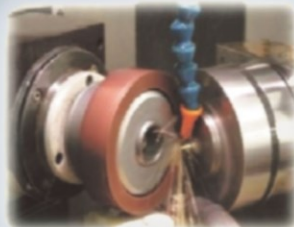


НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

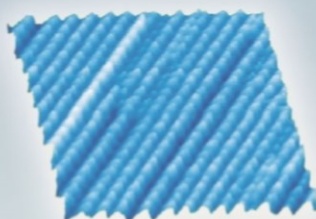
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

10⁽¹⁶⁰⁾
2024

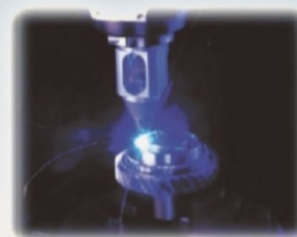
**ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
И КОМБИНИРОВАННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



**НАНОТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**



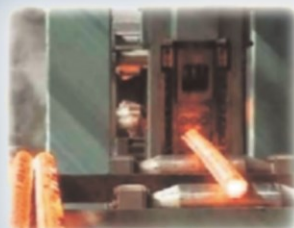
**ЛАЗЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



**ТЕХНОЛОГИИ
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**



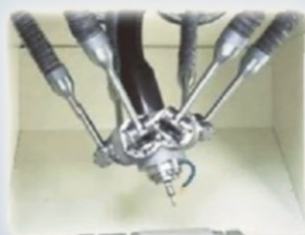
**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В СВАРОЧНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ
ЗАГОТОВОК НА СТАНКАХ С ЧПУ
И ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ**



НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 10 (160)

2024

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

Главный редактор

Заслуженный деятель науки и техники РФ
д.т.н., проф. СУСЛОВ А.Г. (г. Москва)

Зам. главного редактора

д.т.н., доц. ШАЛЫГИН М.Г. (г. Брянск)

Председатель редакционного совета

д.т.н., чл.-корр. РАН ПРИХОДЬКО В.М.
(г. Москва)

Зам. председателя редакционного совета

д.т.н., проф. ГРИГОРЬЯНЦ А.Г. (г. Москва)

Редакционный совет:

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

д.т.н., проф. БУЯНОВСКИЙ И.А. (г. Москва)

д.н., доктор инженер ВАЛЬДЕНМАЙЕР Т.

(г. Штутгарт, Германия)

д.т.н., проф. ГУСЕЙНОВ Г.А. (г. Баку,
Азербайджан)

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

д.т.н., проф. КАВАЛЕК А.А. (г. Ченстохова,
Польша)

д.н., магистр наук КРЕХЕЛЬ Р. (г. Капушан,
Словакия)

д.т.н., проф. КУКСЁНОВА Л.И. (г. Москва)

д.т.н., проф. ЛАРИН С.Н. (г. Тула)

д.т.н., акад. РАН ЛЫСАК В.И. (г. Волгоград)

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

д.т.н., проф. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)

д.т.н., проф. МИХАЙЛОВ А.Н. (г. Донецк)

д.т.н., акад. НАН Беларуси МЫШКИН Н.К.
(г. Гомель, Беларусь)

д.т.н., проф. ОВЧИННИКОВ В.В. (г. Москва)

д.т.н., проф. ПЕТРОВА Л.Г. (г. Москва)

д.т.н., проф. СМОЛЕНЦЕВ В.П. (г. Воронеж)

д.т.н., проф. ФЕДОНИН О.Н. (г. Брянск)

д.т.н., проф. ХЕЙФЕЦ М.Л. (г. Минск, Беларусь)

д.т.н., проф. ЧИГИРИНСКИЙ Ю.Л. (г. Волгоград)

д.т.н., доц. ШОХИЁН А.Н. (г. Куляб, Таджикистан)

DOI:10.30987/issn.2223-4608

Журнал распространяется по подписке,
которую можно оформить по интернет-
каталогу "Пресса по подписке".

Подписной индекс: **Э79195**.

Тел. редакции: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: editntm@yandex.ru

<https://www.tu-bryansk.ru/info/zhurnaly>

Журнал зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и
массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

26 апреля 2019 года

рег. номер ПИ № ФС77-75524

СОДЕРЖАНИЕ

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА

Ронжин Д.А., Мисюров А.И., Григорьянц А.Г., Холопов А.А.,
Таксанц М.В. Влияние стратегий прямого лазерного выращивания
на структуру и свойства титанового сплава ВТ6 3

ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Михайлов А.Н., Анастасьев А.В. К вопросу определения технологических
параметров обработки сложных пространственных поверхностей лопаток
ГТД при полировании 12

Якубов Ч.Ф., Покинтелица Н.И., Братан С.М., Часовитина А.С.
Моделирование процессов теплопередачи при термофрикционном
резании в заготовках из конструкционных сталей 19

ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Приходько В.М., Сундуков С.К., Нигметзянов Р.И., Фатюхин Д.С.
Получение неразъёмных соединений с использованием ультразвуковых
колебаний. 27

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИХ СОЕДИНЕНИЙ

Федонин О.Н., Съянов С.Ю. Технологическое обеспечение качества
поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин
электроэрозионной обработкой. 38

*Журнал входит в перечень изданий ВАК, утвержденных для соискателей
ученых степеней по научным специальностям: 2.5.3 - Трение и износ в
машинах; 2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки; 2.5.6 - Технология машиностроения; 2.5.7 -
Технология и машины обработки давлением; 2.5.8 - Сварка, родственные
процессы и технологии; 2.6.17 - Материаловедение (по отраслям)
(технические науки).*

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов,
публикуемых в журнале «Наукоёмкие технологии в машиностроении»,
допускаются со ссылкой на источник информации и только
с разрешения редакции.

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 10 (160)

2024

Publishes from July 2011

MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

Comes out with assistance of Engineering Technologists Association

Editor-in-chief

Honoured Scientist and Engineer of Russia
d.en.s., prof. SUSLOV A.G. (Moscow)

Deputy chief editor

d.en.s., assoc. prof. SHALYGIN M.G. (Bryansk)

Chairman of Editorial Committee

m.-corr. RAS PRIKHODKO V.M. (Moscow)

Chairman Assistant

d.en.s., prof. GRIGORYANTS A.G. (Moscow)

Editorial Committee:

d.en.s., prof. BAZROV B.M. (Moscow)

d.en.s., prof. BUYANOVSKII I.A. (Moscow)

PhD., Dr. Engineer WALDENMAIER T.
(Stuttgart, Germany)

d.en.s., prof. HUSEYNOV H.A. (Baku,
Azerbaijan)

d.en.s., prof. DEMIN V.A. (Moscow)

d.en.s., prof. KAWALEK A.A. (Czestochowa,
Poland)

PhD., Msc. KREHEL R. (Kapusany, Slovakia)

d.en.s., prof. KUKSENOVA L.I. (Moscow)

d.en.s., prof. LARIN S.N. (Tula)

d.en.s., Acad. RASLYSAK V.I. (Volgograd)

d.en.s., prof. MAKAROV V.F. (Perm)

d.en.s., prof. MALIKOV A.A. (Tula)

d.en.s., prof. MIKHAILOV A.N. (Donetsk)

d.en.s., MYSHKIN N.K. Acad. of NAS Belarus
(Gomel, Belarus)

d.en.s., prof. OVCHINNIKOV V.V. (Moscow)

d.en.s., prof. PETROVA L.G. (Moscow)

d.en.s., prof. SMOLENTSEV V.P. (Voronezh)

d.en.s., prof. FEDONIN O.N. (Bryansk)

d.en.s., prof. KHEIFETZ M.L. (Minsk, Belarus)

d.en.s., prof. TCHIGIR INSKY Ju.L. (Volgograd)

d.en.s., assoc. prof. SHOHYON A.N. (Kulob,
Tajikistan)

DOI:10.30987/issn.2223-4608

The magazine is distributed by subscription,
which can be issued through the online catalog
"Subscription Press".
Subscription index: **379195**.

Editorial office Ph: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.
E-mail: editntm@yandex.ru
<https://www.tu-bryansk.ru/info/zhurnaly>

**The journal is registered by the Federal
service for supervision of communications,
information technologies and mass
communications (Roskomnadzor)
26.04.2019 registration number
print publication № FS77-75524**

CONTENTS

ADDITIVE TECHNOLOGIES AND LASER PROCESSING

Ronzhin D.A., Misyurov A.I., Grigoryants A.G., Kholopov A.A., Taksants M.V.

The effect of direct laser growth patterns on the structure and properties
of titanium alloy VT6 3

TECHNOLOGIES OF MECHANICAL PROCESSING OF WORKPIECES

Mikhailov A.N., Anastasiev A.V. Revisiting technological parameters determination
of complex sculptured surfacing for GTE blades under smooth finish 12

Yakubov C.F., Pokintelitsa N.I., Bratan S.M., Chasovotona A.S. Modeling
of heat transfer operation within thermal friction cutting
for constructional steel workpieces. 19

TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

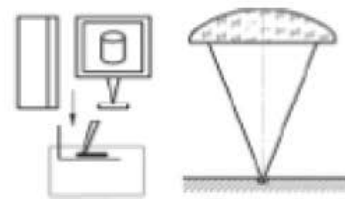
Prikhodko V.M., Sundukov S.K., Nigmatzyanov R.I., Fatyukhin D.S. Obtaining
fixed joints using ultrasonic vibrations 27

TECHNOLOGICAL SUPPORT OF OPERATIONAL PROPERTIES OF MACHINE PARTS AND THEIR CONNECTIONS

Fedonin O.N., Syanov S.Yu. Technological quality assurance of the surface
layer and operational properties of machine parts through
EDM process 38

The journal is included in the list of publications of the HAC approved for applicants of
academic degrees in scientific specialties: 2.5.3 - Friction and wear in machines;
2.5.5 - Technology and equipment of mechanical and physico-technical processing;
2.5.6 - Mechanical engineering technology; 2.5.7 - Technology and pressure treatment
machines; 2.5.8 - Welding, related processes and technologies; 2.6.17 - Materials
Science (by industry) (technical sciences).

**Reprint is possible only with the reference to the journal
«Science intensive technologies in mechanical engineering»**



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №10 (160). С.3-11.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №10 (160). P.3-11.

Научная статья

УДК 621.791.92/620.186.82

doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-11

Влияние стратегий прямого лазерного выращивания на структуру и свойства титанового сплава ВТ6

Дмитрий Александрович Ронжин¹, аспирант

Александр Иванович Мисюров², к.т.н.

Александр Григорьевич Григорьянц³, д.т.н.

Андрей Андреевич Холопов⁴, к.т.н.

Марина Вячеславовна Таксанц⁵, старший преподаватель

^{1, 2, 3, 4, 5}Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

¹kynavino@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5446-7261>

²misuyurov50@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³mt12@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁴holopiy@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6108-5023>

⁵marina270263@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Проблема использования и развития технологий ремонта в газотурбиностроении является актуальной в связи с постоянно растущим объемом производства и развитием газотурбинных двигателей. Процесс изготовления колеса-вентилятора включает штамповку с последующей механической обработкой. Восстановление лопастей колеса-вентилятора является многообещающей технологией, учитывая их большую стоимость при производстве, а также высокий риск повреждения и выхода из строя. Наиболее перспективной ремонтной технологией в авиационном двигателестроении является прямое лазерное выращивание. Применение низкокзатратной технологии ремонта деталей путем лазерной наплавки с обеспечением комплекса свойств, сопоставимых с традиционными методами изготовления деталей, является первоочередной задачей. В статье представлено комплексное исследование стратегий сканирования, полученных методом прямого лазерного выращивания с коаксиальной подачей порошка на подложке из поковки титанового сплава ВТ6. Показано, что стратегия сканирования существенно влияет на структуру наплавленного слоя. Структура влияет на механические свойства. Тепло накапливается с увеличением числа слоев. Материал прогревается и находится на этом уровне продолжительное время, что можно сравнить с термической обработкой. Происходит постепенное изменение микроструктуры от неравновесной с различным соотношением α/α' к равновесной с фазовым составом $\alpha + \beta$. Для всех образцов характерно формирование вытянутых столбчатых зерен первичной β -фазы. Многократные тепловые циклы приводят к укрупнению исходного β -зерна. Материалом, изучаемым в данной работе, является широко применяемый в авиационной промышленности титановый сплав ВТ6.

Ключевые слова: прямое лазерное выращивание, титановый сплав ВТ6, размер зерна, структура, механические свойства

Для цитирования: Ронжин Д.А., Мисюров А.И., Григорьянц А.Г., Холопов А.А., Таксанц М.В. Влияние стратегий прямого лазерного выращивания на структуру и свойства титанового сплава ВТ6 // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 10 (160). С. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-11

The effect of direct laser growth patterns on the structure and properties of titanium alloy VT6

Dmitry A. Ronzhin¹, PhD student

Alexander I. Misyurov², PhD. Eng.

Alexander G. Grigoryants³, D. Eng.

Andrey A. Kholopov⁴, PhD. Eng.

Marina V. Taksants⁵, Senior Lecturer

^{1, 2, 3, 4, 5} Moscow State Technical University named after Bauman, Moscow, Russia

¹kynavino@bk.ru

²misyurov50@yandex.ru

³mt12@bmstu.ru

⁴holopiy@yandex.ru

⁵marina270263@yandex.ru

Abstract. The problem of using and developing repair technologies in gas turbine engineering is relevant due to the constantly growing volume of production and the development of gas turbine engines. The manufacturing process of the fan wheel includes stamping followed by machining. The restoration of the fan wheel blades is a promising technology, owing to the high cost of blades in production, as well as the high risk of damage and failure. The most promising repair technology in the aviation engine industry is direct laser growth. The use of low-cost technology for repairing parts by laser clad with the suitable property package compatible with traditional methods of parts production is a priority task. The article presents a comprehensive study of scanning strategies obtained by direct laser growth with coaxial powder feeding on a support plate made of titanium alloy VT6. It is shown that the scanning strategy significantly affects the structure of the pad. The structure affects the mechanical properties. Heat accumulates with an increase in the number of layers. The material warms up and stays at this level for a long time, which can be compared to heat treatment. There is a gradual change in the microstructure from a nonequilibrium one with a different ratio α/α' to an equilibrium one with a phase composition $\alpha + \beta$. All samples are characterized by the formation of elongated columnar grains of the primary β -phase. Multiple thermal cycles lead to the enlargement of the initial β -grain. The data for study in this work is the titanium alloy VT6, which is widely used in the aviation industry.

Keywords: direct laser growth, titanium alloy VT6, grain size, structure, mechanical properties

For citation: Ronzhin D.A., Misyurov A.I., Grigoryants A.G., Kholopov A.A., Taksants M.V. The effect of direct laser growth patterns on the structure and properties of titanium alloy VT6 / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 10 (160). P. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-11

Введение

При эксплуатации ГТД наблюдаются разрушения лопаток колеса вентилятора первой и второй ступеней газогенератора. В связи с тем, что колесо вентилятора является монолитным узлом, то разрушение одной лопатки приводит к необходимости замены всего узла. Современные лазерные технологии позволяют восстановить разрушенную часть лопатки непосредственно на монолитном узле. Известно использование для этих целей технологических процессов таких как сварка трением [1] и электронно-лучевая сварка [2] которые не всегда способны обеспечить работоспособность узла и обладают высокой трудоемкостью. Для этих целей возможно использование технологии прямого лазерного выращивания [3, 4]. Получение изделия из титановых сплавов сопряжено с определенными трудностями, связанными с технологическими особенностями процесса. Данными вопросами занимались российские и зарубежные авторы.

В частности, в работе [4] предлагается технология восстановления лопаток из титанового сплава ВТ8. Данная технология позволяет ремонтировать сколы и забоины по кромке пера лопатки. Однако часто возникают дефекты в центральной части лопатки. Ремонт по разработанной технологии становится проблематичным.

Известно, что накопление тепла приводит к изменению условий кристаллизации ванны расплава при восстановительной лазерной наплавке. Последовательное нанесение формообразующих валиков, циклический нагрев и быстрое охлаждение во время лазерной наплавки создают уникальные особенности микроструктуры и механические свойства. Таким образом служебные свойства детали, выращенной методом ПЛВ, в существенной мере зависят от тепловой обстановки, которой можно управлять изменением стратегии выращивания.

Для достижения этой цели были решены следующие задачи: произведена

лазерная наплавка образцов с разной стратегией выращивания; произведены механические испытания образцов на растяжение и определение предела выносливости; выявлена структура механические свойства которой подходят для продления ресурса работы лопаток ГТД.

Материалы и методы

Образцы были выращены в МГТУ им. Н.Э. Баумана на универсальном комплексе прямого лазерного выращивания КЛП-400. В качестве источника излучения использован волоконный лазер мощностью 3 кВт с длиной волны излучения 1,07 мкм [5]. Режимы лазерной наплавки выбраны исходя из предыдущих исследований [6]. Мощность и скорость не изменялись, 600 Вт и 800 м/мин. Как известно, титан и его сплавы активно взаимодействуют с кислородом, азотом и другими газами в атмосфере при температуре свыше 350 °С. Это значительно снижает эксплуатационные качества производимых изделий, такие

как пластичность, прочность и усталость. Поэтому процесс выращивания осуществляли в герметичной камере в среде инертного газа.

Предел выносливости определяли на образцах прямоугольной формы: толщиной 3 мм, шириной 40 мм и высотой 60 мм с разной стратегией движения наплавочной головки относительно образца: однонаправленной (вдоль образца); двунаправленной (вдоль и поперек образца); в четырех направлениях (вдоль, поперек, под углом 45° и -45°). Каждый слой был получен из перекрывающихся дорожек, которые соответствовали форме исходного образца. Перекрывание между соседними дорожками составляло 50 %. После подъема по оси Z, наплавка смещалась на $\pm \frac{1}{2}\Delta Y$.

После лазерной наплавки образцы прошли термообработку для снятия остаточных напряжений в цилиндрической печи при температуре $650^\circ \pm 10^\circ \text{C}$ и низком вакууме (5×10^{-5} Мбар), время нагрева 120 мин, выдержка на режиме 120 мин, охлаждение в среде аргона [6]. Исследования проводили применительно к титановому сплаву ВТ6.

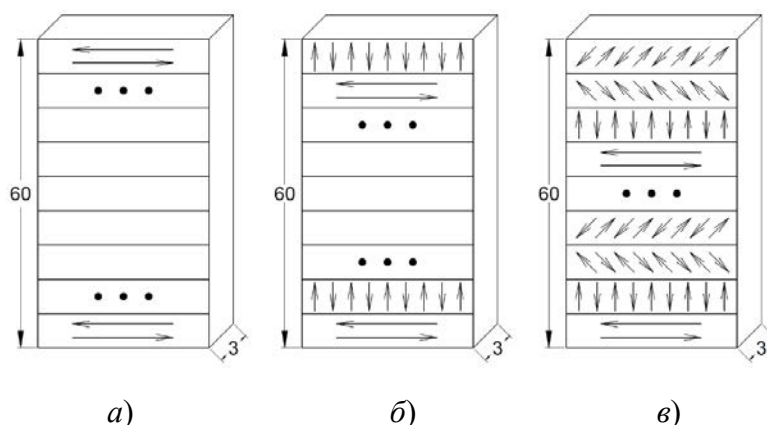


Рис. 1. Типы стратегий выращивания:

a – в одном направлении; *b* – вдоль и поперек образца; *c* – вдоль, поперек, под углом 45° и -45°

Fig. 1. Types of growth strategies:

a – in one direction; *b* – along and across the sample; *c* – along, across, angle-wise 45° and -45°

Для полученных образцов была исследована структура, а также измерен размер зерна. Для определения типов микроструктуры и изменения размера зерен использовали сканирующий электронный микроскоп Quanta 650 (FEI США).

Результаты и обсуждение

Предлагаемая технология ремонта рабочего колеса компрессора низкого давления заключается в удалении части пера лопатки с

дефектом и последующем восстановлении удаленной части методом прямого лазерного выращивания. Характерной особенностью титановых сплавов является наличие полиморфного превращения, приводящего к значительным изменениям структуры в зоне термического влияния (ЗТВ) и литом металле восстановленной части лопатки. На металлографических шлифах видны несколько участков, принципиально отличающихся друг от друга по структуре и фазовому составу (рис. 2, *a*). Из

них можно выделить участок основного металла, не претерпевшего термического воздействия (рис. 2, б); зону термического влияния, примыкающую к линии сплавления (рис. 2, в, г); участок литого металла,

образующийся при переплаве присадки (рис. 2, д, е). В нем имеются явно выраженные зоны повторного нагрева металла предыдущих валиков при укладке последующего.

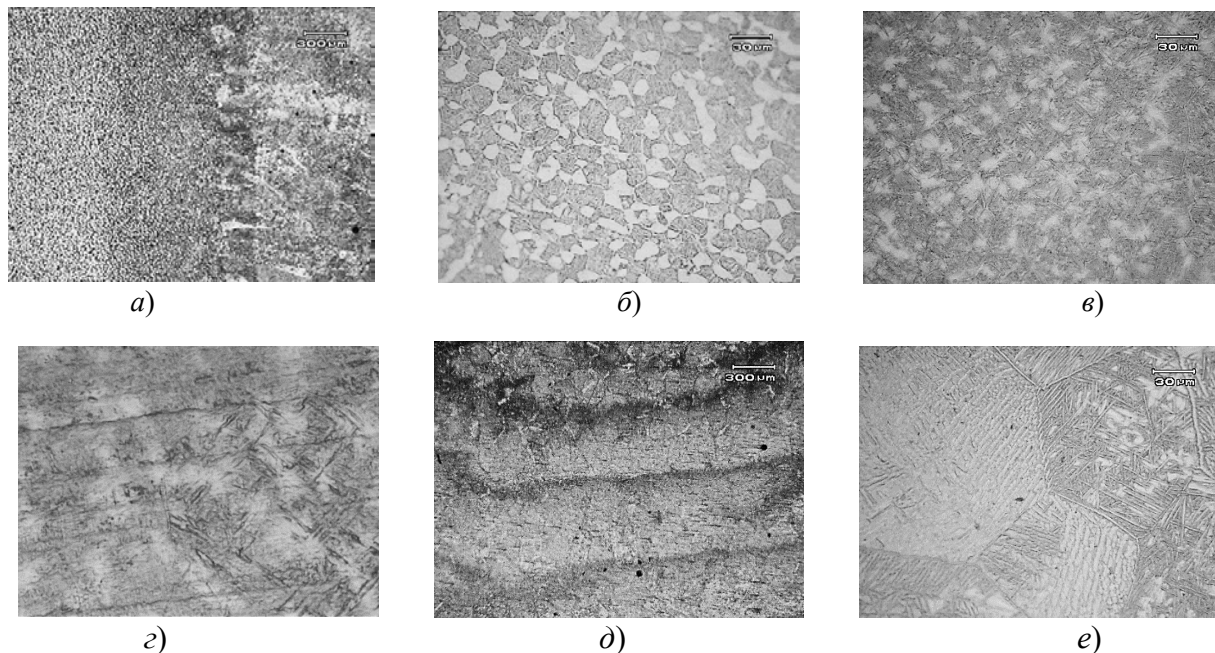


Рис. 2. Структура участка, переходной зоны от ковального к литому металлу:

a – внешний вид переходной зоны ($\times 150$); *б* – металл поковки ($\times 1000$); *в* – начало растворения α -фазы ($\times 1000$); *г* – участок, прилегающий к линии сплавления ($\times 1000$); *д* – литой металл ($\times 150$); *е* – зоны повторного нагрева в наплавленном металле ($\times 1000$)

Fig. 2. Structure of the area, a transition zone from forged to cast metal:

a – appearance of the transition zone ($\times 150$); *b* – press forging metal ($\times 1000$); *c* – the beginning of the α -phase ($\times 1000$); *d* – the area close to the fusion line ($\times 1000$); *e* – cast metal ($\times 150$); *f* – reheating zones in the added metal ($\times 1000$)

В зоне наплавленного металла, металл нагревается до температуры плавления и определенное время находится в жидком состоянии. После кристаллизации формируется характерная литая структура, имеющая фазовую неоднородность в зонах повторного нагрева (см. рис. 2, д). В этот период происходит насыщение металла газами, рост зерна, развивается физическая, химическая и структурная неоднородность, изменяется фазовый состав, образуются метастабильные фазы и т. д. В структуре этой зоны наблюдаются равноосные или вытянутые поперек линии сплавления β -зерна, имеющие окантовку в виде α -фазы и крупнопластинчатое внутризеренное строение (см. рис. 2, е). Это значительно изменяет свойства в сравнении с металлом основы.

Кинетика фазовых превращений в ВТ6 сильно зависят от предшествующего теплового воздействия и скоростей охлаждения в процессе изготовления [7]. В случае полного плавления и затвердевания металл претерпевает различные этапы фазового

превращения в следующей последовательности: $\alpha + \beta \rightarrow \beta \rightarrow \text{жидкость} \rightarrow \beta \rightarrow \alpha + \beta/\alpha'$. При закалке из жидкой фазы α' -мартенсит образуется в определенном диапазоне скоростей охлаждения [8]. Если скорость охлаждения превышает $410^\circ\text{C}/\text{с}$, будет происходить неравновесное превращение из β -фазы в мартенситную α' -фазу. Охлаждение со скоростями в интервале между $410^\circ\text{C}/\text{с}$ и $20^\circ\text{C}/\text{с}$ приведет к неполному превращению в α' -фазу, при охлаждении со скоростью менее $10^\circ\text{C}/\text{с}$ формируется равновесный фазовый состав $\alpha + \beta$ [8, 9].

Рост β -зерен в двухфазных титановых сплавах происходит в направлении роста образца [9, 10]. Наблюдается прорастание β -зерен через наплавленные слои. Это связывают с тем, что частично расплавленные зерна предыдущего слоя служит центрами кристаллизации при затвердевании последующего [11, 12]. Новые зерна, сформировавшиеся от этих центров кристаллизации, растут в сторону максимального теплоотвода. Процесс продолжается пока не снизится потеря

тепла через подложку, после чего изменяется механизм кристаллизации. Такое формирование структуры является основной причиной анизотропии свойств в образцах.

В зависимости от скорости охлаждения в твердожидком состоянии, в литом металле могут образовываться либо равноосные, либо удлинённые столбчатые зерна, а также комбинация обоих. Более высокие скорости охлаждения приводят к более мелкой макроструктуре. При уменьшении скорости затвердевания происходит измельчение зерен и переход их формы от столбчатой к равноосной. Зоной, определяющей свариваемость и свойства титановых сплавов, является зона термического влияния (ЗТВ) [13]. Ее протяженность и структура зависят от термического цикла наплавки, основными параметрами которого являются скорость нагрева ω_n , в интервале фазовых превращений, максимальная температура нагрева $T_{\max}$, время пребывания выше температуры полиморфного превращения и скорость охлаждения $\omega_{\text{охл}}$ в интервале превращений. При проведении восстановительной наплавки следует учитывать, что $T_{\max}$ и $\omega_{\text{охл}}$ оказывают преобладающее влияние на конечную структуру и свойства нагретого металла. Наиболее резкие изменения происходят на участке, непосредственно прилегающем к литому металлу, поэтому работоспособность восстановленной лопатки во многом определяется свойствами этой зоны.

В сплавах типа ВТ6 в зоне термического влияния $\beta \rightarrow \alpha'$ – превращение происходит при сравнительно низких температурах. Если металл нагревается до температур выше, чем температура начала β -превращения, первичные зерна α почти полностью растворяются, тогда как первичные β зерна немного увеличиваются. Если максимальная температура нагрева ниже температуры начала β -превращения, то структура в этой зоне будет состоять из комбинации α и β фаз. Морфология выделения α' -фазы зависит от максимальной температуры нагрева. Если она существенно ниже температуры начала β -превращения, то толщина пластин в матрице ($\alpha + \beta$) может слегка увеличиться, в то время как средний размер первичных α зерен остается постоянным. При максимальной температуре нагрева несколько ниже температуры начала β -превращения пластинчатая структура матрицы ($\alpha + \beta$) может трансформироваться в столбчатую структуру с более тонкими α пластинками.

Как правило, структура у линии сплавления представляет собой смесь остаточной β -фазы и мартенситной игольчатой α' -фазы (или α'' -фазы), количество которой с увеличением скорости охлаждения возрастает. Мартенситная α' фаза является неравновесной с

деформированной кристаллической решёткой и высокой плотностью дислокаций [14], что приводит к упрочнению матрицы [15]. Механические свойства в значительной степени зависят от остаточных напряжений и микроструктуры, включая фазовый состав, размеры зерен, текстуру первичных β -зерен, а также наличие дефектов. Результаты исследований [13, 16, 17] показывают, что металл со структурой, содержащей α' -фазу имеет прочность выше, а пластичность ниже, чем металл с равновесной $\alpha + \beta$ – структурой.

При назначении режимов лазерной восстановительной наплавки следует обратить внимание на то, что у двухфазных титановых сплавов снижение пластичности наблюдается как при охлаждении с большими скоростями из-за образования мартенситных структур, так и при замедленном охлаждении из-за развития процессов β – хрупкости [13]. Показано, что существует довольно узкий диапазон скоростей охлаждения литого металла и ЗТВ, обеспечивающих удовлетворительное сочетание их свойств [18], поэтому для повышения пластичности желательно проводить термообработку после изготовления детали. Расширить диапазон режимов, обеспечивающих равнопрочность участков восстановленной лопатки, можно также изменением состава присадочного порошка. Так, для сварки изделий из сплава ВТ6 рекомендовано использование присадочного металла состава ВТ6С [17].

Для проведения восстановительной наплавки были использованы различные стратегии, обеспечивающие формирование различных температурных полей и полей остаточных напряжений. Движение наплавочной головы осуществлялась: в одном направлении вдоль образца; вдоль и поперек образца; вдоль, поперек, под углом 45° и -45° (рис. 1).

Изменение стратегии выращивания, а следовательно, и схемы введения тепла, от первого к третьему приводит к увеличению времени пребывания металла в высокотемпературной зоне. Наряду с этим постоянное введение тепла при выращивании пера лопатки и низкая теплопроводность ВТ6 (около $7 \text{ Вт/м}^\circ\text{К}$) [19] создают условия для его накопления и возрастания температуры металла с увеличением числа слоев. Это создает условия для укрупнения исходного размера зерна β -фазы и снижению скорости охлаждения при температурах полиморфного превращения в зонах повторного нагрева.

Для литого металла образцов, выращенных по любой из исследованных стратегий, характерно формирование вытянутых столбчатых зерен первичной β -фазы (рис. 3). Зерна прорастают через границы слоев в направлении нанесения валиков. Внутри зерен формируются колонии

α -пластин. В образцах с разными стратегиями выращивания происходит изменение размера зерен и границ слоев. Размер зерна увеличивается с увеличением количества направлений наплавки (третья стратегия). Необходимо отметить, что в

случае использования первой стратегии ось β зерна прорастает преимущественно вверх, в то время как для других стратегий наблюдается разориентировка зерен относительно ванны расплава, т. е. относительно границ слоев.

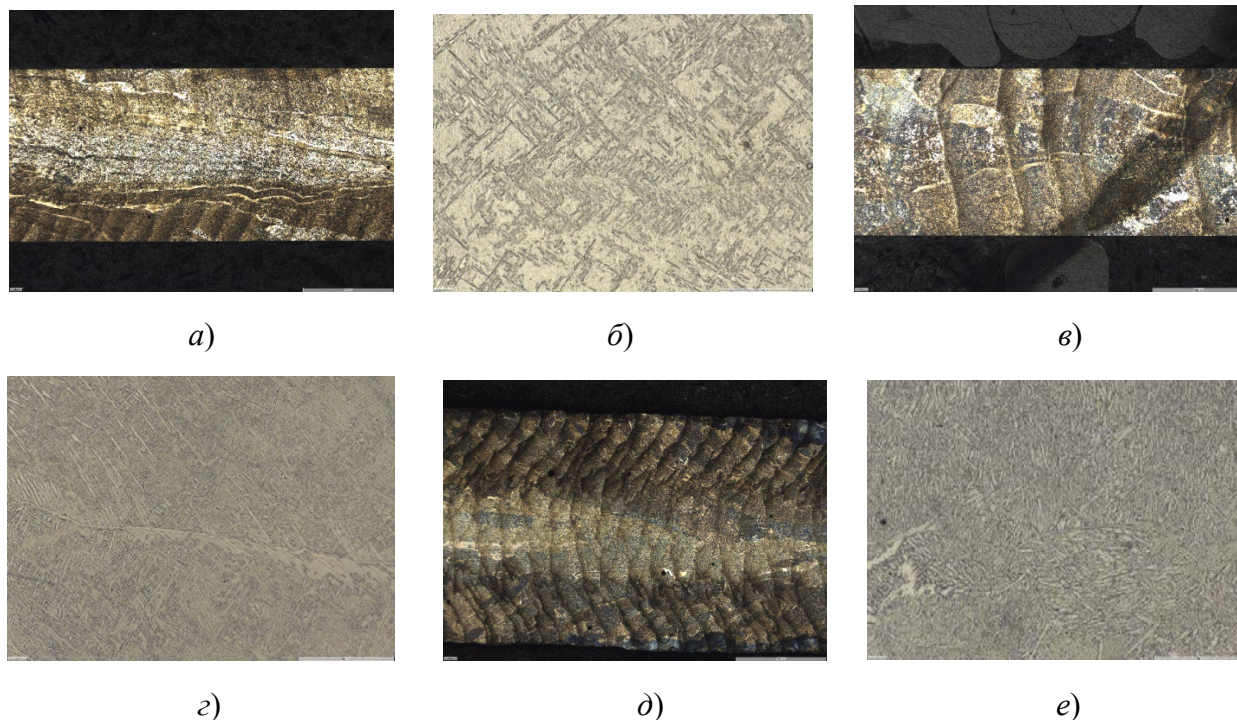


Рис. 3. Структура литого металла, полученного с разной стратегией выращивания:

a, б – в одном направлении 1500 мкм ($\times 25$) и 80 мкм ($\times 500$); *в, г* – в двух направлениях 1500 мкм ($\times 25$) и 80 мкм ($\times 500$); *д, е* – в четырех направлениях 1500 мкм ($\times 25$) и 80 мкм ($\times 500$)

Fig. 3. The structure of cast metal obtained with different growing strategies:

a, b – in one direction 1500 microns ($\times 25$) and 80 microns ($\times 500$); *c, d* – in two directions 1500 microns ($\times 25$) and 80 microns ($\times 500$); *e, f* – in four directions 1500 microns ($\times 25$) and 80 microns ($\times 500$)

Для первой стратегии характерны очень узкие вытянутые в высоту зерна с незначительным отклонением оси зерна в сторону боковых стенок образца. Это можно связать с направлением максимального теплоотвода и высокими скоростями кристаллизации в условиях повышенного термоконцентрационного переохлаждения. Высокие скорости охлаждения обуславливают возможность возникновения хрупкой игольчатой α' -фазы при $\beta \rightarrow \alpha'$ – превращении.

Увеличение тепловложения при проведении процесса выращивания по второй стратегии повышает время нахождения металла при высоких температурах в условиях изменившегося направления теплоотвода, что способствует формированию равноосных зерен и некоторому увеличению их размера (см. рис. 3, *г*). Уменьшение скорости

охлаждения приводит к более полному протеканию полиморфного превращения, снижению количества α' -фазы, росту пластин α -фазы и изменению их взаимного расположения. Эти два обстоятельства должны привести к повышению пластичности наплавленного металла.

В образцах, полученных с использованием третьей стратегии, происходит чередование направления движения фронта кристаллизации от слоя к слою, связанное с изменением направления движения наплавочной головы. Направление роста зерна смещается преимущественно в сторону боковых стенок. Увеличенное тепловложение снижает скорость охлаждения и увеличивает время пребывания при высоких температурах. Возникают длинные и широкие столбчатые β -зерна, содержащие пластинчатую α -фазу (см. рис. 3 *д, е*). Несмотря на уменьшение α' -фазы в результате частичного

перехода $\alpha' \rightarrow \alpha + \beta$, пластичность может снижаться из-за развития процессов β -хрупкости.

Повторный нагрев металла предыдущих валиков последующими может приводить к возникновению неравномерности механических свойств по длине восстановленного пера лопатки. В этом случае высокотемпературный нагрев создает условия для изменения

фазового состава зоны повторного нагрева и повышению пластичности этого объема металла за счет получения более равновесных структур $\alpha' \rightarrow \alpha + \beta$. Фрагмент структуры литого металла части лопатки, выращенной по второй стратегии показан на рис. 4. В зонах перекрытия отдельных валиков четко видны участки снижения микротвердости.

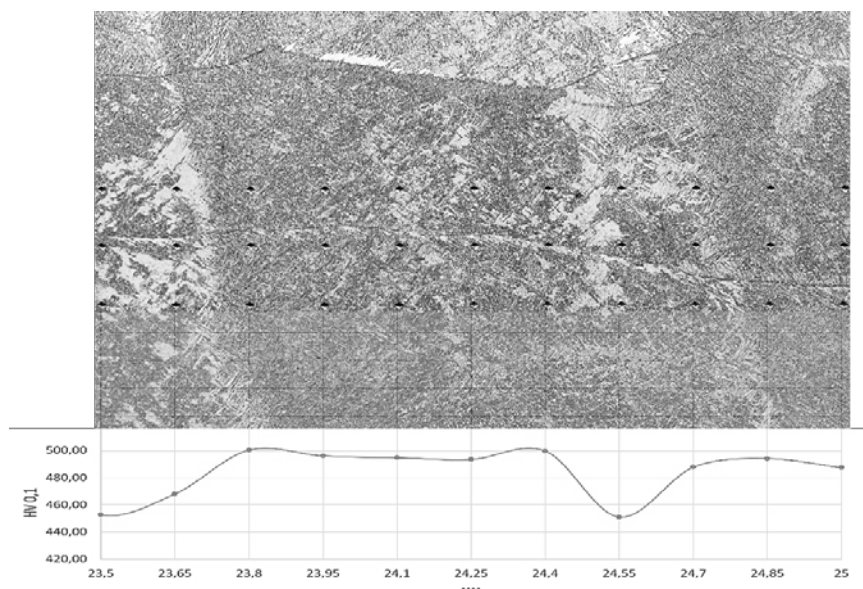


Рис. 4. Изменение микротвердости на участке восстановленной части лопатки в зонах перекрытия наплавленных слоев

Fig. 4. Change in microhardness in the area of the restored part of the blade in the overlap zones of pad welds

Таким образом, стратегия выращивания оказывает заметное влияние на фазовый состав и форму фазовых выделений. При переходе от первой стратегии выращивания к третьей, с уменьшением скорости охлаждения и периодической сменой направления роста первичных кристаллитов, происходит постепенное изменение микроструктуры от неравновесной с фазовым сотовым $\alpha + \beta + \alpha'$ и различным соотношением α / α' к равновесной с фазовым составом $\alpha + \beta$. При этом мартенситные иглы уменьшаются в длину и увеличиваются в ширину. Можно предположить, что литой металл восстановленной части лопатки, выращенный по второй стратегии, будет иметь наибольшую пластичность. Так, в восстановленной части лопатки, полученной по третьей стратегии, наблюдались хрупкие разрушения в твердом состоянии. Их возникновение можно связать со снижением деформационной способности литого металла в неравновесном состоянии и возникновением трехосного напряженного состояния при преимущественном направлении получения единичного валика в поперечном,

относительно плоскости пера лопатки, направлении. Следует иметь ввиду, что увеличение длительности пребывания металла при повышенных температурах, в случае нарушения защиты от окружающей атмосферы может привести к повышенному газонасыщению и снижению технологической и хрупкой прочности.

Зона термического влияния, у границы раздела поковка-наплавка, может иметь протяженность 0,8...1,6 мм в зависимости от степени термического воздействия. Ее свойства во многом определяют работоспособность лопатки в условиях циклических нагружений. Микроструктура ЗТВ имеет мелко-пластинчатое внутризеренное строение на фоне глобулярных выделений α -фазы. В зоне термического влияния на участке, примыкающем к поковке, наблюдается частичное растворение α -пластин, что может способствовать повышению пластичности.

Результаты статических испытаний на растяжение показали увеличенные значения предела прочности и сниженные значения пластичности, для образцов со структурой,

изготовленных по первой стратегии. Наилучшие значения показал металл, полученный по второй стратегии. В этом случае значения предела прочности и относительного удлинения сопоставимы со свойствами материала поковки из титанового сплава ВТ6.

Оценка усталостной прочности выявила влияние стратегии выращивания на предел выносливости. Его значения для лопатки, выращенной по второй стратегии, имели наибольший показатель и составили 31 кгс/мм² при $N = 2 \times 10^7$ циклов, по сравнению с вариантом выращивания по первой стратегии, обеспечивающей 28 кгс/мм² при тех же условиях испытаний. Структура полученного металла имеет достаточно высокую пластичность. Характер излома образцов после испытаний свидетельствует о развитии вязкого внутризеренного разрушения по ямочному механизму.

Выводы:

1. Стратегия выращивания оказывает существенное влияние на фазовый состав, форму фазовых выделений и свойства детали. Наилучшие результаты получены при нанесении формообразующих слоев последовательно в продольном и поперечном направлениях относительно восстанавливаемой части лопатки;

2. Во время лазерной наплавки титанового сплава ВТ6 необходимо контролировать скорость охлаждения наплавленного слоя. Режимы наплавки, обеспечивающие высокие скорости охлаждения, вызывают повышение содержания хрупкой неравновесной α' -фазы. При замедленном охлаждении в условиях многократных тепловых циклов наблюдается значительное увеличение размера исходного β -зерна в направлении роста, а также развитие β -хрупкости. В обоих случаях снижается пластичность наплавленного металла;

3. Рекомендуемая стратегия выращивания обеспечивает необходимые скорости охлаждения и повышение пластических свойств, за счет формирования равноосных исходных β -зерен, более полного протекания процесса полиморфного превращения, обеспечивающего распад хрупкой неравновесной α' -фазы, увеличения за счет этого количества пластичных составляющих $\alpha + \beta$, изменения формы фазовых выделений и их взаимного расположения;

4. Структура металла, полученная при восстановительной наплавке по рекомендуемой технологии, обеспечивает предел прочности и относительное удлинение сопоставимые со свойствами материала поковки из титанового сплава ВТ6. Значения показателя

усталостной прочности сопоставимы с усталостной прочностью поковки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пат. 6219916 США, МПК7 В 23 Р 15/00. Метод линейной сварки трением и производство данным методом / Волкер Г. Л.; заявитель и патентообладатель Юнайтед Технолоджи, корп.; № 08/994769; заявл. 19.12.1997; опублик. 24.04.2001. 14 с.

2. Пат. 1771161 СССР, МПК6 В 23 Р 6/04. Способ ремонта деталей / Пузанов С.Г. [и др.]; заявитель и патентообладатель НИИД.; № 4871169/27; заявл. 04.10.1990; опублик. 15.01.1994, Бюл. № 01. 4 с.

3. Лазерные аддитивные технологии в машиностроении: учебное пособие \ [А.Г. Григорьянц, и др.]; под ред. А.Г. Григорьянца. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 278 с.

4. Горун А. И. Восстановление титановых лопаток компрессора авиационного газотурбинного двигателя методом лазерной наплавки // Металлург. 2017. № 6. С. 80–85.

5. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Оборудование для лазерной обработки / под ред. А.Г. Григорьянца. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022 г. 285 с.

6. Ronzhin D.A., Grigoryants A.G., Kholopov A.A. Effect of Operational Parameters on Metal Structure in Products Manufactured by Direct Laser Deposition from VT6 Titanium Powder. BMSTU Journal of Mechanical Engineering, 2022, no. 9, pp. 30–42, doi: 10.18698/0536-1044-2022-9-30-42

7. Dipankar Banerjee, Williams J.C. Perspectives on Titanium Science and Technology // Acta Materialia. 2013. Vol. 61. P. 844–879.

8. Antonino Ducato, Livan Fratini, Marco La Cascia, Giuseppe Mazzola. An Automated Visual Inspection System for the Classification of the Phases of Ti-6Al-4V Titanium Alloy // International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns CAIP 2013: Computer Analysis of Images and Patterns. P. 362–369.

9. Dabrowski R. The Kinetics of Phase Transformations During Continuous Cooling of the Ti6Al4V Alloy from the Single-Phase β / R. Dabrowski // Range Archives of Metallurgy and Materials. 2011. Vol. 56. P. 703–707.

10. Carroll B.E., Palmer T.A., Beese A.M. Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing // Acta Materialia. 2015. Vol. 87. P. 309–320.

11. Srikanth Bontha, Nathan W. Klingbeil, Pamela A. Kobryn, Hamish L. Fraser. Effects of process variables and size-scale on solidification microstructure in beam-based fabrication of bulky 3D structures // Materials Science and Engineering A. 2009. Vol. 513-514. P. 311–318.

12. Kyung-Min Hong, Yung C. Shin. Analysis of microstructure and mechanical properties change in laser welding of Ti-6Al-4V with a multiphysics prediction model // Journal of Materials Processing Technology. 2016. Vol. 237. P. 420–429.

13. Титановые сплавы в машиностроении Л.: «Машиностроение», 1977. 248 с.

14. Jingjing Yang, Hanchen Yu, Jie Yin, Ming Gao, Zemin Wang, Xiaoyan Zeng. Formation and control of martensite in Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting // Materials and Design. 2016. Vol. 108. P. 308–318.

15. Shun Guo, Qingkun Meng, Guangyue Liao, Liang Hu, Xinqing Zhaon. Microstructural evolution and mechanical behavior of metastable β -type Ti-25Nb-2Mo-4Sn alloy with high strength and low modulus // Progress in Natural Science: Materials International 2013. Val. 23(2).P. 174–182.

16. Galarraga H., Warren R.J., Lados D.A., Dehoff R.R., Kirka M.M., Nandwana P. Nandwana. Effects of heat treatments on microstructure and properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM) // Materials Science and Engineering: A. 2017. Vol. 685. P. 417–428.

17. Сварные соединения титановых сплавов / В. Н. Моисеев, Ф. Р. Куликов, Ю. Г. Кириллов. М.: Металлургия, 1979. 248 с.

18. Шоршоров М.Х. Металловедение сварки стали и сплавов титана. М.: Наука, 1965.

19. Titanium. 2nd ed. / G Luetjering, J.C. Williams New York: Springer; 2007. 442.

REFERENCES

1. Pat. 6219916 USA, IPC7 B 23 P 15/00. The method of linear friction welding and production by this method / Volker G. L.; applicant and patent holder of United Technology Corp.; No. 08/994769; applied for 12/19/1997; publ. 04/24/2001, 14 p.

2. Pat. 1771161 USSR, MPK6 B 23 P 6/04. A method for repairing parts / Puzanov S.G. [et al.]; applicant and patent holder of the NIID.; No. 4871169/27; applied for 10/04/1997; publ. 01/15/1997, cert. no. 01, 4 p.

3. Laser additive technologies in mechanical engineering: a textbook by A.G. Grigoriyants, et al.; edited by A.G. Grigoryants. Moscow: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University, 2018, 278 p.

4. Goryunov A. I. Restoration of titanium compressor blades of an aviation gas turbine engine by laser surfacing // Metallurg, 2017, no. 6, pp. 80–85.

5. Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. Equipment for LBM / ed. by A.G. Grigoryants. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2022, 285 p.

6. Ronzhin D.A., Grigoryants A.G., Kholopov A.A. Effect of Operational Parameters on Metal Structure in Products Manufactured by Direct Laser Deposition from VT6 Titanium Powder. BMSTU Journal of Mechanical Engineering, 2022, no. 9, pp. 30–42, doi: 10.18698/0536-1044-2022-9-30-42

7. Dipankar Banerjee, Williams J.C. Perspectives on Titanium Science and Technology // Acta Materialia. 2013. Vol. 61. P. 844–879.

8. Antonino Ducato, Livan Fratini, Marco La Cascia, Giuseppe Mazzola. An Automated Visual Inspection System for the Classification of the Phases of Ti-6Al-4V Titanium Alloy // International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns CAIP 2013: Computer Analysis of Images and Patterns. P. 362–369.

9. Dabrowski R. The Kinetics of Phase Transformations During Continuous Cooling of the Ti6Al4V Alloy from the Single-Phase β / R. Dabrowski // Range Archives of Metallurgy and Materials. 2011. Vol. 56. P. 703–707.

10. Carroll B.E., Palmer T.A., Beese A.M. Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing // Acta Materialia. 2015. Vol. 87. P. 309–320.

11. Srikanth Bontha, Nathan W. Klingbeil, Pamela A. Kobryn, Hamish L. Fraser. Effects of process variables and size-scale on solidification microstructure in beam-based fabrication of bulky 3D structures // Materials Science and Engineering A. 2009. Vol. 513-514. P. 311–318.

12. Kyung-Min Hong, Yung C. Shin. Analysis of microstructure and mechanical properties change in laser welding of Ti-6Al-4V with a multiphysics prediction model // Journal of Materials Processing Technology. 2016. Vol. 237. P. 420–429.

13. Titanium alloys in mechanical engineering Leningrad, «Mashinostroenie», 1977, 248 p.

14. Jingjing Yang, Hanchen Yu, Jie Yin, Ming Gao, Zemin Wang, Xiaoyan Zeng. Formation and control of martensite in Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting // Materials and Design. 2016. Vol. 108. P. 308–318.

15. Shun Guo, Qingkun Meng, Guangyue Liao, Liang Hu, Xinqing Zhaon. Microstructural evolution and mechanical behavior of metastable β -type Ti-25Nb-2Mo-4Sn alloy with high strength and low modulus // Progress in Natural Science: Materials International 2013. Val. 23(2). P.174–182.

16. Galarraga H., Warren R.J., Lados D.A., Dehoff R.R., Kirka M.M., Nandwana P. Nandwana. Effects of heat treatments on microstructure and properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM) // Materials Science and Engineering: A. 2017. Vol. 685. P. 417–428.

17. Welded joints of titanium alloys / V. N. Moiseev, F. R. Kulikov, Yu. G. Kirillov. Moscow: Metallurgiya, 1979, 248 p.

18. Shorshorov M.H. Metallurgical science of steel and titanium alloys welding. Moscow: Nauka, 1965.

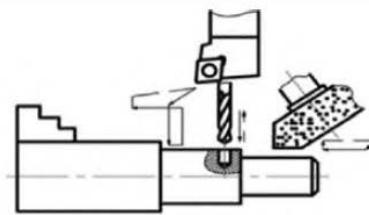
19. Titanium. 2nd ed. / G Luetjering, J.C. Williams New York: Springer; 2007. 442

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 11.04.2024; одобрена после рецензирования 18.04.2024; принята к публикации 05.06.2023.

The article was submitted 11.04.2024; approved after reviewing 18.04.2024; assepted for publication 05.06.2023.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №10 (160). С.12-18.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №10 (160). P.12-18.

Научная статья

УДК 621

doi: 10.30987/2223-4608-2024-12-18

К вопросу определения технологических параметров обработки сложных пространственных поверхностей лопаток ГТД при полировании

Александр Николаевич Михайлов¹, д.т.н.

Александр Владимирович Анастасьев², аспирант

^{1, 2} Донецкий национальный технический университет, Донецк, ДНР, Россия

¹ mntk21@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² anastasyev.av@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Полирование является завершающим этапом отделочной обработки лопаток турбин газотурбинного двигателя. Лопатки характеризуются сложной пространственной формой пера, к которому выдвигаются жесткие требования к шероховатости поверхностного слоя. Отклонение геометрических форм, размеров и параметров качества поверхности профиля пера лопатки от расчетных ухудшает рабочие характеристики двигателя, приводит к потере мощности, уменьшению КПД и снижению экономичности двигателя и его надежности, особенно под действием переменных нагрузок, вызванных изменениями в режиме работы, такими как взлет, посадка и т.д. Вследствие этого становится важным определить точные технологические параметры, такие как усилие прижима, используемое при полировании, чтобы добиться минимальных отклонений в процессе обработки. Представлены результаты экспериментального исследования изменения пятна контакта при полировании образца упрощенной модели лопатки ГТД в зависимости от величины усилия прижима и материала полировальника. Детально описана методика проведения эксперимента, используемое оборудование и оснастка, а также технологические режимы обработки. Приведены теоретические сведения о схеме обработки и теоретической величине пятна контакта для рассматриваемых усилий при обработке кругами из различных материалов. Приведены результаты экспериментального исследования, установлена взаимосвязь между изменением усилия прижима и шириной пятна контакта, и построена номограмма взаимосвязи теоретического и экспериментального значения полуширины пятна контакта при полировании, подтверждающие возможность применения контактной задачи Герца при определении пятна контакта полировального круга. Даны рекомендации по применению полученных данных при проектировании технологического процесса отделочной обработки сложных пространственных поверхностей лопаток ГТД за счет применения теоретических и экспериментальных методов расчета пятна контакта. Предложенные подходы могут быть использованы в производстве для повышения качества и долговечности деталей лопаточного аппарата газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: полирование, лопатка турбины, профиль, пятно контакта, усилие прижима

Для цитирования: Михайлов А.Н., Анастасьев А.В. К вопросу определения технологических параметров обработки сложных пространственных поверхностей лопаток ГТД при полировании// Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 10 (160). С. 12–18. doi: 10.30987/2223-4608-2024-12-18

Revisiting technological parameters determination of complex sculptured surfacing for GTE blades under smooth finish

Alexander N. Mikhailov¹, D. Eng.

Alexander V. Anastasiev², PhD student

^{1, 2} Donetsk National Technical University, Donetsk, DPR, Russia

¹ mntk21@mail.ru

² anastasyev.av@yandex.ru

Abstract. Smooth finish is the final stage of finish-machining of a gas turbine engine blades. The blades are characterized by a complex spatial outline of a feather, which has strict requirements for surface roughness. Deviation of geometric shapes, sizes and quality parameters of the blade feather airfoil from the calculated ones worsens the engine's performance characteristics, leads to the loss of power, reduces efficiency and engine reliability, especially under the influence of variable loads caused by changes in operating mode, such as takeoff, landing and etc. As a result, it assumes importance of determining exact technological parameters, such as the clamping force when finishing, in order to achieve minimal deviations in the finish-machining. The results of an experimental study of the change in the contact spot under smooth finish of a simplified model of a GTE blade, depending on the magnitude of the clamping force and the material of the polishing instrument, are presented. The routine of the experiment, the equipment and instrumentation used within the study, as well as the technological modes are described in detail. Theoretical information is provided on the machining pattern and the theoretical value of the contact spot for the forces under consideration using circular discs made of various materials. The results of an experimental study are presented, the relationship between the change in the clamping force and the width of the contact spot is found, and a nomogram of the relationship between the theoretical and experimental values of the half-width of the contact spot under smooth finish is constructed, confirming the possibility of using the Hertz contact problem in determining the contact spot of the polishing wheel. The reference is provided for the application of the obtained data in the design of the technological process of finishing complex sculptured surfaces of the blades of the GTE due to the application of theoretical and experimental methods for calculating the contact spot. The proposed approaches can be used in production to improve the quality and durability of the parts of gas turbine engine blades.

Keywords: smooth finish, turbine blade, blade airfoil, contact spot, clamping force

For citation: Mikhailov A.N, Anastasiev A.V. Revisiting technological parameters determination of complex sculptured surfacing for GTE blades under smooth finish / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 10 (160). P. 12–18. doi: 10.30987/2223-4608-2024-12-18

Введение

В настоящее время процессы отделочной обработки лопаток газотурбинного двигателя (ГТД) как у нас в стране, так и за рубежом, носят преимущественно ручной характер, что в большей степени обусловлено сложной пространственной формой пера лопатки [1]. Активно применяются различные виды полирования, в том числе полирование на полировальных бабках, с применением в качестве инструмента специальных войлочных кругов с накатанными на профиль абразивными зернами, или микропорошков [2]. Эти процессы разделяют на такие переходы как предварительное и окончательное полирование, а также глянцеование [3].

Обеспечение постоянства обработки при этом, очень часто зависит от уровня квалификации рабочего, т. к. такие параметры, как усилие прижима и длительность обработки в каждой характерной точке профиля, могут изменяться в широком диапазоне, что обусловлено сложным пространственным профилем лопаток [4]. Результатом такого процесса обработки является непостоянство технологических воздействий, вследствие чего на готовом изделии могут наблюдаться локальные зоны, характеризующиеся более

низким качеством обработанной поверхности, либо же процесс обработки существенно увеличивается из-за применения нерациональных режимов резания. С учетом и без того очень сложных условий эксплуатации, которым подвергаются лопатки турбины в процессе работы, наличие дополнительных вышеупомянутых участков может приводить к ускоренному выходу из строя лопаток в частности, и ГТД в целом.

Целью данной работы является экспериментальная проверка теории о нахождении пятна контакта при полировании путем решения контактной задачи Герца, предложенной коллективом авторов в своей работе [5], для расчета сил при назначении технологических параметров обработки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач, таких как: разработка методики выполнения экспериментальных исследований, проведение исследований и обработка полученных экспериментальных данных, их анализ и сравнение с теоретическими, полученными по представленным зависимостям, а также установление их взаимосвязи. Все эти задачи решаются в данной работе.

Методика выполнения экспериментальных исследований

Проведенные экспериментальные исследования направлены на экспериментальную проверку и подтверждение теории о нахождении пятна контакта при полировании путем решения контактной задачи Герца, описанной в работе [5]. Следует отметить, что попытка подтверждения применения данной теории уже проводилась [6], и при проведении экспериментальных исследований были учтены все замечания и рекомендации, а именно: увеличение жесткости всей экспериментальной установки, уменьшение биения полировального круга перед проведением замеров, повышение мощности привода.

Экспериментальная проверка проводилась для схемы обработки полировальным кругом прямого профиля наружной поверхности пера лопатки, при условии, что радиус полировальника больше, чем радиус обрабатываемой лопатки $R_{\text{п}} > R_{\text{л}}$, представленной на рис. 1.

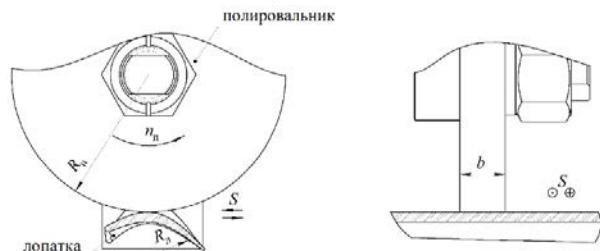


Рис. 1. Схема полирования спинки пера лопатки турбины ГТД

Fig. 1. Finishing-out scheme of the back of the feather

Процесс экспериментального исследования заключается в последовательной обработке образцов со ступенчатым изменением величины прижима детали к полировальному кругу, и последующем замере размеров полученного пятна контакта. Размеры пятна контакта, полученного в результате эксперимента, сравниваем с расчетными параметрами, полученными по зависимостям, представленным в работах [5 – 7].

При проведении эксперимента каждый из подготовленных образцов был разделен на пять зон, для определения размеров пятна контакта при различных усилиях прижима. Для

облегчения проведения замеров пятна контакта на контрольных образцах, перед проведением экспериментальных исследований образцы покрывались тонким слоем перманентного красителя.

Оборудование и оснастка

В качестве основы для экспериментальной установки использовался токарно-винторезный станок. Выбор был обусловлен рядом факторов, в том числе учтенных в работе [6], а именно:

- высокая жесткость системы станок, приспособление, инструмент, деталь;
- возможность закрепления инструмента в центрах, тем самым устранив потенциальную возможность отгиба полировальника;
- механическая подача обрабатываемой заготовки на полировальный круг;
- высокая мощность привода главного движения, гарантирующая постоянство параметров обработки при увеличении силы прижима детали.

Станок был переоснащен для проведения эксперимента следующим образом. В патроне закреплено специальное зажимное приспособление, на которой размещен полировальный круг. Из конструктивных соображений свободный конец оправки поджат вращающимся центром, что позволяет повысить жесткость системы в целом. Обрабатываемая заготовка закреплена в специальной оправке, и установлена в штатный резцедержатель станка (рис. 2).



Рис. 2. Закрепленная в приспособлении заготовка

Fig. 2. The workpiece fixed in the device

На противоположной стороне в резцедержатель установлен кронштейн для тяги цифрового динамометра модели AMF-500,

закрепленного на суппорте станка. Рассматриваемый цифровой динамометр позволяет проводить измерение усилий прижима в двух направлениях (как для случаев сжимающего, так и тянущего воздействия на тягу динамометра), о чем свидетельствует соответствующая пиктограмма на дисплее, в диапазоне до 500 Н, при этом устройство позволяет отображать как текущую величину усилия, так и пиковую в конкретном замере.

Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 3, а режимы обработки в табл. 1.



Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки

Fig. 3. General view of the experimental installation

1. Технологические режимы полирования упрощенных моделей лопатки турбины

1. Technological modes of finishing-out simplified turbine blade models

Наименование параметров	Значение параметров
Частота вращения полировальника, об/мин	400
Усилие прижима, Н	5...260
Длительность операции полирования, с	30
Количество замеров каждого усилия	3

Подготовка к проведению экспериментального исследования проводилась с учетом следующих подготовительных операций: установка и проверка параллельности установки специального зажимного приспособления (см. рис. 2) относительно оси вращения полировального круга; тарирование цифрового динамометра; комплексная проверка обоих подготовительных этапов путем последовательной обработки двух контактных площадок на краях заготовок с одинаковым усилием прижима, и их сравнение.

После подготовительных операций обрабатываемые образцы очищались от пыли и следов проверок и повторно покрывались тонким слоем перманентного красителя, после чего проводились контрольные замеры с фиксацией усилия в соответствующем протоколе. Диапазон измерения усилия прижима был заведомо расширен до 260 Н, что позволит охватить любые виды и схемы обработки полировальными кругами.

Полученные результаты

Результатом данного исследования является экспериментальная проверка изменения

пятна контакта при обработке профиля, эквивалентного профилю лопатки турбины [8], в зависимости от прилагаемых усилий, и сравнение полученных результатов с теоретическими данными, рассчитанными по зависимостям [5]. В результате проведения эксперимента был получен ряд значений, выдержка из которых представлена в табл. 2, а общий вид обработанных образцов представлен на рис. 4.

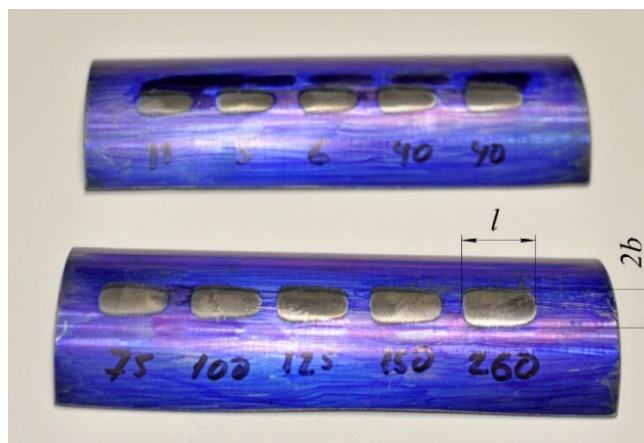


Рис. 4. Общий вид обработанных образцов

Fig. 4. General view of the finish-machined samples

2. Основные характеристики пятна контакта при изменении силы прижима при полировании образцов из стали 45 ГОСТ 1050-2013

2. The main characteristics of the contact spot when changing the clamping force when polishing steel samples 45 GOST 1050-2013

№ п/п	Сила прижима, Н	Характеристики пятна контакта		
		1,0 мм	Ширина $2b$, мм	Площадь, мм ²
1	5	17,0	6,5	110,5
2	10	17,0	7,2	122,4
3	15	17,1	7,3	124,8
4	20	17,5	7,7	134,8
5	40	17,9	7,8	139,6
6	50	18,0	8,0	144,0
7	75	18,2	9,0	163,8
8	100	18,6	9,4	174,8
9	125	19,0	9,6	182,4
10	150	19,1	10,0	191,0
11	260	19,8	10,5	207,9

Для приведенной схемы полирования, полуширина пятна контакта находится по формуле:

$$b = 1,128 \times \sqrt{\frac{P}{l} \frac{R_{\text{л}} R_{\text{п}}}{R_{\text{л}} + R_{\text{п}}} \left(\frac{1 - \mu_{\text{л}}^2}{E_{\text{л}}} + \frac{1 - \mu_{\text{п}}^2}{E_{\text{п}}} \right)}, \quad (1)$$

где P – усилие прижима, Н; l – ширина полировального круга, мм; $R_{\text{л}}$ – радиус заготовки

(лопатки), мм; $R_{\text{п}}$ – радиус полировального круга, мм; $\mu_{\text{л}}$, $\mu_{\text{п}}$ – коэффициент Пуассона материала заготовки (лопатки) и круга соответственно; $E_{\text{п}}$, $E_{\text{л}}$ – модуль упругости материала полировальника и лопатки соответственно.

Теоретические данные, для аналогичных условий обработки приведены в табл. 3.

3. Теоретическое значение пятна контакта для различных материалов полировальника

3. The theoretical value of the contact spot for various polishing instrument materials

№ п/п	Сила прижима, Н	Характеристики пятна контакта							
		Резина техническая		Каучук		Вулканитовая связка		Полиамид	
		b , мм	ширина $2b$, мм	b , мм	ширина $2b$, мм	b , мм	ширина $2b$, мм	b , мм	ширина $2b$, мм
1	5	1,03	2,06	0,83	1,66	0,08	0,16	0,07	0,14
2	10	1,46	2,92	1,18	2,36	0,12	0,24	0,10	0,20
3	15	1,79	3,58	1,44	2,88	0,14	0,28	0,12	0,24
4	20	2,07	4,14	1,67	3,34	0,16	0,32	0,14	0,28
5	40	2,92	5,84	2,36	4,72	0,23	0,46	0,20	0,40
6	50	3,27	6,54	2,63	5,26	0,26	0,52	0,22	0,44
7	75	4,00	8,00	3,22	6,44	0,32	0,64	0,27	0,54
8	100	4,62	9,24	3,72	7,44	0,37	0,74	0,31	0,62
9	125	5,17	10,34	4,16	8,32	0,41	0,82	0,35	0,70
10	150	5,66	11,32	4,56	9,12	0,45	0,9	0,38	0,76
11	260	7,45	14,90	6,00	12,0	0,59	1,18	0,50	1,00

На основании полученных характеристик ширины пятна контакта, в зависимости от величины усилия прижима, полученных в результате проведения экспериментальных

исследований и приведенных в табл. 2., был построен график, приведенный на рис. 5.

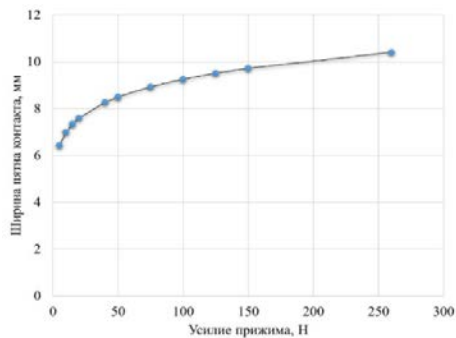


Рис. 5. График зависимости ширины пятна контакта от усилия прижима

Fig. 5. Graph of the dependence of the width of the contact spot on the clamping force

На основе экспериментальных данных пятна контакта, в зависимости от величины усилия прижима, находим функцию зависимости ширины пятна контакта от усилия прижима с применением метода наименьших квадратов. Искомая закономерность описывается степенной функцией $y = 5,2838x^{0,122}$. Аналогичным образом по известной методике находим искомые функции зависимости теоретической ширины пятна контакта от усилия прижима. Основываясь на полученных графиках и эмпирических зависимостях, строим номограмму для определения ширины пятна контакта в зависимости от полученных теоретических значений, в зависимости от применяемого материала полировальника. Приведенные результаты экспериментальных исследований доказывают, что применение контактной задачи Герца при определении пятна контакта полировального круга является достоверным. Однако с учетом сложных функций изменения полуширины пятна контакта в зависимости от усилия прижима для различных материалов, для упрощения его нахождения можно использовать номограмму (рис. 6), построенную по полученным зависимостям.

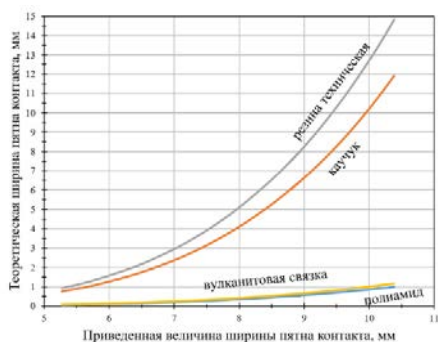


Рис. 6. Номограмма для определения ширины пятна контакта в зависимости от полученных теоретических значений

Fig. 6. Nomogram for determining the width of the contact spot depending on the theoretical values obtained

Обсуждение результатов

Полученные результаты позволяют не только определить геометрические параметры пятна контакта при обработке, а и лечь в основу технологического процесса, обеспечивающего постоянство процесса резания в каждой точке сложного пространственного профиля лопаток ГТД как при ручной обработке [9, 10], так и при автоматизированной [11]. При этом реализация такого технологического процесса может быть основана на обеспечении постоянства режимов обработки в каждой зоне профиля пера лопатки при реализации типового ТП, так и контролируемых переменных воздействий при реализации функционально-ориентированного технологического процесса.

Выводы

Как следствие всего вышесказанного, можно утверждать, что применение контактной задачи Герца применимо к процессам полирования в целом, и в определении геометрических параметров пятна контакта, в частности. Это дает ряд преимуществ, таких как:

1. Оптимизация процесса полировки благодаря более эффективному процессу контроля и регулировки операций полирования, за счет управления режимами обработки;
2. Повышение производительности за счет более точного прогнозирования времени обработки в каждой характерной зоне обрабатываемого изделия;
3. Снижение вероятности повреждений обрабатываемых изделий за счет минимизации чрезмерных нагрузок;
4. Применение при проектировании технологических процессов автоматизированной или роботизированной полировки изделий со сложным пространственным профилем;

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мубаракшин Р.М., Дическул М.Д., Николаев Н.Н. Роботизированная адаптивная размерная полировка компрессорных и турбинных лопаток // Авиационные двигатели. 2021. № 4 (13). С. 51–62. DOI 10.54349/26586061_2021_4_51. EDN YGFKKK.
2. Макаров В.Ф. Разработка высокоэффективных технологических процессов обработки деталей газотурбинных двигателей для авиации и наземных установок // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. 2017. № 1(40). С. 159–166. EDN YOYBXN.
3. Макаров В.Ф., Жукотский В.А., Бычина Е.Н. Проблемы автоматизации финишной обработки сложнопрофильных поверхностей лопаток ГТД // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 8-2. С. 52–55. EDN WLXUTT.
4. Михайлов Д.А. Некоторые особенности полировки криволинейных поверхностей лопаток ГТД из титановых сплавов // Прогрессивные технологии и

системы машиностроения. 2014. № 3(49). С. 120–127. EDN TPNXPT.

5. Михайлов А.Н., Анастасьев А.В., Пичко Н.С. Обеспечение постоянства контактной нагрузки при полировании сложного профиля пера лопатки турбины ГТД // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2023. № 2 (81). С. 26–34. EDN ZDUZXB.

6. Михайлов А.Н., Анастасьев А.В., Пичко Н.С. Экспериментальное подтверждение адекватности применения контактной задачи Герца при определении пятна контакта полировального круга // Высокие технологии в машиностроении: Материалы XX всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Самара, 09–10 ноября 2023 года. Самара: Самарский государственный технический университет, 2023. С. 84–88. EDN RADZUU.

7. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов / 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Наук. думка, 1988. 736 с. ISBN 5-12-000299-4.

8. Михайлов А.Н. Анастасьев А.В., Пичко Н.С. Построение упрощенного профиля пера лопатки турбины ГТД // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сборник трудов XXI МНТК, Екатеринбург, 6–7 апреля 2023 г. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2023. С. 305–308. EDN HKHMAU.

9. Анастасьев А.В., Михайлов А.Н. Синтез структуры технологического процесса обеспечения постоянства условий резания при отделочной обработке лопаток ГТД // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: Материалы ВНИК молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 16–17 ноября 2023 г. Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. С. 3–5. EDN QJNBRV.

10. Суслов А.Г., Федонин О.Н., Медведев Д.М. Проектирование функционально ориентированных технологических процессов // Вестник машиностроения. 2019. № 9. С. 66–71. EDN TDBHLR.

11. Дударев А.С., Баяндин Е.В. Роботизированное шлифование лопаток газотурбинных двигателей // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 4 (360). С. 126–130. DOI 10.33979/2073-7408-2023-360-4-126-130. EDN IVJEKT.

REFERENCES

1. Mubarakshin R.M., Dacicul M.D., Nikolaev N.N. Robotic adaptive dimensional polishing of compressor and turbine blades // Aviation engines. 2021, no. 4 (13). pp. 51–62. DOI 10.54349/26586061_2021_4_51. EDN YGFKKK.

2. Makarov V.F. Development of highly efficient technical processes for finishing parts of gas turbine engines

in aviation and ground installations // Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P. A. Solovyov. 2017, no. 1(40), pp. 159–166. EDN YOYBXN.

3. Makarov V.F., Zhukovsky V.A., Bychina E.N. Problems of automation of finishing of complex sculptured surfaces of GTE blades // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. 2016, no. 8-2, pp. 52–55. EDN WLXUTT.

4. Mikhailov D.A. Some features of smooth finish curved surfaces of GTE blades made of titanium alloys // Progressive technologies and machine building systems. 2014, no. 3(49), pp. 120–127. EDN TPNXPT.

5. Mikhailov A.N., Anastasiev A.V., Pichko N.S. Ensuring the constant contact load when polishing a complex profile of the GTE turbine blade flade // Progressive technologies and machine building systems. 2023. No. 2 (81). pp. 26–34. EDN ZDUZXB.

6. Mikhailov A.N., Anastasiev A.V., Pichko N.S. Experimental confirmation of the adequacy of the use of the Hertz contact lens in determining the contact spot of a polishing wheel // High technologies in mechanical engineering: Proceedings of the XX All-Russian Scientific and Technical conference with international participation, Samara, November 09-10, 2023. Samara: Samara State Technical University, 2023, pp. 84–88. EDN RADZUU.

7. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. Handbook of resistance materials / 2nd ed., reprint. and add. Kiev: Nauk. Dumka, 1988, 736 p. ISBN 5-12-000299-4.

8. Mikhailov A.N. Anastasiev A.V., Pichko N.S. Construction of a simplified profile of a turbine blade // Technological equipment for the mining and oil and gas industry: Proceedings of the XXI ISTC, Yekaterinburg, April 6-7, 2023 Yekaterinburg: Ural State Mining University, 2023, pp. 305–308. EDN HKHMAU.

9. Anastasiev A.V., Mikhailov A.N. Synthesis of the structure of the technological process for ensuring the constancy of cutting conditions under GTE blades finishing // Science, innovations and technologies: from ideas to implementation: Proceedings of SPC of young scientists, Komsomolsk-on-Amur, November 16-17, 2023 Komsomolsk-on-Amur State University, 2023. pp. 3–5. UHT YOTIKM.

10. Suslov A.G., Fedonin O.N., Medvedev D.M. Designing functionally oriented technological processes // Vestnic mashinostroeniya, 2019, no. 9, pp. 66–71. EDN TDBHLR.

11. Dudarev A.S., Bayandin E.V. Robotic grinding of blades of gas turbine engines // Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2023, no. 4 (360), pp. 126–130. DOI 10.33979/2073-7408-2023-360-4-126-130.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.06.2024; одобрена после рецензирования 02.07.2024; принята к публикации 09.07.2024.

The article was submitted 16.06.2024; approved after reviewing 02.07.2024; assepted for publication 09.07.2024.

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №10 (160). С.19-26.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №10 (160). P.19-26.

Научная статья
УДК 621.7
doi: 10.30987/2223-4608-2024-19-26

Моделирование процессов теплопередачи при термофрикционном резании в заготовках из конструкционных сталей

Чингиз Февзиевич Якубов¹, к.т.н.

Николай Иванович Покинтелица², д.т.н.

Сергей Михайлович Братан³, д.т.н.

Анастасия Сергеевна Часовитина⁴, аспирант

¹ Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова,
Симферополь, Россия,

^{2, 3, 4} Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

¹ yakubov_chingiz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9483-8677>

² nik.pokintelitsa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0277-9252>

³ serg.bratan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9033-1174>

⁴ nastya.chasovitina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6800-9392>

Аннотация. Рассмотрено влияние анизотропных свойств конструкционных сталей, на изменение теплопроводности в различных областях зоны контакта в процессе термофрикционного резания. Получены математические модели, которые позволяют построить векторные уравнения теплопроводности для среды с неодинаковыми свойствами в различных направлениях. Разработанные математические зависимости позволили получить модель скалярного температурного поля, приведены результаты расчета температурного поля по плоскости заготовки с учетом анизотропии теплофизических свойств обрабатываемого материала. Решение уравнений позволило построить поля температур в системе относительных и физических координат. Результаты измерений изотерм совпадают с экспериментальными данными можно сделать вывод об их соответствии. В результате выполненных исследований было доказано, что в анизотропной среде изменяются направления и ориентация тепловых потоков в сторону более холодных частей заготовки и инструмента из-за разницы коэффициентов теплопроводности холодного и разогретого материалов. Вышеуказанный процесс способствует выравниванию температуры в зоне контакта инструмента с заготовкой.

Ключевые слова: термофрикционное резание, зона контакта, тепловой поток, поля температур, анизотропная среда

Для цитирования: Якубов Ч.Ф., Покинтелица Н.И., Братан С.М., Часовитина А.С. Моделирование процессов теплопередачи при термофрикционном резании в заготовках из конструкционных сталей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 10 (160). С. 19–26. doi: 10.30987/2223-4608-2024-19-26

Modeling of heat transfer operation within thermal friction cutting for constructional steel workpieces

Chingiz F. Yakubov¹, PhD. Eng.

Nikolay I. Pokintelitsa², D. Eng.

Sergey M. Bratan³, D. Eng.

Anastasia S. Chasovitina⁴, PhD student

¹ Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov,
Simferopol, Russia,

^{2, 3, 4} Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

¹ yakubov_chingiz@mail.ru

² nik.pokintelitsa@mail.ru

³ serg.bratan@gmail.com

⁴ nastya.chasovitina@mail.ru

Abstract. The influence of anisotropic properties of structural steels on the change in thermal conductivity in various areas of the contact zone under thermal friction cutting is viewed. Obtained mathematical models afford to construct vector equations of thermal conductivity for a medium with different properties in various directions. The developed mathematical dependences made it possible to obtain a model of a scalar temperature field, the results of calculating the temperature field along the workpiece plate are given, taking into account the anisotropy of the thermal properties of the work material. The solution of the equations made it possible to construct temperature fields in a system of relative and physical coordinate systems. The measurement results of the isotherms coincide with the experimental data, so it can be concluded on their interrelationship. As a result of the performed studies, it was proved that in an anisotropic medium, the directions and orientation order of heat flows change towards colder zones of the workpiece and tool due to the difference in the heat transfer coefficients for cold and heated materials. The above process helps to equalize the temperature in the contact area of the tool and the workpiece.

Keywords: thermal friction cutting, contact zone, heat flow, temperature fields, anisotropic medium

For citation: Yakubov C.F., Pokintelitsa N.I., Bratan S.M., Chasovotona A.S. Modeling of heat transfer operation within thermal friction cutting for constructional steel workpieces / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 10 (160). P. 19–26. doi: 10.30987/2223-4608-2024-19-26

Введение

В настоящее время для обработки заготовок с плоскими поверхностями используется метод термофрикционного резания, позволяющий осуществлять высокопроизводительную обработку поверхностей, за счет снятия стружки с разогретой поверхности металла вследствие теплоты, выделяющейся при трении поверхностей инструмента о материал заготовки. Для реализации данного способа используются инструменты, изготовленные из легированных сталей, что позволяет существенно экономить дорогостоящие инструментальные материалы. Кроме того, металлические диски проще в изготовлении и имеют более высокую стойкость по сравнению с абразивными кругами и фрезами. Применение металлических дисков эффективно при черновой обработке плоских поверхностей с неравномерным припуском и заготовок, содержащих в своем составе различные включения.

Интенсивное выделение теплоты приводит к повышению температуры в зоне контакта поверхностей инструмента с материалом заготовки. Под действием высоких температур и приложенных сил поверхности трения деформируются, и материал в зоне трения переходит в пластическое состояние. Глубина пластических деформаций, зависит, в основном, от величины удельного давления, скорости относительного движения, продолжительности процесса трения и физико-механических свойств, трущихся тел. Теплота в зоне трения выделяется неравномерно. Анализ

современных исследований в области термофрикционного резания показывает, что в зоне обработки наблюдается анизотропия теплофизических свойств [1 – 7]. В исследованиях, проведенных авторами установлено, что в непосредственной близости от зоны обработки имеют место значительные градиенты температур [8]. Экспериментальные исследования, полученные в работах [9, 10] позволили дать количественную оценку изменения теплопроводности обрабатываемого материала от температуры, так, например, при термофрикционном резании заготовок из стали 45 при нагреве металла от 100 °С до 800 °С коэффициенты теплопроводности изменяются в 2,3 – 3,5 раза (рис. 1).

Таким образом, в результате изменения температур в зоне термофрикционного резания изменяется теплопроводность участков зоны контакта в разных направлениях. Например, аналитический расчет коэффициентов теплопроводности показал, что для зон, расположенных вдоль касательной поверхности диска, численные значения коэффициентов меньше, чем значения коэффициентов теплопроводности для зон, изменяющихся в радиальном направлении, что убедительно доказывает анизотропию теплофизических свойств материалов инструмента и заготовки.

Для прогнозирования величины дефектного слоя, возникающего в поверхностном слое заготовки после термофрикционного резания необходимо наличие адекватного описания тепловых процессов, происходящих в зоне контакта, учитывающего изменение

направлений основных тепловых потоков с их ориентацией, что является целью данной статьи.

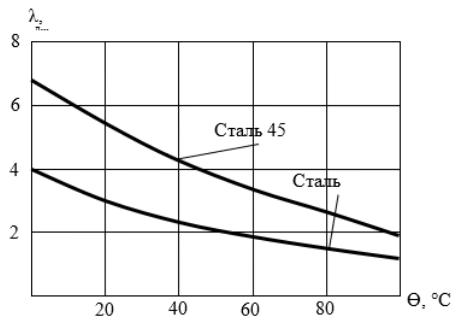


Рис. 1. Зависимости коэффициента теплопроводности стали 45 от температуры

Fig. 1. Dependences of the thermal conductivity coefficient of steel 45 on temperature

Материалы и методы

Для моделирования тепловых процессов и явлений при термофрикционном резании, например, процессов теплопроводности, вектора переноса тепла удобно использовать аппарат тензорного исчисления.

Для построения математической модели рассмотрим схему процесса термофрикционного резания рис. 2. На схеме указаны отклонения вектора теплового потока от вектора-градиента температуры, имеющего место на грани режущего диска вследствие разности коэффициентов теплопроводности металла.

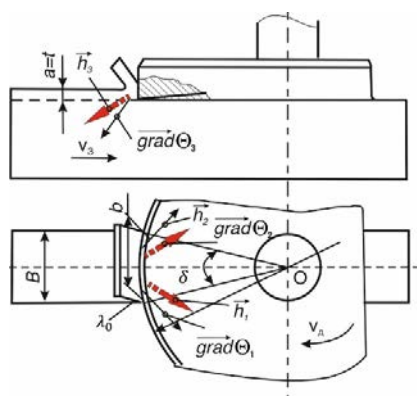


Рис. 2. Схема отклонения вектора теплового потока от вектора-градиента температуры, имеющего место на грани режущего диска вследствие разности коэффициентов теплопроводности металла

Fig. 2. Diagram of the deviation of the heat flow vector from the temperature gradient vector occurring on the edge of the cutting disc due to the difference in the thermal conductivity coefficients of the metal

На схеме, представленной на рис. 2 видно, что между вектором теплового потока $\vec{h}_i$ и градиентом температуры $\overrightarrow{\text{grad}}\Theta$ образован угол, значения которого определяются соотношением теплопроводностей холодного и нагретого металла (рис. 3).

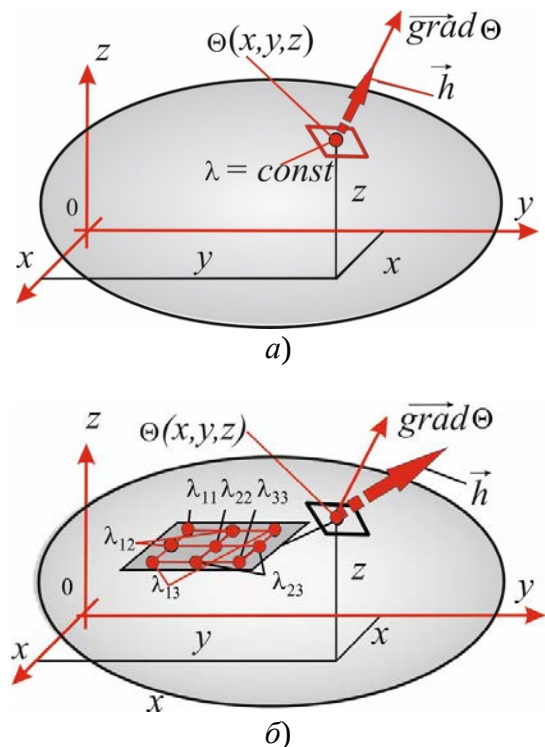


Рис. 3. Схема связи вектора теплового потока с градиентом температуры для изотропной теплопроводной (а) и анизотропной (б) сред

Fig. 3. Diagram of the connection of the heat flux vector with the temperature gradient for an isotropic heat-conducting (a) and anisotropic (b) media

Известно, что вектор переноса тепла моделируется зависимостью вида:

$$\vec{h} = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}}\Theta, \quad (1)$$

$$h_i = -\left[\lambda_{i1} \frac{\partial \Theta}{\partial x} + \lambda_{i2} \frac{\partial \Theta}{\partial y} + \lambda_{i3} \frac{\partial \Theta}{\partial z}\right], \quad (2)$$

где $i = 1, 2, 3$.

Выражение (2) может быть представлено в индексном виде:

$$h_i = -\sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} \frac{\partial \Theta}{\partial x_j}, \quad (3)$$

где λ_{ij} – тензор теплопроводности анизотропной среды:

$$(\lambda_{ij}) = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Экспериментальные исследования показывают, что тензор теплопроводности обладает свойством симметричности:

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ji}.$$

Такой вектор, путем ортогональных преобразований, может быть представлен в виде диагональной матрицы

$$(\lambda_{ij}) = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_x & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{pmatrix},$$

где $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – главные коэффициенты или собственные значения тензора теплопроводности анизотропной среды.

Направления, соответствующие собственным значениям тензора теплопроводности анизотропной среды

$$\vec{e}_i^0, i = 1, 2, 3,$$

являются собственными направлениями тензора теплопроводности.

Для дальнейшего описания введем обозначение r_{ij} – тензора второго ранга, и обратного ему λ_{ij} – тензора теплового сопротивления.

После решения уравнения (3) с учетом вышеизложенного получим:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x_j} = - \sum_{i=1}^3 r_{ij} h_i, \quad j = 1, 2, 3, \quad (5)$$

где r_{ij} – тензор теплового сопротивления который характеризуется матрицей вида:

$$(r_{ij}) = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где $r_{12} = r_{21}$; $r_{32} = r_{23}$; $r_{13} = r_{31}$.

Процедура приведения к диагональному виду, матрицы вектора теплопроводности осуществляется аналогично для матрицы вектора теплового сопротивления:

$$r_i = \frac{1}{\lambda_i}, i = 1, 2, 3, \quad (7)$$

где r_i – собственные значения вектора теплового сопротивления.

С учетом вышеизложенного уравнение характеристической поверхности вектора теплопроводности λ_{ij} моделируется выражением:

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} x_i x_j = 1,$$

которое после приведения к главным осям примет вид:

$$\lambda_x x_0^2 + \lambda_y y_0^2 + \lambda_z z_0^2 = 1 \quad (8)$$

или

$$\frac{x_0^2}{\left(\frac{1}{\sqrt{\lambda_x}}\right)^2} + \frac{y_0^2}{\left(\frac{1}{\sqrt{\lambda_y}}\right)^2} + \frac{z_0^2}{\left(\frac{1}{\sqrt{\lambda_z}}\right)^2} = 1, \quad (9)$$

где $a = \frac{1}{\sqrt{\lambda_x}}$; $b = \frac{1}{\sqrt{\lambda_y}}$; $c = \frac{1}{\sqrt{\lambda_z}}$ – полуоси эллипсоида теплопроводности (рис. 4).

С учетом соотношения (7), получим уравнение вектора теплового сопротивления:

$$\frac{x_1^2}{(\sqrt{r_1})^2} + \frac{x_2^2}{(\sqrt{r_2})^2} + \frac{x_3^2}{(\sqrt{r_3})^2} = 1. \quad (10)$$

Полученное выражение позволяет построить векторные уравнения теплопроводности для среды с неодинаковыми свойствами в различных направлениях.

Рассмотрим процесс распространения тепла в среде с плотностью ρ и удельной теплоемкостью c . Такой процесс моделируется выражением вида [4]:

$$\rho c \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \text{div} \quad (11)$$

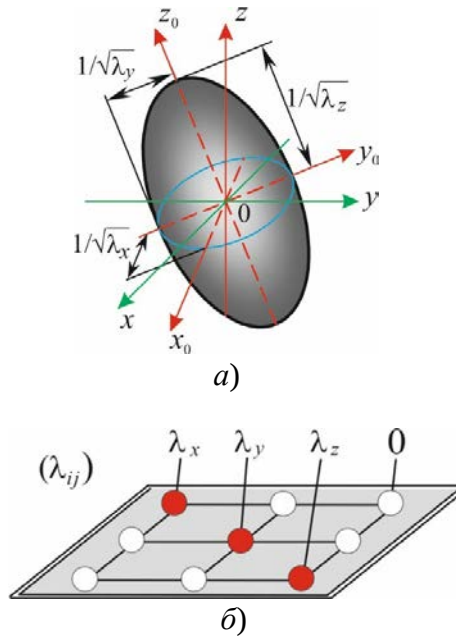


Рис. 4. Эллипсоид теплопроводности анизотропной среды (а) и графическая интерпретация тензора теплопроводности (б)

Fig. 4. Ellipsoid of thermal conductivity of anisotropic medium (a) and graphical interpretation of the thermal conductivity tensor (b)

Для описания установившегося процесса приравняем правую часть уравнения (11) к нулю:

$$\frac{\partial h_1}{\partial x_1} + \frac{\partial h_2}{\partial x_2} + \frac{\partial h_3}{\partial x_3} = 0.$$

Известно, что координаты тензора теплового потока связаны вектором тензор теплопроводности:

$$h_i = -\sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} \frac{\partial \Theta}{\partial x_j}. \quad (12)$$

Соответственно получим:

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_i \partial x_j} = 0. \quad (13)$$

Чтобы решить уравнение (13) необходимо осуществить переход вектора λ_{ij} , к системе главных координат:

$$\lambda_1 \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_1^2} + \lambda_2 \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_2^2} + \lambda_3 \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_3^2} = 0 \quad (14)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – главные коэффициенты теплопроводности.

После замены переменных в уравнении (14) получим:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x_i} = \frac{\partial \Theta}{\partial \xi_i} \frac{\partial \xi_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \Theta}{\partial \xi_i} \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}}; \quad \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi_i^2} \frac{1}{\lambda_i}, \quad (15)$$

где $\xi_1 = \frac{x_1}{\sqrt{\lambda_1}}; \xi_2 = \frac{x_2}{\sqrt{\lambda_2}}; \xi_3 = \frac{x_3}{\sqrt{\lambda_3}}; i = 1, 2, 3$.

С учетом выше рассмотренных преобразований уравнение (16) приводится к виду уравнения Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi_1^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi_2^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi_3^2} = 0. \quad (16)$$

Аналитическое решение уравнения (16) возможно лишь для некоторых частных случаев. Например, для условий термофрикционного резания, при которых источник тепла в неограниченной анизотропной среде может рассматриваться, как точечный, расположенный на границе расплавленного металла и главной режущей кромки инструмента в точке с координатами $(x_T; y_T; z_T)$.

Пусть источник тепла расположен в начале координат, тогда после решения уравнения (16) получим результат:

$$\Theta = \Theta_\infty + \frac{Q}{\sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2 + \xi_3^2}}, \quad (17)$$

где Θ_∞, Q – постоянные температуры среды и производительности источника тепла соответственно.

Результаты и их обсуждение

Полученное выражение позволяет получить модель скалярного температурного поля, путем перехода от системы координат $\xi_1 \xi_2 \xi_3$ согласно (12) к системе координат $x_1 x_2 x_3$:

$$\Theta = \Theta_\infty + \frac{Q}{\sqrt{\frac{x_1^2}{\lambda_1} + \frac{x_2^2}{\lambda_2} + \frac{x_3^2}{\lambda_3}}}. \quad (18)$$

Определим изотермические поверхности, возникающие вокруг из источника тепла. Они соответствуют уравнению (16).

Для графического представления изотермических поверхностей обозначим разность температур:

$$\Theta - \Theta_\infty = \text{const} = C. \quad (19)$$

После подстановки (20) в (19) и несложных преобразований получим уравнение изотермических поверхностей:

$$\frac{x_1^2}{\lambda_1} + \frac{x_2^2}{\lambda_2} + \frac{x_3^2}{\lambda_3} = \frac{Q^2}{(\Theta - \Theta_\infty)^2} = \frac{Q^2}{c^2} = \text{const.} \quad (20)$$

Изотермические поверхности представляют собой эллипсоиды с соответствующими полуосями (рис. 5)

$$a = \sqrt{\lambda_1} \frac{(\Theta - \Theta_\infty)}{Q}; b = \sqrt{\lambda_2} \frac{(\Theta - \Theta_\infty)}{Q}; c = \sqrt{\lambda_3} \frac{(\Theta - \Theta_\infty)}{Q}. \quad (21)$$

Графические интерпретации процесса теплопередачи, построенные путем аналитического решения уравнения теплопроводности для малоподвижного и подвижного источников тепла приведены на рис. 6.

Результаты расчета температурного поля по плоскости заготовки с учетом анизотропии теплофизических свойств по уравнению (20) приведены на рис. 7. Расчет выполнен численными методами, при решении назначена область интегрирования $ABCD$.

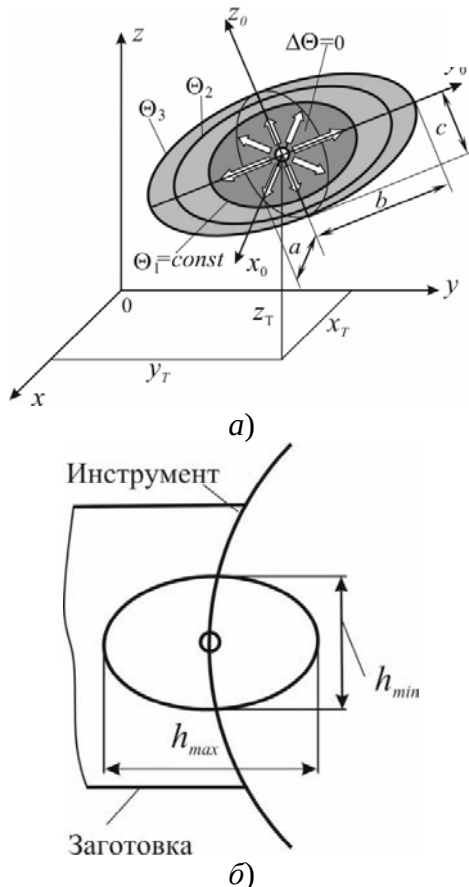


Рис. 5. Распространение тепла из точечного источника, расположенного на периферии инструмента:
а – принципиальная схема распространения тепла;
б – ориентация осей эллипса

Fig. 5. Heat propagation starting from a point source located on the periphery of the tool:
a – schematic diagram of heat propagation; b – orientation of the axes of the ellipse

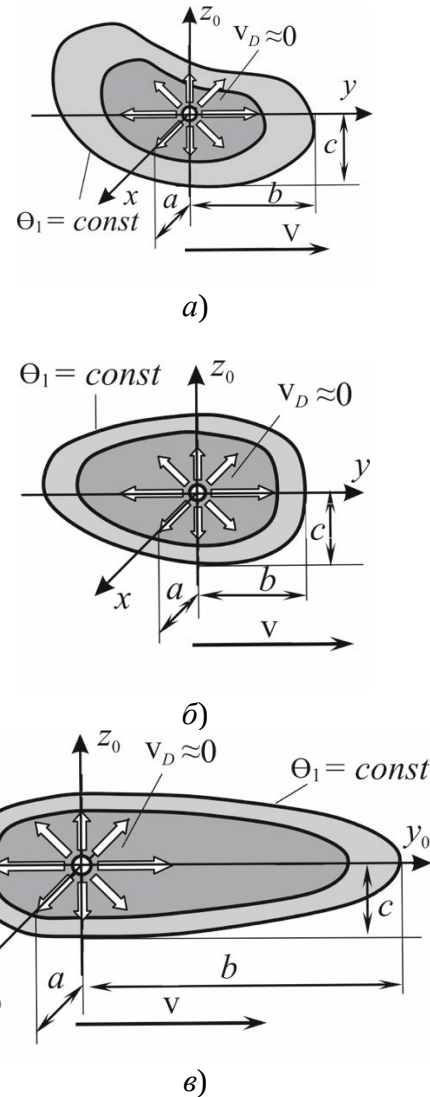


Рис. 6. Распространение тепла от точечного источника, находящегося в слое жидкого металла:
а – для малоподвижного источника теплоты; б – для движущегося источника теплоты; в – для источника, движущегося с большой скоростью

Fig. 6. Heat propagation starting from a point source located in a layer of liquid metal:
a – for inactive (slow) heat source; b – for a moving heat source; c – for a source moving at high speed

На участке AB распределение температуры принято в виде параболической зависимости с максимумом $\Theta = 150^\circ\text{C}$ на расстоянии $AB/3$ от точки A . Для участка BC и AD приняты краевые условия Неймана в виде $\text{grad } \Theta = 0$. На участке CD принято условие $\Theta = \Theta_0 = \text{const} = 30^\circ\text{C}$.

Решение уравнения (20) позволило построить поля температур в системе относительных ζ_1 , ζ_2 и физических координат $x = \sqrt{\Lambda_1} \zeta_1$, $y = \sqrt{\Lambda_2} \zeta_2$.

В результате расчетов определено температурное поле в заготовке. Расчет температурного поля сравнивался с результатами экспериментальных измерений (см. рис. 6 и 7). Результаты измерений изотерм показаны на рис. 7 знаками (Δ , 0, +, $\square$). Из сравнения расчетов с экспериментальными данными можно сделать вывод об их соответствии. Из сравнения расчетных значений с результатами экспериментальных исследований следует, что точность расчета поля температур по предложенной методике составляет 2...4 %. Это подтверждает необходимость учета анизотропии теплофизических свойств инструмента и металла. Таким образом, установлено, что в центральной части заготовки формируется тепловой поток h_1 , который приводит к разогреву центральной части заготовки и локализует нагрев металла в центральной части заготовки. Тепловые потоки h_2 , h_3 , которые распространяются перпендикулярно направлению подачи, менее интенсивны. Это уменьшает теплоотдачу от зоны контакта в окружающее пространство.

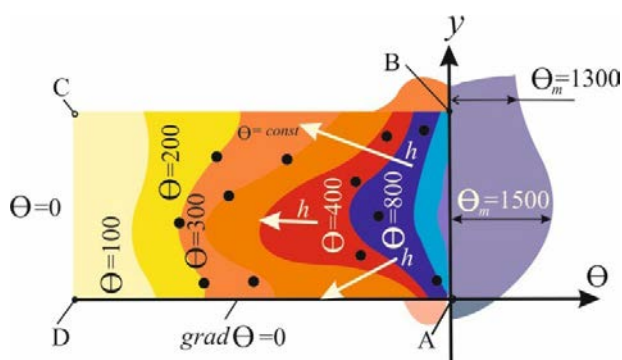


Рис. 7. Результаты расчета температурного поля по плоскости заготовки с учетом анизотропии теплофизических свойств и результатов экспериментальных измерений

Fig. 7. Calculating results for the temperature field along the plane of the workpiece, taking into account the anisotropy of thermal physical properties and experimental results measurements

Закключение

Анализ полученных результатов позволяет сделать заключение, что нагрев зоны контакта зависит от физико-механических свойств материала заготовки и инструмента, а также режимов резания.

Установлено, что в анизотропной среде изменяются направления и ориентация тепловых потоков в сторону более холодных частей заготовки и инструмента из-за разницы коэффициентов теплопроводности холодного и разогретого материалов. Вышеуказанный процесс способствует выравниванию температуры в зоне контакта инструмента с заготовкой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зарубицкий Е.У., Плахотник В.А., Покинтелица Н.И. и др. Оптимизация режимов термофрикционного резания // Вестник машиностроения. 1998. № 9. С. 54–56.
2. Покинтелица Н.И., Стреляная Ю.О., Братан М.И. Пластическое деформирование при термофрикционной обработке материалов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2022. № 3(77). С. 188–191. DOI 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.036. EDN XHTITS.
3. Зарубицкий Е.У. Температура снимаемого припуска при термофрикционном резании // Оптимизация процессов резания жаропрочных и особо прочных материалов. Уфа: Изд-во УАИ, 1986. С. 106–110.
4. Волков О.А. Исследование теплодеформационного влияния при поверхностном упрочнении сталей термофрикционной обработкой // ВЕЖПТ. 2016. № 5 (80). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-teplodeformatsionnogo-vliyaniya-pri-poverhnostnom-uprochnenii-staley-termofriksionnoy-obrabotkoy>.
5. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. М.: Машиностроение, 1992. 240 с.
6. Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И. Механико-химические процессы при граничном трении. М.: Наука, 1972. 170 с.
7. Балакин В.А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения. М.: Машиностроение, 1980. - 136 с.
8. Покинтелица Н.И., Братан М.И. Особенности контактного взаимодействия инструмента и заготовки в зоне термофрикционного резания сталей // Вестник современных технологий. 2022. № 3(27). С. 37–43. EDN TOVBFE.
9. Покинтелица Н.И., Братан М.И., Якубов Ч.Ф. Методология обеспечения повышения эффективности фрикционного формообразования поверхностей // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2023. № 1 (79). С. 252–260. DOI 10.34771/UZCEPU.2023.79.1.050. EDN FOCKNK.
10. Покинтелица Н.И., Братан М.И. Исследование влияния параметров режима резания на температуру в зоне контактного взаимодействия инструмента и заготовки при термофрикционной обработке сталей // Вестник современных технологий. 2022. № 1 (25). С. 10–15. EDN IKCQUE.

REFERENCES

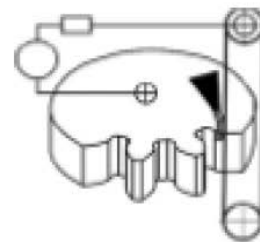
1. Zarubitsky E.U., Plakhotnik V.A., Pokintelitsa N.I. et.al. Optimization of thermal friction cutting modes. Bulletin of Mechanical Engineering, 1998, no. 9. pp. 54–56.
2. Pokintelitsa N.I., Strelyanaya Yu.O., Bratan M.I. Plastic deformation during thermofriction processing of materials. Scientific notes of the Crimean Engineering Pedagogical University. 2022, no. 3(77), pp. 188–191. DOI 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.036. ED.
3. Zarubitsky E.U. The temperature of the removable allowance during thermofriction cutting // Optimization of cutting processes of heat-resistant and especially durable materials. Ufa: UAI Publishing House, 1986, pp. 106–110.
4. Volkov O.A. Investigation of the thermal deformation effect under surface hardening of steels by thermal friction treatment // VEZHPT, 2016, no. 5 (80). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-teplodeformatsionnogo-vliyaniya-pri-poverhnostnom-uprochnenii-staley-termofriktsionnoy-obrabotkoy>.
5. Talantov N.V. The physical foundations of the process of cutting, wear and destruction of the tool. Moscow: Mashinostroenie, 1992, 240 p.
6. Kostetsky B.I., Natanson M.E., Bershadsky L.I. Mechanical and chemical processes under boundary friction. Moscow: Nauka, 1972, 170 p.
7. Balakin V.A. Friction and wear at high sliding speeds. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 136 p.
8. Pokintelitsa N.I., Bratan M.I. Features of the contact interaction of the tool and the workpiece in the zone of thermal friction cutting of steels. Bulletin of modern technologies, 2022, no. 3(27), pp. 37–43. EDN TOVBFE.
9. Pokintelitsa N.I., Bratan M.I., Yakubov Ch.F. Methodology for ensuring the effectiveness of frictional shaping of rotations. Scientific notes of the Crimean Engineering Pedagogical University, 2023, no. 1 (79), pp. 252–260. DOI 10.34771/UZCEPU.2023.79.1.050. SOURCE: EDN FOCKNK.
10. Pokintelitsa N.I., Bratan M.I. Investigation of the influence of cutting mode parameters on the temperature in the zone of contact interaction between the tool and the workpiece under thermofrictional treatment of steels. Bulletin of modern technologies, 2022, no. 1 (25), pp. 10–15. EDN IKC QUE.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.06.2024; одобрена после рецензирования 26.06.2024; принята к публикации 09.07.2024.

The article was submitted 17.06.2024; approved after reviewing 26.06.2024; assepted for publication 09.07.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 10 (160). С. 27-37.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 10 (160). P. 27-37.

Научная статья
УДК 534-8, 621.9.048.6
doi: 10.30987/2223-4608-2024-27-37

Получение неразъёмных соединений с использованием ультразвуковых колебаний

Вячеслав Михайлович Приходько¹, чл.-кор. РАН, д.т.н.

Сергей Константинович Сундуков², к.т.н.

Равиль Исламович Нигметзянов³, к.т.н.

Дмитрий Сергеевич Фатюхин⁴, д.т.н.

^{1, 2, 3, 4} ФГБОУ ВО Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

¹ prikhodko@madi.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² sergey-lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4393-4471>

³ lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁴ mitriy2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5914-3415>

Аннотация. Получение неразъёмных соединений является одним из самых ответственных и трудоёмких этапов сборки изделий машиностроения. Качество выполнения неразъёмных соединений определяет надёжность машины в целом. Это обуславливает актуальность исследований, направленных на повышение качества неразъёмных соединений и на интенсификацию процессов их получения. Эффективным способом для решения данного вопроса является применение ультразвуковых колебаний. Наложение колебаний на свариваемые элементы приводит к изменению параметров кристаллизации, измельчает микроструктуру сварного шва, снижает сварочные деформации и повышает прочность соединения. Деформирование заклёпки ультразвуковым инструментом происходит при снижении требуемого усилия более чем в 10 раз и обеспечивает равномерное распределение радиальных напряжений, что повышает прочность на срез. Ультразвуковая обработка клея при его приготовлении и наложение колебаний на склеиваемые детали снижают вязкость клея, повышают смачиваемость, увеличивают заполняющую способность, что приводит к повышению прочности клеевого соединения на сдвиг. Сообщение ультразвуковых колебаний запрессовываемой детали приводит к снижению трения за счёт его преобразования в квазивязкое, что снижает требуемое усилие запрессовки и уменьшает вероятность повреждения сопрягаемых поверхностей. Ультразвуковая кавитационно-абразивная обработка сложнопрофильных металлических изделий, полученных методами аддитивного производства, позволяет снижать шероховатость на труднодоступных участках и элементах поверхности, что недоступно другими методами. Для каждого из рассматриваемых видов неразъёмных соединений предложены схемы технологических процессов, включающих как типовые операции, так и дополнительные с применением ультразвуковых колебаний, позволяющих повысить свойства получаемых неразъёмных соединений.

Ключевые слова: ультразвук, колебания, неразъёмные соединения

Для цитирования: Приходько В.М., Сундуков С.К., Нигметзянов Р.И., Фатюхин Д.С. Получение неразъёмных соединений с использованием ультразвуковых колебаний // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 10 (160). С. 27–37. doi: 10.30987/2223-4608-2024-27-37

Obtaining fixed joints using ultrasonic vibrations

Vyacheslav M. Prikhodko¹, RAS member-corr, D. Eng.

Sergey K. Sundukov², PhD. Eng.

Ravil I. Nigmatzyanov³, PhD. Eng.

Dmitry S. Fatyukhin⁴, D. Eng.

^{1, 2, 3, 4} Moscow State Automobile and Road Engineering University (MADI), Moscow, Russia

¹ prikhodko@madi.ru

² sergey-lefmo@yandex.ru

³ lefmo@yandex.ru

⁴ mitriy2@yandex.ru

Abstract. Obtaining fixed joints is one of the most demanding and time-consuming stages of assembling machine-building products. The quality of all-in-one connections determines the reliability of the machine as a whole. This determines the relevance of research aimed at improving the quality of non-removable compounds and at the intensification of their production processes. An effective way to solve this issue is the use of ultrasonic vibrations. The imposition of vibrations on the welded elements leads to a change in the crystallization parameters, grinds the microstructure of the weld, reduces welding deformations and increases the strength of the joint. Deformation of the rivet with an ultrasonic tool takes place when the required force is reduced by more than 10 times and ensures uniform distribution of radial stresses, making shear strength better this way. Ultrasonic treatment of the binding material within the process of its production and oscillation superposition on the adherend parts reduce the viscosity of the adhesive, increase wettability and filling capacity, resulting in shear strength hardening in the adhesive joint. The transmittal of ultrasonic vibrations of the pressed part decreases friction due to its transformation into a quasi-viscous one, which takes down the required pressing force and reduces damage probability for mating surfaces. Ultrasonic cavity-abrasive treatment of complex metal products obtained by additive manufacturing methods makes it possible to reduce roughness in hard-to-reach areas and surface elements, which is not possible by other methods. For each fixed joint type under examination, technical plans are proposed, including both standard operations and additional ones using ultrasonic vibrations, which makes properties improvement for the obtained fixed joints possible.

Keywords: ultrasound, vibrations, fixed joints

For citation: Prikhodko V.M., Sundukov S.K., Nigmatzyanov R.I., Fatyukhin D.S. Obtaining fixed joints using ultrasonic vibrations / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 10 (160). P. 27–37. doi: 10.30987/2223-4608-2024-27-37

Введение

В машиностроительном производстве одной из наиболее трудоёмких операций является сборка неразъёмных соединений, которые не предполагают последующей разборки, осуществление которой невозможно без повреждения соединённых деталей или соединительного материала [1 – 3].

Неразъёмные соединения классифицируются по способу их образования. К

неразъёмным соединениям, образованным за счёт создания сил молекулярного сцепления, относятся сварные, паяные и клеевые. Для получения данных соединений применяется соединительный материал, который в процессе соединения находится в жидком состоянии (это не относится к механическим и термомеханическим видам сварки), который после кристаллизации (для сварного шва, припоя) или полимеризации (для клеев) создают прочную связь между

соединяемыми элементами [4, 5]. Сюда же можно отнести способ получения неразъёмных соединений методом послойного синтеза, который заключается в изготовлении неразъёмного соединения целиком вместо отдельного изготовления соединяемых деталей и их последующей сборки [6, 7]. Неразъёмные соединения, полученные с приложением механической силы, делятся на заклёпочные, которые получают путём деформирования соединительного элемента, и пресовые посадки с гарантированным натягом [8, 9].

Неразъёмные соединения играют важнейшую роль в обеспечении работы механизмов и составляют до половины всех соединений. В случаях ремонта изделия, связанного с поломкой неразъёмного соединения, требуется замена соединения целиком, либо восстановление соединения за счёт сварки, пайки и склейки. При этом возрастают время и затраты на проведение ремонтных работ. Следовательно, от качества выполнения неразъёмных соединений деталей зависит работоспособность и ремонтпригодность узлов и механизмов машин [10].

Поэтому актуальным направлением исследований является повышение эксплуатационных свойств неразъёмных соединений и интенсификация процессов их получения.

В лаборатории электрофизических методов обработки МАДИ данное направление разрабатывается за счёт использования в технологиях создания неразъёмных соединений ультразвуковых колебаний. В данной статье предложены схемы технологических процессов с применением ультразвука на основе полученных ранее результатов.

Получение сварных соединений методом приложения колебаний к свариваемым элементам

Способ сварки с приложением ультразвуковых колебаний к свариваемым элементам позволяет осуществлять воздействие в течение всего сварочного цикла от формирования ванны расплава до охлаждения соединения. В результате действия звукового давления, кавитации и акустических течений снижается температура начала кристаллизации, увеличивается количество образуемых зародышей и уменьшается скорость их роста, что приводит к измельчению микроструктуры сварного шва, повышению свойств на субмикроуровне, сглаживанию значений микротвёрдости, повышению прочности и пластичности соединения [11].

Для реализации данного способа сварки предлагается следующая последовательность технологического процесса (рис. 1):

1. Подготовка кромок под сварку для очистки поверхности от окалины или оксидных плёнок;
2. Подготовка места приложения колебаний требуется для обеспечения акустического контакта между поверхностью ультразвукового излучателя и свариваемым элементом и заключается в шлифовании его поверхности до шероховатости $Ra12,5$. При этом места приложения колебаний и наложения сварного шва должны находиться в местах максимальной амплитуды изгибных колебаний, которые определяются из условия равенства резонансной частоты источника колебаний и собственной частоты колебаний свариваемых пластин, что подробно описано в [11];

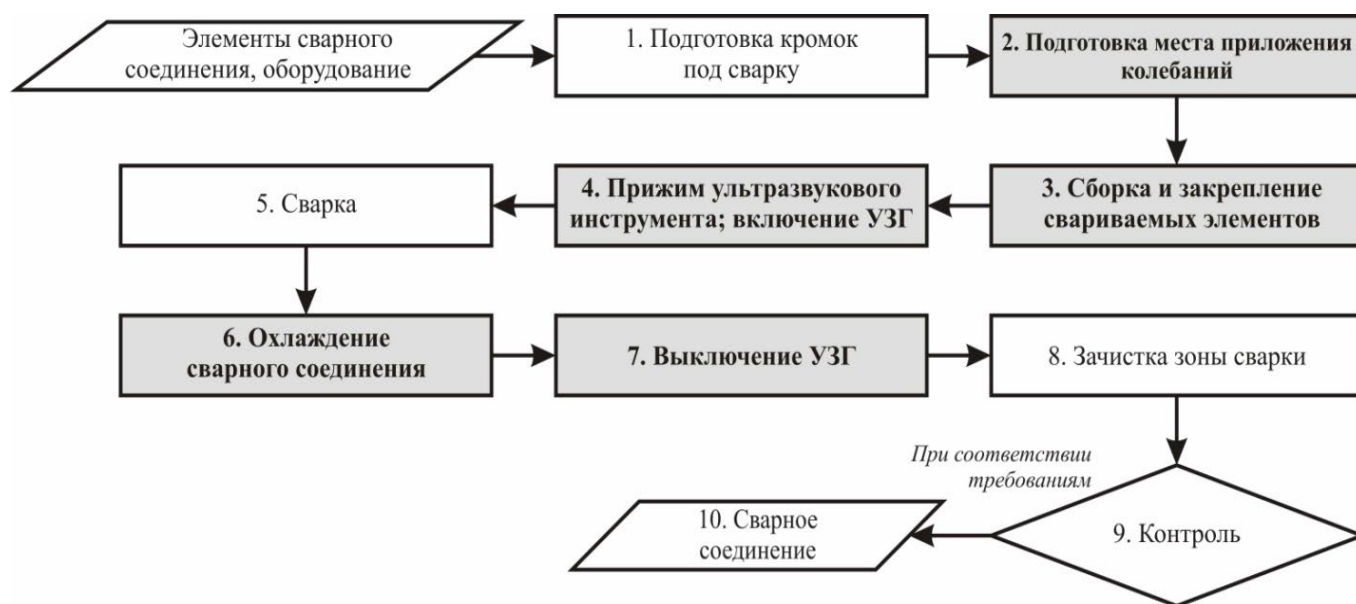


Рис. 1. Схема технологического процесса сварки с использованием ультразвуковых колебаний

Fig. 1. Diagram of the technical welding process of welding using ultrasonic vibrations

3. Сборка и закрепление свариваемых элементов заключается в их расположении с требуемым зазором и, в случае необходимости, прихватки с последующей её зачисткой. Закрепление заготовок осуществляется в местах, обеспечивающих расстояние, необходимое для согласования резонансных частот источника колебаний и собственных колебаний свариваемых элементов;

4. Прижим ультразвукового инструмента с силой, обеспечивающей акустический контакт (при $Ra12,5$ составляет порядка 50 Н) и включение ультразвукового генератора, в результате чего свариваемые элементы совершают изгибные колебания ультразвуковой частоты;

5. Сварка элементов на режимах, определённых стандартными расчётными методами;

6. Охлаждение сварного соединения осуществляется при продолжении действия ультразвуковых колебаний до достижения в зоне сварки температуры, ниже температуры

рекристаллизации свариваемого материала, с целью обеспечения ультразвукового воздействия в течение всего процесса формирования структуры шва;

7. Выключение ультразвукового генератора и последующий отвод ультразвукового инструмента от сваренной конструкции;

8. Зачистка зоны сварки от брызг расплавленного металла;

9. Контроль осуществляется неразрушающими методами;

10. Получение сварного соединения, обладающего повышенными механическими свойствами.

Область применения технологии: сварка изделий и конструкций из простого профиля, обладающего геометрией с плоскостями (листы, квадраты, шестигранники, швеллеры и т. д.), например автомобильные рамы и стрелы дорожно-строительных машин.

Получение заклёпочных соединений под действием ультразвука

Деформация заклёпки в условиях ультразвуковых колебаний осуществляется в результате микроударного высокочастотного воздействия при значительном повышении пластической деформации материала заклёпки. Способ отличается от ударной и прессовой клёпки меньшим усилием расклёпывания (более, чем в 10 раз), большим временем деформации (для заклёпки из Д16 порядка 7 с), но при этом более полным заполнением зазора между стержнем заклёпки и установочным отверстием, равномерным распределением радиальных напряжений, что приводит к росту прочности на срез до 20 % [12]. Для реализации данного способа клёпки предлагается следующая последовательность технологического процесса (рис. 2):

1. Нанесение герметика на сопрягаемые поверхности требуется при требовании герметичности соединений, используемых, например, в авиа- и судостроении;

2. Фиксация элементов соединения требуется для обеспечения соосности

отверстий соединяемых элементов при выполнении следующей операции;

3. Сверление и зенкерование отверстий под заклёпки требуется для получения установочного отверстия с необходимым зазором 0,1 мм и места установки закладной головки заклёпки;

4. Установка заклёпок в установочное отверстие;

5. Прижим ультразвукового инструмента к заклёпке с оптимальной силой, которая при расклёпывании обеспечит максимальное поглощение акустической энергии деформируемым элементом (для заклёпки из Д16 $F = 50$ Н при амплитуде колебаний 10 мкм);

6. Клёпка ультразвуковым инструментом;

7. Герметизация замыкающей головки требуется для герметичных конструкций, чтобы исключить воздействие среды в месте зазора между стержнем и установочным отверстием, образованным вследствие бочкообразной формы стержня. Так как при разработанном способе заполнение отверстия полное, без зазоров, то появляется возможность отказа от этой операции

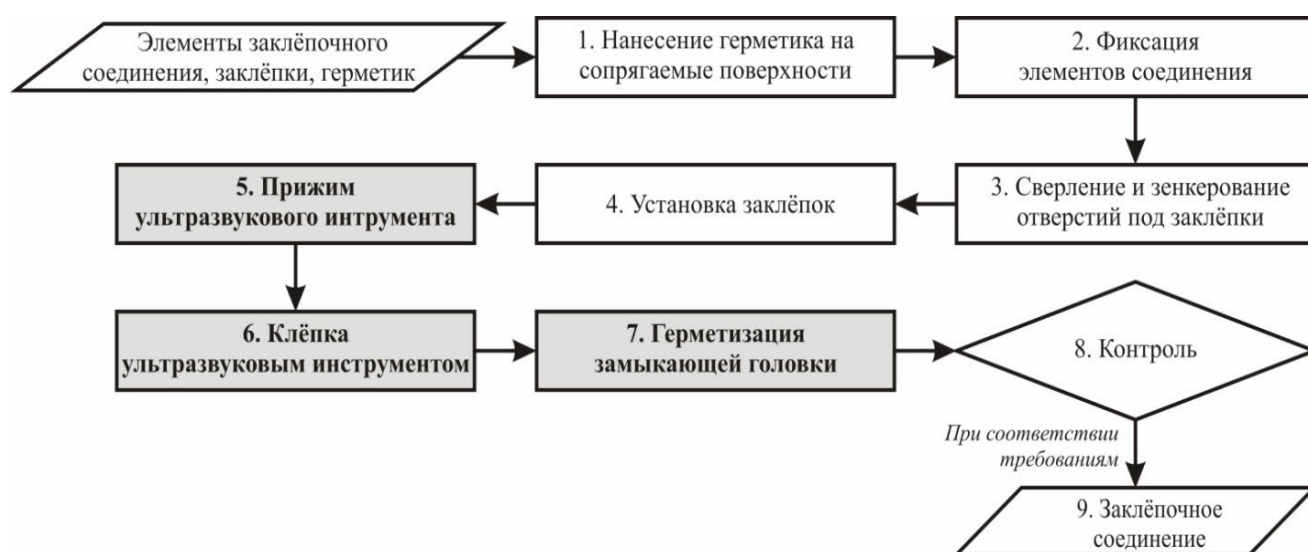


Рис. 2. Схема технологического процесса клёпки с использованием ультразвуковых колебаний

Fig. 2. Diagram of the technical riveting process using ultrasonic vibrations

8. Контроль осуществляется неразрушающими методами;

9. Получение заклёпочного соединения, обладающего повышенными механическими свойствами.

Область применения разработанной технологии: сборка фюзеляжей летательных аппаратов, сборка высоконагруженных узлов машиностроения, например, крепление гусеничных звеньев дорожно-строительной техники, сборка резервуаров, работающих под высоким давлением, где имеются повышенные требования по герметичности.

Получение клеевых соединений с использованием ультразвуковых колебаний

Применение ультразвуковых колебаний в технологии получения клеевых соединений эффективно при приготовлении клеевого состава и при приложении к склеиваемым элементам [13]. Обработка клеевого состава приводит к снижению его вязкости за счёт разрушения макромолекул под действием

кавитации, обеспечивает дегазацию смеси, что повышает прочность самого клея и увеличивает его заполняющую способность. Прочность клеевого соединения повышается в 1,5 раза. Наложение колебаний на склеиваемые элементы повышает смачиваемость поверхности и создаёт звукокапиллярный эффект, позволяющий клею лучше проникать в микронеровности поверхности, что повышает прочность соединения на 40 %.

Для реализации данного способа склеивания предлагается следующая последовательность технологического процесса (рис. 3):

1. Подготовка склеиваемых поверхностей заключается в механической обработке для придания определённой шероховатости, способствующей получению наибольшей площади склеивания, и очистке с последующим обезжириванием. Учитывая, дальнейшую обработку клеевого состава ультразвуком и снижение его вязкости, возможно увеличение шероховатости для увеличения площади склеивания, или, наоборот, увеличение площади склеивания при одинаковой шероховатости;



Рис. 3. Схема технологического процесса склеивания с использованием ультразвуковых колебаний

Fig. 3. Diagram of the technical adhering process using ultrasonic vibrations

2. Смешивание компонентов клеевого состава заключается в равномерном перемешивании связующего и отвердителя в заданных пропорциях с последующей дегазацией смеси. Последующее применение ультразвуковой обработки осуществляет полную дегазацию смеси, что позволяет осуществлять данный этап вручную с высокой скоростью перемешивания;

3. Ультразвуковая обработка клеевого состава с целью снижения вязкости, уменьшения угла смачивания, и повышения его свойств после полимеризации;

4. Нанесение клея на склеиваемые поверхности механическим способом;

5. Сборка соединения заключается в ориентации склеиваемых деталей в конечном положении;

6. Выполнение этапа прижима склеиваемых соединений зависит от их геометрии и возможности приложения ультразвуковых колебаний. Если производится склеивание мелкогабаритных и/или сложнопрофильных деталей, не имеющих плоских поверхностей для приложения ультразвуковых колебаний, то осуществляется механический прижим, далее идёт этап 9. Если склеиваются детали, обладающие геометрией, обеспечивающей возможность приложения ультразвуковых колебаний, то прижим осуществляется ультразвуковым инструментом;

7. Включение ультразвукового генератора для сообщения колебаний на режиме, обеспечивающем максимальный капиллярный эффект для используемого клея;

8. Выключение ультразвукового генератора после 2...3 с обработки, что соответствует времени подъёма клея в капилляре до максимального значения;

9. Выдержка клеевого соединения под нагрузкой до полной полимеризации в соответствии с инструкцией;

10. Очистка от излишков клея механическими способами;

11. Контроль соединения осуществляется неразрушающими методами;

12. Получение клеевого соединения, обладающего повышенными механическими свойствами.

Область применения разработанной технологии: повышение прочности клеевых соединений в машиностроении, например, соединение элементов кузова, наклеивание фрикционных накладок на тормозные колодки, стопорение резьбовых деталей (шатунные болты, болты крепления поршневых пальцев); заделка трещин; нанесение полимерных покрытий; создание полимерных композиционных материалов.

Получение прессовых соединений методом с наложением ультразвуковых колебаний

Приложение продольных колебаний при запрессовке позволяет снизить силу трения между сопрягаемыми поверхностями до 50...80 % в зависимости от величины натяга и начальной шероховатости, что позволяет значительно снизить усилие запрессовки и снизить вероятность повреждения соединяемых деталей. В зависимости от параметров соединяемых деталей возможно сообщение охватывающей детали радиальных колебаний с амплитудой, превышающей величину требуемого натяга [14].



Рис. 4. Схема технологического процесса запрессовки с использованием ультразвуковых колебаний

Fig. 4. Technical process scheme of pressing using ultrasonic vibrations

Для реализации данного способа запрессовки предлагается следующая последовательность технологического процесса (рис. 4):

1. Подготовка соединяемых поверхностей заключается в обеспечении требуемой шероховатости, позволяющей обеспечить требуемую величину натяга. С учётом наложения колебаний в процессе запрессовки можно использовать меньшую шероховатость для увеличения фактического натяга при одинаковом усилии запрессовки;

2. Установка элементов соединения для последующей запрессовки;

3. Прижим ультразвукового инструмента к запрессовываемой детали при использовании схемы с продольными колебаниями или к охватываемой при использовании схемы с радиальными колебаниями;

4. Включение ультразвукового генератора для начала передачи колебаний с целью снижения силы трения при запрессовке;

5. Запрессовка производится с меньшим усилием, чем без применения колебаний. При этом в зависимости от геометрии соединения и условий сборки усилие может прикладываться со стороны ультразвуковой колебательной системы или за счёт прессы;

6. Выключение ультразвукового генератора после незначительной выдержки для

создания мостиков сварки, что предлагалось в работе [9];

7. Контроль соединения осуществляется неразрушающими методами;

8. Получение прессового соединения, обладающего повышенным натягом и с меньшей вероятностью повреждения сопрягаемых поверхностей.

Область применения разработанной технологии: процессы механической запрессовки без применения нагрева и охлаждения собираемых деталей, например, запрессовка вкладышей подшипников скольжения, запрессовка направляющей втулки клапана в отверстие блока цилиндров, запрессовка шпонки в шпоночный паз на валу.

Селективное лазерное плавление с финишной ультразвуковой кавитационно-абразивной обработкой (КАО)

При ультразвуковой жидкостной обработке рабочими телами являются кавитационные пузырьки, что позволяет осуществлять воздействие на поверхностный слой обрабатываемой детали, обладающей сложной геометрией. При добавлении в технологическую жидкость абразивных частиц им передаётся

энергия, возникающая при схлопывании кавитационных пузырьков. При соударении с поверхностью частицы абразива оказывают

микрорежущее воздействие, приводящее к снижению высотных параметров шероховатости более, чем в 2 раза [15].

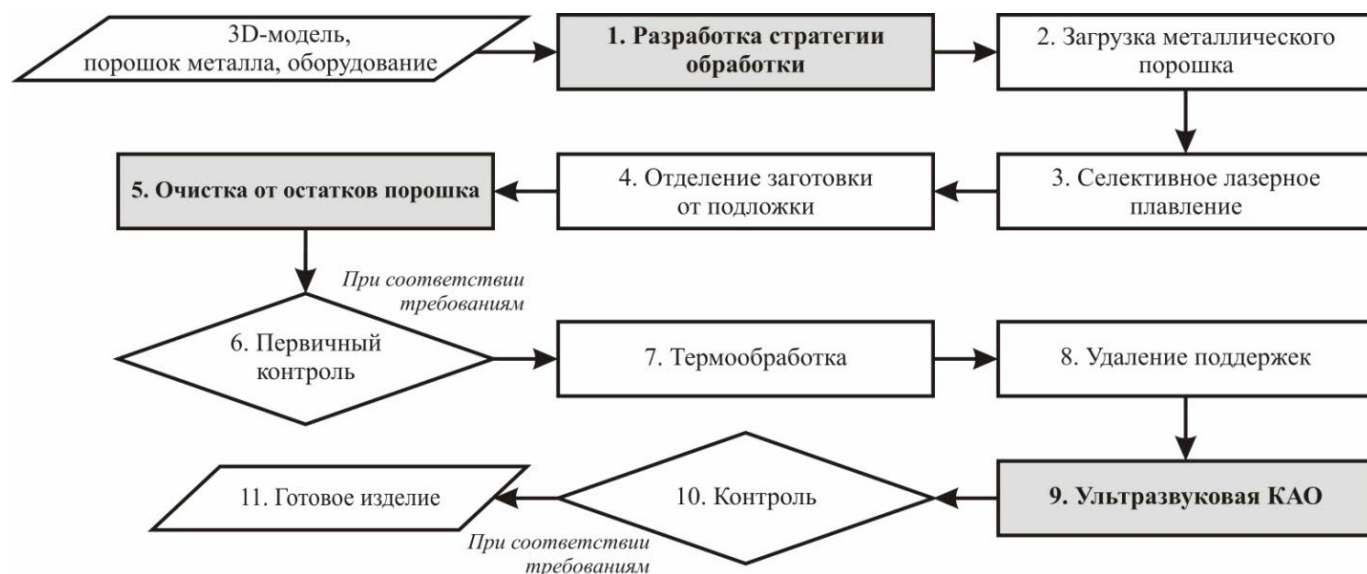


Рис. 5. Схема технологического процесса селективного лазерного плавления с использованием ультразвуковых колебаний

Fig. 5. Technical process scheme of selective laser melting using ultrasonic vibrations

Для реализации технологического процесса селективного лазерного плавления с финишной ультразвуковой обработкой предлагается следующая последовательность операций (рис. 5):

1. Разработка стратегии обработки заключается в программной обработке 3D-модели с разделением её на слои и создании программы лазерного плавления металлического порошка для каждого слоя с учётом необходимых поддержек. Разработка стратегии ультразвуковой КАО на установке координатной обработки осуществляется по той же 3D-модели;
2. Загрузка металлического порошка после просеивания в бункер установки лазерного селективного плавления;
3. Селективное лазерное плавление слоёв металлического порошка по разработанной ранее программе;
4. Отделение заготовки от подложки для её последующей обработки. Осуществляется механическими способами;

5. Очистка от остатков порошка, налипшего на поверхности и застрявшего в труднодоступных местах, осуществляется механическими и вибрационными способами. Для удаления порошка из сложнопрофильных внутренних поверхностей возможно использование ультразвуковой очистки;

6. Контроль пористости и шероховатости полученной заготовки;

7. Термообработка для устранения деформаций и снятия внутренних напряжений;

8. Удаление поддержек, напечатанных для обеспечения формообразования заготовки;

9. Ультразвуковая КАО сложнопрофильных участков поверхности с целью снижения шероховатости до требуемых показателей;

10. Контроль параметров шероховатости после ультразвуковой финишной обработки;

11. Получение неразъёмного соединения, обладающего сложной геометрией и

соответствующего требованиям по качеству поверхности.

Область применения разработанной технологии: производство сложнопрофильных металлических изделий методами аддитивного производства, в том числе для замены сборочных операций получения неразъёмного соединения на синтез соединения целиком, например, решётка воздухозаборника и стопорная шайба [15].

Заключение

Предложены схемы технологических процессов для получения сварных, заклёпочных, клеевых, прессовых соединений и изделий, полученных аддитивным производством, с применением ультразвуковых колебаний. Во всех случаях эффекты, возникающие при использовании колебаний, приводят к повышению свойств получаемых соединений или интенсифицируют технологию их получения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ткачева А.В., Абашкин Е.Е. Влияние, оказываемое активным охлаждением, на неразъёмное соединение, образованное в результате электродуговой сварки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2022. № 3. С. 160–169.
2. Латыпова Е.Ю., Цумарев Ю.А. Составные конструктивные элементы для неразъёмных соединений // Сварочное производство. 2016. № 3. С. 33–38.
3. Эрдеди А.А. Техническая механика. Детали машин. М.: Издательство «Высшая школа». 1991. 272с.
4. Баурова Н.И., Сергеев А.Ю. Структурные исследования механизма разрушения клеевых соединений после испытаний методом pull-out // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. № 4. С. 24–28.
5. Скупов А.А. и др. Создание неразъёмных соединений из интерметаллидных титановых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 7 (101). С. 31–38.
6. Зорин В.А., Полухин Е.В. Аддитивные технологии // СТТ: Строительная техника и технологии. 2016. № 3. С. 54–57.

7. Garcia R., Prabhakar P. Bond interface design for single lap joints using polymeric additive manufacturing // Composite Structures. 2017. Т. 176. С. 547–555.

8. Овчинников В.В., Новиков В.А., Малов Д.А. Сравнительные испытания заклёпочных соединений алюминиевых сплавов, полученных различными методами клепки // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 3. С. 7–12.

9. Авт. св-во № 1764921 А1 СССР, МПК В23Р 11/02. Способ сборки прессовых соединений типа вал-втулка: № 4839393: заявл. 15.06.1990: опубл. 30.09.1992 / В.А. Николаев, Н.Д. Папшева, Б.Л. Штриков; заявитель Самарский политехнический институт им. В.В. Куйбышева, самарский филиал института машиноведения им. А.А. Благонравова

10. Сундуков С.К. Ультразвуковые технологии в процессах получения неразъёмных соединений. М.: ООО «Техполиграфцентр», 2023. 269 с.

11. Сундуков С.К. Особенности наложения ультразвуковых колебаний в процессе сварки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2022. Т. 24, № 2. С. 50–66. DOI 10.17212/1994-6309-2022-24.2-50-66

12. Сундуков С.К. Анализ деформации заклёпки при наложении ультразвуковых колебаний // Технология металлов. 2023. № 1. С. 28–37. DOI 10.31044/1684-2499-2023-0-1-28-37

13. Сундуков С.К. Подготовка эпоксидного клея методом ультразвуковой обработки // Клеи. Герметики. Технологии. 2023. № 9. С. 32–40. DOI 10.31044/1813-7008-2023-0-9-32-401

14. Сундуков С.К. Снижение силы трения при запрессовке с наложением ультразвуковых колебаний // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2023. № 12. С. 25–33. DOI 10.31044/1684-2561-2023-0-12-25-33

15. Influence of Postprocessing on Wear Resistance of Aerospace Steel Parts Produced by Laser Powder Bed Fusion / A.S. Metel, S.N. Grigoriev, T.V. Tarasova [et al.] // Technologies. 2020. Vol. 8, No. 4. P. 73. DOI 10.3390/technologies8040073

REFERENCES

1. Tkacheva A.V., Abashkin E.E. The influence exerted by active cooling on the permanent connection formed as a result of electric arc welding // The bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics, 2022, no. 3, pp. 160–169.
2. Latypova E.Yu., Tsumarev Yu.A. Composite structural elements for permanent joints // Welding production. 2016, no. 3, pp. 33–38.

3. Erdedi A.A. Technical mechanics. Machine parts. Moscow: Publishing house "Higher School", 1991, 272 p.

4. Baurova N.I., Sergeev A.Yu. Structural studies of fracture patterns in adhesive joints after pullout testing // Glues. Sealants. Technologies, 2014, no. 4, pp. 24–28.

5. Skupov A.A. et al. Creation of non-removable compounds from intermetallic titanium alloys (review) // Proceedings of VIAM. 2021, no. 7 (101), pp. 31–38.

6. Zorin V.A., Polukhin E.V. Additive technologies // CMT: Construction machinery and technologies. 2016, no. 3, pp. 54–57.

7. Garcia R., Prabhakar P. Bond interface design for single lap joints using polymeric additive manufacturing // Composite Structures. 2017. T. 176. C. 547–555.

8. Ovchinnikov V.V., Novikov V.A., Malov D.A. Comparative tests of rivet connections of aluminum alloys obtained by different methods of riveting // Procurement production in machine building. 2015, no. 3, pp. 7–12.

9. Inventor's cert. No. 1764921 A1 of the USSR, IPC B23P 11/02. Method of assembly of press joints of the shaft-sleeve type: No. 4839393: application 06/15/1990 : publ. 30.09.1992 / V.A. Nikolaev, N.D. Papsheva, B.L. Shtrikov; applicant Samara Polytechnic

Institute named after V.V.Kuibyshev, Samara branch of the Institute of Mechanical Engineering named after A.A.Blagonravov

10. Sundukov S.K. Ultrasonic technologies in the processes of obtaining permanent joints. Moscow : Tech-Polygraphcenter LLC, 2023, 269 p.

11. Sundukov S.K. Features of applying ultrasonic vibrations in the welding process // Metalworking (technology, equipment, tools). 2022, vol. 24, no. 2, pp. 50–66. DOI 10.17212/1994-6309-2022-24.2-50-66

12. Sundukov S.K. Study of rivet deformation under the application of ultrasonic vibrations // Technology of metals. 2023, no. 1, pp. 28–37. DOI 10.31044/1684-2499-2023-0-1-28-37

13. Sundukov S.K. Preparation of epoxy glue by ultrasonic treatment // Glues. Sealants. Technologies. 2023, no. 9, pp. 32–40. DOI 10.31044/1813-7008-2023-0-9-32-401

14. Sundukov S.K. Reduction of friction force during pressing with imposition of ultrasonic vibrations // Repair. Recovery. Modernization. 2023, no. 12, pp. 25–33. DOI 10.31044/1684-2561-2023-0-12-25-33

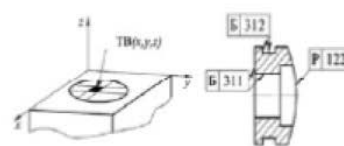
15. Influence of Postprocessing on Wear Resistance of Aerospace Steel Parts Produced by Laser Powder Bed Fusion / A.S. Metel, S.N. Grigoriev, T.V. Tarasova [et al.] // Technologies. 2020. Vol. 8, No. 4. P. 73. DOI 10.3390/technologies8040073

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.03.2024; одобрена после рецензирования 10.04.2024; принята к публикации 17.04.2024.

The article was submitted 28.03.2024; approved after reviewing 10.04.2024; accepted for publication 17.04.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №10 (160). С.38-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №10 (160). P.38-48.

Научная статья
УДК 621.9.048.4
doi: 10.30987/2223-4608-2024-38-48

Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин электроэрозионной обработкой

Олег Николаевич Федонин¹, д.т.н.

Сергей Юрьевич Съянов², к.т.н.

^{1,2} *Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия*

¹ rector@tu-bryansk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3511-699X>

² SERG620@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9829-4566>

Аннотация. Рассмотрена проблема технологического обеспечения эксплуатационных свойств и параметров качества поверхностного слоя деталей машин электроэрозионной обработкой. На основании физической картины протекания процесса электроэрозионной обработки получены теоретические и экспериментальные зависимости для установления параметров качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин от режимов (напряжение, ток и длительность импульсов) для различных условий (свойств диэлектрической жидкости, физико-механических свойств материала инструмента и физико-механических свойств материала заготовки) электроэрозионной обработки. Анализируя представленные зависимости установлено, что на формирование параметров качества поверхностного слоя и эксплуатационные свойства деталей машин основное влияние оказывают режимы при различных условиях электроэрозионной обработки. Также установлено, что на формирование волнистости и макроотклонений поверхности помимо режимов для различных условий электроэрозионной обработки влияние оказывают также исходная волнистость и макроотклонения как заготовки, так и инструмента в зависимости от схемы обработки. В результате была установлена связь параметров качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин с режимами электроэрозионной обработки, были определены возможности электроэрозионной обработки в обеспечении параметров качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин. Полученные результаты позволяют научно обоснованно в зависимости от того, что необходимо обеспечить либо требуемые параметры качества поверхностного слоя, либо требуемые эксплуатационные свойства деталей машин определять режимы для различных условий электроэрозионной обработки. Это позволит реализовать одноступенчатый подход в обеспечении требуемых эксплуатационных свойств деталей машин электроэрозионной обработкой.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, геометрические параметры качества, физико-механические параметры качества, интенсивность изнашивания, предел выносливости, скорость коррозии, режимы и условия обработки

Для цитирования: Федонин О.Н., Съянов С.Ю. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин электроэрозионной обработкой // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 9 (159). С. 38–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-38-48

Technological quality assurance of the surface layer and operational properties of machine parts through EDM process

Oleg N. Fedonin¹, D. Eng.
Sergey Yu. Syanov², PhD. Eng.

^{1,2} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ rector@tu-bryansk.ru

² SERG620@yandex.ru

Abstract. The problem of technological quality assurance and operational properties of the surface layer of machine parts through EDM process is viewed. Based on physics of EDM process, theoretical and experimental dependences for determining the parameters of the surface layer quality and the operational properties of machine parts on the modes (voltage, current and pulse duration) for various conditions (properties of dielectric fluid, physical and mechanical properties of the tool material and physical and mechanical properties of the workpiece material) of EDM process, are found. Studying these dependencies, it was also found that the formation of surface layer quality parameters and the service characteristics of machine parts are mainly influenced by modes under various conditions of EDM process. It was deemed that the formation of undulation and macro-deviations of the surface, in addition to the modes for various conditions of EDMing, is also influenced by the initial undulation and macro-deviations of both the workpiece and the tool, depending on the machining pattern. As a result, the relationship between quality parameters of the surface layer and the operational properties of machine parts depending on the modes of EDM process was found, the possibilities of EDMing of the quality parameters assurance for the surface layer and the operational properties of machine parts were determined. Obtained results allow us to determine the modes for various conditions of EDM process from scientific point of view. Either the required quality parameters of the surface layer or the required operational properties of machine parts determine different modes for various conditions of EDMing. This will make the implementation of a single-stage approach in ensuring the required operational properties of machine parts by EDM process possible.

Keywords: EDM process, geometric quality parameters, physical and mechanical quality parameters, wear intensity, endurance limit, corrosion rate, process modes and conditions

For citation: Fedonin O.N., Syanov S.Yu. Technological quality assurance of the surface layer and operational properties of machine parts through EDM process / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 10 (160). P. 38–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-38-48

Введение

Электроэрозионная обработка преимущественно применяется для производства изделий сложной пространственной конфигурации и из труднообрабатываемых материалов. Обеспечение требуемых эксплуатационных свойств данных изделий будет определять их качество и надежность в целом. Проблема технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин и параметров качества поверхностного слоя электроэрозионными методами обработки является достаточно новой по сравнению с подобной проблемой при механических методах обработки, что определяет ее актуальность.

Исследованию электроэрозионной обработки посвящены работы Б.Н. Золотых, Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко, Н.К. Фотеева, В.П. Смоленцева, А.Л. Лившица и др. ученых. Анализ данных работ показал, что в настоящее время отсутствуют теоретические научно обоснованные методики определения

эксплуатационных свойств деталей машин и параметров качества поверхностного слоя в зависимости от режимов для различных условий электроэрозионной обработки. Для устранения указанного пробела необходимо получить теоретические уравнения параметров качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств от режимов для различных условий электроэрозионной обработки на основании физической картины формирования параметров качества поверхностного слоя. Также необходимо установить возможности электроэрозионной обработки в обеспечении требуемых эксплуатационных свойств деталей машин и параметров качества поверхностного слоя.

Параметры качества поверхностного слоя

Формирование физико-механических и геометрических параметров качества поверхностного слоя при электроэрозионной обработке происходит в результате разрушения и

нагрева поверхностей за счет энергии электрического разряда между заготовкой и инструментом, которые разделены диэлектрической жидкостью.

Для теоретического определения параметров шероховатости поверхности необходимо:

- сопоставить энергии электрического импульсного разряда и тепловую, идущую на плавление объема материала;
- учесть коэффициент перекрытия лунок;
- сделать допущения о том, что режимы обработки усредняются, размеры всех лунок одинаковы и физико-механические свойства материалов и коэффициент перекрытия лунок постоянны на протяжении всей обработки.

Учитывая все вышесказанное, были выведены теоретические зависимости для расчета параметров шероховатости поверхности:

$$\left. \begin{aligned} R_{\max} &= \sqrt[3]{\frac{(2\beta-1) \cdot I \cdot U \cdot \tau_{\text{и}} \cdot \eta_{\text{и}}}{(4\beta+1) \cdot c_{\text{д}} \cdot \rho_{\text{д}} \cdot T_{\text{пл}}}} \\ R_z &= 0,84 \cdot R_{\max} \\ R_a &= 0,398 \cdot R_z \\ R_p &= 0,671 \cdot R_z \\ S_m &= 4,5 \cdot R_z \\ tp &= 0,49 \cdot p^{1,02} \text{ при } p \leq 60\% \\ tp &= 100 - 10 \cdot (100 - p)^{0,5} \text{ при } p > 60\% \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где U – напряжение, В; I – ток, А; $\eta_{\text{и}}$ – коэффициент полезного действия энергии импульса

$$[1 - 3], \eta_{\text{и}} = \frac{0,92}{\sqrt{\frac{\lambda_{\text{и}} \cdot c_{\text{и}} \cdot \rho_{\text{и}}}{\lambda_{\text{д}} \cdot c_{\text{д}} \cdot \rho_{\text{д}}} + 1}}; \lambda_{\text{и}}, \lambda_{\text{д}} - \text{теплопровод-}$$

ность материала инструмента и заготовки соответственно, Вт/(м·К); $c_{\text{и}}, c_{\text{д}}$ – удельная теплоемкость инструмента и заготовки соответственно, Дж/(кг·К); $\rho_{\text{и}}, \rho_{\text{д}}$ – плотность материала инструмента и заготовки соответственно, кг/м³; $\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса, с; β – коэффициент перекрытия лунок; p – уровень сечения; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления материала заготовки, К.

На формирование волнистости и макроотклонений основное влияние оказывают следующие составляющие: исходные волнистость и макроотклонения детали и заготовки, и колебания технологических режимов обработки, которые в зависимости от схемы обработки могут оказывать влияние на формируемый параметр или нет. Произведя суммирование составляющих волнистости и макроотклонений по правилу суммирования случайных величин для различных схем обработки можно получить зависимости для определения максимальных макроотклонений $H_{\max}$ и средней волнистости Wz поверхности.

Прямое и обратное копирование:

- электроэрозионное прошивание предварительно обработанных поверхностей:

$$Wz = \sqrt{10^{-4} \cdot \gamma^2 [(Wz_{\text{исх}}^{\text{и}})^2 + (Wz_{\text{исх}}^{\text{заг}})^2] + (Wz_{\text{исх}}^{\text{и}})^2 \cdot (1 - 0,02 \cdot \gamma) + \left(0,5 \sqrt[3]{\frac{I \cdot \tau_{\text{и}} \cdot \eta_{\text{и}}}{c_{\text{д}} \cdot \rho_{\text{д}} \cdot T_{\text{пл}}}}\right)^2 \cdot (\sqrt[3]{U_{\max}} - \sqrt[3]{U_{\min}})^2}; \quad (2)$$

$$H_{\max} = \sqrt{(0,01 \cdot \gamma \cdot H_{\text{исх}}^{\text{заг}})^2 + (H_{\text{исх}}^{\text{и}} - 0,01 \cdot \gamma \cdot H_{\text{исх}}^{\text{и}})^2} \text{ при } \gamma < 100 \% ; \quad (3)$$

$$H_{\max} = \sqrt{(0,01 \cdot \gamma \cdot H_{\text{исх}}^{\text{заг}})^2 + (0,01 \cdot \gamma \cdot H_{\text{исх}}^{\text{и}} - H_{\text{исх}}^{\text{и}})^2} \text{ при } \gamma > 100 \% ; \quad (4)$$

- электроэрозионное прошивание в сплошном материале:

$$Wz = \sqrt{(Wz_{\text{исх}}^{\text{и}})^2 \cdot (1 - 0,02 \cdot \gamma + 10^{-4} \cdot \gamma^2) + \left(0,5 \sqrt[3]{\frac{I \cdot \tau_{\text{и}} \cdot \eta_{\text{и}}}{c_{\text{д}} \cdot \rho_{\text{д}} \cdot T_{\text{пл}}}}\right)^2 \cdot (\sqrt[3]{U_{\max}} - \sqrt[3]{U_{\min}})^2}; \quad (5)$$

$$H_{\max} = \sqrt{(H_{\text{исх}}^{\text{и}})^2 \cdot (1 - 0,02 \cdot \gamma + 10^{-4} \cdot \gamma^2)}; \quad (6)$$

- разрезание, вырезание, шлифование и т. п.:

$$W_z = 0,5 \sqrt[3]{\frac{I \cdot \tau_{и} \cdot \eta_{и}}{c_d \cdot \rho_d \cdot T_{пл}}} \cdot (\sqrt[3]{U_{\max}} - \sqrt[3]{U_{\min}}). \quad (7)$$

В зависимостях (2) – (7) $W_{z_{исх}}^{заг}$ – исходная волнистость заготовки, м; $W_{исх}^и$ – исходная волнистость инструмента, м; $H_{исх}^{заг}$ – исходные макроотклонения заготовки, м; $H_{исх}^и$ – исходные макроотклонения инструмента, м; $U_{\max} = U + \Delta U$ – максимальное напряжение при обработке, В; ΔU – перепад напряжения; $U_{\min} = U - \Delta U$ – минимальное напряжение при обработке, В; γ – относительный объемный износ электрод инструмента.

Основное влияние на формирование физико-механических параметров качества поверхностного слоя оказывают тепловые процессы, протекающие при обработке. Определив распределение температурного поля по глубине материала, тепловые и пластические деформации можно определить глубину слоя материала с измененными физико-механическими свойствами h , поверхностную микротвердость $H_{\mu 0}$ и остаточные напряжения σ_0 :

$$H_{\mu 0} = H_{\mu_{исх}} \left(\frac{\sigma_B (1 + 0,01 \psi_k)}{\sigma_T} - 1 \right) \times \\ \times \exp \left(-1,5 \cdot 10^{-3} \left[T_0 + \frac{I \cdot U \cdot \tau_{и} \cdot \eta_{и}}{c_d \cdot \rho_d \cdot (2 \sqrt{\pi \cdot a_d \cdot \tau_{и}})^3} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \exp \left(- \frac{\left[y - \sqrt{4 \cdot a_d \cdot \tau_{и} \cdot \ln \left(\frac{(T_{пл} - T_0) \cdot c_d \cdot \rho_d \cdot (2 \sqrt{\pi \cdot a_d \cdot \tau_{и}})^3}{I \cdot U \cdot \tau_{и} \cdot \eta_{и}} \right)} \right]^2}{4 \cdot a_d \cdot \tau_{и}} \right) \right] \right) \right] + H_{\mu_{исх}}; \quad (8)$$

$$\sigma_0 = \frac{0,5 \cdot E \cdot \alpha_d \cdot I \cdot U \cdot \tau_{и} \cdot \eta_{и}}{c_d \cdot \rho_d \cdot (2 \sqrt{\pi \cdot a_d \cdot \tau_{и}})^3} \times \\ \times \exp \left(- \frac{\left[y - \sqrt{4 \cdot a_d \cdot \tau_{и} \cdot \ln \left(\frac{(T_{пл} - T_0) \cdot c_d \cdot \rho_d \cdot (2 \sqrt{\pi \cdot a_d \cdot \tau_{и}})^3}{I \cdot U \cdot \tau_{и} \cdot \eta_{и}} \right)} \right]^2}{4 \cdot a_d \cdot \tau_{и}} \right) + \frac{\sigma_T}{2} \quad (9)$$

$$h = \sqrt{(4 \cdot a_d \cdot \tau_{и}) \cdot \ln \left[\frac{I \cdot U \cdot \tau_{и} \cdot \eta_{и}}{c_d \cdot \rho_d \cdot (2 \sqrt{\pi \cdot a_d \cdot \tau_{и}})^3} \right] - 4 \cdot a_d \cdot \tau_{и} -} \\ - \sqrt{-(4 \cdot a_d \cdot \tau_{и}) \cdot \ln \left[\frac{(T_{пл} - T_0) \cdot c_d \cdot \rho_d \cdot (2 \sqrt{\pi \cdot a_d \cdot \tau_{и}})^3}{I \cdot U \cdot \tau_{и} \cdot \eta_{и}} \right]}. \quad (10)$$

В зависимостях (8) – (10) σ_T – предел текучести материала поверхностного слоя детали перед электроэрозионной обработкой; σ_B – предел прочности материала поверхностного слоя детали; ψ_k – относительное сужение поперечного сечения образца из материала

детали перед его разрывом при испытаниях на растяжение; $H_{\mu_{исх}}$ – исходная микротвердость поверхностного слоя детали; a_d – коэффициент температуропроводности материала детали; E – модуль упругости первого рода; T_0 – температура окружающей среды;

α_d – коэффициент линейного расширения материала детали.

Для получения эмпирических уравнений, связывающих параметры качества поверхностного слоя с режимами для различных условий электроэрозионной обработки, были проведены экспериментальные исследования с последующей их обработкой, в результате чего были получены следующие зависимости:

$$Y = b_0 \cdot A_{\text{и}}^{b_1} \cdot \Pi_{\text{д}}^{b_2} \cdot \Pi_{\text{и}}^{b_3}; \quad (11)$$

$$tm = 46,5 \pm 5,5 \%; \quad (12)$$

$$H_{\mu 0} = 4,04 \cdot \frac{\Pi_{\text{и}}^{0,171}}{\Pi_{\text{д}}^{0,017}}; \quad (13)$$

$$h_{\mu} = 10^{-3} \cdot \frac{A_{\text{и}}^{0,234} \cdot \Pi_{\text{и}}^{0,409}}{\Pi_{\text{д}}^{0,236}}; \quad (14)$$

$$Sm_W = 0,275 \cdot \frac{A_{\text{и}}^{0,094} \cdot \Pi_{\text{д}}^{0,174}}{\Pi_{\text{и}}^{0,112}}. \quad (15)$$

Электроэрозионное прошивание:

$$Wz = 66,88 \cdot \frac{A_{\text{и}}^{0,11} \cdot \Pi_{\text{д}}^{0,025}}{\Pi_{\text{и}}^{0,119}}. \quad (16)$$

Электроэрозионное прошивание предварительно обработанных поверхностей:

$$Wz = 10,51 \cdot \frac{(Wz_{\text{исх}}^{\text{д}})^{0,353} (Wz_{\text{исх}}^{\text{и}})^{0,034}}{A_{\text{и}}^{0,358} \cdot \Pi_{\text{и}}^{0,126}}. \quad (17)$$

В зависимостях (11) – (17) $\Pi_{\text{д}}$ – критерий фазовых превращений Палатника материала детали, Дж·Вт/м⁴; $A_{\text{и}}$ – энергия импульсов, Дж; $\Pi_{\text{и}}$ – критерий фазовых превращений Палатника материала инструмента, Дж·Вт/м⁴. В зависимости (11) значения коэффициентов b_0, b_1, b_2, b_3 для соответствующего параметра шероховатости Y приведены в табл. 1.

1. Значения коэффициентов b_0, b_1, b_2, b_3 для соответствующего параметра шероховатости Y

1. Values of coefficients b_0, b_1, b_2, b_3 for the corresponding roughness parameter Y

Y	R_{max} , мкм	R_z , мкм	R_a , мкм	R_p , мкм	Sm , мм
b_0	$4,118 \cdot 10^5$	$8,817 \cdot 10^4$	$2,224 \cdot 10^3$	$2,196 \cdot 10^5$	12,79
b_1	0,318	0,315	0,345	0,306	0,33
b_2	-0,103	-0,132	-0,02	-0,042	-0,043
b_3	-0,132	-0,073	-0,102	-0,205	-0,044

Полученные эмпирические (11) – (17) уравнения в значительной мере подтвердили теоретические (1) – (10) уравнения.

Эксплуатационные свойства деталей машин

Для вывода теоретических зависимостей связывающих эксплуатационные свойства деталей машин с режимами при различных условиях электроэрозионной обработки необходимо воспользоваться теоретическими зависимостями, связывающими эксплуатационные свойства деталей машин с параметрами

качества поверхностного слоя [3 – 10] и зависимостями (1) – (17), связывающими параметры качества поверхностного слоя с режимами для различных условий электроэрозионной обработки. В результате можно вывести теоретические зависимости, связывающие интенсивность изнашивания, скорость коррозии и усталостную прочность с режимами для различных условий электроэрозионной обработки.

Интенсивность изнашивания:

– в период приработки:

при обработке предварительно обработанных поверхностей:

$$I_h = \frac{0,06 \left(\sqrt[3]{\frac{0,024IU\tau_{\text{и}}\eta_{\text{и}}}{T_{\text{пл}}c_{\text{д}}\rho_{\text{д}}}} \right)^{0,67} \left(\frac{0,25P\Pi_{\text{д}}^{0,017}}{\Pi_{\text{и}}^{0,171}} \right)^{1,17}}{n1 \left(\frac{3969a^3\rho_{\text{д}}^2c_{\text{д}}^2\sigma_{\text{в}}\tau_{\text{и}}(T_{\text{пл}} - T_0)}{EI^2U^2\eta_{\text{и}}^2\alpha_{\text{д}}} \right)^{ty} \sqrt[3]{\frac{10,37IU\tau_{\text{и}}\eta_{\text{и}}}{T_{\text{пл}}c_{\text{д}}\rho_{\text{д}}}}} \left(1 + \frac{25,38\Pi_{\text{и}}^{0,171}(1 + \mu^2)}{E\Pi_{\text{д}}^{0,017}} \right)^{0,5} \times$$

$$\times \left(2\pi \sqrt[3]{\frac{(Wz_{\text{исх}}^{\text{и}})^2 \left(\frac{408000IU(\eta_{\text{и}} - 1)}{T_{\text{и}}c_{\text{и}}\rho_{\text{и}}} + 1 \right) + \left(0,5(\sqrt[3]{U_{\text{max}}} - \sqrt[3]{U_{\text{min}}})^3 \sqrt[3]{\frac{I\eta_{\text{и}}\tau_{\text{и}}}{T_{\text{пл}}c_{\text{д}}\rho_{\text{д}}}} \right)^2}{\frac{4,16 \cdot 10^{10}I^2U^2(\eta_{\text{и}} - 1)^2((Wz_{\text{исх}}^{\text{и}})^2 + (Wz_{\text{исх}}^{\text{д}})^2)}{T_{\text{и}}^2c_{\text{и}}^2\rho_{\text{и}}^2}}} + \left(0,5(\sqrt[3]{U_{\text{max}}} - \sqrt[3]{U_{\text{min}}})^3 \sqrt[3]{\frac{I\eta_{\text{и}}\tau_{\text{и}}}{T_{\text{пл}}c_{\text{д}}\rho_{\text{д}}}} \right)^2} \right)^{0,165} \times$$

$$\times \left(\sqrt[3]{(H\text{max}_{\text{исх}}^{\text{и}})^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10}I^2U^2(\eta_{\text{и}} - 1)^2}{T_{\text{и}}^2c_{\text{и}}^2\rho_{\text{и}}^2} + \frac{408000IU(\eta_{\text{и}} - 1)}{T_{\text{и}}c_{\text{и}}\rho_{\text{и}}} + 1 \right)} \right)^{0,165}, \quad (18)$$

где $n1$ – число циклов воздействия, которое приводит к разрушению материала; $\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности обрабатываемого материала;

при обработке в сплошном материале:

$$I_h = \frac{0,06 \left(\sqrt[3]{\frac{0,024IU\tau_{\text{и}}\eta_{\text{и}}}{T_{\text{пл}}c_{\text{д}}\rho_{\text{д}}}} \right)^{0,67} \left(\frac{0,25P\Pi_{\text{д}}^{0,017}}{\Pi_{\text{и}}^{0,171}} \right)^{1,17}}{n1 \left(\frac{3969a^3\rho_{\text{д}}^2c_{\text{д}}^2\sigma_{\text{в}}\tau_{\text{и}}(T_{\text{пл}} - T_0)}{EI^2U^2\eta_{\text{и}}^2\alpha_{\text{д}}} \right)^{ty} \sqrt[3]{\frac{10,37IU\tau_{\text{и}}\eta_{\text{и}}}{T_{\text{пл}}c_{\text{д}}\rho_{\text{д}}}}} \left(1 + \frac{25,38\Pi_{\text{и}}^{0,171}(1 + \mu^2)}{E\Pi_{\text{д}}^{0,017}} \right)^{0,5} \times$$

$$\times \left(2\pi \sqrt[3]{\frac{(Wz_{\text{исх}}^{\text{и}})^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10}I^2U^2(\eta_{\text{и}} - 1)^2}{T_{\text{и}}^2c_{\text{и}}^2\rho_{\text{и}}^2} + \frac{408000IU(\eta_{\text{и}} - 1)}{T_{\text{и}}c_{\text{и}}\rho_{\text{и}}} + 1 \right) + \left(0,5(\sqrt[3]{U_{\text{max}}} - \sqrt[3]{U_{\text{min}}})^3 \sqrt[3]{\frac{I\eta_{\text{и}}\tau_{\text{и}}}{T_{\text{пл}}c_{\text{д}}\rho_{\text{д}}}} \right)^2}{\frac{4,16 \cdot 10^{10}I^2U^2(\eta_{\text{и}} - 1)^2}{T_{\text{и}}^2c_{\text{и}}^2\rho_{\text{и}}^2} + \frac{408000IU(\eta_{\text{и}} - 1)}{T_{\text{и}}c_{\text{и}}\rho_{\text{и}}} + 1} \right)^{0,165} \times$$

$$\times \left(\sqrt[3]{(H\text{max}_{\text{исх}}^{\text{и}})^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10}I^2U^2(\eta_{\text{и}} - 1)^2}{T_{\text{и}}^2c_{\text{и}}^2\rho_{\text{и}}^2} + \frac{408000IU(\eta_{\text{и}} - 1)}{T_{\text{и}}c_{\text{и}}\rho_{\text{и}}} + 1 \right)} \right)^{0,165}; \quad (19)$$

при разрезании или вырезании:

$$I_h = \frac{0,06 \left(\sqrt[3]{\frac{0,024IU\tau_{и}\eta_{и}}{T_{пл}c_{д}\rho_{д}}} \right)^{0,67} \left(\frac{0,25P\Pi_{д}^{0,017}}{\Pi_{и}^{0,171}} \right)^{1,17}}{n1 \cdot \left(\frac{3969a_{д}^3\rho_{д}^2c_{д}^2\sigma_{в}\tau_{и}(T_{пл}-T_0)}{EI^2U^2\eta_{и}^2\alpha_{д}} \right)^{ty} \cdot \sqrt[3]{\frac{10,37IU\tau_{и}\eta_{и}}{T_{пл}c_{д}\rho_{д}}}} \times$$

$$\times \left(1 + \frac{25,38\Pi_{и}^{0,171}(1+\mu^2)}{E\Pi_{д}^{0,017}} \right)^{0,5} \left(\pi \cdot (\sqrt[3]{U_{max}} - \sqrt[3]{U_{min}})^3 \sqrt[3]{\frac{I\eta_{и}\tau_{и}}{T_{пл}c_{д}\rho_{д}}} \right)^{0,165} \times$$

$$\times \left(\sqrt{(Hmax_{исх}^и)^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10}I^2U^2(\eta_{и}-1)^2}{T_{и}^2c_{и}^2\rho_{и}^2} + \frac{408000IU(\eta_{и}-1)}{T_{и}c_{и}\rho_{и}} + 1 \right)} \right)^{0,165}; \quad (20)$$

– в период нормального изнашивания:
при обработке предварительно обработанных поверхностей:

$$I_h = \frac{0,038\sqrt{(30-30\mu^2)}}{n1 \left(E \sqrt[3]{\frac{10,37UI\eta_{и}\tau_{и}}{T_{пл}c_{д}\rho_{д}}} \right)^{0,5} \left(\frac{3969a_{д}^3\rho_{д}^2c_{д}^2\sigma_{в}\tau_{и}(T_{пл}-T_0)}{EI^2U^2\eta_{и}^2\alpha_{д}} \right)^{ty} \left(4,04 \frac{\Pi_{и}^{0,171}}{\Pi_{д}^{0,017}} \right)^{1,5}} \times$$

$$\times \sqrt[12]{(Hmax_{исх}^и)^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10}I^2U^2(\eta_{и}-1)^2}{T_{и}^2c_{и}^2\rho_{и}^2} + \frac{408000IU(\eta_{и}-1)}{T_{и}c_{и}\rho_{и}} + 1 \right)} \sqrt[18]{\frac{0,024UI\tau_{и}\eta_{и}}{T_{пл}c_{д}\rho_{д}}} \times$$

$$\times \sqrt[12]{0,5(\sqrt[3]{U_{max}} - \sqrt[3]{U_{min}})^3 \sqrt[3]{\frac{I\eta_{и}\tau_{и}}{T_{пл}c_{д}\rho_{д}}} + (Wz_{исх}^и)^2 \left(\frac{408000IU(\eta_{и}-1)}{T_{и}c_{и}\rho_{и}} + 1 \right) +$$

$$+ \frac{4,16 \cdot 10^{10}I^2U^2(\eta_{и}-1)^2((Wz_{исх}^и)^2 + (Wz_{исх}^д)^2)}{T_{и}^2c_{и}^2\rho_{и}^2}}; \quad (21)$$

при обработке в сплошном материале:

$$I_h = \frac{0,038\sqrt{(30-30\mu^2)} \sqrt[12]{(Hmax_{исх}^и)^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10}I^2U^2(\eta_{и}-1)^2}{T_{и}^2c_{и}^2\rho_{и}^2} + \frac{408000IU(\eta_{и}-1)}{T_{и}c_{и}\rho_{и}} + 1 \right)}}{n1 \left(E \sqrt[3]{\frac{10,37UI\eta_{и}\tau_{и}}{T_{пл}c_{д}\rho_{д}}} \right)^{0,5} \left(\frac{3969a_{д}^3\rho_{д}^2c_{д}^2\sigma_{в}\tau_{и}(T_{пл}-T_0)}{EI^2U^2\eta_{и}^2\alpha_{д}} \right)^{ty} \left(4,04 \frac{\Pi_{и}^{0,171}}{\Pi_{д}^{0,017}} \right)^{1,5}} \times$$

$$\times \sqrt[18]{\frac{0,024UI\tau_{и}\eta_{и}}{T_{пл}c_{д}\rho_{д}}} \sqrt[12]{0,5(\sqrt[3]{U_{max}} - \sqrt[3]{U_{min}})^3 \sqrt[3]{\frac{I\eta_{и}\tau_{и}}{T_{пл}c_{д}\rho_{д}}} + (Wz_{исх}^и)^2 \times$$

$$\times \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10}I^2U^2(\eta_{и}-1)^2}{T_{и}^2c_{и}^2\rho_{и}^2} + \frac{408000IU(\eta_{и}-1)}{T_{и}c_{и}\rho_{и}} + 1 \right)}; \quad (22)$$

при разрезании или вырезании:

$$I_h = \frac{0,028\sqrt{(30 - 30\mu^2)}}{n1 \left(E^3 \sqrt{\frac{10,37UI\eta_i\tau_i}{T_{пл}c_d\rho_d}} \right)^{0,5} \left(\frac{3969a_d^3\rho_d^2c_d^2\sigma_b\tau_i(T_{пл} - T_0)}{EI^2U^2\eta_i^2\alpha_d} \right)^{ty} \left(4,04 \frac{\Pi_i^{0,171}}{\Pi_d^{0,017}} \right)^{1,5}} \times \sqrt{\left(\sqrt{(H\max_{исх}^i)^2 \left(\frac{4,16 \cdot 10^{10}I^2U^2(\eta_i - 1)^2}{T_i^2c_i^2\rho_i^2} + \frac{408000IU(\eta_i - 1)}{T_i c_i \rho_i} + 1 \right)} \times \right)^{0,33} \times \sqrt{\frac{0,024UI^2\eta_i^2\tau_i^2}{T_{пл}^2\rho_d^2c_d^2}} \pi(\sqrt[3]{U_{\max}} - \sqrt[3]{U_{\min}})} \quad (23)$$

Так же интенсивность изнашивания при электроэрозионной обработке можно определить с точки зрения энергетического подхода к процессу электроэрозионной обработки и трения [11]. В результате чего можно получить уравнение взаимосвязи режимов электроэрозионной обработки с интенсивностью изнашивания:

– для цилиндрических поверхностей:

$$I_h = b_0 \left(\frac{Nfqf_i h \left(\sqrt{\frac{\lambda_i c_i \rho_i}{\lambda_d c_d \rho_d} + 1} \right)}{0,92\pi dbUI} \right)^{b_1} ; \quad (24)$$

– для плоских поверхностей:

$$= b_0 \left(\frac{Nfqf_i h \left(\sqrt{\frac{\lambda_i c_i \rho_i}{\lambda_d c_d \rho_d} + 1} \right)}{0,92lbUI} \right)^{b_1} , \quad (25)$$

где N – нормальная нагрузка; f – коэффициент трения; h – толщина удаляемого материала; f_i – частота следования импульсов; q – скважность импульсов; l – длина трущейся поверхности; b – ширина трущейся поверхности; b_0 и b_1 – коэффициенты.

Скорость коррозии:

$$v_k = \frac{494b_0v_{k0}}{\sqrt[3]{\frac{UI\eta_i\tau_i}{T_{пл}\rho_d c_d}}} \times \left(\frac{\left(\frac{\sigma_b(1 + 0,01\Psi_k)}{\sigma_T} - 1 \right) \times \left(T_0 + \frac{UI\eta_i\tau_i}{\rho_d c_d (2 \cdot \sqrt{\pi \cdot a_d \cdot \tau_i})^3} \times \left(y - \sqrt{4 \cdot a_d \cdot \tau_i \cdot \ln \left(\frac{(T - T_0)\rho_d c_d (2 \cdot \sqrt{\pi \cdot a_d \cdot \tau_i})^3}{UI\eta_i\tau_i} \right)} \right)^2 \right)}{4 \cdot a_d \cdot \tau_i} \right) \times \left(\times \exp \left(-1,5 \cdot 10^{-3} \right) \times \exp \left(- \frac{\left(y - \sqrt{4 \cdot a_d \cdot \tau_i \cdot \ln \left(\frac{(T - T_0)\rho_d c_d (2 \cdot \sqrt{\pi \cdot a_d \cdot \tau_i})^3}{UI\eta_i\tau_i} \right)} \right)^2}{4 \cdot a_d \cdot \tau_i} \right) \right) \right)^{b_1} \times K_T K_c K_\Theta K_{pH}, \quad (26)$$

где; v_{k0} – скорость коррозии образца сравнения (эталонного образца), изготовленного из того же материала, что и рассматриваемое изделие, но без механической обработки, в определенных стандартных (эталонных) условиях (в дистиллированной воде); b_0 и b_1 – коэффициенты, зависящие от марки и состояния материала (для нетермоупрочненной стали $b_0 = 1,0$; $b_1 = 5,2$; для термоупрочненной низколегированной стали $b_0 = 0,713$; $b_1 = 5,72$; для термоупрочненной среднелегированной стали $b_0 = 0,74$; $b_1 = 5,57$); K_T – коэффициент, учитывающий влияние толщины пленки влаги h на

поверхности детали; K_c – коэффициент, учитывающий агрессивность коррозионной среды; K_Θ – коэффициент, учитывающий влияние температуры коррозионной среды на скорость коррозии детали; K_{pH} – коэффициент, учитывающий влияние концентрации ионов H^+ на скорость коррозии детали [6, 8, 10]; U_n – степень упрочнения материала поверхностного слоя; $R_v = 0,55 R_z$; tm – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии; Sm – средний шаг неровностей.

Усталостная прочность:

$$\sigma_{-1} = \sqrt{\frac{\sigma_{-1}^{исх} \left(\sigma + \left(\frac{0,5E\alpha_d UI\tau_i\eta_i}{c_d\rho_d(2\sqrt{\pi a_d\tau_i})^3} \exp \left(-\ln \left(\frac{(T_{пл} - T_0)c_d\rho_d(2\sqrt{\pi a_d\tau_i})^3}{UI\tau_i\eta_i} \right) \right) + \frac{\sigma_T}{2} \right) \right)}{(2,07q + 1)^{-1}}}, \quad (27)$$

где $\sigma_{-1}^{исх}$ – предел выносливости образца без концентрации напряжений, МПа; q – коэффициент чувствительности материала детали к концентрации напряжений [4, 5, 10], σ – напряжения от нагрузки, МПа.

Анализируя зависимости (18) – (27) можно утверждать, что основное влияние на эксплуатационные свойства оказывают физико-механические свойства материалов детали и инструмента, энергия импульсов и свойства диэлектрической жидкости, а также что к возрастанию интенсивности изнашивания, усталостной прочности и повышению коррозионной стойкости материалов приводит увеличение энергии импульсов.

Выводы

В ходе теоретических и экспериментальных исследований были выявлены возможности [3, 11] электроэрозионной обработки для обеспечения качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин. Установлена связь между этими параметрами и режимами обработки при различных условиях [3, 11].

Для применения результатов исследований разработан алгоритм (рис. 1) и программа,

автоматизирующие определение режимов обработки для достижения требуемых значений параметров качества или эксплуатационных свойств. Это позволяет обоснованно выбирать режимы обработки и сокращает время технологической подготовки производства.

Необходимые исходные данные включают марку материала, наличие предварительной обработки, требуемые параметры качества поверхности или эксплуатационные свойства, а также данные о предварительной обработке, волнистости и макроотклонениях поверхности детали и инструмента. Результаты ввода сравниваются с данными банка возможностей электроэрозионной обработки, что позволяет определить возможность достижения заданных параметров и перейти к следующему этапу алгоритма.

В базе данных инструментальных материалов содержится информация о марках и характеристиках материалов. Из базы данных выбирается первый материал инструмента и учитывая какой параметр качества поверхности или эксплуатационное свойство необходимо получить, определяется энергия импульса для достижения данного параметра. Затем рассчитываются остальные параметры качества поверхностного слоя для выбранного

материала. Процедура выбора и расчетов повторяется для каждого материала в базе данных инструментальных материалов. Далее определяется производительность с учетом

полученных режимов электроэрозионной обработки. Рекомендуется тот режим, который обеспечивает максимальную производительность.

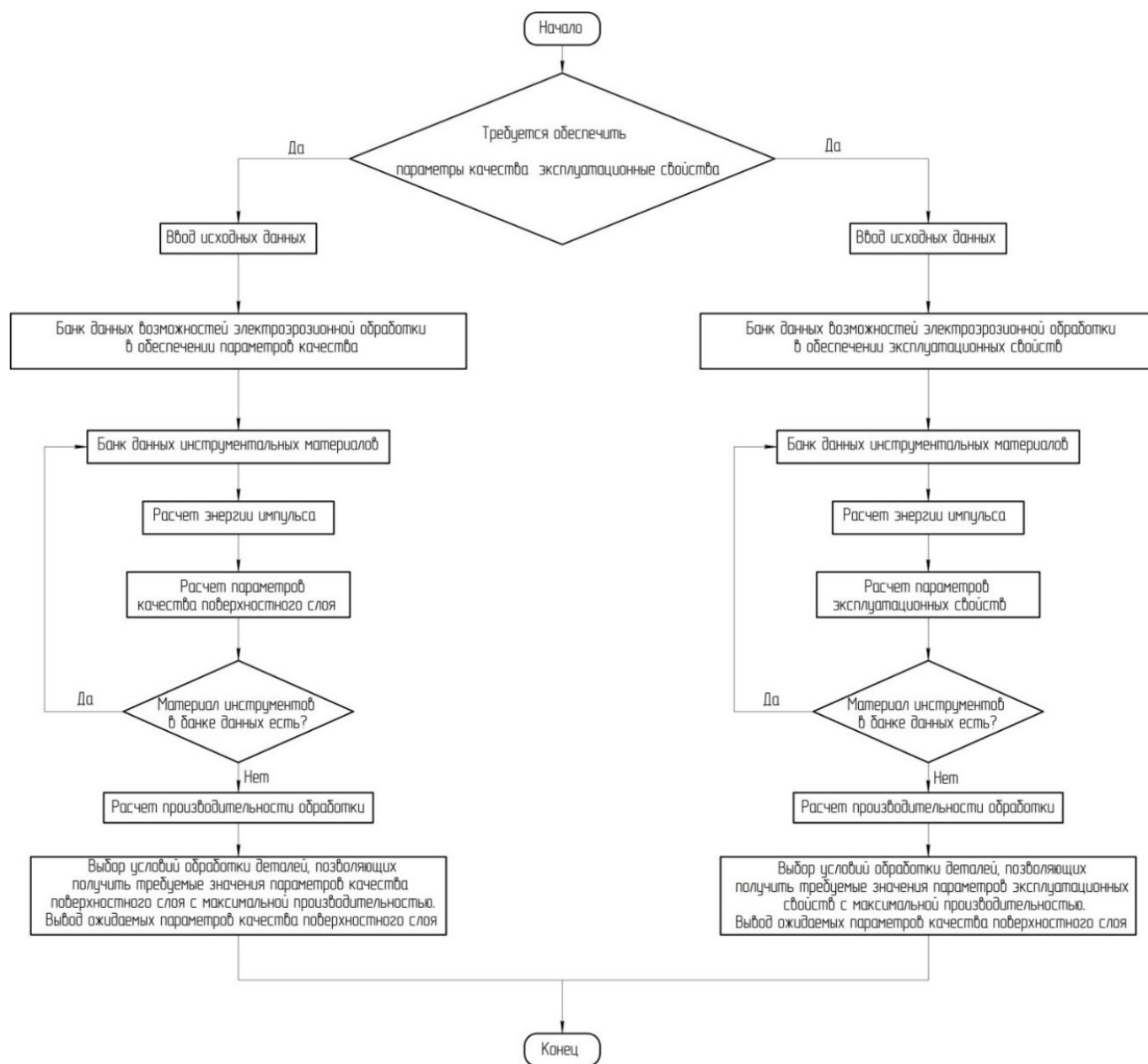


Рис. 1. Алгоритм определения условий электроэрозионной обработки в зависимости от требуемых параметров качества поверхностного слоя или эксплуатационных свойств

Fig. 1. Algorithm for determining the conditions of EDM process depending on the required parameters of the surface layer quality or operational properties

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Съянов С.Ю. Разработка технологического процесса электроэрозионной обработки // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 2 (55). С. 49–57.
2. Съянов С.Ю. Технологическое обеспечение износостойкости деталей машин электроэрозионной

обработкой // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 12 (114). С. 18–21.

3. Съянов С.Ю. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей машин электроэрозионной обработкой // Научные технологии в машиностроении. 2021. № 11 (125). С. 30–37.

4. Качество машин: Справ. в 2 т. / Под общ. ред. А. Г. Суслова. М.: Машиностроение, 1995. 253 с.

5. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения М.: Машиностроение, 2002. 684 с.

6. Верещагин А.С., Федонин О.Н. и [др]. Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты: Коллективная монография: Т. 5. Москва: Издательский дом «Спектр», 2015. С. 464.

7. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов [и др.]; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2009. 320 с.

8. Федонин О.Н. Обеспечение коррозионной стойкости деталей машин при механической обработке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты), 2004. № 3. С. 22–25

9. Справочник технолога / под общей ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.

10. Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / под ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2022. 552 с.

11. Суслов А.Г., Сьянов С.Ю. Одноступенчатое технологическое обеспечение износостойкости деталей машин электроэрозионной обработкой // Научные технологии в машиностроении. 2023. №3 (141). С. 19–22.

REFERENCES

1. Syanov S.Yu. Development of technological process of electro-erosion processing // Bulletin of the Bryansk State Technical University. 2017, no. 2 (55), pp. 49–57.

2. Syanov S.Yu. Technological provision of wear resistance of machine parts by electro-erosion processing

//Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2020, no. 12 (114), pp. 18–21.

3. Syanov S.Yu. Technological provision of wear resistance of machine parts by electro-erosion processing //Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2020, no. 12 (114), pp. 18–21.

4. Machine Quality: Reference book in 2 volumes / Under the editorship of A. G. Suslov. М.: Mechanical Engineering, 1995, 253 p.

5. Suslov A.G., Dalsky A.M. Scientific foundations of mechanical engineering technology. Moscow: Mashinostroenie, 2002, 684 p.

6. Vereshchagin A.S., Fedonin O.N. et. al. Progressive machine-building technologies, equipment and tools: joint monograph: vol. 5. Moscow: Spectrum Publishing House, 2015, p. 464.

7. Parts Surface Engineering / A.G. Suslov [et al.]; under the editorship of A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2009, 320 p.

8. Fedonin O.N. Ensuring corrosion resistance of machine parts during machining // Metalworking (technology, equipment, tools), 2004, no. 3, pp. 22–25

9. Technologist's Reference Book / under the general editorship of A.G. Suslov. Moscow: Innovation Mechanical Engineering, 2019, 800 p.

10. Fundamentals of technological support and reliability improvement of mechanical engineering articles/ ed. by A.G. Suslov. Moscow: Innovation Mechanical Engineering, 2022, 552 p.

11. Suslov A.G., Syanov S.Yu. Single-stage technological provision of wear resistance of machine parts during electro-erosive processing. // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023, no.3(141), pp. 19–22.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.04.2024; одобрена после рецензирования 10.04.2024; принята к публикации 15.04.2024.

The article was submitted 05.04.2024; approved after reviewing 10.04.2024; assepted for publication 15.04.2024.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка Н.А. Лукашов. Редактор Е.В. Лукашова. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.10.2024. Выход в свет 30.10.2024.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Брянский государственный технический университет» 241035,
Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+