рис. 5. Диспенсер паллет



Рис. 6. Напольный роликовый конвейер для поддонов

3. Робот-паллетизатор (рис. 7), оснащенный специализированным захватом (рис. 8), получает информацию о положении коробок с ленточных конвейеров. Робот захватывает коробки с конвейеров и, следуя заранее определенному алгоритму, записанному в коде, укладывает их на паллету. Робот

попеременно укладывает коробки на две паллеты, расположенные на конвейерах, минимизируя время простоя системы.



Рис. 7. Step SP180/3200

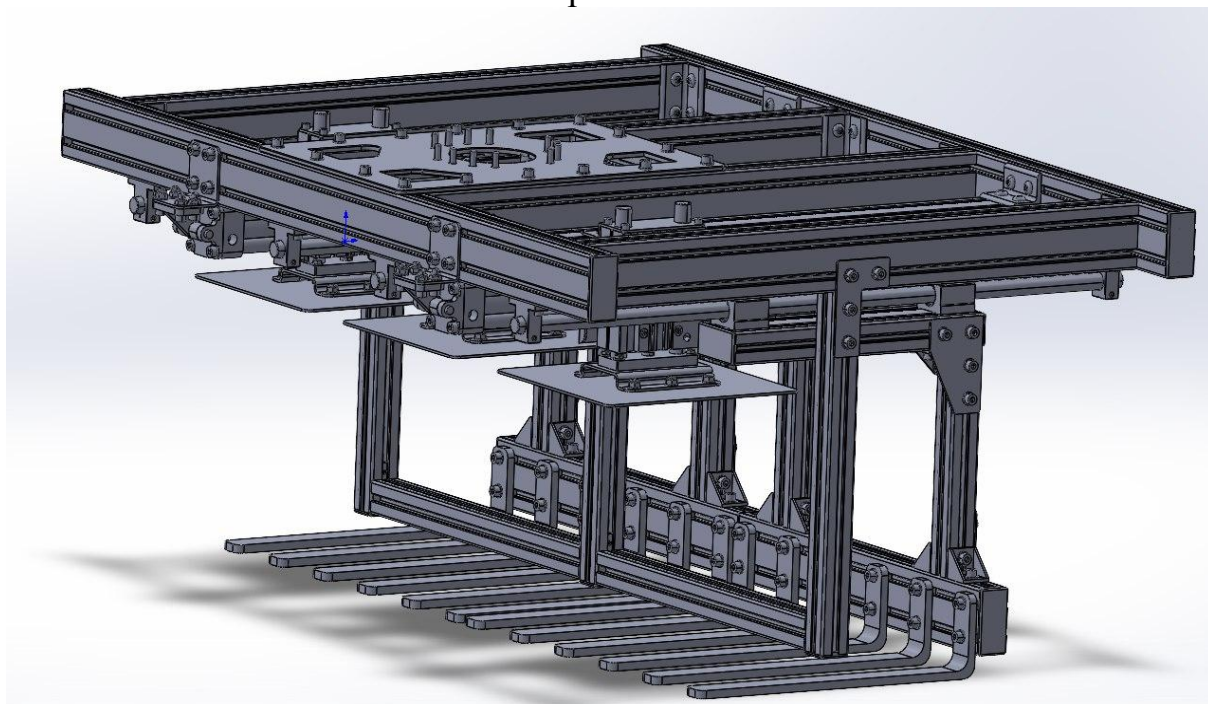


Рис. 8. Захватная система

4. После завершения укладки коробок на паллету, роликовый конвейер транспортирует загруженную паллету к паллетообмотчику. Система управления обеспечивает автоматический запуск конвейера после заполнения паллеты и синхронизацию с работой паллетообмотчика.

5. Паллетообмотчик (рис. 9) автоматически оборачивает паллету с уложенными коробками стрейч-пленкой. После завершения обмотки, паллетообмотчик автоматически отрезает пленку и фиксирует ее конец.



Рис. 9. Паллетообмотчик Robopac

6. Замотанная стрейч-пленкой паллета продолжает движение по роликовому конвейеру к месту отгрузки. В зоне отгрузки подготовленную паллету забирает вилочный погрузчик для дальнейшей транспортировки на склад.

Данная роботизированная система является эффективным способом увеличения производительности для предприятий. Таким образом была получена хорошая производительность за счет обслуживания двух линий фасовки.

Заключение

В ходе анализа рассмотрен ряд решений для палетизации коробок с продукцией АО «Башспирт», были выявлены плюсы и минусы каждого варианта роботизированной установки, выявлен лидер, а также найден идеальный вариант для автоматизированной паллетообмотки.

Библиографический список

1. Ссылка на официальный сайт паллетообмотчика:
<https://robopacrussia.com/catalog/vertical-wrapping-machines/technoplat-3000?ysclid=m901j5gv25511760602>
2. Ссылка на компанию «MetraRobotics»: <https://metrarobotics.ru/?ysclid=mht9wx7swb360753682>
3. Ссылка на компанию «ARTECH»: <https://artech.si/?ysclid=mhta2hihjz197068796>

4. Ссылка на компанию АО «Башспирт»: <https://meridian.ru/industry-solutions/wines-spirits/>

© Залиев М.Э., 2025

УДК 67.05.000

Д.Э. КУТУШЕВ

bdbd_h@bk.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент П.П. ЧЕРНИКОВ

Уфимский университет науки и технологий

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТАРИРОВОЧНОЙ УСТАНОВКИ С УЧЕТОМ СОВРЕМЕННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

Аннотация: статья посвящена модернизации устаревшей тарировочной установки для термопар. Проанализированы ключевые недостатки оборудования. Предложено решение на базе современных АЦП, программируемых контроллеров и специализированного программного обеспечения. Описаны принципы работы и структура модернизированной установки.

Ключевые слова: тарировочная установка; термопара; модернизация оборудования; АЦП; автоматизация измерений; температурные измерения; зона резания; ЧПУ.

Актуальность темы модернизации тарировочной установки обусловлена важностью точного измерения температуры в зоне резания для повышения эффективности обработки современных материалов. В условиях перехода к цифровому производству устаревшее оборудование, становится узким местом исследовательского процесса, не обеспечивая необходимой точности, автоматизации сбора данных. Настоящая работа направлена на анализ существующих недостатков таких установок и поиска путей их модернизации с применением современных АЦП, систем автоматизации и специализированного ПО, что позволит вывести экспериментальную базу на новый уровень и обеспечить достоверность результатов исследования.

Имеющаяся на кафедре тарировочная установка *рис. 1* [1] не соответствует современным требованиям к точности, производительности и интеграции в цифровую среду. Прежде всего, на установка отсутствует автоматизация и цифровизация измерительных процессов: данные снимаются оператором вручную с аналоговых приборов и фиксируются в журналах, что неизбежно порождает погрешности, значительно увеличивает время проведения экспериментов и исключает возможность оперативной обработки результатов, в то время как современные научные стандарты диктуют использование высокоточных аналого-

цифровых преобразователей, цифровой фильтрации сигналов и программного комплекса для автоматического построения и верификации тарифовочных характеристик с последующей интеграцией в справочную литературу. Существенным ограничением является и её устаревшая элементная база, которая обуславливает повышенный уровень собственных шумов и нестабильность метрологических параметров, снижая общую точность и воспроизводимость результатов. Наконец, эргономика и безопасность установки не отвечают актуальным нормативам из-за громоздкой компоновки, отсутствия интуитивного интерфейса управления и наличия открытых токонесущих элементов, что в совокупности определяет необходимость её глубокой модернизации. Для решения обозначенных проблем предлагается комплексный подход к модернизации тарифовочной установки, сохраняющий её фундаментальный метрологический принцип, но кардинально обновляющий аппаратную и программную составляющие.

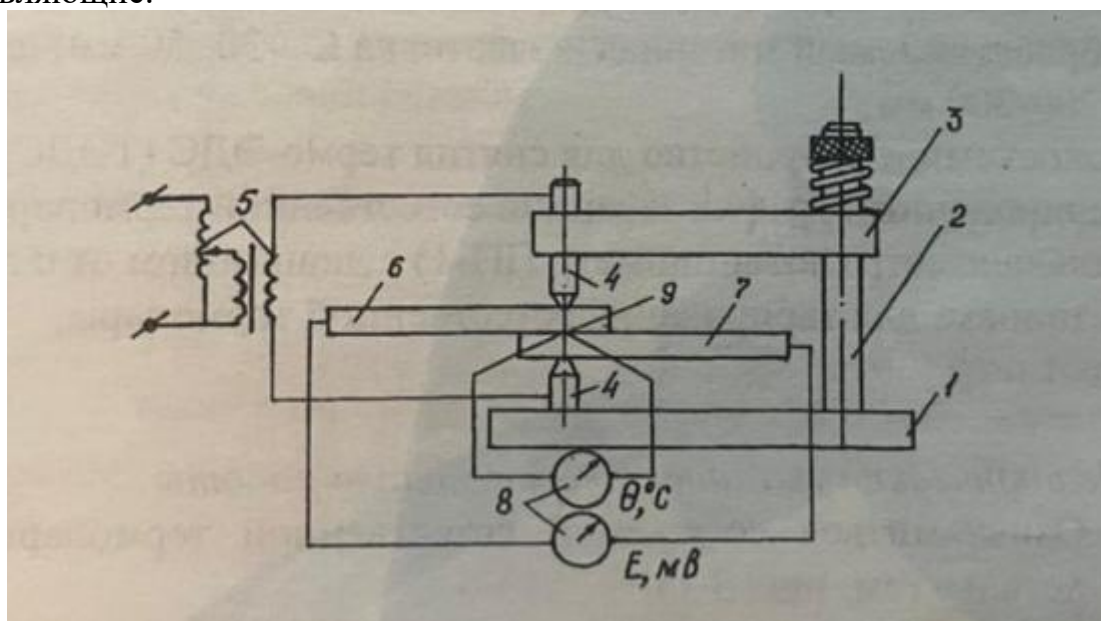


Рис. 1. Схема тарифовочной установки

1. Нагревательный элемент *рис.2*. Представляет собой спиралевидную конструкцию из жаропрочного сплава на основе нихрома или фехраля, размещенную на керамических изоляторах по периметру рабочей камеры. Внешне элемент выполнен в виде металлической проволоки диаметром 1-3 мм, сформированной в плотные спирали с равномерным шагом 2-5 мм. Конструкция обеспечивает многозонный нагрев с минимальным градиентом температуры.



Рис. 2. Нагревательный элемент

2. Нагружающее устройство *рис. 3*. Создает нагрузку на зону контакта образцов из обрабатываемого и инструментального материалов соответствующую силам резания в зоне контакта инструмента и детали. Нагружающее устройство представляет собой зубчато-реечный механизм, состоящий из мотор-редуктора с сервоуправлением, закаленной зубчатой рейки и двух направляющих качения для восприятия моментов. Устройство оснащено тензометрическим датчиком на опоре рейки и датчиком момента на валу шестерни, обеспечивающими измерение усилия в диапазоне 100-3000 Н с точностью $\pm 1\%$. Кинематическая схема позволяет осуществлять ход рейки 50-150 мм со скоростью 0.1-10 мм/с, с возможностью реверса и механической фиксации положения.



Рис. 3. Нагружающее устройство

3. Система теплоизоляции. Выполнена на основе высокопористого керамического волокна с температурой эксплуатации до 1400°C, представляющего собой многослойную структуру толщиной 50-100 мм. Теплоизоляционный контур полностью охватывает рабочую зону установки, включая боковые стенки, верхнюю и нижнюю крышки, и монтируется в виде съемных модулей для удобства обслуживания.

4. Эталонный измеритель температуры. В качестве эталонного измерителя температуры используется эталонная термopара типа S (платина-родий) высшего разряда точности. Датчик устанавливается в рабочей зоне керамического блока в

непосредственной близости от тарируемой термопары для обеспечения идентичных тепловых условий.

5. Система принудительного охлаждения. представляет собой комбинированную конструкцию, состоящую из осевых вентиляторов для обдува внешних поверхностей печи и жидкостного контура с теплообменником для интенсивного отвода тепла от нагревательных элементов. Управление системой осуществляется программируемым контроллером, который регулирует скорость оборотов вентиляторов и расход теплоносителя на основе показаний термопар, установленных на критических элементах конструкции.

6. Компьютер со специализированным ПО. Компьютерный комплекс представляет собой промышленную панель управления с сенсорным дисплеем, которое работает под управлением операционной системы реального времени. Программное обеспечение гарантирует автоматическое выполнение полного цикла тарировки, включая прогрев, стабилизацию температуры, измерение ТЭДС в заданных точках, математическую обработку результатов и генерацию отчетной документации.

Проведенная модернизация тарировочной установки позволит создать современный измерительный комплекс, обеспечивающий полную автоматизацию процесса тарировки и повышение точности измерений температур в зоне резания. Перспективы развития направления включают создание мобильных версий установки для эксплуатации в производственных условиях, разработку модульных решений для различных диапазонов температур и типов термопар, совершенствование методик тарировки с учетом реальных условий обработки материалов. Дальнейшее совершенствование установки будет направлено на расширение функциональных возможностей и повышение точности измерений при одновременном упрощении процедуры тарировки. Одна из компоновок такой установки на основе калибрационной печи *additel* [2] представлена на *рис. 4*.



Рис. 4. Тарировочная установка

Библиографический список

1. В.М Кишуров, П.П. Черников, Ч.А. Яруллин Технология механообработки: лабораторный практикум. – Москва 2006 – 217 с.

2. Additel 850-1200 URL: <https://additel.com/product-detail.html/850-laboratory-thermocouple-calibration-furnace/> (Дата обращения: 01.11.2025).

© Кутушев Д.Э., 2025

УДК 621.9

Н.С. НЕМКОВ

nemkovnikita@yandex.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент С.И. ФЕЦАК

Уфимский университет науки и технологий

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ ПАЛЛЕТИЗАЦИИ ЛОТКОВ С МОЛОЧНОЙ ПРОДУКЦИЕЙ В СТАКАНЧИКАХ

Аннотация: в данной работе представлено техническое предложение по автоматизации процесса паллетизации лотков с молочной продукцией в стаканчиках. Проведен анализ существующих систем паллетизации, выявлены их недостатки и определены ключевые требования к автоматизированной системе. Предложен вариант технического решения, включающий использование промышленного робота-паллетизатора.

Ключевые слова: оптимизация, паллетизатор, лоток, технические предложения, внедрение, производственный процесс, робототехника, автоматизация.

Современное пищевое производство предъявляет всё более жёсткие требования к скорости, точности и гигиеничности упаковки и отгрузки продукции. Кроме того, продукты данной отрасли являются достаточно хрупкими и имеют различные особенности, которые особенно важно учитывать при транспортировке.

В данной работе рассматриваются особенности укладки лотков со стаканчиками, содержащими молочный продукт (сметану). А также предлагается решение, позволяющее посредством автоматизации оптимизировать данный процесс. В рамках работы предлагается конкретная идея о роботизированной установке, которая будет принимать коробку с продукцией, ориентировать ее и помещать на палету.

Так как толщина и прочность стаканчиков низки, при падении они повреждаются и становятся непригодными к продаже. Поэтому роботизированный комплекс должен осуществлять надёжную фиксацию груза при перемещении.

Кроме того, воздействие на груз должно быть достаточно малым, чтобы он не был повреждён самим комплексом.

Стаканчики помещаются в лоток, размеры основания которого составляют 400х300 мм. Основной задачей комплекса является размещение лотков на паллеты размером 1200х800х145 мм в разных форматах.

Для складов предприятий, специализирующихся на молочной продукции, характерна ограниченность пространства. Поэтому в рамках данной работы рассматривается склад малых размеров, отделённый от цеха фасовки продукции, но соединённый с ним конвейерной линией с лотками, проходящей через специальное отверстие в стене.

Средняя производительность конвейерных линий на подобных производствах: 20 лотков в минуту. Из этого следует, что для того, чтобы лотки не скапливались на линии, комплекс должен укладывать за 10 секунд не менее 2-х лотков.

В качестве основного технологического оборудования предлагается использовать промышленный робот — устройство, представляющее собой совокупность манипуляторов. В зависимости от программы и рабочего органа он способен паллетировать самую разную продукцию (от мешков до бутылок), что поможет сэкономить время и денежные средства при переналадке. Робот будет снабжён захватным устройством с втягивающимися вилами. Его конструкция обеспечивает достаточно надёжную фиксацию и полностью исключает выпадение лотков при движении по вертикали.

В целях рационального использования площади поддонов лотки будут укладываться узкой стороной вдоль длинной стороны поддона, таким образом в одном ряду будет размещаться 8 лотков. Для обеспечения достаточной эффективности комплекса за один ход робота будет переноситься одновременно 4 лотка, в связи с чем размеры схвата должны быть достаточно велики. При этом максимальный вес груза будет равен 16 кг.

Процесс перемещения полной паллеты и поступления пустой паллеты должен быть происходить не дольше, чем за 10 секунд, иначе в результате постепенного накопления лотков на конвейере производственная линия будет приостановлена. Поэтому в дополнении к автоматическому диспенсеру паллет и приводному конвейеру будет использоваться аналогичный конвейер.

Для уменьшения времени простоя робота решено совместить выбранный хват с вакуумным. В то время, когда будет происходить смена полной паллеты на пустую, промышленный робот будет захватывать прокладочный лист и держать над зоной загрузки, ожидая пустую паллету.

Комплекс следует оградить защитным барьером.

С целью наглядного представления конструкции захвата с втягивающимися вилами с помощью ПО “SolidWorks” была создана его компьютерная модель (рис. 1). Захватное устройство в представленном варианте является конструкцией из металлических профилей. Движение зубцов осуществляется за счёт 2-х пневматических приводов, как и выдвижение вакуумных присосок,

предназначенных для захвата прокладочных листов и повышения производительности комплекса. Однако во втором случае движение является вращательным и передаётся с помощью подшипниковых узлов. Фиксация лотков осуществляется 3-мя прижимными пластинами с помощью такого же количества пневматических приводов. Общие размеры самого захвата равняются 1200x950x400 мм.

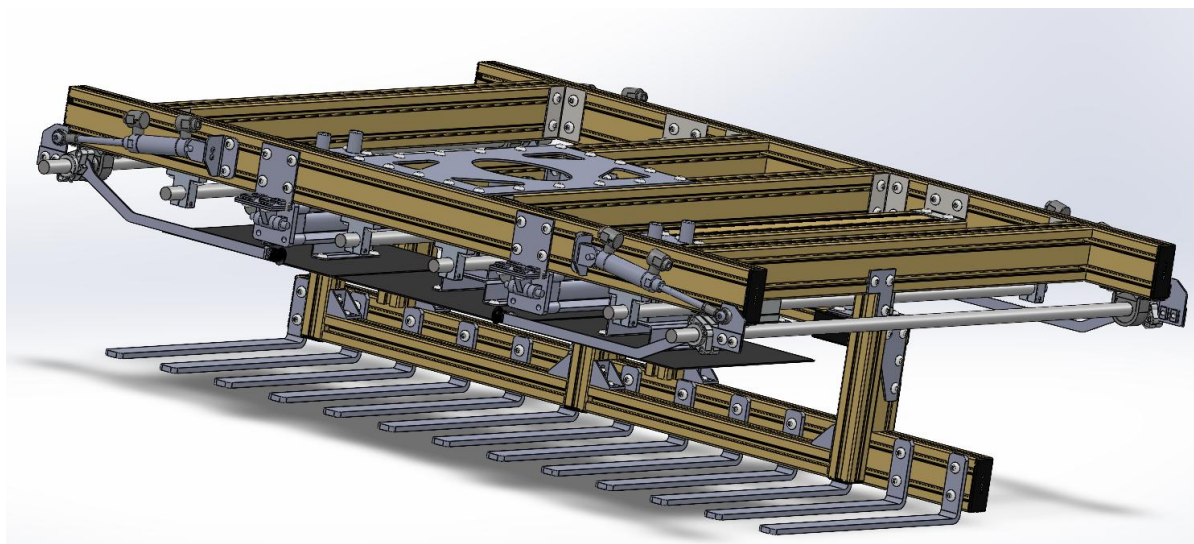


Рис. 1. Захватное устройство

Стаканчики могут оказаться негерметичными в результате брака, поэтому возможна переработка конструкции, а именно замена металлических профилей на пластины из нержавеющей стали, соединённых посредством сварки таким образом, что корпус будет закрытым. В таком случае при попадании сметаны на захватное устройство его можно будет очистить с помощью моющих средств и промывания водой.

Для наглядного представления устройства предлагаемого робототехнического комплекса ниже представлена его компоновка, отображённая с помощью средств трёхмерного моделирования (рис. 2-3).

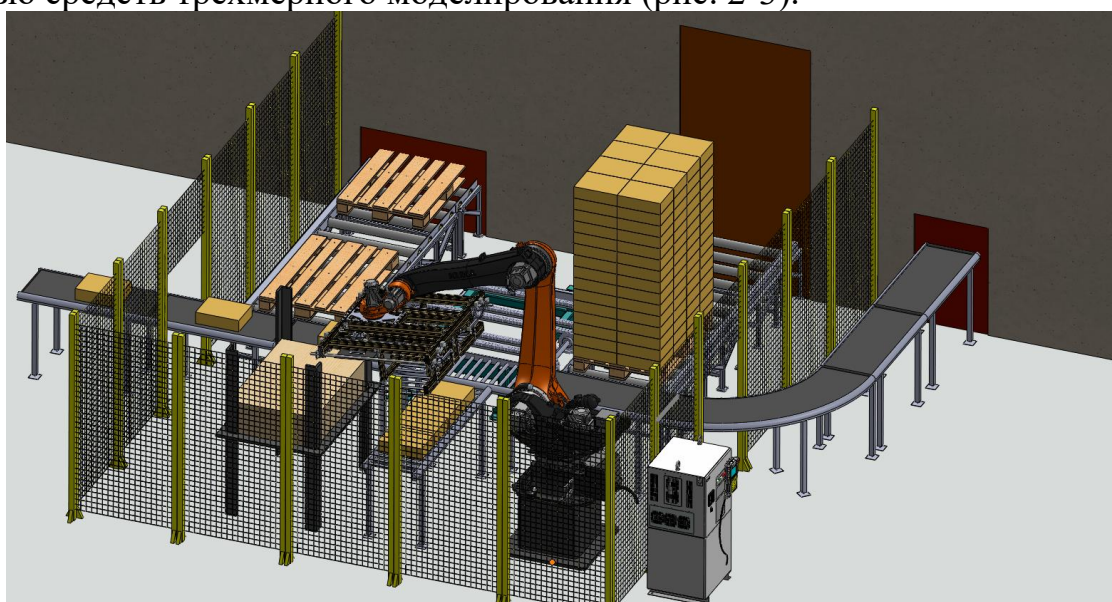


Рис. 2. Вид комплекса справа

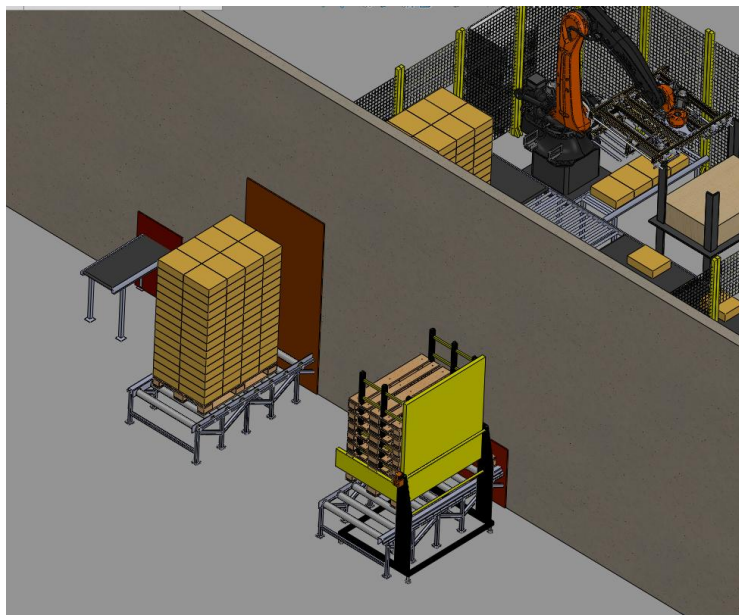


Рис. 3. Вид комплекса с обратной стороны

Алгоритм работы комплекса:

- 1) Лотки поочередно подаются узкой стороной вперёд на 1-й пик-поинт конвейер и сдвигаются встроенным толкателем на 2-й пик-поинт конвейер. Когда накапливается группа из 4-х лотков, робот захватывает их и переносит на паллету.
- 2) С помощью встроенных вакуумных присосок робот переносит из магазина прокладочный лист и укладывает его поверх сложенных лотков.
- 3) Затем полностью загруженная паллета перемещается с помощью роликового конвейера на склад. На его места подаётся пустая паллета с помощью кросс-конвейеров и цепного конвейера, на неё укладывается роботом прокладочный лист. Также со склада по другому роликовому конвейеру прибывает ещё одна пустая паллета. Далее цикл повторяется.

В случае аварийной остановки комплекса или ремонтных работ лотки с продукцией будут уходить на склад по изначально установленному ленточному конвейеру и разгружаться вручную.

Заключение

В ходе анализа рассмотрены особенности паллетизации лотков с молочной продукцией в стаканчиках и определены требования к робототехническому комплексу. А также была разработана компоновка робототехнического комплекса.

Библиографический список

1. Ссылка вариант вилочного схвата компании «SAS Automation»: <https://news.thomasnet.com/fullstory/retracting-fork-style-eoat-palletizes-variety-of-containers-593599>
2. Ссылка на вариант вилочного схвата от компании “RSI AUTOMATION”: <https://news.thomasnet.com/fullstory/retracting-fork-style-eoat-palletizes-variety-of-containers-593599>

© Немков Н.С., 2025

И.Р. НУРАЕВ, Н.А. ПЕТРОВ

arzar7@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, А.Р. ЗАРИПОВ

Уфимский университет науки и технологий

РЕАЛИЗАЦИЯ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ МЭК 61131-3 НА ПРИМЕРЕ LD СРЕДСТВАМИ МОДЕЛИРОВАНИЯ В SIMINTECH

Аннотация: статья посвящена реализации программ стандарта МЭК 61131-3 средствами динамического моделирования SimInTech. Преобразованию языка программирования LD, для визуализации процессов в автоматизированных системах.

Ключевые слова: язык программирования, Ladder Diagram, лестничная диаграмма, моделирования технических систем, SimInTech, испытательный стенд, контроллер, ПЛК, MATLAB/simulink.

Язык программирования МЭК 61131-3 LD (Ladder Diagram, лестничная диаграмма) является одним из наиболее распространённых графических языков программирования, используемых в системах автоматизации промышленных процессов. LD представляет собой визуальное представление логики управления системой в виде лестничных схем. Каждая строка схемы соответствует условному выражению, состоящему из последовательных операций (контактов и катушек). Основные элементы LD включают:

- контакты;
- катушки;
- триггеры и таймеры;
- логические элементы.

LD – крайне простой графический язык программирования, так как большинство блоков рассчитаны на работу с дискретными датчиками, включения и выключения исполнительных механизмов и т. д. Но, как и остальные графические языки программирования, имеет проблему, связанную с усложнением программы за счет количества расположенных блоков, которые усложняют понимание составленной программы как для себя, так и для других программистов.

Как правило, программы на данном языке программирования реализовываются на специализированной среде разработки IDE промышленного назначения, предназначенном для программирования программируемых логических контроллеров (ПЛК), например CoDeSys 3.5, Step 7 и другие. В частности, они позволяют создавать визуализированные интерфейсы для отображения данных с датчиков посредством индикаторов, а также обеспечивают управление исполнительными механизмами через интерактивные элементы управления, такие как кнопки и переключатели.

Таким образом, специализированное программное обеспечение для ПЛК не только оптимизирует процесс разработки программного обеспечения, но и способствует повышению общей эффективности и надежности автоматизированных систем.

Огромное разнообразие IDE промышленного назначения могут создавать немалые неудобства программистам. Каждый разработчик как правило добавляет что-то свое в рамках допустимого в соответствии с стандартом МЭК 61131-3, где указано для разработчиков что и как можно использовать. Помимо добавления в сам язык программирования чего-то нового часто разработчики могут привести изменения в интерфейс программного обеспечения, способах задания переменных с последующим заданием адреса, способы расстановки и подключения графических блоков друг с другом. Данные факторы увеличивают время перехода программистом с одного IDE на другой, возникают проблемы с элементарным созданием проекта. Например, некоторые среды используют target-файлы для программирования или симуляции ПЛК, которые, в свою очередь, необходимо найти и правильно импортировать, или другой пример, когда IDE имеет встроенный target-файл и при переустановке данный файл повреждается или перестает нормально функционировать.

Для решения этих проблем нужно внедрить стандарт МЭК 61131-3 в другое программное обеспечение. Можно также использовать обычные интегрированные среды разработки (IDE). Существует множество программных обеспечений, которое подходит по этим критериям, но выбор сужается до тех, что поддерживают блочное функциональное программирование. Это графический язык программирования, где каждый блок выполняет свою программу для работы алгоритма или реализации математической формулы. Наиболее подходящие варианты — это программное обеспечение для математического и динамического моделирования технических систем, такие как LabVIEW, MATLAB/simulink и SimInTech.

LabVIEW – это программное обеспечение, базирующуюся на концепции блочного функционального программирования, предназначенную для разработки приложений, взаимодействующих с разнообразными испытательными стендами и контроллерами, созданными компанией National Instruments. Ключевым элементом этой системы является специализированный язык программирования G, также разработанный National Instruments, который обеспечивает высокую степень абстракции и упрощает процесс создания программ. Одной из ключевых особенностей LabVIEW является обширная библиотека функций и модулей, предназначенных для работы с различными типами данных и аппаратными интерфейсами. Например, для интеграции с контроллером NI myRIO 1900 предусмотрены специализированные функции, обеспечивающие эффективное взаимодействие с данным устройством. Типы данных в LabVIEW организованы по цветовой схеме, что позволяет легко идентифицировать и использовать их в соответствующих контекстах. Кроме того, система поддерживает широкий спектр операций преобразования данных, что обеспечивает гибкость и адаптивность при разработке приложений. LabVIEW также предоставляет богатый набор

программных конструкций, включая различные циклы и управляющие структуры, которые значительно упрощают процесс написания и отладки кода.

Однако, следует отметить, что использование этих конструкций для мониторинга процессов в реальном времени требует применения специализированных циклов, что может представлять определенные сложности для начинающих разработчиков. Еще одним аспектом, требующим внимания, является языковой интерфейс LabVIEW и его справочная система, которые представлены исключительно на английском языке. Это может стать существенным препятствием для разработчиков, не обладающих достаточным уровнем владения английским языком. Тем не менее, данное ограничение можно преодолеть путем изучения обширного массива обучающих видеоматериалов, доступных в интернете, созданных как разработчиками, так и пользователями, стремящимися поделиться своим опытом и решениями возникающих проблем.

MATLAB/Simulink представляет собой интегрированное программное обеспечение, предназначенное для реализации сложных математических моделей, алгоритмов контроля и управления, а также для проведения многокритериального анализа и синтеза систем. MATLAB является мощным инструментом для численного моделирования и обработки данных, предоставляя пользователю широкий спектр математических функций и возможностей для разработки алгоритмов. Simulink, в свою очередь, позволяет визуализировать и симулировать динамические системы с помощью графического интерфейса, что значительно упрощает процесс проектирования и отладки систем управления. Интеграция MATLAB и Simulink обеспечивает синергетический эффект, позволяя пользователям эффективно комбинировать аналитические и имитационные методы для решения задач различной сложности. Несмотря на наличие англоязычного интерфейса, что может замедлить процесс адаптации для пользователей, не владеющих английским языком, MATLAB/Simulink остается одним из ведущих инструментов в области автоматизации и управления технологическими процессами.

В контексте автоматизации производственных процессов MATLAB/Simulink находит широкое применение для разработки математических моделей оборудования и систем управления. Эти модели используются для внедрения регуляторов, оптимизации технологических процессов и сокращения времени производства. С их помощью также можно прогнозировать влияние внедрения новых технологий и оборудования на эффективность и надежность производственных систем.

SimInTech представляет собой специализированное программное обеспечение, предназначенное для проведения динамического моделирования сложных технических систем. Его функциональные возможности включают в себя расчетную верификацию алгоритмов управления и оптимизацию проектных решений. В качестве ключевых направлений развития данного инструмента можно выделить моделирование динамических процессов и проектирование систем автоматического управления. SimInTech обладает обширным набором библиотек, аналогичных тем, что представлены в LabVIEW и MATLAB/Simulink. Эти

библиотеки включают в себя широкий спектр инструментов для выполнения математических операций, синтеза передаточных функций, а также для реализации трехмерной визуализации. Важно отметить, что SimInTech базируется на тех же принципах и методах построения схем и программ, что и упомянутые выше программные комплексы, что значительно облегчает процесс перехода для пользователей, ранее работавших с этими системами. Дополнительным преимуществом SimInTech является наличие русскоязычного интерфейса, что существенно упрощает и ускоряет процесс освоения программного обеспечения. Данный аспект особенно актуален для специалистов, не владеющих английским языком на достаточном уровне для эффективного использования англоязычных аналогов.

Все вышеперечисленные программы помимо плюсов и минусов имеет немало общего и немало различий. Но за счет чего данные программы должны помочь программистам внедрить язык программирования LD в программное обеспечение для математического и динамического моделирования технических систем? Создание собственной библиотеки или создание собственных блоков, если не имеется возможности создать библиотеку. Все три программы позволяют нам создать собственные блоки и библиотеки, что как раз и нужно для решения проблем написанные в начале статьи. Настоятельно рекомендуется изучить всевозможные материалы, которые были созданы как пользователями, так и разработчиками. Ниже представлены примеры реализации в SimInTech и фрагменты программ.

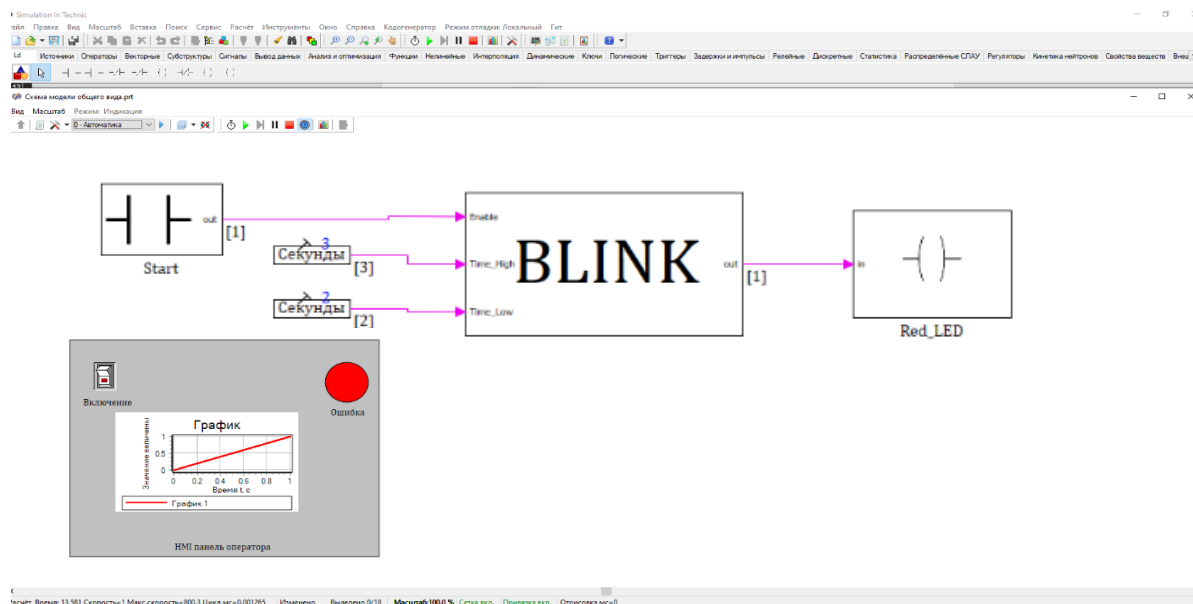


Рис. 1. Реализация функционального блока и элементов реле в SimInTech

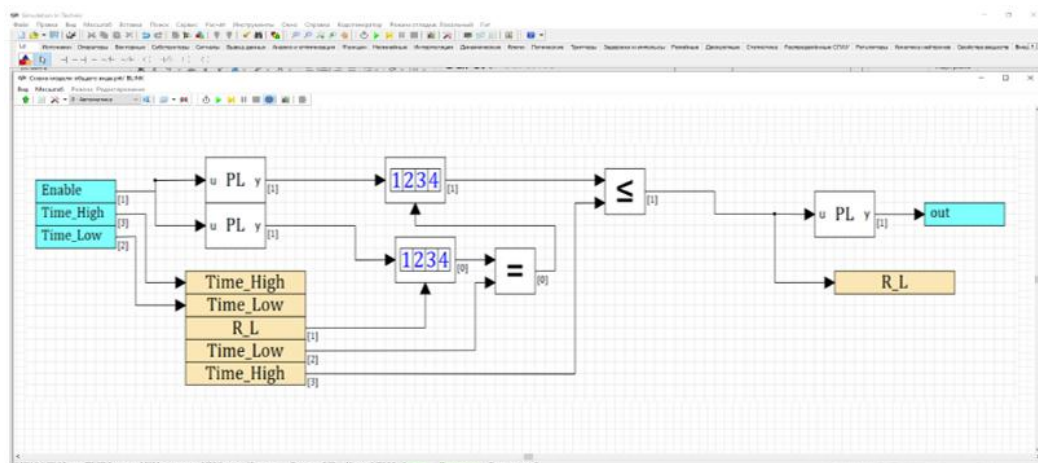


Рис. 2. Строение функционального блока BLINK

Программы блоков для счетчиков:

input u;

output y;

if u = 1 then y = flash(1000) else y = 0;

Программа для выхода функционального блока:

input u;

output y;

Var t:double;

t = Time_High;

if u = 1 then y = flash(t) else y = 0;

Библиографический список

1. Карташов Б. А., Шабаетв Е. А., Козлов О. С., Щекатуров А. М. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech: Практикум по моделированию систем автоматического регулирования. – М.: ДМК Пресс 2017. - 424 с.
2. Герман-Галкин С. Г., Карташов Б. А., Литвинов С. Н. Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения в среде SimInTech. - М.: ДМК Пресс, 2021. - 494 с.
3. Щекатуров А. М. Методика моделирования динамики октокоптера. - М.: ДМК Пресс, 2021. - 228 с.
4. Справочная система SimInTech <https://help.simintech.ru/>
5. National instruments <https://www.ni.com/en.html>

© Нураев И.Р., Петров Н.А., Зарипов А.Р., 2025

УДК 621.9

А.А. ПАВЛОВА

aurorapavlo.va@gmail.com

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент С.И. ФЕЦАК

Уфимский университет науки и технологий

ЭСКИЗНЫЙ ПРОЕКТ МАНИПУЛЯТОРА SCARA

Аннотация: в статье рассмотрены современные тенденции развития автоматизации и роботизации промышленного производства. Освещается значение автоматизации как основного способа повышения эффективности, качества и безопасности труда. Особое внимание уделено промышленным роботам типа SCARA, их конструктивным особенностям, преимуществам и применению в различных отраслях. Проведён обзор зарубежных моделей SCARA-роботов от компаний KUKA, FANUC и ABB, а также отечественных аналогов – Lestar-CNC (RH04-03) и CRP RS04-03, представленных на российском рынке. Отмечены сложности, возникающие при импорте зарубежных роботов, и необходимость развития отечественных решений для достижения технологической независимости. Рассмотрены требования, предъявляемые к промышленным роботам для обеспечения их надёжности, безопасности и эффективности. Приведено описание конструкции макета манипулятора типа SCARA, включающего основные элементы – основание, балансир, руку и шариковую передачу.

Ключевые слова: автоматизация, роботизация, промышленный робот, SCARA-робот, манипулятор, промышленная автоматизация, импортозамещение, технологическая независимость.

Развитие современных технологий ведут к тому, что повышается потребность в эффективной и качественной работе. Поэтому в современном мире автоматизация – один из ключевых способов оптимизации, – охватывает практически все сферы производства. Это процесс, при котором происходит замена ручного труда механизированными системами. Автоматизация дает возможность повысить качество продукции, снизить затраты, минимизировать человеческий фактор и повысить эффективность производства.

Во времена стремительного развития технологий, автоматизация является неотъемлемой частью множества отраслей. Она включает в себя применение таких технологий, которые способны работать без постоянного вмешательства человека.

Одним из ключевых и базовых типов промышленной автоматизации является внедрение роботизации. Ее применение предполагает использование роботов для выполнения задач, которые могут быть, в первую очередь, опасны для людей или облегчают труд человека.

Стремление заменить человека в тяжелых и опасных условиях привело к идеи создания робота. Поэтому при их разработке главным образцом является возможности человека. Хотя роботы и далеки по способностям, они, подобно человеку, осуществляют активное взаимодействие с окружающей средой, благодаря чему способны давать точную информацию об объекте.

В общем виде функциональная схема робота (рисунок 1) включает в себя информационно-управляющую систему, передающая сигнал в исполнительную систему. Эта система в свою очередь состоит из механической системы манипулятора и механической системы передвижения (у мобильных роботов). Далее информация с этих систем передается во внешнюю среду Объектом обратной связи является сенсорная система, которая дает информацию о внешней среде оператору, а также другим машинам, которые взаимодействуют с роботом.



Рис. 1. Функциональная схема робота

Конструкция промышленных роботов может быть разнообразной и зависит от задач производства. Строение может отличаться друг от друга по форме, компоновке и сложности. Однако функциональная схема у всех роботов аналогична (рисунок 1).

Механическая часть включает в себя следующие компоненты:

1. Манипулятор – это устройство, которое отвечает за двигательную функцию. Робот может иметь один или несколько манипуляторов.
2. Рабочий орган устанавливается на конце манипулятора и предназначен для непосредственного осуществления технологической операции. Самый распространенный вариант – «схват».
3. Привода необходимы для передачи движения манипулятору. Каждое сочленение может иметь свой привод.

Несмотря на кажущееся различие человека и промышленного робота, у них есть немало общего. Первое очевидное сходство – это суставы, места соединений костей человека и звеньев у робота, которые придают им подвижность. В основе промышленного робота лежит человеческая рука. Кости и суставы в плече, локте и запястье, благодаря которым рука может свободно сгибаться и двигаться. По этому же принципу работает и робот, только вместо костей – звенья.

SCARA Robot. Это тип промышленного робота, который разработан для выполнения задач с высокой точностью в горизонтальной плоскости. Применяются от сборки мелких деталей электроники до упаковки и логистики, SCARA-роботы повышают эффективность производственных процессов, заменяя человеческий труд и достигая полной автоматизации. Из преимуществ можно выделить высокую скорость и точность, гибкость и компактность.



Рис. 2. SCARA Robot

Промышленный робот от *Kuka* служит для манипуляции инструментами и приспособлениями или для обработки и транспортировки деталей или продуктов. Они выполняют монотонные задачи с высочайшей точностью (время цикла может достигать 0.4 с). Четырёхкоординатные роботы серии *Scara* обеспечивают высокую точность движений и неприхотливы в обслуживании, будь то захват и перемещение грузов, сборка мелких деталей в чистых помещениях, погрузка-разгрузка или инспекция.

Серия роботов Scara от Fanuc включает модели с нагрузками от ~3 кг до 20 кг и до ~1 100 мм радиуса действия. Удобна для задач: сборка, размещение, инспекция, упаковка. Некоторые версии специально рассчитаны для пищевой/чистой среды: белое эпоксидное покрытие, смазка пищевого класса NSF-H1, защита от коррозии. Очень компактный дизайн: монтаж со стойки, рабочая зона 360°, небольшая занимаемая площадь.

Серия SCARA от ABB имеет внутреннюю прокладку кабелей, компактный дизайн, интеграцию с контроллерами серия OmniCore. Подходит как для обычных приложений с небольшой нагрузкой, так и для более тяжёлых задач с SCARA-роботами (до ~22 кг). Высокая точность и быстродействие.

Импорт scara-роботов в Россию сталкивается с рядом сложностей, что вынуждает потребителей и производителей искать альтернативные решения на внутреннем рынке. В последние годы Россия столкнулась с рядом экономических санкций, которые значительно ограничили возможности импорта высокотехнологичного оборудования, включая Scara роботов. Эти меры затрудняют закупку оборудования как от западных производителей, так и от компаний из других стран.

С учетом этих трудностей, российским предприятиям придётся искать альтернативы. Это даёт стимул для развития отечественного производства и создания аналогичных решений. В России уже есть ряд компаний, которые занимаются разработкой и производством роботов и автоматизированных систем.

Серия от компании “Лестар”/Lestar-CNC: манипулятор SCARA 4-осевой, доступен с длиной руки 400 мм (и вариант 600 мм) с нагрузкой, например, до 3 кг или 6 кг. Компактный робот, подходит для задач с небольшой зоной охвата и лёгкой нагрузкой. Российский рынок может рассматривать его как вариант локализации (или по крайней мере доступности) SCARA-решения. Из недостатков можно выделить: нагрузка сравнительно небольшая (до ~3 кг в этой модели) не подходит для тяжёлых изделий. Радиус действия ограничен (~400 мм этой версии) требует компактного пространства. Видимо, не полностью отечественная разработка – возможно импортный компонент или сборка под лицензию.

CRP-RS04-03 (серия SCARA от компании, представленной на российском рынке) сконструирована как SCARA-робот с четырьмя осями. Максимальная досягаемость ~400 мм, максимальная нагрузка до 3 кг (номинальная ~1 кг) по данным каталога. Тоже ориентирован на задачи сборки/перемещения с высокой точностью и низким уровнем шума, что важно для электроники, легкой автоматизации. Подобно предыдущей модели – нагрузка и досягаемость ограничены: не для тяжёлых условий. Не полностью ясно, насколько он «российский» (т.е. разработан или изготовлен в РФ) – скорее зарубежный/импортный бренд с локализацией.

Требования к промышленным роботам необходимы для обеспечения их безопасной, эффективной и надежной работы в промышленных условиях. Эти требования охватывают различные аспекты, от конструкции и производительности до безопасности и совместимости:

1. Соответствие конструктивно-технологических параметров робота и их функциональное назначение: грузоподъемность, скорость перемещения, погрешность позиционирования, размер рабочей зоны, тип управления. Объем операций, выполняемых роботом, их темп должны обеспечить технико-экономическую эффективность применения роботов;

2. Соответствие числа степеней подвижности робота минимально необходимому числу для выполнения требуемого объема операций;

3. Соответствие манипуляторных возможностей роботов, зонам обслуживания станков, схема требований к взаимодействиям со вспомогательными устройствами;

4. Простота и краткость цикла переналадки, надежность, высокий коэффициент использования роботов;

5. Обеспечение требований техники безопасности.

Несмотря на сложности, связанные с импортом дельта роботов, у России есть потенциал для разработки собственных решений в этой области. Это позволит не только удовлетворить потребности отечественного производства, но и повысить уровень технологической независимости страны. Способы найти российские аналоги scara-роботов требуют времени и усилий, но результат может стать значительным шагом вперед в области робототехники и автоматизации во всех отраслях экономики. Для этих целей была выбрана тема о разработке scara робота.

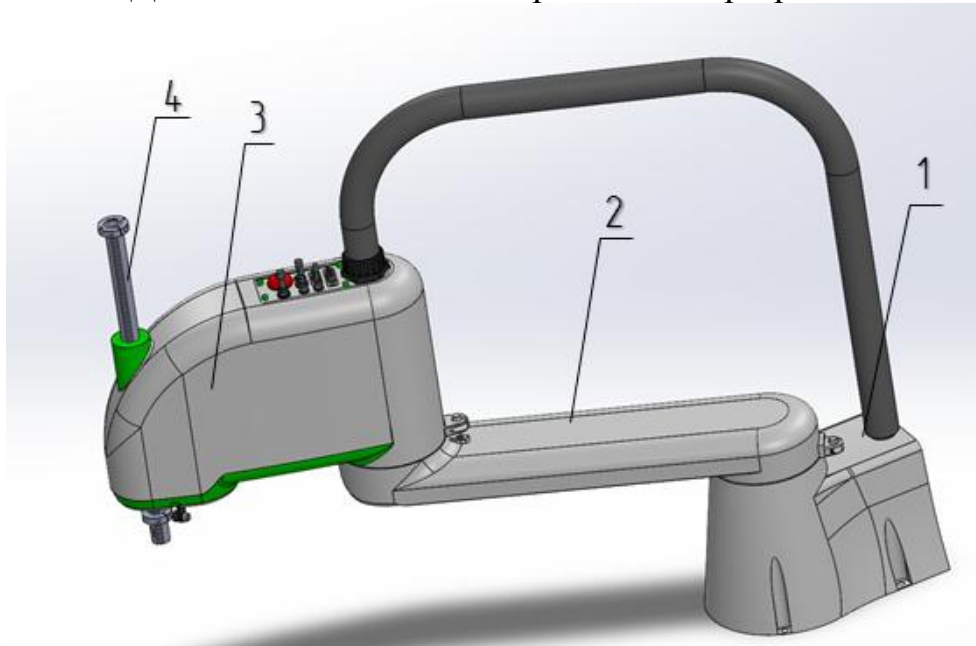


Рис. 3. Макет манипулятора Scara

На рисунке изображен макет манипулятора Scara. Робот состоит из массивного основания 1, в котором расположены привода. Балансир 2 является узлом, который соединяет руку 3 и основание 1. Рука – это звено между шариковой передачей (ШВП) 4 и балансиром. В ней размещены двигатели осей руки и ШВП. Рука приводится в движение двигателем оси балансира.

В ходе проведённого исследования были рассмотрены современные тенденции развития автоматизации и роботизации, а также особенности применения промышленных роботов типа SCARA. Анализ зарубежных и

отечественных моделей показал, что SCARA-манипуляторы остаются востребованными благодаря высокой точности, скорости и компактности, однако в условиях ограничений на импорт Россия сталкивается с необходимостью развивать собственные технологии и усиливать технологическую независимость.

Список литературы:

1. Юревич Е.И. Основы робототехники, 304 с.
2. <https://www.kuka.com/>
3. <https://www.fanuc.co.jp/>
4. Составные части и конструкции промышленных роботов

© Павлова А.А., 2025

УДК 67.05.000

Г.Ю. САПОЖНИКОВ, А.А. САЗАНОВ

sapozhnikov.rep@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. С.Х. ХАДИУЛЛИН

Уфимский университет науки и технологий

ИЗНОС ИНСТРУМЕНТА И КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ ТОЧЕНИИ С ПОКРЫТИЯМИ

Аннотация: в статье рассматриваются результаты экспериментов на износ режущего инструмента с покрытиями при различных режимах резания и анализируется влияние контактных процессов на стойкость инструмента.

Ключевые слова: лезвийная обработка, резание, режущий инструмент, износостойкое покрытие, износ, режимы резания, адгезия.

Введение

Опыт эксплуатации современного высокотехнологичного металлорежущего оборудования показывает, что применение даже самых прогрессивных моделей станков с режущим инструментом несоответствующего качества и/или технологического назначения не позволяет обеспечить желаемых технико-экономических показателей, качества обработанной поверхности. Свойства режущего инструмента (РИ) в значительной степени влияет на процесс лезвийной обработки. Помимо того, жизненный цикл РИ заметно короче в сравнении с деталями и узлами металлообрабатывающего оборудования. Таким образом, обоснованно считать, что качество и рациональность назначения РИ первоочередно влияет на работоспособность всей технологической системы [1].

Важно отметить, что вышеуказанное влияние кратно возрастает в случае механической обработки, характеризующейся повышенными теплосиловыми параметрами: обработке высоколегированных, коррозионностойких, жаропрочных сталей и сплавов [1]. При осуществлении операций с данными обрабатываемыми

материалами (ОМ) наблюдается ускоренный износ инструмента, и, следовательно, уменьшенная стойкость. Таким образом, решение данной проблемы становится актуальной задачей для наиболее ответственных и массовых отраслей машиностроительного комплекса, а именно: авиадвигателестроительной, станкостроительной, приборостроительной, космической.

Износостойкие покрытия и требования к ним

На сегодняшний день известны различные способы увеличения продолжительности жизненного цикла РИ, а именно: применение износостойких покрытий, использование СОТС, назначение оптимальных режимов резания [2], выбор более износостойкого ИМ, а также их комбинации.

Известно, что, независимо от условий и типа лезвийной обработки, поверхностный слой РИ является наиболее нагруженным, а его свойства в значительной степени влияют на работоспособность инструмента. Поэтому на настоящий момент приоритетными направлениями дальнейшего развития стали методы, связанные с улучшением свойств поверхностных слоев РИ, среди которых активно разрабатываются и применяются износостойкие инструментальные покрытия (ИП) [1].

Эксплуатация РИ с покрытиями существенно увеличивает их стойкость, комплексно повышает производительность лезвийной обработки, качество и точность обрабатываемых поверхностей, улучшает экономические показатели производства [1]. Кроме того, нанесение износостойких покрытий на режущий инструмент позволяет осуществлять экологически безопасную обработку, исключая применение СОТС [3].

Исследования процесса резания инструментом с износостойкими покрытиями показывают, что формирование износостойких покрытий должно проводиться исходя из условий, в которых работает режущий инструмент, и требований, которые к нему предъявляются в данных условиях резания. Для этого необходимо понимать механизм износа режущего инструмента и разрушения покрытий в процессе резания, сведения о тепловом и напряженном состоянии режущего клина инструмента с покрытием [3].

В целях обеспечения качественного влияния ИП на процесс лезвийной обработки в практике технологического проектирования и назначения покрытия необходимо руководствоваться требованиями, предъявляемыми к материалу покрытий. Так, материал ИП должен сочетать в себе коррозионностойкие свойства, высокие значения микротвердости, пассивность к ОМ, стабильность свойств в условиях высокой температуры, совместимость с ИМ.

Вместе с тем назначение ИП, обеспечивающего требуемые показатели степени физико-химического взаимодействия материала покрытия комплексно как с ОМ, так и с ИМ, является сложной задачей, требующей для своего решения как качественной, так и количественной оценки совместимости материалов [3]. Важно отметить, что в данном случае значительное влияние оказывают межмолекулярные адгезионные силы сцепления: прочность адгезионной связи системы «инструмент-покрытие» определяет работоспособность инструмента в процессе эксплуатации, в то время как для системы «покрытие-заготовка» явление адгезии является

негативным фактором, понижающим качество обработанной поверхности и точность выполняемых размеров [4]. Таким образом, процесс рационального назначения материала покрытия требует не только понимания механизма износа РИ и условий обработки, но и знаний в области адгезионного взаимодействия твердых тел.

Анализ экспериментальных данных

В целях изучения влияния износостойких покрытий на период стойкости режущего инструмента, а также протекания контактных процессов при резании, были проведены эксперименты на токарно-винторезном станке 16К20 с частотным преобразователем. В качестве инструментального материала был назначен металлокерамический твердый сплав В35 Кировградского завода твердых сплавов (современный аналог ВК8), а в качестве обрабатываемого – нержавеющая сталь 12Х18Н10Т. Обработка производилась на двух режимах: повышенной производительности ($V = 150$ м/с, $S = 0,1$ мм/об, $t = 0,5$ мм) и оптимальных ($V = 120$ м/с, $S = 0,1$ мм/об, $t = 0,5$ мм). Тип обработки – продольное точение. Геометрия режущей части: передний угол $\gamma = 0^\circ$, задний угол $\alpha = 6^\circ$, главный и вспомогательный углы в плане $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$. Эксперименты проводились с покрытиями на основе нитрида титана с различными добавками, режимами нанесения, количеством слоев. Результаты приведены в виде графиков зависимостей износа по задней поверхности, мм, от путей резания, м (рис. 1,2), а также диаграмм интенсивности износа (рис. 3,4).

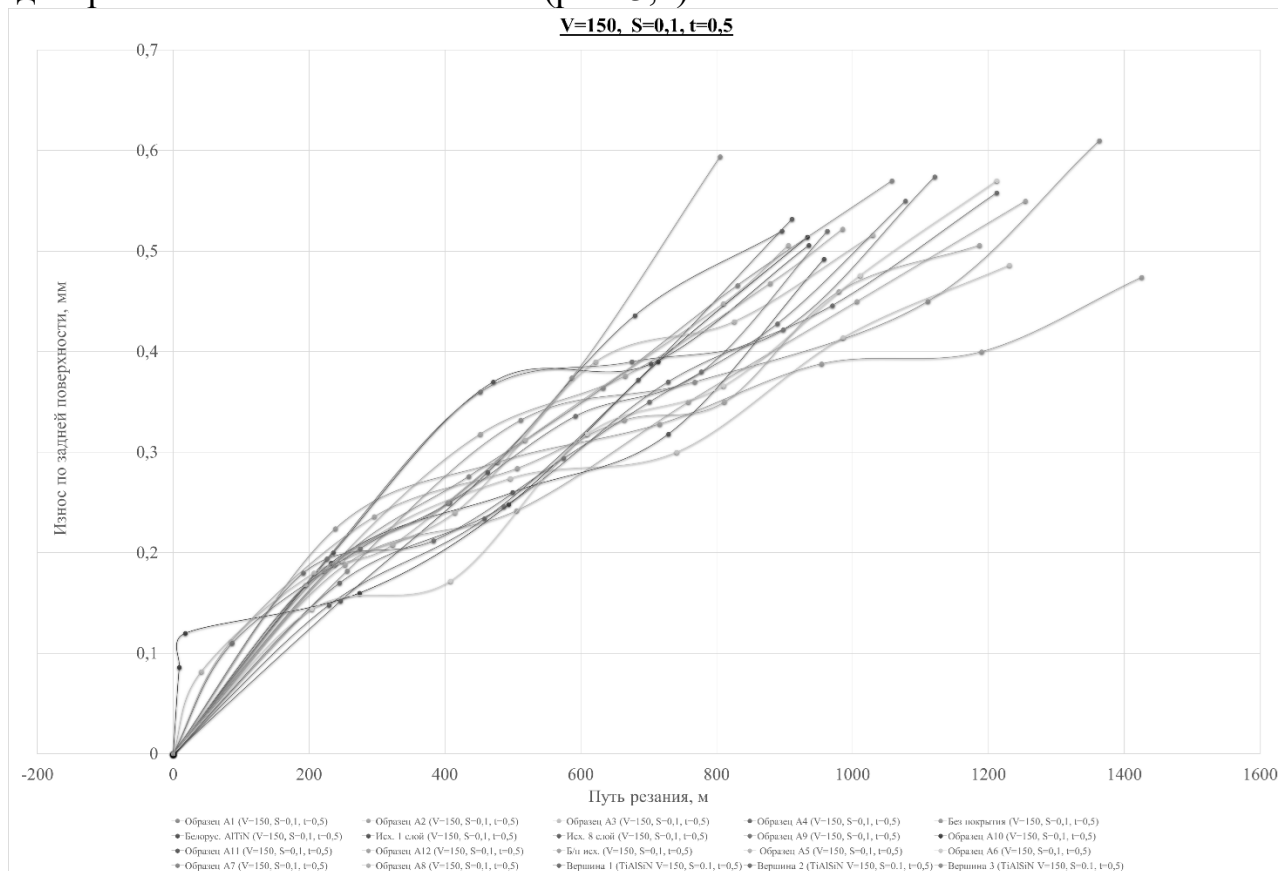


Рис. 1. График зависимости износа по задней поверхности от пути резания при обработке на режимах повышенной производительности

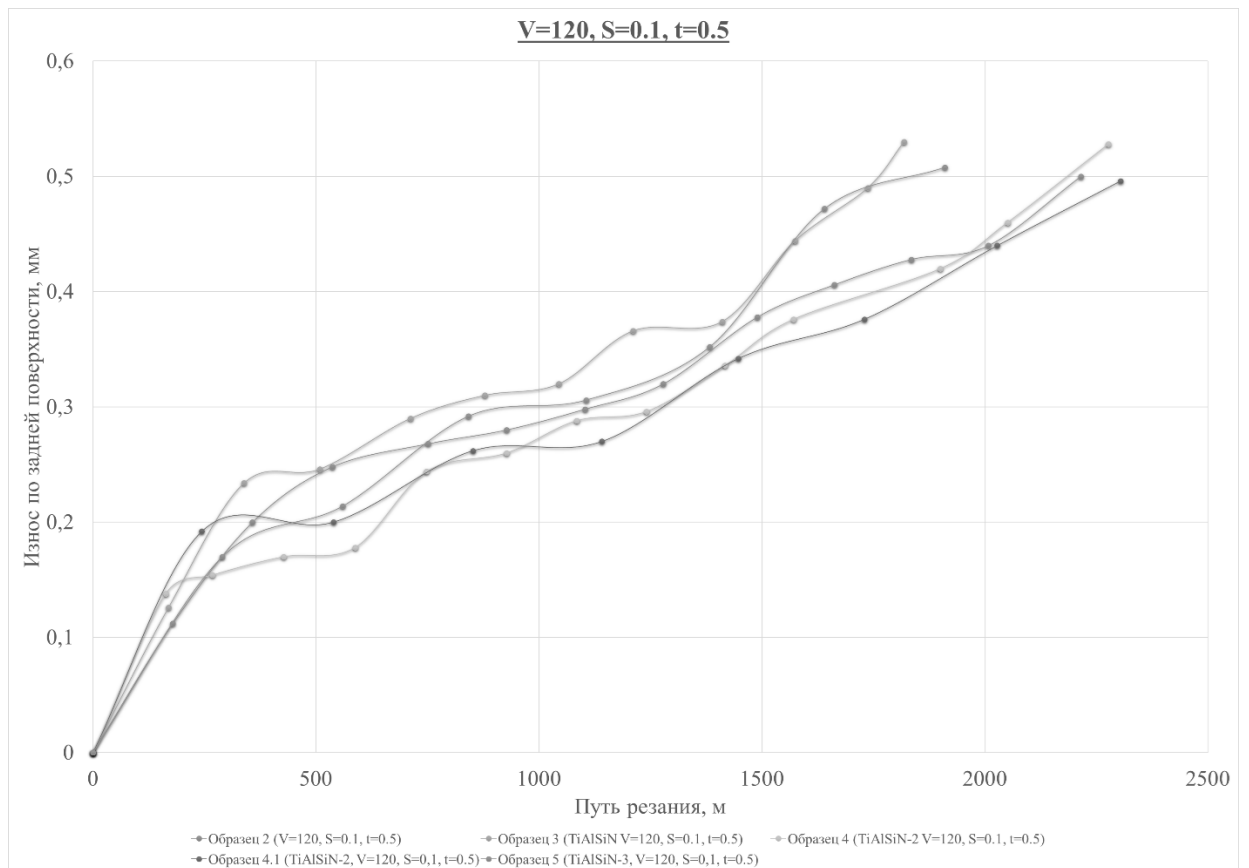


Рис. 2. График зависимости износа по задней поверхности от пути резания при обработке на оптимальных режимах

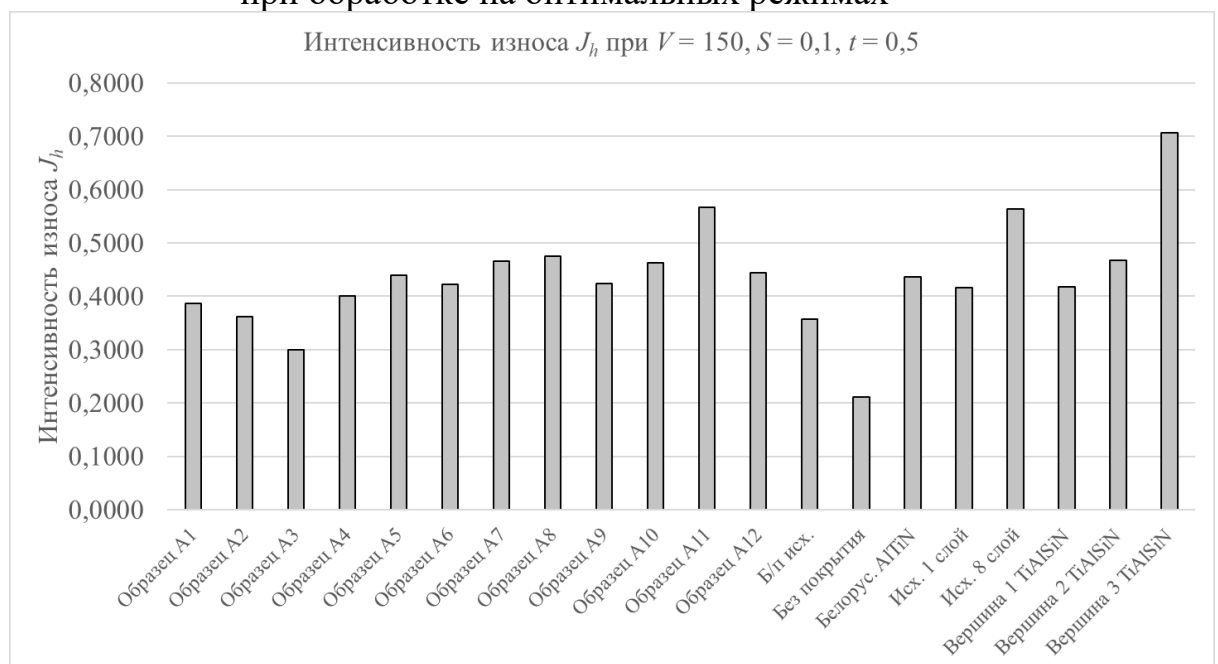


Рис. 3. Диаграмма интенсивности износа при обработке на режимах повышенной производительности

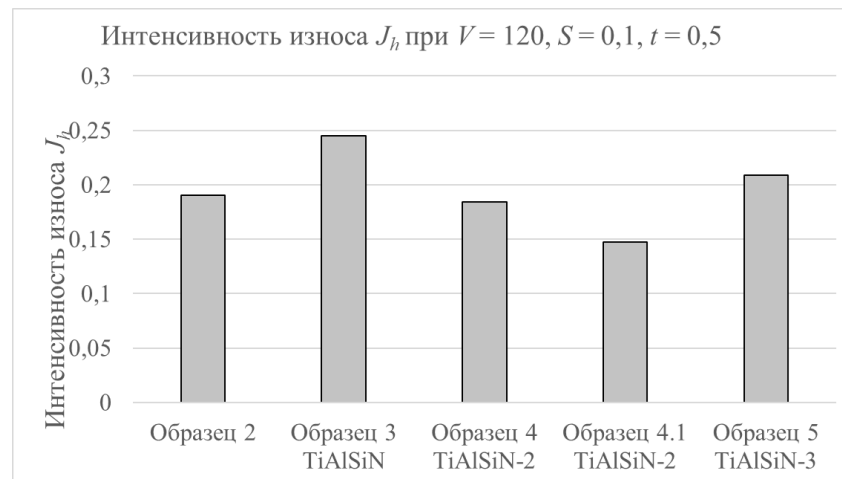


Рис. 4. Диаграмма интенсивности износа при обработке на оптимальных режимах

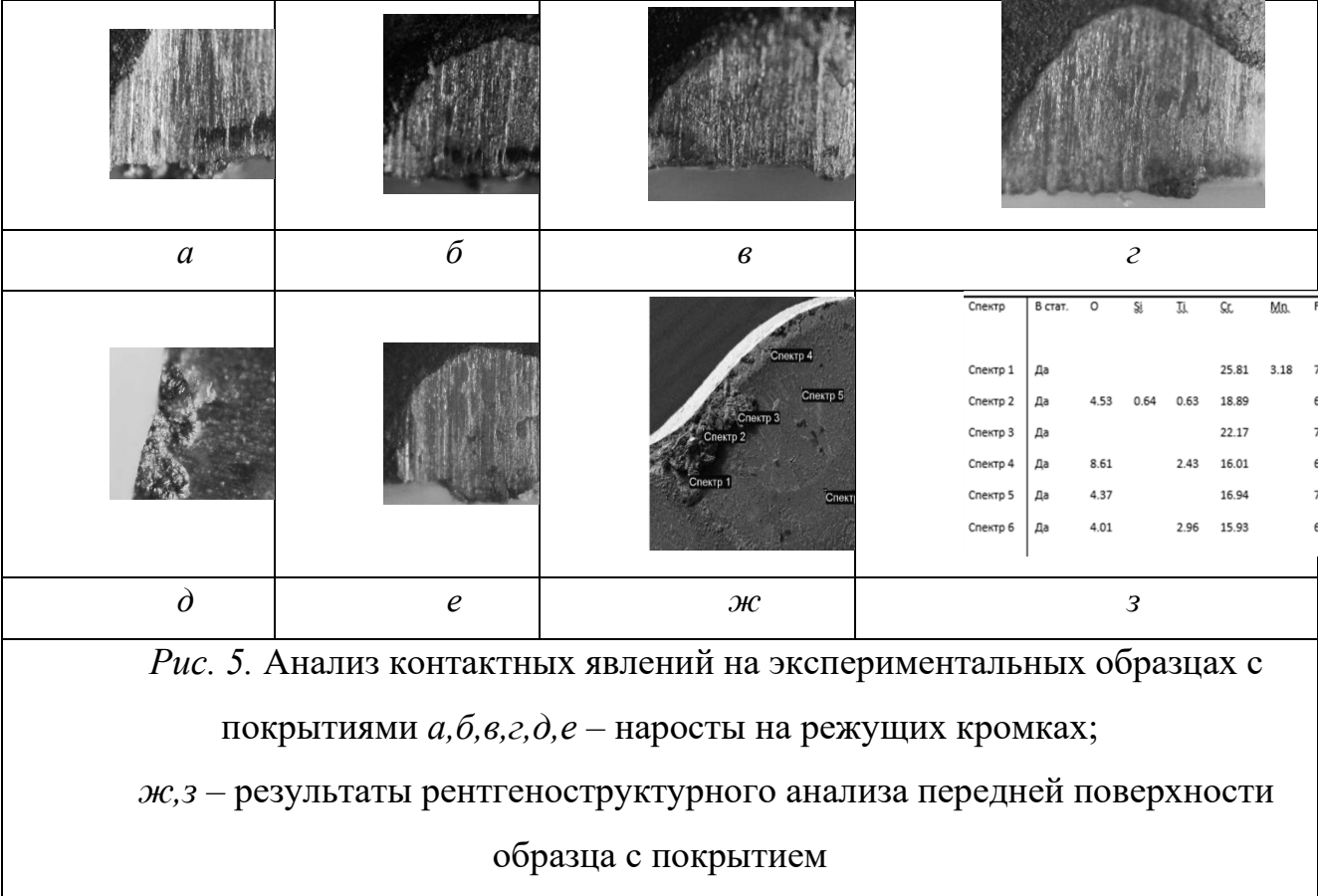
Анализ результатов экспериментов на износ показывает, что при обработке на режимах повышенной производительности (см. рис. 1,3) применение износостойких покрытий носит отрицательный характер, поскольку в сравнении с образцами без покрытий при идентичных величинах износа по задней поверхности пути резания у последних больше в среднем на 150 м (12%). Помимо того, интенсивность износа при вышеуказанных режимах обработки колеблется в широком диапазоне, причем для образцов с покрытием в среднем составляет 0,45, для образцов без покрытий – 0,28.

Применительно к экспериментам, проведенным на оптимальных режимах резания (см. рис. 2,4), путь резания при критическом износе по задней поверхности составляет в среднем 2000 м (для сравнения на режимах повышенной производительности – 1000 м), причем образцы с покрытиями дают выигрыш в пути резания до 100 м. Интенсивность износа колеблется в более узком диапазоне и в среднем составляет 0,2.

Таким образом, эксплуатация износостойких покрытий при продольном точении на оптимальных режимах обработки приносит положительный эффект с точки зрения жизненного цикла РИ. Однако анализ состояния режущего клина показывает, что дальнейшее увеличение эффекта от применения покрытий невозможно без качественного и количественного учета контактных процессов, происходящих в зоне резания. Так, на подавляющем большинстве экспериментальных образцов наблюдается наростообразование, что свидетельствует об интенсивном протекании адгезионных процессов между материалами покрытий и обрабатываемого образца (рис. 5 а-е). Помимо визуальных подтверждений, результаты рентгеноструктурного анализа (рис. 5 ж, з) показывают наличие химических элементов обрабатываемого материала на передней поверхности РИ.

В заключение, анализ экспериментальных данных показывает, что применение износостойких покрытий при оптимальных режимах обработки для продольного точения увеличивает средний путь резания, преодолеваемый инструментом до критического износа. Однако дальнейшее усиление эффекта

недостижимо без учета адгезионных явлений, протекающих в зоне резания: при назначении износостойкого покрытия необходимо подбирать химически инертные материалы покрытия и заготовки, что позволит минимизировать влияние контактных процессов на износ режущего инструмента [4].



Библиографический список

1. Григорьев, С. Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента : учебник / С. Н. Григорьев. – 2-е изд. – Москва: Машиностроение, 2023. – 368 с.
2. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
3. Табаков В.П. Принципы формирования и технологии нанесения износостойких покрытий режущего инструмента : учебное пособие / В. П. Табаков, А. С. Верещака, С. Н. Григорьев, А. А. Верещака. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ульяновск: УлГТУ, 2023. – 227 с.
4. Сапожников Г.Ю. Адгезионные процессы при лезвийной обработке и их влияние на инструментальные покрытия / Актуальные проблемы науки и техники: материалы II Всероссийской весенней школы-семинара молодых ученых. – Г.Ю. Сапожников, С.Х. Хадиуллин, П.П. Черников – Уфимск. ун-т науки и технологий. – Уфа: Уфимский университет, 2025.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания «Исследование физико-химических и механических процессов при формообразовании и упрочнении деталей для авиакосмической и транспортной техники» № FEUE-2023-0006.

УДК 621.9

И.Н. СИТДИКОВ

sin20040106@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент С.Х. ХАДИУЛЛИН

Уфимский университет науки и технологий

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ ОЧИСТКИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Аннотация: в статье рассмотрены принципы и современные методы организации автоматических линий очистки металлорежущего инструмента перед нанесением CVD- или PVD-покрытий. Проанализированы различные способы очистки, а также предложены такие варианты усовершенствования как внедрение манипулятора для переноски чистых инструментов и применение воздушных ножей.

Ключевые слова: автоматическая линия очистки; автоматизация; PVD-покрытия; ультразвуковая мойка; металлорежущий инструмент.

Введение

Современные режущие инструменты, такие как фрезы, сверла, развертки и т. д., используются в условиях высоких нагрузок и температур, что предъявляет особые требования к их прочностным и эксплуатационным характеристикам. Для повышения износостойкости, термостойкости и продления срока службы инструмента широко применяются различные износостойкие покрытия на основе нитридов, карбидов или оксидов [7].

На сегодняшний день наиболее распространёнными методами нанесения покрытий являются физическое (PVD) и (CVD) химическое осаждение из паровой фазы.

Очистка металлорежущего инструмента без нанесения механических повреждений поверхности перед нанесением CVD- или PVD-покрытий является критически важным этапом технологического процесса, влияющим на адгезионную связь с изделием. Для обеспечения требуемой чистоты поверхности инструмента предприятия используют современные автоматические линии

очистки включающие в себя ультразвуковые ванны, промывочные блоки и системы сушки.

В статье рассматриваются возможные пути улучшения процесса чистки внедрением манипулятора для точной передачи очищенного инструмента и применением воздушных ножей для предварительного удаления влаги перед основной сушкой.

1. Методы очистки

Существует несколько основных методов очистки, которые могут применяться в автоматических линиях.

Ультразвуковая чистка основана на эффекте кавитации, возникающем в жидкости под воздействием ультразвуковых волн (обычно 20–40 кГц). Кавитационные пузыри, схлопываясь, создают импульсные микровзрывы, эффективно разрушающие загрязнения на молекулярном уровне. Преимущества метода: высокая степень очистки, даже в труднодоступных местах; не требует механического контакта с инструментом; подходит для сложной геометрии. Недостатки метода: высокая стоимость оборудования; необходимо контролировать параметры жидкости; длительный процесс чистки.

Механическая чистка основана на применении абразивных или синтетических щеток, приводимых в движение валами или сервоприводами. Преимущества метода: высокая производительность; простота конструкции; дешевизна. Недостатки метода: риск повреждения режущей кромки; щетки изнашиваются; неэффективна для очистки внутренних каналов и полостей.

Очистка струёй высокого давления подразумевает применение давления 100–1000 бар с целью удаления крупной стружки и остатков СОЖ. Возможна импульсная подача воды или эмульсии. Преимущества метода: эффективная очистка наружных поверхностей; можно встроить в линию обработки. Недостатки метода: требует системы фильтрации и отведения жидкости; повышенный риск травм при утечках и неправильной эксплуатации.

Лазерная очистка использует импульсное лазерное излучение для испарения или термического расщепления загрязнений с поверхности инструмента. Луч направляется на загрязнённый участок, где короткие импульсы энергии выпаривают или разрушают загрязнения. Преимущества метода: очень высокая точность обработки, полное отсутствие механического контакта, можно локально удалять загрязнения даже с кромок и внутренних зон. Недостатки метода: высокая стоимость установки, сложность встраивания в поточные линии, пока ограничено применяется для массовых операций из-за скорости обработки [6].

В современных производственных линиях широко применяются комбинированные методы очистки, объединяющие несколько технологий для максимальной эффективности. При этом главное требование сохранить геометрию инструмента и полностью исключить любые дефекты поверхности, способные снизить адгезию покрытий. Агрессивные абразивные подходы, рискующие повредить режущую кромку, отбрасываются. Оптимальным решением становится сочетание струйной очистки под высоким давлением и ультразвукового

воздействия – они эффективно удаляют стружку и загрязнения, не нарушая целостности и шероховатость поверхности.

2. Автоматические линии очистки металлорежущего инструмента

Типовая линия очистки состоит из нескольких модулей ультразвуковых ванн с различными моющими средствами и деминерализованной водой для конечного ополаскивания, блока сушки и портального манипулятора (*Рис. 3 и Рис. 2*). Они интегрируемы в производственные участки, и обеспечивают последовательное выполнение всех необходимых этапов подготовки инструмента. Дополнительно линии могут оснащаться замкнутыми циклами циркуляции моющего раствора с многоступенчатой системой фильтрации, что позволит снизить расход жидкости и минимизировать экологический ущерб.



Рис. 1. 4-х позиционная автоматическая линия очистки от СпецмашСоник



Рис. 2. 6-и позиционная автоматическая линия очистки от Novatec S.r.l

Однако, входе перемещения между ваннами, остатки моющего средства может загрязнить следующее, что повышает эксплуатационные расходы, также после чистки инструменты переносит человек, а это повышает риски вторичного загрязнения поверхности инструмента, что непосредственно повлияет прочность покрытия. Далее представлены предложения для решения указанных проблем.

3. Предложения по улучшению

Для решения проблемы с загрязнением последующих моющих средств предлагается рассмотреть вариант внедрения дополнительных модулей воздушных ножей для предварительной продувки корзин с инструментами.

Данное решение позволит снизить попадание остатков капель жидкости из одной ванны в другую. Кроме этого, продувка поможет облегчить и ускорить процесс сушки, а значит будет затрачено меньше энергии на нагрев воздуха для обдува изделий.

В целях минимизации ручного труда и исключения повторного загрязнения предлагается внедрить роботизированный манипулятор в конце линии очистки. К нему предъявляются следующие технические требования:

- Точность позиционирования не более $\pm 0,5$ мм;
- Коррозионностойкая конструкция и уплотнения, устойчивые к парам агрессивных моющих растворов;
- Максимальная грузоподъёмность 150 кг.
- Максимальное число осей: 6.

Внедрение манипулятора малоэффективно если на предприятии только одна линия чистки. Связано это с тем, что робот большую часть времени простаивает в ожидании очищенных инструментов. Поэтому более рациональным будет решение если робот будет обслуживать параллельно две и/или более линии.

Это решение позволит исключить участие человека в переноске чистых инструментов и обеспечить достаточно чистую среду для последующих технологических операций.

Вывод

Очистка металлорежущего инструмента перед нанесением износостойких покрытий – важный этап, напрямую влияющий на качество адгезии и срок службы инструмента. Проведённый анализ показал, что наиболее эффективными и безопасными для инструмента являются ультразвуковая очистка и струйная промывка под высоким давлением, особенно при их комбинировании.

Однако современные автоматические линии требуют дальнейшей оптимизации. Предложенные усовершенствования, такие как внедрение воздушных ножей для предварительной продувки между ваннами и интеграция роботизированного манипулятора для автоматического перемещения инструмента, способны повысить эффективность очистки, минимизировать риски повторного загрязнения и снизить долю ручного труда.

Комплексная модернизация очистных линий в указанном направлении позволит значительно улучшить стабильность качества подготовки инструмента под PVD- и CVD-покрытия, что особенно актуально для серийного и прецизионного производства.

Библиографический список

1. Маркова Е. А., Яцкевич О. К. Износостойкие покрытия для режущих инструментов // – Минск: БНТУ, 2021. – 50 с. – Режим доступа: <https://core.ac.uk/download/pdf/483931277.pdf>
2. Гиршов В. Л., Коротких М. Т., Тополянский П. А. Повышение износостойкости режущего инструмента методом финишного плазменного упрочнения // Электрофизические и электрохимические методы обработки. — 2013. – № 4(76). – С. 28–54.
3. Кожевников Д. В., Кирсанов С. В. Металлорежущие инструменты / Д. В. Кожевников, С. В. Кирсанов. – Томск : Изд-во Томского политехнического ун-та, 2003. – 256 с.
4. Лебедев Н. М., Жирнова Т. И., Саутин А. Г., Воронин О. В. Ультразвуковой метод подготовки металлов к нанесению защитных покрытий // Коррозия: материалы, защита. – 2005. – № 6.
5. Маслов А. А., Назаров А. Ю., Хусаинова А. М., Рамазанов К. Н. Изучение покрытия системы Y-Al-O, нанесённого на сплав Inconel 718 // Materials. Technologies. Design. – 2023. – Т. 5, № 3(13). – С. 44–54. – DOI: 10.54708/26587572_2023_531344
6. Преимущества и недостатки лазерной очистки металлов [Электронный ресурс] // LaserMarker.ru. – Режим доступа: <https://lasermarker.ru/blog/stati-o-lazernoy-svarke/preimushchestva-i-nedostatki-lazernoy-ochistki-metallov/>
7. Почему очистка перед нанесением PVD-покрытия имеет решающее значение? Обеспечение оптимальной адгезии и производительности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.kindle-tech.com/faqs/how-do-you-clean-before-pvd-coating>
8. Techmann. Подготовка поверхности перед плазменным напылением, PVD и CVD покрытия. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://techmann.ru/primenenie/pvd-cvd-pokrytiya/>

© Ситдииков И.Н., Хадиуллин С.Х., 2025

С.А. ИСКАКОВ, Л.Р. ФАЙРУШИНА

nice.romantic@mail.ru

Науч. руковод. – доктор техн. наук, профессор Р.А. МУНАСЫПОВ

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

ПЕРЕХОД К ИНДУСТРИИ 5.0 В МАШИНОСТРОЕНИИ: ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Аннотация: рассмотрена эволюция от Индустрии 4.0 к человекоцентричной модели Индустрии 5.0 в машиностроении. Проанализированы ключевые технологические тренды: коллаборативная робототехника, интеллектуальные операционные системы и гиперкастомизация. Исследованы организационные трансформации в условиях цифровых экосистем. Определена роль государства в формировании сбалансированной стратегии развития отрасли.

Ключевые слова: Индустрия 5.0, машиностроение, человекоцентричность, коллаборативная робототехника, цифровая экосистема, устойчивое развитие, государственно-частное партнерство.

Введение

Машиностроение, являясь фундаментом промышленного комплекса любой развитой страны, находится на пороге пятой промышленной революции – Индустрии 5.0. Если Индустрия 4.0 была сфокусирована на тотальной автоматизации, киберфизических системах и повышении эффективности за счет вытеснения человека из производственных процессов, то новая парадигма провозглашает возвращение человека в центр производства, но в новом качестве – творческого партнера интеллектуальных машин [1, 2].

Цель данной статьи – проанализировать специфику, драйверы и вызовы перехода машиностроения к Индустрии 5.0, опираясь на существующие национальные стратегии и технологические тренды.

1. От эффективности к ценности: философия Индустрии 5.0

Индустрия 5.0 представляет собой не столько технологический разрыв с предыдущим этапом, сколько его ценностную эволюцию. Ее ключевые принципы, сформулированные Европейской комиссией, включают [1, 3]:

1. **Человекоцентричность:** Производственные системы проектируются вокруг потребностей и возможностей человека, а не наоборот;

2. **Устойчивость (sustainability):** Ориентация на экологическую и социальную ответственность, циркулярную экономику и снижение углеродного следа;

3. **Резилиентность (resilience):** Способность производственных систем адаптироваться к внешним шокам и сбоям, будь то разрывы цепочек поставок или пандемии.

В машиностроении это означает переход от массового выпуска стандартизированной продукции к производству кастомизированных, высокотехнологичных решений, где ценность создается за счет синергии человеческой креативности и точности роботов.

2. Технологическое ядро Индустрии 5.0 в машиностроении

Технологическая база Индустрии 5.0 в машиностроении строится на развитии и интеграции следующих ключевых элементов [1, 2, 4]:

1. Коллаборативные роботы (коботы) и расширенный оператор. В отличие от изолированных роботов Индустрии 4.0, коботы работают в непосредственном контакте с человеком, беря на себя монотонные, тяжелые или опасные операции. «Расширенный оператор» – это рабочее место, где сотрудник, оснащенный интерфейсом «мозг-компьютер», умными помощниками и экзоскелетами, управляет сложными производственными процессами, выступая в роли контролера и креативного директора [2];

2. Интеллектуальные операционные системы (IEM). На смену системам планирования ресурсов предприятия (ERP) приходят интегрированные операционные системы (Intelligent Enterprise Managing), которые преодолевают проблемы масштабируемости и обеспечивают гибкость, мобильность и экосистемность. Они позволяют моделировать эволюцию предприятия в виртуальной среде, оптимизируя его конфигурацию [2];

3. Гиперкастомизация и цифровые двойники. Использование больших данных, ИИ и цифровых двойников позволяет создавать уникальные продукты под конкретные запросы заказчика. Потребитель активно участвует в процессе проектирования и настройки изделия, что превращает производство в интерактивный диалог [1, 4];

4. Роевой интеллект (Swarm Intelligence). Децентрализованные самоорганизующиеся системы, состоящие из множества агентов («бойдов»), позволяют создавать гибкие, масштабируемые и мультизадачные производственные сети, способные к быстрой адаптации и коллективному принятию решений [2];

5. Цифровые экосистемы (ЦЭС). Классическая фирма уступает место гибридным цифровым экосистемам, которые объединяют разрозненных участников (поставщиков, производителей, логистов, клиентов) в единую виртуальную платформу. Это стирает границы между отраслями, создавая новые бизнес-модели, основанные на услугах «по требованию» (SaaS, IaaS) [2, 4].

3. Национальные стратегии перехода: уроки для машиностроения

Анализ существующих стратегий показывает различные подходы к реализации принципов Индустрии 5.0 [1]:

– ЕС «Индустрия 5.0». Акцент на исследовательские инициативы в рамках программы «Горизонт Европа», поддержку проектов в области человеко-машинного взаимодействия (FACTS4WORKERS), «умной» сервисизации

(MAKERS) и цифрового благополучия работников. Фокус – на малых и средних предприятиях (МСП);

– Китай «Сделано в Китае 2025». Стратегия «сверху вниз», нацеленная на технологический суверенитет и импортозамещение в 10 ключевых секторах, включая робототехнику и автомобилестроение. Достигается за счет прямых государственных инвестиций, субсидий и защиты внутреннего рынка;

– Япония «Общество 5.0». Более широкая философская концепция, где технологии служат для решения социальных проблем и повышения качества жизни. Реализуется через создание «умных городов» (Фудзисава, Касива-но-Ха), где тестируются и интегрируются новые технологические решения.

Для российского машиностроения, стремящегося к технологическому суверенитету, наиболее релевантен опыт Китая в части концентрации усилий на приоритетных направлениях (например, станкостроение, робототехника) и активной роли государства в создании инфраструктуры и стимулировании спроса. Одновременно необходимо перенимать европейский подход к развитию человеческого капитала и японский – к созданию человеко-ориентированной производственной среды.

4. Вызовы и риски для машиностроительного комплекса

Переход к Индустрии 5.0 сопряжен с рядом серьезных вызовов [2, 4]:

1. Цифровая монополизация и эффект запутывания. Крупные ЦЭС могут использовать алгоритмический менеджмент для проведения тонкой ценовой дискриминации и манипулирования поведением как поставщиков, так и потребителей;

2. Цифровое мошенничество и киберугрозы. Виртуализация бизнеса создает новые риски: от фрод-кликов и поддельных аккаунтов до создания фирм-однодневок («диких кошек»), что подрывает доверие и наносит финансовый ущерб;

3. Размывание ответственности. В плоских, одноранговых сетях, характерных для ЦЭС, часто отсутствует четко определенное «ответственное лицо», что усложняет регулирование и разрешение споров;

4. Цифровая интенсификация труда. Алгоритмический менеджмент, обеспечивающий работу платформ 24/7, может привести к чрезмерной нагрузке, выгоранию и новым формам отчуждения труда;

5. Проблема статистического учета и регулирования. Гибридные ЦЭС, объединяющие функции производства, торговли и финансов, не укладываются в традиционные отраслевые классификаторы, что искажает статистику и затрудняет выработку адекватных мер господдержки.

Заключение

Переход машиностроения к Индустрии 5.0 – это не неизбежный «золотой век», но и не «прыжок в темноту». Это сложный, многогранный процесс,

требующий сбалансированного подхода. С одной стороны, он открывает беспрецедентные возможности для создания высокомаржинальной, кастомизированной продукции, повышения экологической устойчивости и эффективности использования ресурсов. С другой – порождает новые риски цифровой эпохи.

Успешная трансформация отрасли возможна только при активной роли государства, которое должно:

- Сформулировать национальную стратегию перехода, сочетающую задачи технологического суверенитета (импортозамещение) с принципами человекоцентричности и устойчивости;

- Создать условия для развития цифровой инфраструктуры и стимулировать кооперацию между наукой, образованием и бизнесом;

- Разработать новую систему регулирования, адекватную вызовам цифровых экосистем, включая вопросы кибербезопасности, защиты прав работников и антимонопольного контроля в виртуальной среде.

Таким образом, будущее машиностроения за теми предприятиями, которые смогут не просто внедрить новые технологии, но и органично интегрировать человеческий потенциал в цифровые производственные системы, выстроив новую, более гибкую и социально-ответственную бизнес-модель.

Библиографический список

1. Ху Тинтин. Обзор национальных стратегий перехода к Индустрии 5.0: Экономика и управление инновациями. 2022. № 3. – 28-38 с.
2. Розанова Н.М. Индустрия 5.0: золотой век или прыжок в темноту?: Вестник Института экономики Российской академии наук. 2023. №6. – 61-77 с.
3. Breque M., De Nul L., Petridis A. Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021. – 56 p.
4. Степаненко А.А., Федорова И.К., Земзюлина В.Ю. Переход от Индустрии 4.0 к 5.0: тенденции и перспективы: Уральский федеральный университет. 2023. – 178-183 с.

© Исаков С.А., Файрушина Л.Р., 2025

М.Р. ХАБИБУЛЛИН

habibullin.2001yandex.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент С.И. ФЕЦАК

Уфимский университет науки и технологий

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ ПЕРФОРАЦИИ

Аннотация: рассмотрены требования, предъявляемые к рабочим лопаткам турбин высокого давления. Проведен анализ современных способов охлаждения лопаток. 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, отверстия, охлаждение лопаток, отверстия перфорации.

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) занимает около 7% среди всех операций обработки деталей и узлов газотурбинных двигателей (ГТД). Область её применения продолжает расти. ЭЭО производится путем съема металла с поверхности детали термическим воздействием, вызванным электрическим разрядом между двумя электродами, помещенными в жидкую диэлектрическую среду. При изготовлении деталей ГТД методом ЭЭО используются станки типа супердрель, предназначенные для скоростного электроэрозионного сверления глубоких отверстий в лопатках с использованием единичных, гребенчатых или кассетных электродов (копировально-прошивные станки), и проволочно-вырезные электроэрозионные станки – для обработки пазов и выполнения операции отрезки [1-3].

Отверстия перфорации в пере рабочих и сопловых лопаток турбины, секций жаровой трубы камеры сгорания необходимы для активного охлаждения материала и формирования защитной пленки, разделяющей профиль пера и потока горячего газа. Для их изготовления обычно используют станки типа супердрель. Они применяются для получения рядов отверстий в лопатках турбины высокого давления диаметром 0,3-1,5 мм с отношением $k = h/d > 10...80$, где h – глубина отверстия, мм; d – диаметр отверстия, мм [1].

Сверление отверстий методом ЭЭО сопряжено с несколькими серьезными проблемами: значительный износ электрод-инструмента (ЭИ) (до 200 % относительно снятого материала); формирование измененного слоя; конусность обрабатываемых отверстий; относительно низкая производительность при

обработке единичным ТЭИ; невозможность ЭЭО заготовок с нанесенным термобарьерным покрытием ввиду его электроизоляционных свойств.

Измененный слой в отверстии формируется в результате термического влияния на материал заготовки. На (рис. 1) приводится схема градации зон в зоне обработки по степени воздействия источника тепла [1-3]:

1 – зона осаждения продуктов пиролиза рабочей жидкости;

2 – зона осаждения материала ЭИ;

3 – зона осаждения металла, в которой часть расплавленного материала, удаленного диэлектрической жидкостью, осаждается и повторно затвердевает, формируя так называемый дефектный слой характерного белого цвета с мелкозернистой структурой;

4 – зона термического влияния, в которой материал заготовки подвергается нагреванию, из-за чего изменяются его свойства;

5 – зона пластических деформаций, измельчения зерна металла.

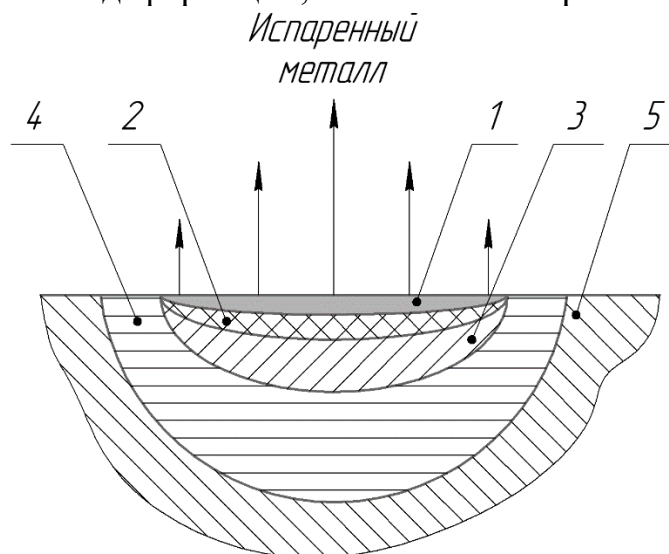


Рис. 1. Зоны измененного слоя

Из-за особенностей ЭЭО сопровождается непрерывным процессом разрушения ЭИ и заготовки, который зависит от электропроводящих свойств материала инструмента и подобранного режима обработки [1, 10]. Одним из способов повышения стойкости ЭИ является нанесение покрытий. Защитный эффект покрытия возрастает вместе со снижением температуропроводности применяемого материала. Иначе говоря, чем меньше температуропроводность, тем при меньшей толщине покрытия достигается защитный эффект. Материал покрытия должен обладать высокой температурой плавления, чтобы препятствовать быстрому износу пленки на поверхности ЭИ.

С целью снижения износа ЭИ в статье [11] описывается изготовление инструмента из бронзы, меди, молибдена и медно-вольфрамовых сплавов с нанесением композитного никелевого и алмазно-никелевого покрытий, что показало значительное снижение износа длины ЭИ из меди и бронзы с композитным никель-алмазным покрытием по сравнению ЭИ без покрытия (медь и бронза соответственно 27% и 23%). Изменение износа ЭИ лишь с никелевым

покрытием по сравнению с ЭИ без покрытия менее значительно (медь и бронза соответственно 11% и 4%).

На сегодняшний день не существует полных математических моделей, способных описать все процессы, протекающие при ЭЭО. Существует два подхода к созданию моделей ЭЭО: эмпирический и теоретический. Теоретические модели предусматривают создание моделей, исходя из взаимосвязи электропроводности, теории термодинамики и теплопроводности. Ввиду того, что существует множество физико-химических процессов, протекающих в зоне обработки, в модели формообразования поверхности вводят упрощения, которые отражаются на валидности прогнозируемых значений.

В большинстве случаев, создаются модели единичной эрозионной лунки (ЕЭЛ). При этом принимается, что полярность электродов прямая, то есть инструмент выступает катодом, а заготовка – анодом. Наиболее широкое применение получила математическая модель износа (эрозии) катода [12-13], в которой плазменная дуга принимается как точечный источник тепла, так как радиус плазменного факела значительно меньше на катоде. Уравнение температурного распределения приведено в уравнении (1):

$T = T_0 + \frac{F_c UI}{2\pi k_T r} \operatorname{erfcf}\left(\frac{r}{2\sqrt{at}}\right),$	(1)

где T_0 – начальная температура, К; U – напряжение, В; I – сила тока, А; F_c – доля передаваемой мощности на катод; k_T – теплопроводность материала катода, Вт/(м·К); r – радиус плавления материала катода, м; $\alpha \equiv k_T/(\rho C_p)$ – тепловое рассеяние материала катода, м²/с; C_p – теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; $\operatorname{erfcf}(f)$ – дополнительная функция ошибок.

Математические модели эрозии анода являются более комплексными из-за учета как удаляемого материала электрода, так и повторно затвердевшего материала. В результате аналитическое решение модели на основе дифференциальных уравнений может быть недостижимо. Одним из способов вычисления размера ЕЭЛ является модель распределения тепла на основе эффекта Томпсона с теми допущениями, что электрод рассматривается в качестве массивного полуограниченного тела, тепло не передается рабочей жидкости, фазовые превращения не учитываются [14]:

$T(R, t) = \frac{2Q}{c \cdot \rho (4\pi at)^{3/2}} e^{\frac{-R^2}{4at}}.$	(2)

где Q – выделенное количество тепла, Дж; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; c – теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; R – радиус вектора точки пространства, имеющей искомую температуру $T(R, t)$.

Реализация модели эрозии анода возможна с помощью конечно-элементного анализа (КЭА). Исследование [13] показывает достоверность получаемых моделей КЭА с распределенным источником тепла и смещающимся граничным условием. КЭА позволяет прогнозировать толщину «белого» слоя повторного затвердевания и глубины зоны температурного влияния. С помощью моделей температурного

распределения возможно прогнозирование толщины дефектного слоя. Эффективность вымывания плазмы (plasma flush efficiency, PFE) определяется как отношение, описывающие долю удаленного материала из ЕЭЛ (3): $PFE = V_m/V_S$, где V_m – измеренный объем кратера; V_S – прогнозируемый объем кратера.

Результаты, получаемые с помощью данной модели, согласуются с характером экспериментальных измерений: толщина дефектного слоя в первую очередь зависит от энергии импульсов (рис. 2), однако спрогнозированные значения обладают низкой точностью в силу влияния сторонних факторов, что видно из сравнения графиков экспериментального исследования и моделирования процесса (рис. 3) [13]. Таким образом, современные математические модели ЕЭЛ могут дать оценку диаметра и глубины отверстия для заданного режима, но обладают низкой достоверностью в прогнозировании толщины дефектного слоя на поверхности лунки.

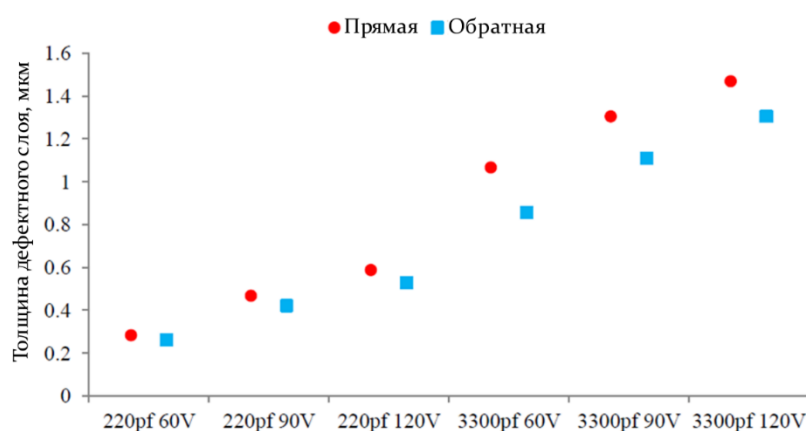


Рис. 2. Прогнозируемая глубина дефектного слоя

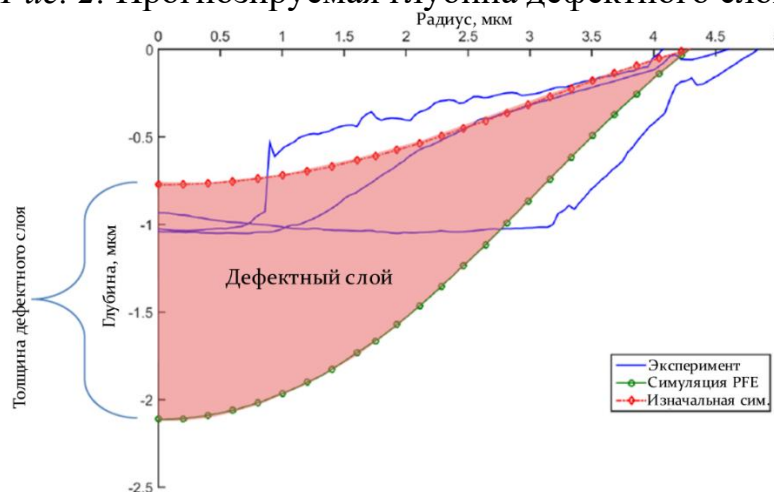


Рис. 3. Профиль ЕЭЛ фактический и прогнозируемый

Как показывает работа [4], при движении ЭИ вниз шлам вытесняется в боковые потоки из зоны обработки благодаря созданию зоны повышенного давления. Поднятие ЭИ, напротив, создает зону пониженного давления в области обработки, из-за чего окружающая диэлектрическая жидкость устремляется в зону обработки, захватывая шлам и другие продукты эрозии.

В отсутствии прокачки жидкости для интенсификации процесса эвакуации шлама из зоны обработки к инструменту, заготовке или рабочей жидкости может прикладываться вибрация. Прикладываемая вибрация разделяются на два частотных диапазона: низкочастотные (1-100 Гц) и высокочастотные колебания (ВЧВ). ВЧВ задаются в диапазоне частот, соответствующем ультразвуковым воздушным колебаниям (20-100 кГц).

Современные электроэрозионные станки оснащаются линейными двигателями для точного подвода инструмента и подачи ЭИ, так как высокая точность и жесткость являются критическими характеристиками для позиционирования ЭИ. В статье [5] рассматривается использование линейного двигателя в качестве привода ЭИ электроэрозионного станка. Исследование показывает практическую реализуемость составных движений ЭИ с разной частотой и амплитудой, однако влияние низкочастотных вибраций ЭИ противоречиво и бессистемно.

Применение ВЧВ в ЭЭО исследуется уже более пятидесяти лет, главным образом в копировально-прошивных станках, но так и не получило широкого распространения. Выявлено безусловное увеличение производительности ЭЭО от увеличения частоты вибрации, причем эффект заметнее при обработке материалов с высокой термо- и электропроводимостью [6]. Совмещение ВЧВ с вращением ЭИ позволяет добиться максимального эффекта и повысить скорость подачи ЭИ в несколько раз [7-9]. Однако наблюдается относительное снижение стабильности процесса и повышение износа ЭИ. Авторы работы [8] приводят сравнение производительности ЭЭО с ВЧВ разной частоты и без вибрации ЭИ (рис. 4). В настоящий момент применение ВЧВ в ЭЭО не нашло применения из-за нестабильного влияния на процесс обработки.

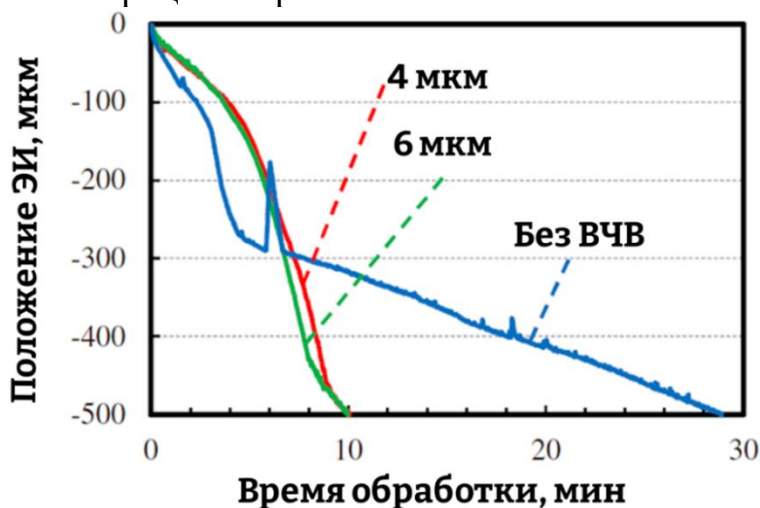


Рис. 4. Взаимосвязь между положением электрода и временем обработки с разной амплитудой вибрации

Обзор научно-технической литературы выявил несколько методов повышения качества электроэрозионного сверления отверстий перфорации в ГТД. Рассмотрено использование математических моделей ЕЭЛ для вычисления глубины лунки и прогнозирования толщины дефектного слоя. Рассмотрен метод нанесения композитного никелевого и алмазно-никелевого покрытия,

повышающего стойкость цилиндрического ЭИ, снижающего боковой износ инструмента. Такие методы, как интегрирование ВЧВ и составное движение ЭИ, применимы для копировально-прошивных станков. Для прожига отверстий перфорации на копировально-прошивочных станках используются гребенчатые электроды и электроды со сложной формой для доступа в зоны с ограниченным подводом инструмента, для которых приложение ВЧВ и составных движений может повысить эффективность эвакуации шлама из зоны обработки.

Библиографический список

1. 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.
2. Влияние режимов электроэрозионной обработки на качество поверхностного слоя / П.А. Иванов, Е.В. Раменская, В.Д. Шапорев [и др.] // Актуальные проблемы космонавтики. – 2020. – С.10-12.
3. Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки/ Фотеев Н.К. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с.
4. S. Zhang, W. Zhang, Y. Liu, F. Ma, C. Su, and Z. Sha. / Study on the gap flow simulation in EDM small hole machining with Ti alloy. // Advances in Materials Science and Engineering. – 2017. – p. 7.
5. Jing Cui, Zhongyi Chu/ Composite motion design procedure for vibration assisted small-hole EDM using one voice coil motor. // Shock and Vibration. – 2015. – p. 7.
6. Material independent effectiveness of workpiece vibration in m-EDM drilling. S. Kumar Singh, H. Singh Mali, D. Rajendra Unune, A. Majdi Abdul-Rani, S. Wojciechowski / journal of materials research and technology. – 2022. – p. 531-546.
7. T. Ichikawa, W. Natsu. Realization of micro-EDM under ultra-small discharge energy by applying ultrasonic vibration to machining fluid. // Procedia CIRP. – 2013. – p. 326-331.
8. Ultrasonic Vibration Assisted Electro-Discharge Machining (EDM) – An Overview. / N. Sabyrov, M.P. Jahan, A. Bilal, A. Perveen. // Material. – 2019. V.12. – p. 56.
9. The state of the art of electrical discharge drilling: a review. X. Mao, S. Almeida, J. Mo, S. Ding // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – p. 2947-2969.
10. Investigation of the Fundamentals of toll Electrode Wear in Dry EDM / T.B. Macedo, M. Wiessner, C. Hollensten, F. Kuster, K. Wegener. // Procedia CIRP. – 2016. – p. 55-58.
11. Experimental Study on Electrode Wear of Diamond-Nickel Coated Electrode in EDM Small Hole Machining / Y. Liu [and others] // Advances in Materials Science and Engineering. – 2019. – p. 10.
12. Influence of graphene coating in electrical discharge machining with an aluminum electrode / P.V. Dong [and others]– Journal of the Mechanical Behavior of Materials. – 2023. – p.10.

13. Daryl D. DiBitonto, Philip T. Eubank, Mukund R. Patel, Maria A. Barrufet; Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple cathode erosion model. Journal of Applied Physics. – 1989. – p. 4095-4103.

14. Shao Bai. Modeling and Simulation of Micro Electrical Discharge Machining Process. Mechanical (and Materials) Engineering. – Dissertations, Theses, and Student Research. – 2015. – p. 123.

15. А.В. Журин. Методы расчета технологических параметров и электродов-инструментов при электроэрозионной обработке. Автореферат диссертации. ТГУ. – 2005. – 20 с.

© Хабибуллин М.Р., 2025

УДК 621.923

Р.У. ХУСАИНОВ

rustam_khusainov@internet.ru

Научный руководитель – д.т.н., профессор Р.А. МУНАСЫПОВ

Уфимский университет науки и технологий

АЛМАЗНЫЕ КРУГИ НА ЭЛАСТИЧНОЙ СВЯЗКЕ – ИННОВАЦИОННОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Аннотация: статья рассматривает проблему финишной обработки лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов. Показаны ограничения традиционных методов (прижоги, подрезка кромок, альфированный слой) и предложено решение — полировка эластичными алмазными кругами. Описана конструкция круга и систематизированы типы связующих материалов. На примере полиуретана СУРЭЛ-27 представлены результаты обработки кромок лопаток из сплава ВТЗ-1. Обозначены направления оптимизации связки для повышения термостойкости, износостойкости и адгезии алмазных зёрен.

Ключевые слова: титановые сплавы, финишная обработка, лопатки компрессора ГТД, алмазные круги, эластичная связка, полировка, прижоги, подрезка кромок, альфированный слой, полиуретан СУРЭЛ-27.

В современных условиях развития авиационной промышленности особую актуальность приобретает совершенствование технологических процессов, в частности, процессов чистовой и финишной обработки деталей ГТД. При этом ключевое значение имеет обработка лопаток ГТД, где предъявляются повышенные требования к геометрии и качеству поверхностного слоя.

Однако реализация этих требований существенно осложняется тем, что лопатки компрессора ГТД зачастую изготавливаются труднообрабатываемых

материалов, в том числе из титановых сплавов. Обработка таких материалов представляет особую сложность ввиду ряда специфических особенностей:

- низкая теплопроводность материала (от 6 до $20 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$) приводит к интенсивному тепловыделению в зоне резания и повышенному риску образования «прижогов» [1];

- высокая адгезионная активность вызывает налипание материала на инструмент, что существенно снижает качество обработки;

- склонность к упрочнению при пластической деформации, при которой прочностные свойства материала возрастают почти в 2 раза (при степени деформации 60...70 %);

- химическая активность титана (сильное поглощение O_2 и N) приводит к повышенному окислению, способствует активному взаимодействию с окружающей средой при повышении температуры в зоне резания, в результате чего снижается пластичность титановых сплавов и повышается их твёрдость;

- повышенные усилия резания при сохранении твёрдости материала в широком диапазоне температур, что часто приводит к вибрациям и ускоренному износу режущего инструмента.

Эти физико-механические особенности титановых сплавов напрямую влияют на качество финишной обработки критически важных деталей – лопаток компрессора ГТД. При формировании их аэродинамического профиля особое значение имеет состояние входной и выходной кромок. Однако при использовании традиционных жёстких алмазных кругов при обработке этих кромок возникает серьёзная проблема – «подрезка» радиуса кромки. Это нарушение геометрии критично для аэродинамических характеристик изделия и зачастую приводит к браку дорогостоящих деталей. Кроме того, жёсткие круги нередко вызывают «прижоги» поверхности из-за локального перегрева в зоне контакта, что усугубляется низкой теплопроводностью титанового сплава и интенсивным тепловыделением в зоне обработки.

Существующие технологические решения в области финишной обработки титановых сплавов демонстрируют ряд существенных ограничений, связанных с появлением альфированного слоя, которые значительно снижают эффективность производственного процесса, при обработке лопаток компрессора ГТД.

В этих условиях особую актуальность приобретает поиск альтернативных методов обработки. Альтернативным решением, позволяющим избежать указанных дефектов, является полировка эластичными алмазными кругами. Их применение демонстрирует следующие преимущества:

- сохранение исходной геометрии кромок (отсутствие затягивания кромок лопатки на круг, что исключает «подрезку» радиуса кромок);

- снижает вероятность возникновения «прижогов» благодаря меньшим усилиям резания;

- высокое качество обработки поверхности (шероховатости) при сохранении точности размеров.

Эластичные алмазные круги способны преодолеть ключевые ограничения традиционных методов, обеспечивая более стабильные и предсказуемые

результаты финишной обработки. Для наглядной демонстрации конструктивных особенностей такого инструмента на рисунке 1 представлен эскиз сборки абразивного круга на эластичной связке.

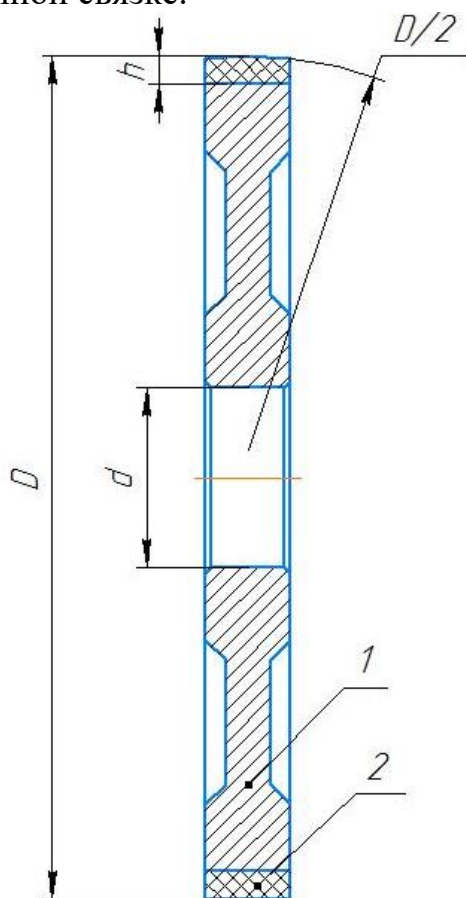


Рис. 1 Эскиз абразивного круга в сборе: 1- корпус круга;
2- абразивный слой на основе эластичной связки.

Круг состоит из корпуса круга (1), который служит основой конструкции и обеспечивает его механическую прочность. Он должен выдерживать значительные центробежные нагрузки при вращении и динамические нагрузки в процессе обработки. Материал, используемый для изготовления корпуса круга, — сталь 20 ГОСТ 380-2005 [2].

Алмазонасный слой (2) представляет собой рабочую часть инструмента, состоящую из алмазных зёрен, равномерно распределённых в матрице эластичной связки. Именно эта часть непосредственно взаимодействует с обрабатываемой поверхностью и обеспечивает требуемые параметры качества обработки.

В настоящее время для изготовления эластичных связок применяются различные композиционные материалы. Ниже в таблице 1 приведены основные типы таких материалов, их ключевые преимущества и ограничения.

Таблица 1 – Характеристики эластичных связующих материалов

Материал	Преимущества	Недостатки
Полиуретан (марка СУРЭЛ-27)	Высокая эластичность и упругость; хорошая адгезия к алмазным зёрнам; устойчивость к динамическим нагрузкам; технологичность при формовании [3]	Ограниченная термостойкость (до 120–150 °С); постепенное старение при длительной эксплуатации [3]
Силиконовый каучук	Отличная термостойкость (до 250 °С); высокая химическая стойкость; сохранение эластичности при низких температурах [4]	Более низкая механическая прочность по сравнению с полиуретаном; сложность равномерного распределения алмазных зёрен
Эпоксидная смола с эластификаторами	Хорошая адгезия к абразиву; регулируемая твёрдость; устойчивость к истиранию [5]	Жёсткость структуры при недостаточном количестве эластификаторов; склонность к трещинообразованию при ударных нагрузках
Полиамид термопластичный	Высокая износостойкость; хорошая ударная прочность; устойчивость к растворителям [6]	Ограниченная эластичность при комнатной температуре; необходимость высокотемпературной переработки
Акриловый эластомер	Хорошая оптическая прозрачность (удобно для контроля износа); устойчивость к УФ-излучению; низкая остаточная деформация	Умеренная термостойкость (до 150 °С); более высокая стоимость по сравнению с полиуретаном
Натуральный каучук	Исключительная эластичность; высокая амортизация ударных нагрузок; хорошая адгезия к металлам	Низкая термостойкость (до 80–100 °С); подверженность окислению и старению под действием озона
Бутадиен-нитрильный каучук (БНК)	Хорошая маслостойкость; умеренная эластичность; устойчивость к химическим средам [7]	Ограниченная термостойкость (до 120 °С); жёсткость при низких температурах

Значительные успехи в разработке эластичных связок были достигнуты при создании композиции на основе полиуретана марки СУРЭЛ-27. Данные круги были разработаны в Институте технологий и организации производства АО НИИТ [3]. Экспериментальные исследования, проведённые в Институте, показали, что использование алмазных кругов на пенополиуретановой связке позволяет достичь требуемых параметров качества обработки при сохранении высокой

производительности процесса. Особенно значимыми являются результаты обработки кромок лопаток компрессора из титанового сплава ВТ3-1 ГОСТ 19807-91, где предъявляются наиболее жёсткие требования к геометрии и качеству поверхностного слоя.

На рисунке 2 представлены профили сечений кромок пера лопаток после шлифования алмазным кругом на пенополиуретановой связке поперечной строкой (х 90).

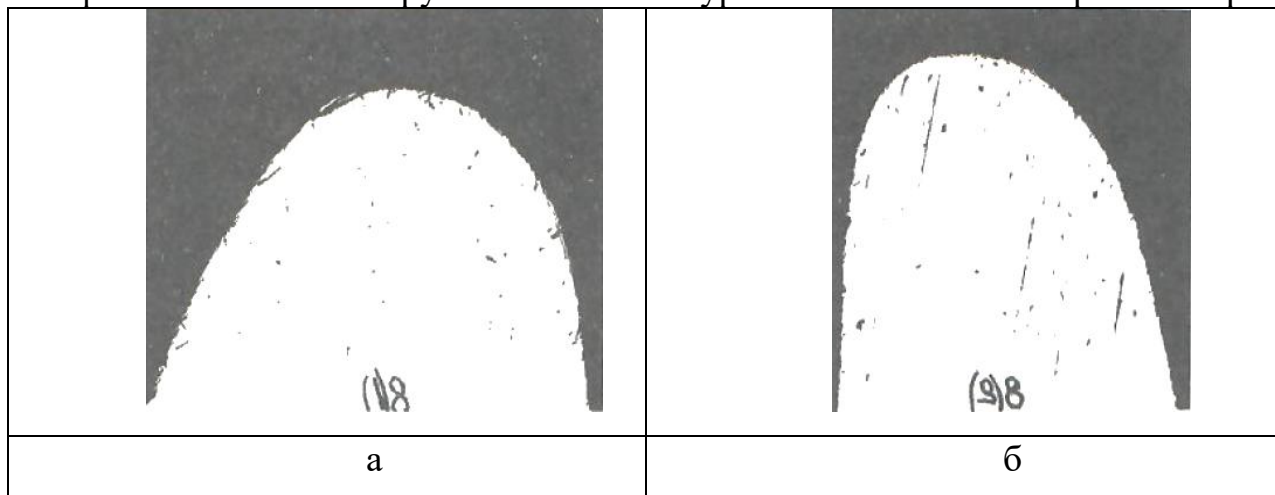


*Рис. 2. Профили сечений кромок пера лопаток после шлифования алмазным кругом на пенополиуретановой связке поперечной строкой (х 90)
а – входная кромка, б – выходная кромка [1]*

Эластичные связки на основе полиуретана марки СУРЭЛ-27 (~ 60... 80 Шор А) демонстрируют высокую эффективность при финишной обработке. Их применение позволяет:

- достигать требуемых параметров качества поверхности;
- сохранять высокую производительность процесса;
- эффективно обрабатывать кромки лопаток из титановых сплавов с жёсткими требованиями к геометрии;
- провести обработку спинки и корыта пера лопаток с закруглением входной и выходной кромок в одной операции, за одну установку и в одной строке, что позволяет исключить погрешности совмещения профиля спинки и корыта с радиусами входной и выходной кромок (рисунок 2);
- исключать дефекты в виде «прижогов» и нарушения радиуса кромок.

В перспективе исследования будут сосредоточены на оптимизации состава эластичной связки – это позволит существенно повысить стойкость алмазных кругов на эластичной связке. Ключевая задача – подбор новых полимерных композиций, которые обеспечат:

- сохранение высокой эластичности при интенсивных нагрузках;
- увеличение износостойкости рабочего слоя;
- стабильность характеристик при температурах до 500–600°C;
- прочное сцепление алмазных зёрен с матрицей связки.

Такой подход откроет возможности для расширения сферы применения эластичных алмазных кругов и повысит экономическую эффективность финишной обработки жаропрочных титановых сплавов.

Библиографический список

1. Технология изготовления лопаток компрессора газотурбинных двигателей Юрьев В.Л., Грибановский В.А., Старочкина С.В. // М., “Машиностроение”, 2011. – 623 с.
 2. ГОСТ 16181-82. Круги алмазные шлифовальные. Технические условия
 3. «Изготовление опытной партии алмазных кругов на эластичной связке» Технический отчет/Руководитель Айтмухаметова Р.Г., инв. №7-2368/11-8400, Уфа, 2019 г.
 4. Silicone rubber basics [Электронный ресурс] // LeadRP. – URL: (дата обращения: 14.10.2025).
 5. Коротков, В. А. Исследование эксплуатационных показателей моделей отрезных шлифовальных кругов из различных типов полимерных связующих / В. А. Коротков, Е. С. Шмаков, Н. Е. Бобков.
 6. Стеклопластик на основе полипропилена [Электронный ресурс] // Alliance-Compozit. – URL: (дата обращения: 14.10.2025).
 7. Свойства и применение бутадиен-нитрильного каучука (БНК) [Электронный ресурс] // ПрофРезина. – URL: (дата обращения: 14.10.2025).
- © Хусаинов Р.У., 2025

УДК 621.923.5

И.Р. ШАМСУТДИНОВ

ilnur_rahil@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент В.А. ОГОРОДОВ

Уфимский университет науки и технологий

МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АЛМАЗНЫХ ЗЕРЕН НА ПОВЕРХНОСТИ ХОНИНГОВАЛЬНОГО БРУСКА

Аннотация: разрабатывается математическая модель режущей поверхности хонинговального бруска, позволяющая по результатам экспериментальных исследований контактного взаимодействия алмазных брусков с обрабатываемой поверхностью и равномерном законе распределения зерен по поверхности с высокой точностью рассчитать размеры этих зерен.

Ключевые слова: процесс хонингования; образование заусенцев; алмазные зерна; хонинговальный брусок; радиус зерна; закон распределения.

Одним из основных недостатков высокоточного процесса алмазного хонингования прецизионных отверстий плунжерных пар топливной и гидравлической аппаратуры является образование заусенцев на кромках

пересечений обрабатываемой поверхности и радиальных отверстий. Известно, что их образование обусловлено многократным выдавливанием режущими зернами частиц металла за кромку пересечения. Поэтому для предотвращения образования заусенцев необходимо обеспечить постоянное удаление выдавленных частиц металла за кромку пересечения в процессе хонингования. Это возможно, если управлять траекторией движения алмазных зерен вдоль кромки пересечения, что, в свою очередь, требует определения размеров алмазных зерен при условии их случайного расположении на поверхности бруска.

Для решения поставленной задачи в качестве исходных приняты результаты экспериментальных исследований контактного взаимодействия алмазных брусков с обрабатываемой поверхностью [1]:

- фактическая площадь контакта алмазных зерен с деталью A_{ra} , мм²/см²;
- максимальная площадь контакта алмазов с деталью S_{max} , 10⁴, мкм²/см²;
- число контактирующих зерен N_a , шт/см².

Средневзвешенная площадь контакта алмазов с деталью

$$S_a = \frac{A_{ra}}{N_a}.$$

Средний радиус зерна

$$R_a = \sqrt{\frac{A_{ra}}{N_a}}. \quad (1)$$

Максимальный радиус зерна

$$R_{max} = \sqrt{\frac{S_{max}}{N_a}}. \quad (2)$$

На *Рис. 1*. Расчетная схема показана расчетная схема расположения зерен на поверхности бруска.

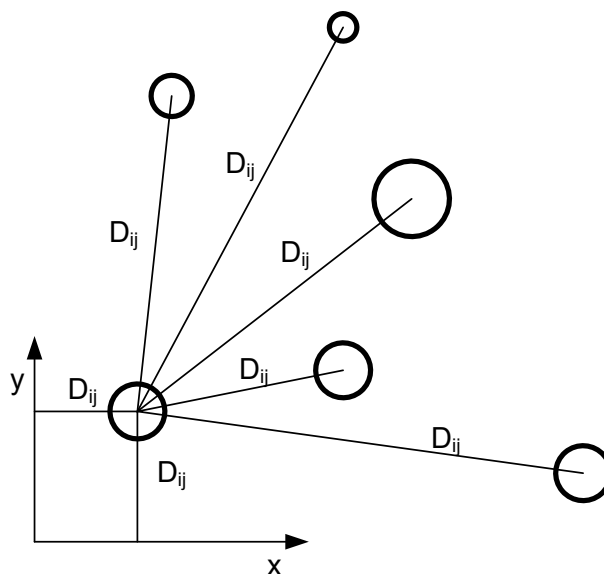


Рис. 1. Расчетная схема

Считая, что форма всех алмазных зерен является сферической, на расчетной схеме зерна представлены в виде окружностей разного диаметра. Расположение этих зерен отвечает равномерному закону распределения.

На *Рис. 1*. Расчетная схема D_{ij} – расстояние от центра i -го зерна до центра других зерен и краев рассматриваемого участка поверхности, где, $i \in [1; N_a]$ и $j \in [1; N_a + 4]$. Очевидно, что на поверхности бруска зерна не могут пересекаться, касаться друг друга и выступать за края участка.

Для определения максимально разрешенного радиуса каждого зерна составлена матрица расстояний D

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & \dots & D_{1(N_a+4)} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & \dots & D_{2(N_a+4)} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & \dots & D_{3(N_a+4)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ D_{N_a1} & D_{N_a2} & D_{N_a3} & \dots & D_{N_a(N_a+4)} \end{bmatrix}.$$

В каждой строке матрицы D найдем минимальное расстояние $D_{\min}^i$ и составим матрицу максимально допустимых радиусов зерен.

$$r_{\max} = \begin{bmatrix} r_{\max}^1 \\ r_{\max}^2 \\ r_{\max}^3 \\ \dots \\ r_{\max}^{N_a} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $r_{\max}^i = D_{\min}^i$.

Из условий (2) и (3) следует, что радиусы алмазных зерен должны удовлетворять следующему условию

$$r_i \leq \min(r_{\max}^i, R_{\max}).$$

При этом средний радиус зерна должен быть равен величине, полученной из уравнения (1),

$$\frac{1}{N_a} \sum_{i=1}^{N_a} r_i = R_a.$$

Кроме того, необходимо, чтобы хотя бы одно зерно из множества имело максимальный радиус

$$r_k = R_{\max}.$$

Также по условию задачи суммарная площадь всех зерен должна быть равна фактической площади контакта алмазных зерен с деталью, т. е.

$$\sum_{i=1}^{N_a} r_i^2 = A_{ra}.$$

Исходя из малости радиусов зерен r_i , можно считать

$$\sum_{i=1}^{N_a} r_i^2 \approx \sum_{i=1}^{N_a} r_i = A_{ra}$$

и

$$\frac{1}{N_a} \sum_{i=1}^{N_a} r_i^2 = S_a.$$

Таким образом, теоретически суммарная площадь всех зерен S_T равна

$$S_T = \left(1 + \frac{1}{N_a}\right) \sum_{i=1}^{N_a} r_i^2.$$

С другой стороны, площадь всех зерен должна быть равна или близка к экспериментально полученной величине. Это требование математически может быть описано следующим выражением

$$F = A_{ra} + S_a - \left(1 + \frac{1}{N_a}\right) \sum_{i=1}^{N_a} r_i^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Выражение (4) представляет собой аддитивную целевую функцию, в которую искомые величины входят во второй степени. Таким образом, задача определения радиусов зерен сводится к задаче квадратического программирования по нахождению оптимального решения при следующих ограничениях

$$\left\{ \begin{array}{l} r_i \leq \min(r_{\max}^i, R_{\max}), \\ \frac{1}{N_a} \sum_{i=1}^{N_a} r_i = R_a, \\ r_k = R_{\max}, \\ \sum_{i=1}^{N_a} r_i = A_{ra}. \end{array} \right. \quad (5)$$

В матричной форме зависимости (4) и (5) применительно к задаче квадратического программирования имеют вид

$$\left\{ \begin{array}{l} F = \frac{1}{2} R H R^T + f^T R \rightarrow \min, \\ A \leq b, \\ A_{eq} = b_{eq}, \end{array} \right.$$

где R – вектор решений, $R = [r_1 \quad r_2 \quad r_3 \quad \dots \quad r_{N_a}]$,

$$H = \begin{bmatrix} 2A_{ra} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 2S_a & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -2\left(1 + \frac{1}{N_a}\right) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -2\left(1 + \frac{1}{N_a}\right) \end{bmatrix},$$

$$f = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r_{\max}^1 \\ r_{\max}^2 \\ r_{\max}^3 \\ r_{\max}^4 \\ \dots \\ r_{\max}^{N_a} \end{bmatrix}, \quad b_{eq} = \begin{bmatrix} R_a \\ 1 \\ 1 \\ R_{\max} \\ A_{ra} \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}.$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad A_{eq} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{N_a} & \frac{1}{N_a} & \dots & \frac{1}{N_a} & \dots & \frac{1}{N_a} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}.$$

Адекватность найденного оптимального решения может быть оценена посредством вычисления отклонений общей и средней площади контакта зерен по следующим зависимостям соответственно

$$\Delta_{ra} = \left(1 - \frac{a_{ra}}{A_{ra}}\right) 100\%$$

$$\Delta_a = \left(1 - \frac{S_a}{S_a}\right) 100\%$$

Выполненные статистические испытания разработанной модели в виде 100 кратного повторения расчетов с помощью пакета *MatLab* показали, что для различных исходных данных [1] среднее значение отклонений составляет

$$\bar{\Delta}_{ra} \approx 10^{-12} \%, \quad \bar{\Delta}_a \approx 10^{-12} \%,$$

что подтверждает точность вычисления радиусов алмазных зерен с помощью данной математической модели.

Библиографический список

1. Чеповецкий И.Х. Механика контактного взаимодействия при алмазной обработке. К., Наук. думка, 1978. – 228 с.

И.Н. ЯКУПОВ

y4kup0v.11d4r@gmail.com

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доцент Д.В. ЦЕЛИЩЕВ

Уфимский университет науки и технологий

СИСТЕМЫ, ПОЗВОЛЯЮЩИЕ ЛИЦАМ С ОВЗ УПРАВЛЯТЬ АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Аннотация: в статье проведен комплексный анализ возможности создания и реализации систем, позволяющих лицам с ОВЗ управлять транспортными средствами, оценены необходимость и цели создания подобного проекта. Рассмотрены существующие за рубежом варианты систем улучшения доступной среды для лиц с ОВЗ, приведены предлагаемые способы реализации проекта.

Ключевые слова: пассажирские перевозки, Россия, ОВЗ, доступная среда.

Создание систем, позволяющих лицам с ОВЗ управлять транспортными средствами быстрыми темпами, набирает актуальность в свете событий последних лет. Мобильность является одной из ключевых составляющих качества жизни и социальной интеграции людей с ограниченными возможностями здоровья. Технологии адаптации и автоматизации агрегатов управления транспортными средствами предоставляют возможность обеспечить людям с ОВЗ независимость, преодолеть препятствия доступа к сервисам, ускорить реабилитацию пострадавших, включая участников боевых действий и СВО, а также создать равные условия для трудоустройства. Создание доступной среды находится в наше время стоит на повестке дня, целевой аудиторией проекта являются лица II и III групп инвалидности [1]. В Российской Федерации правовое регулирование основано на Федеральном законе № 181-ФЗ «О социальной защите инвалидов», а также на Приказах Минздрава, утверждающих порядок прохождения медицинских комиссий и перечни противопоказаний. Так, лица с нарушениями слуха, с отсутствием одной конечности, с ограниченной подвижностью ног, но сохранённой функцией рук, могут быть допущены к управлению транспортом при условии прохождения медкомиссии и соблюдения предписанных ограничений. В некоторых случаях водительские удостоверения выдаются только при наличии специально оборудованного автомобиля. Особое значение в последние годы приобретают программы переобучения и восстановления профессиональных навыков участников СВО, возможность водить управлять транспортным средством может оцениваться как часть процесса возвращения к активной жизни [2]. Таким образом, задачи адаптации транспортных средств напрямую связаны с национальными целями по развитию доступной среды и социальной интеграции.

В западных странах системы адаптации автомобилей для лиц с ОВЗ развиваются уже долгое время, широко распространены коммерческие

производители адаптаций автомобилей и сети дилеров и сервисных центров, а также стандарты установки модификаций транспортных средств. К примеру, в США и европейских странах работают крупные компании, такие как BraunAbility или MobilityWorks, предлагающие полный спектр решений: от ручных органов управления до подъемников для инвалидных колясок [3,4]. Примером государственно-благотворительной модели, при которой водители с ОВЗ получают доступ уже адаптированным транспортным средствам, может послужить программа Motability Scheme (Великобритания), в рамках которой государство совместно с благотворительными фондами предоставляет людям с инвалидностью автомобили в лизинг, покрывая расходы на адаптацию [5]. Доступ к автомобилю и модифицированному оборудованию становится частью системы социальной защиты, а не только личной заботой гражданина [6]. Западный опыт показывает, что использование адаптированных автомобилей не ограничивается личными нуждами. Они активно применяются в служебных и коммерческих целях — например, в таксомоторных парках (услуга Uber WAV), в системе паратранспорта для людей, неспособных пользоваться обычным общественным транспортом [7]. В то же время эта услуга используется для доставки медицинских услуг и социального обслуживания на дому.

Активная реализация инновационных проектов в очередной раз подтверждает необходимость обеспечения отдельных групп граждан доступной средой, выраженной в оборудовании личного транспорта под нужды водителей с ОВЗ. К примеру, в США разработан экспериментальный SAM Car, позволяющий парализованному гонщику Сэму Шмидту управлять автомобилем при помощи поворотов головы, дыхательных команд и голосового управления [8]. Этот проект стал символом того, что при использовании технологий возможно создать условия для полноценной жизни и комфортного передвижения даже для людей с тяжелейшими травмами.

В России процесс адаптации транспортных средств регулируется Постановлением Правительства № 413 от 2019 года, определяющим порядок внесения технологических изменений в конструкцию автомобилей [9]. Все адаптации, к примеру установка ручного управления, подъемников, креплений для колясок или поворотных сидений, должны проходить техническую экспертизу, согласование с ГИБДД и внесение изменений в регистрационные документы. Существуют следующие этапы оборудования автомобиля под нужды лиц с ОВЗ: предварительная техническая экспертиза (заключение о возможности и безопасности переоборудования от аккредитованной лаборатории), получение разрешения от ГИБДД на внесение изменений в конструкцию транспортного средства, выполнение работ по переоборудованию (только на сертифицированных СТО), проверка безопасности и получение свидетельства о соответствии, внесение отметок в регистрационные документы (ПТС, СТС) [10].

В Российской Федерации существует масса отечественных сервисов и мастерских, предлагающих установку адаптаций на легковые автомобили, микроавтобусы и другие типы транспортных средств. Помимо частных инициатив, государство также оказывает поддержку. Через Социальный фонд России

предоставляются технические средства реабилитации (ТСР), в том числе оборудование для автомобилей. В ряде регионов действуют программы переобучения инвалидов в автошколах, включая специальные курсы от ДОСААФ для участников СВО, утративших конечности. Эти шаги позволяют интегрировать пострадавших в трудовую и общественную жизнь. Однако в России отсутствуют масштабные госпрограммы, направленные на обеспечение доступности управления транспортом лицами с ОВЗ [11]. Процессы согласования реконструкции могут затянуться, многие адаптации не имеют сертификации для большинства моделей автомобилей, а также существуют сложности с доступом к сервисам переоборудования транспортных средств в регионах страны.

Рассмотрим сценарии использования оборудованного под нужды лиц с ОВЗ транспорта. Основной целью, несомненно, является самостоятельное вождение, личное пользование: независимое передвижение с целью выполнения бытовых задач, посещения медицинских учреждений, возможность передвижения к месту трудоустройства. В то же время водители с ОВЗ могут управлять автомобилями для выполнения профессиональных обязанностей: курьерская служба, работа в такси, инструкторская деятельность.

Технологии адаптации транспортных средств уже сейчас обеспечивают широкий спектр возможностей переоборудования под различные задачи, однако на данный момент времени отсутствуют национальные проекты и госпрограммы, направленные на создание доступной среды в сфере управления транспортными средствами лицами с ОВЗ.

Библиографический список

1. Категории для установления групп инвалидности. [Электронный ресурс]. URL: <https://student2.consultant.ru> (дата обращения: НАПИСАТЬ).
2. Социальный фонд Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: <https://sfr.gov.ru/> (дата обращения: НАПИСАТЬ).
3. Западный сервис переоборудования автомобилей под нужды людей с ОВЗ. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.braunability.com/> (дата обращения: НАПИСАТЬ).
4. Европейский коммерческий производитель наборов ручного/электронного управления транспортным средством. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.permobil.com/en-us/> (дата обращения: НАПИСАТЬ).
5. Категории для установления групп инвалидности. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mobilityworks.com/hand-controls/> (дата обращения: 04.09.2025).
6. Дочерняя компания BraunAbility, сервис адаптации автомобилей. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.unitedaccess.com/us/en/mobility-products/> (дата обращения: 04.09.2025).

7. Западный сервис помощи лицам с ОВЗ от компании Uber. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.uber.com/us/en/ride/uberwav/> (дата обращения: 07.09.2025).
8. Пример реализации проекта адаптации автомобиля для водителя-инвалида I категории. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.wired.com/2014/05/sam-schmidt-quadruplegic-driver/> (дата обращения: 07.09.2025).
9. Постановление Правительства РФ от 06.04.2019 №413. [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_322251/ (дата обращения: 20.09.2025).
10. Внесение изменений в конструкцию транспортного средства. [Электронный ресурс]. URL: <https://gibddmoscow.ru/tech-test/izmenenie.php> (дата обращения: 20.09.2025).
11. Оформление переоборудования транспортных средств. [Электронный ресурс]. URL: <https://tehnikavto.ru> (дата обращения: 26.09.2025).

© Якупов И.Н., 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 2.1. Прикладная физика

<i>Алашов М.А.</i> Электролитно-плазменное полирование штамповой стали.....	3
<i>Вахитов Р.Р., Галлямов Р.Р.</i> DIY-устройство для создания световых узоров на велосипедных колесах на базе адресных светодиодов.....	7
<i>Журавлев А.А.</i> Полупроводниковый диод на основе черного фосфора.....	10
<i>Пивцова А.Н.</i> Термообработка титанового сплава ВТ6, полученного методом селективного лазерного спекания.....	16
<i>Мифтахова Д.Т.</i> Применение псевдо-бета титанового сплава Ti-15Mo в медицине.....	20

Секция 2.2. Новые материалы и технологии

<i>Атангулова Д.И., Якупова Э.И.</i> Влияние КВД малой степени на структуру и свойства железа.....	23
<i>Габбасов Р.Р., Шапкин М.П., Хазгалиев Р.Г.</i> Моделирование полей напряжений при твердофазной сварке жаропрочных никелевых сплавов...	29
<i>Гайсина А.А.</i> Изучение влияния ИПД обработки на прочностные свойства магниевых сплавов Mg-0.8Mn при комнатной и повышенной температуре...	32
<i>Гомзин А.И., Хайбулина Н.А.</i> Изготовление композита системы магний-бор с использованием эффекта сверхпластичности.....	36
<i>Давлетбаков А.А., Бабичева Р.И.</i> Сравнение тонкопленочных покрытий из кристаллического и аморфного высокоэнтропийного сплава FENICRCo, нанесенных на подложку алюминия, на основе результатов индентирования.....	41
<i>Кондратюк Д.Д., Хаматдинов Р.З.</i> Сравнение способов удаления покрытий с лопаток авиационных двигателей: механический и электролитно-плазменный методы.....	47
<i>Корнеева А.А.</i> Регистрация усталостного разрушения пластин торсионов вертолета методом акустической эмиссии.....	53
<i>Мухаметов М.В.</i> Влияние отжига для снижения внутренних напряжений на механические свойства ультрамелкозернистого сплава Ti-15Mo.....	57
<i>Пукин К.В., Гундерова С.Д.</i> Исследование микроструктуры и микротвердости сплава Ti-40Zr-8Nb-2Sn после интенсивной пластической деформации и отжига.....	64
<i>Рощина Е.С.</i> Влияние деформационной обработки методом ИПДК на структуру и свойства цинкового сплава Zn-Li-Ca.....	69
<i>Тагирова А.А., Минюкевич Д.А., Галиева Э.В.</i> Микроструктура и механические свойства твердофазного соединения из никелевых сплавов после термической обработки.....	73
<i>Утягулова Л.Ф., Шарафутдинов Д.А., Усманов Э.И.</i> Влияние низкотемпературного отжига на микроструктуру и микротвердость технически чистого титана grade 4 после РКУП-К и последующего волочения.....	77

Секция 2.3. Технология машиностроения

<i>Коггала Л.Ч.М.</i> Разработка никелевого гальванического покрытия для оснастки электрохимических станков.....	84
<i>Лукашов М.В., Байдимиров Д.А.</i> Разработка методики исследования образцов, полученных селективным лазерным сплавлением, после сухого электрополирования.....	90
<i>Мингажева А.А.</i> Технология комплексного азотирования ответственных деталей нефтескважинного оборудования.....	95
<i>Сагитов А.А.</i> Покрытия TIALSIN: методы нанесения, механические свойства и эрозионная стойкость. упрочнение металлорежущих инструментов.....	101
<i>Соколова Н.А.</i> Технология формирования микропористой поверхности методом электролитно-плазменной обработки.....	106
<i>Хайров И.С.</i> Разработка регрессионной модели для оценки влияния факторов резания на износ и стойкость инструмента.....	111

Секция 2.4. Сварочные, литейные и аддитивные технологии

<i>Кадиков И.У., Кириллин И.В.</i> Разработка режимов наплавки проволокой HASTELLOY C-22.....	119
<i>Белов Е.М.</i> Литьё под низким давлением: перспективы для промышленности России.....	123
<i>Бреев А.С.</i> Анализ современного оборудования для литья по выплавляемым моделям: шприц-машины.....	126
<i>Деев Д.В.</i> Сравнительный анализ кокильных покрытий для изготовления алюминиевых отливок.....	130
<i>Кириллин И.В., Кадиков И.У.</i> Разработка методики подготовки роботизированного Waam-процесса деталей простой формы.....	133
<i>Куликова Д.А.</i> Отработка режимов роботизированной плазменной сварки сплава ЭП708.....	137
<i>Сиразетдинов Р.Р.</i> Анализ современного оборудования для приготовления шликера.....	143
<i>Хайруллин И.И.</i> Разработка производственных правил для типичных дефектов алюминиевых сплавов.....	149
<i>Смирнов Э.Д.</i> Технологические подходы к улучшению качества отливок из алюминиевых сплавов.....	153
<i>Хузиев И.Ф.</i> Разработка системы управления и регистрации параметров процесса сварки трением машин общего применения.....	157
<i>Халитов А.Г.</i> Исследование процессов сварки трением титановых сплавов ВТ6.....	161
<i>Юсупов Р.Р., Хузиев И.Ф.</i> Разработка лабораторного стенда для сварки трением стержней малых диаметров 2-4 мм.....	167
<i>Зарифжонов Ж.Ф.</i> Аддитивное производство керамических изделий из полифракционных смесей с управляемой фильтрацией фотополимера.....	171

<i>Прягаев В.М.</i> Разработка и исследование фильтрационной подложки аддитивной установки для печати керамическими, металлическими и композитными материалами.....	177
<i>Жерновков Е.Е.</i> Влияние состава защитного газа на проплавление при сварке неплавящимся электродом жаропрочных никелевых сплавов.....	183
<i>Хисамутдинов Э.Р., Галимов В.Р.</i> Технология роботизированной наплавки покрытий на запорную арматуру	189
<i>Саитова А.А.</i> Построение причинно-следственной диаграммы Исикавы по дефекту усадочной пористости.....	194
<i>Суфиянов И.С.</i> Разработка функциональной модели процесса контроля качества отливок.....	199
Секция 2.5. Метрология, стандартизация и сертификация	
<i>Веретеннова А.А.</i> Технология технического контроля детали «Гнездо подшипника» газотурбинного двигателя.....	204
<i>Герасимова Р.В.</i> Служба заботы о клиентах в компании «Уфанет» как инструмент управления качеством услуг и профилактики оттока.....	207
<i>Гурьянов Н.А.</i> Разработка методики калибровки микрометра МК 047-033-2025.....	210
<i>Гурьянов Н.А.</i> Измерения толщины зубьев зубчатого колеса.....	222
<i>Гурьянов Н.А.</i> Автоматизация измерительных процессов. Методика расчёта эффективности.....	231
<i>Иванова В.Ю.</i> Содержание и структура смарт-стандарта в условиях цифровизации и стандартизации.....	237
<i>Клокова Я.А.</i> Метрологическая прослеживаемость при калибровке индикатора типа ИЧ 2.....	240
<i>Клокова Я.А.</i> Статистический анализ измерительного процесса электрической величины на примере сопротивления.....	244
<i>Кузнецова Е.В.</i> Особенности сертификации предприятий – разработчиков авиационной техники гражданского назначения в Российской Федерации...	248
<i>Мещанинова Д.В.</i> Метрологическое обеспечение барьеров искрозащиты серии SIB: методы поверки и средства измерений.....	253
<i>Мулюкин О.Р.</i> Разработка метода контроля пламени в камерах сгорания ГТУ на основе измерения сопротивления полупроводниковой свечи зажигания	255
<i>Нигматуллина А.И.</i> Испытание станков на точность в аккредитованной испытательной лаборатории.....	258
<i>Пастухова К.И.</i> Статистический анализ процесса измерения линейного размера детали.....	261
<i>Пастухова К.И.</i> Метрологическая экспертиза сборочного чертежа изделия «Эталон».....	265
<i>Синицын Р.А.</i> Метрологическое обеспечение процесса поверки дозиметра ДРК – 1.....	269
<i>Соляникова Т.П.</i> Анализ процесса цифровизации стандартов.....	271
<i>Соляникова Т.П.</i> Перспективы развития отечественной Smart-стандартизации.....	275

<i>Токарева О.И.</i> Смарт-стандарты как элемент процесса цифровизации.....	278
<i>Хатмуллина А.А.</i> Комплекс мероприятий по совершенствованию технологии технического контроля детали «Кольцо уплотнительное» для гидравлических и пневматических устройств.....	281
<i>Хатмуллина А.А.</i> Изменения в законодательстве об обеспечении единства измерений.....	283
<i>Шарафутдинова К.Н.</i> Разработка методики калибровки манометра МП-4УФ с оценкой расширенной неопределенности	286
Секция 2.6. Автоматизация технологических процессов	
<i>Сайдуганов А.Р., Ахмедьянова Д.А., Никонов Е.С.</i> Анализ принципиальных схем динамометров с учетом современных требований машиностроительного производства.....	289
<i>Габидуллин Э.Ф., Собачкина А.В., Река Н.Г.</i> Мобильный роботизированный комплекс для автономного обслуживания станков.....	295
<i>Залиев М.Э.</i> Технические предложения по палетизации коробок с продукцией АО «Башспирт».....	300
<i>Кутушев Д.Э.</i> Модернизация тарировочной установки с учетом современных возможностей.....	308
<i>Немков Н.С.</i> Технические предложения по автоматизации паллетизации лотков с молочной продукцией в стаканчиках.....	312
<i>Нураев И.Р., Петров Н.А.</i> Реализация языка программирования МЭК 61131-3 на примере LD средствами моделирования в Simintech.....	316
<i>Павлова А.А.</i> Эскизный проект манипулятора Scara.....	321
<i>Сапожников Г.Ю., Сазанов А.А.</i> Износ инструмента и контактные явления при продольном течении с покрытиями.....	326
<i>Ситдинов И.Н.</i> Автоматические линии очистки режущего инструмента.....	332
<i>Искаков С.А., Файрушина Л.Р.</i> Переход к индустрии 5.0 в машиностроении: вызовы и перспективы.....	337
<i>Хабибуллин М.Р.</i> Методы повышения качества электроэрозионной обработки отверстий перфорации.....	341
<i>Хусаинов Р.У.</i> Алмазные круги на эластичной связке – инновационное решение для финишной обработки титановых сплавов.....	347
<i>Шамсутдинов И.Р.</i> Модель распределения алмазных зерен на поверхности хонинговального бруска.....	352
<i>Якупов И.Н.</i> Системы, позволяющие лицам с ОВЗ управлять автомобильным транспортом.....	357

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

МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Том 2

Материалы

***XIX Всероссийской молодёжной научной конференции
(г. Уфа, 24 – 28 ноября 2025 г.)***

Электронное издание сетевого доступа

*За достоверность информации, изложенной в статьях,
ответственность несут авторы.*

Статьи публикуются в авторской редакции

Подписано к использованию 29.12.2025 г.
Гарнитура «Times New Roman». Объем 16,21 Мб.
Заказ 402.

***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