

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

6 (168)
2025

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



**НАНОТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

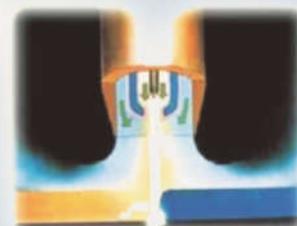
**ЛАЗЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



**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

№ 6 (168)

2025

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. ОБЧИННИКОВ 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

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИХ СОЕДИНЕНИЙ

Суслов А.Г., Горленко А.О., Шалыгин М.Г., Шохийн А.Н.
Научные основы создания наукоемких триботехнологий 3

ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Смоленцев В.П., Сафонов С.В., Смоленцев Е.В. Обеспечение качества
продукции авиационно-космического машиностроения на этапах
отработки технологичности изделий. 11

Киселев Е.С. Повышение эффективности изготовления нежестких
деталей введением в зону формообразования энергии
модулированных ультразвуковых колебаний 19

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПОДГОТОВКА И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Вартанов М.В., Шварц А.И., Миронов Д.Н. Технологическое обеспечение
качества при роботизированной отделочной обработке на основе
средств адаптации. 31

ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Ингеманссон А.Р., Толстяков Н.А. Проблема технологического
обеспечения стабильности операций глубокого сверления при
обработке крупногабаритных кузнечно-прессовых заготовок
на многоцелевых станках с ЧПУ. 40

*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 «Наукоемкие технологии в машиностроении»,
допускаются со ссылкой на источник информации и только
с разрешения редакции.

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 6 (168)

2025

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. SHOHIYON 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

TECHNOLOGICAL SUPPORT OF OPERATIONAL PROPERTIES OF MACHINE PARTS AND THEIR CONNECTIONS

Suslov A.G., Gorlenko A.O., Shalygin M.G., Shohiyon A.N. Science
behind of high-tech tribotechnologies development 3

TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

Smolentsev V.P., Safonov S.V., Smolentsev E.V. Quality assurance
of aerospace engineering products at the stages of products
performance development test 11

Kiselyov E.S. Improving the manufacturing efficiency of non-rigid parts
by introducing the energy of modulated ultrasonic vibrations
into the shaping zone. 19

TECHNOLOGICAL PROCESSES AUTOMATED CONTROL

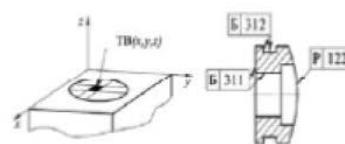
Vartanov M.V., Schwartz A.I., Mironov D.N. Technological quality
assurance in robotic finish based on adaptation tools 31

TECHNOLOGIES OF MECHANICAL PROCESSING OF WORKPIECES

Ingemansson A.R., Tolstyakov N.A. Engineering support problem
for the stability assurance in deep drilling operations for large-sized
forging and pressing blanks work on multi-purpose CNC machines 40

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. 2025. №6 (168). С.3-10.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №6 (168). P.3-10.

Научная статья
УДК [621.7 +621.9]/539.6
doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-3-10

Научные основы создания наукоемких триботехнологий

Анатолий Григорьевич Суслов¹, д.т.н.
Александр Олегович Горленко², д.т.н.
Михаил Геннадьевич Шалыгин³, д.т.н.
Алмосшо Набот Шохиён⁴, д.т.н.

^{1, 2, 3} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия;

⁴ Институт технологий и инновационного менеджмента в городе Куляб, Таджикистан

¹ naukatm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2566-2759>

² bugi12@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0807-9537>

³ migshalygin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8102-9918>

⁴ shoev_a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Изложено понятие наукоемких триботехнологий и приведены конкретные примеры их создания. Изложены технологии окончательной обработки поверхностей трения, работающих при небольших нагрузках, которые замещают процесс приработки этих поверхностей трения, а, следовательно, повышают долговечность их работы. В качестве примеров приведены технологические методы плосковершинного хонингования гильз цилиндров и плосковершинного чистового полирования опорных шеек валов подшипников скольжения. Для повышения долговечности роликов роликоподшипников разработана технология их окончательного полирования бесконечными лентами. Ширина их и усилие натяжения позволяют обеспечить бочкообразность таких роликов, которая гарантирует равномерное распределение давления по всей длине ролика. Это предотвращает возможность их разрушения по краям при их цилиндрической форме. Для ремонта в пути рабочих поверхностей железнодорожных рельсов разработан технологический процесс, обеспечивающий сохранение поперечного профиля рельса, сформировавшегося в процессе приработки на различных участках: прямолинейных и криволинейных. Данный триботехнологический процесс позволяет значительно повысить производительность ремонта полотна железной дороги и срока их службы. Криволинейные поверхности трения в процессе эксплуатации в результате различных скоростей и давлений на различных участках в процессе приработки имеют различные величины износа, т.е. изменяется их оптимальный поперечный профиль. Это непосредственно относится к железнодорожным колесам. Поэтому для повышения долговечности поверхности качения железнодорожных колес разработана триботехнология электромеханической импульсной обработки, обеспечивающей равномерный износ по всему профилю за счет закономерного изменения в степени упрочнения поверхностного слоя профиля колеса.

Ключевые слова: триботехнология, хонингование, приработка, поверхность катания

Для цитирования: Суслов А.Г., Горленко А.О., Шалыгин М.Г., Шохиён А.Н. Научные основы создания наукоемких триботехнологий // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 6 (168). С. 3–10. doi:10.30987/2223-4608-2025-6-3-10

Science behind of high-tech tribotechnologies development

Anatoly G. Suslov¹, D. Eng.
Alexander O. Gorlenko², D. Eng.
Mikhail G. Shalygin³, D. Eng.
Almosho.N. Shohiyon⁴, D. Eng.

^{1,2,3} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia;

⁴ Institute of Technology and Innovation Management in Kulyab, Republic of Tajikistan

¹ naukاتم@yandex.ru

² bugi12@bk.ru

³ migshalygin@yandex.ru

⁴ shoev_a@mail.ru

Abstract. High-tech tribotechnologies concept is outlined. Specific examples of the creation of various tribotechnologies are given. The technologies of final treatment of friction surfaces operating under low loads are described. They replace the process of running-in of these friction surfaces, and, consequently, increase the durability of their operation. Technological methods of cylinder liners plateau honing and flat-topped final polishing of bearing journals of sliding bearing shafts are given as an illustration. To increase the durability of bearing rollers, the tech has been developed for their final polishing with closed loop belts. Their width and tension force make it possible to ensure the barrel shape of such rollers, which guarantees an even distribution of pressure along the entire length of the roller. This prevents the possibility of their destruction at the edges unlike in cylindrical shapes. For voyage repair of railway tracks working surfaces a flow process has been developed that ensures the preservation of the rail transverse profile formed during the running-in process in various sections: rectilinear and curved. This tribotechnological process makes it possible to increase the productivity of railway track repairs and their service life greatly. Curved friction surfaces during operation, resulted from different speeds and pressures at different sites when running-in, have different rate of wear, i.e. their optimal crossing profile changes. The above is also true of railroad wheels. Therefore, to increase the durability of the rolling surface of railway wheels, tribotechnology of electromechanical pulse processing has been developed, which ensures uniform wear throughout the profile due to a regular change in the degree of hardening of the wheel profile surface layer.

Keywords: tribotechnology, honing operation, running-in, rolling surface

For citation: Suslov A.G., Gorlenko A.O., Shalygin M.G., Shohiyon A.N. Science behind of high-tech tribotechnologies development / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 6 (168). P. 3–10. doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-3-10

Под наукоемкими технологиями в машиностроении понимаются технологии, базирующиеся на современных достижениях науки и техники [1]. Под наукоемкими триботехнологиями понимаются технологии, базирующиеся на современных достижениях в трибологической науке. В соответствии с трибологической наукой и практикой кривая износа поверхностей трения имеет следующий характер (рис. 1, кривая 1) [2].

Кривая износа 1 (см. рис. 1), имеет три участка: участок приработки I; участок нормального изнашивания II; участок катастрофического износа III. Как правило, наибольший износ поверхности трения имеют на участке приработки I. На этом участке исходное технологическое качество поверхностного слоя переходит в качество приработанной поверхности (равновесное состояние поверхностного слоя). В соответствии с молекулярно-

механической теорией изнашивания интенсивность износа рассчитывается по формуле для периода нормального изнашивания (рис.1, линия 2) [3]:

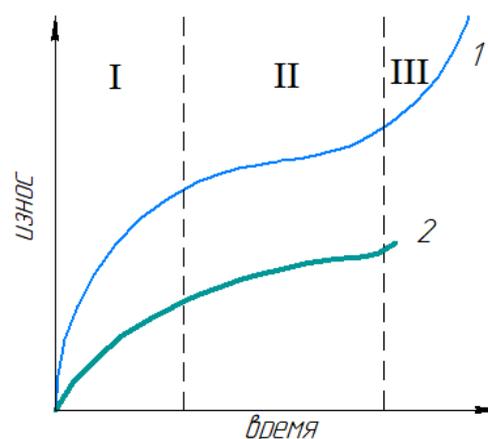


Рис. 1. Кривая износа

Fig. 1. Wear curve

Кривая износа I (см. рис. 1), имеет три участка: участок приработки I; участок нормального изнашивания II; участок катастрофического износа III. Как правило, наибольший износ поверхности трения имеют на участке приработки I. На этом участке исходное технологическое качество поверхностного слоя

переходит в качество приработанной поверхности (равновесное состояние поверхностного слоя). В соответствии с молекулярно-механической теорией изнашивания интенсивность износа рассчитывается по формуле для периода нормального изнашивания (рис.1, линия 2) [3]:

$$I_h = \frac{1,2\pi}{n \cdot \lambda \cdot tm^{3/2} \cdot H_{\mu 0}^{2/3}} \sqrt{\frac{30(1 - \mu^2)^2 (2 \cdot Ra \cdot W_z \cdot H_{\max})^{1/3}}{S_m \cdot E}}, \quad (1)$$

$$\lambda = \left(\frac{\sigma_b - \sigma_o}{\sigma_a} \right)^{t_y}, \quad (2)$$

где n – число циклов до разрушения материала при резании; tm – относительная длина опорной линии профиля шероховатости на уровне средней линии; $H_{\mu 0}$ – микротвердость поверхностного слоя; μ – коэффициент Пуассона; Ra – среднее арифметическое отклонение профиля; W_z – средняя высота волн; H_{\max} – максимальная величина макроотклонений; S_m – средний шаг неровностей профиля; E – приведенный модуль упругости; σ_a – действующее значение амплитудного напряжения в поверхностном слое. Данные параметры – это параметры качества равновесного состояния поверхностного слоя при установившемся нормальном изнашивании.

Таким образом, если в технологическом процессе обработки поверхности трения предусмотреть последнюю финишную операцию, обеспечивающую параметры качества поверхностного слоя, соответствующие установившемуся изнашиванию, то процесс приработки будет переведен в технологию

(см. рис. 1, линия 2). Этот процесс будет называться триботехнологией. Это значительно повысит долговечность поверхностей трения.

Рассмотрим конкретные примеры создания наукоемких триботехнологий. При трении цилиндрических поверхностей – наружных или внутренних, при небольших нагрузках процесс приработки происходит за счет износа вершин микронеровностей пока не сформируется фактическая площадь контакта A_{ϕ} , выдерживающая приложенную нагрузку:

$$A_{\phi} = \frac{\Pi}{C \sqrt{\sigma^2 + \alpha \tau^2}},$$

где Π – нагрузка; C – коэффициент стеснения; σ – нормальное напряжение; α – коэффициент линейного расширения; τ – касательные напряжения.

Профилограмма такой поверхности трения после приработки представлена на рис. 2.



Рис. 2. Профилограмма профиля шероховатости после приработки поверхности трения

Fig. 2. Profilogram of the roughness profile after running-in of the friction surface

Такой профиль может быть получен с использованием триботехнологии. В данном случае – плосковершинным хонингованием

внутренних поверхностей трения или плосковершинным полированием наружных поверхностей трения (рис. 3).



Рис. 3. Профилограмма профиля шероховатости поверхности трения, полученная плосковершинным полированием

Fig. 3. Profilogram of the roughness profile of the friction surface obtained by flat-top polishing

При больших нагрузках на поверхности трения значительное влияние на износ оказывают макроотклонения контактирующих деталей.

Следующим примером создания триботехнологии является окончательная обработка цилиндрических роликов роликоподшипников. В соответствии с теорией контактного взаимодействия жесткого штампа с упругим пространством давление вдоль оси ролика распределяется в соответствии с рис. 4, т.е. со значительным его критическим увеличением по краям ролика [4]. Это приводит к существенному износу на краях ролика, а в некоторых случаях к их разрушению.

Был разработан наукоемкий триботехнологический метод чистовой обработки роликов – чистовое шлифование бесконечными упругими лентами определенной ширины и с усилием натяжения.

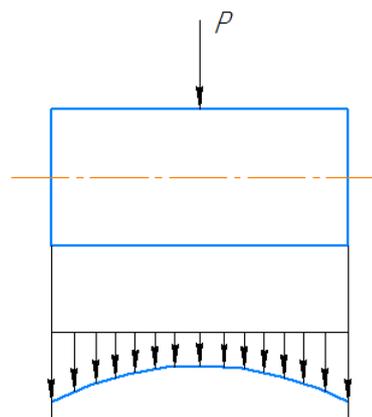


Рис. 4. Распределение давления вдоль оси ролика при цилиндрической его форме

Fig. 4. Pressure distribution along the axis of the roller with its cylindrical shape

Процесс формирования бочкообразной формы ролика бесконечными лентами приведен на рис. 5.

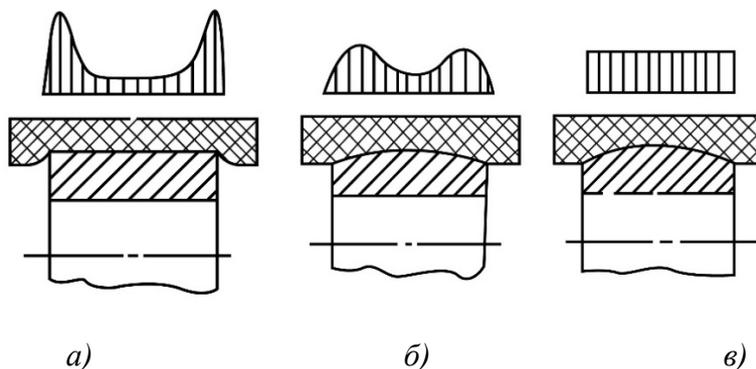


Рис. 5. Процесс формирования бочкообразной формы ролика бесконечными лентами:

a – в начале обработки; *б* – после образования закруглений; *в* – после образования оптимальной бочкообразной формы

Fig. 5. The process of forming a barrel-shaped roller with closed loop belts:

a – at the beginning of processing; *b* – after the formation of curves; *c* – after the formation of the optimal barrel shape

Данный процесс позволяет сформировать бочкообразную форму ролика, обеспечивающую равномерное распределение давления

по его длине (рис. 6), а, следовательно, повысить их долговечность.

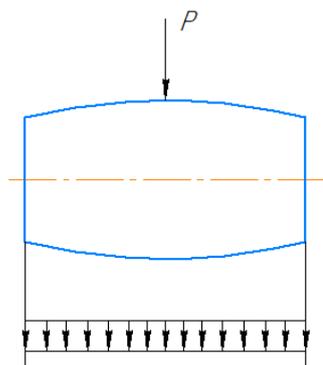


Рис. 6. Распределение давления вдоль оси ролика бочкообразной формы, полученной шлифованием бесконечной лентой

Fig. 6. Pressure distribution along the axis of a barrel-shaped roller obtained by polishing with closed loop belts

Следующим примером создания наукоемкой триботехнологии является ремонт рабочей поверхности катания рельса железных дорог в пути. Особенно это актуально для высокоскоростных железных дорог. В процессе приработки, в зависимости от расположения рельсов на прямолинейном или криволинейном участках, в результате перераспределения давления происходит неравномерный износ его поперечного профиля. На криволинейных участках износ увеличивается к боковым сторонам рельса. При ремонте шлифованием рабочих поверхностей рельсов его поперечный профиль возвращается к исходному на прямолинейных (рис. 7, кривая 2) и криволинейных участках (рис. 7, кривая 3) на всем пути. По существующей технологии ремонта полотна

высокоскоростных железных дорог рельсошлифовальными комплексами поперечный профиль рельсов на всем протяжении его пути (криволинейных и прямолинейных участков) возвращается к исходному его профилю (рис. 7, кривая 4). Это приводит к необходимости снятия большого припуска z_1 . Снятие такого припуска осуществляется за несколько (2 – 3) рабочих ходов при скорости движения рельсошлифовального комплекса 8...10 км/ч.

Для устранения этих недостатков был создан наукоемкий триботехнологический процесс ремонта рабочих поверхностей катания рельсов железнодорожных путей. Этот процесс включает в себя: операцию встречное иглофрезерование для снятия поверхностного дефектного слоя с микротрещинами, операцию шлифования осциллирующими брусками или чашечными шлифовальными кругами для снятия поперечной волнистости и операцию лепесткового шлифования для обеспечения оптимальной шероховатости рабочей поверхности рельса. Все эти операции объединены в одном рельсообрабатывающем комплексе.

При этом технологическом процессе сохраняется сформировавшийся поперечный профиль рельса в процессе приработки (рис. 7, кривая 5). Данный триботехнологический процесс ремонта рабочей поверхности катания рельсов железных дорог в пути позволяет уменьшить снимаемый припуск, а, следовательно, значительно увеличить производительность ремонта и долговечность рельсов за счет возможности неоднократного их ремонта.

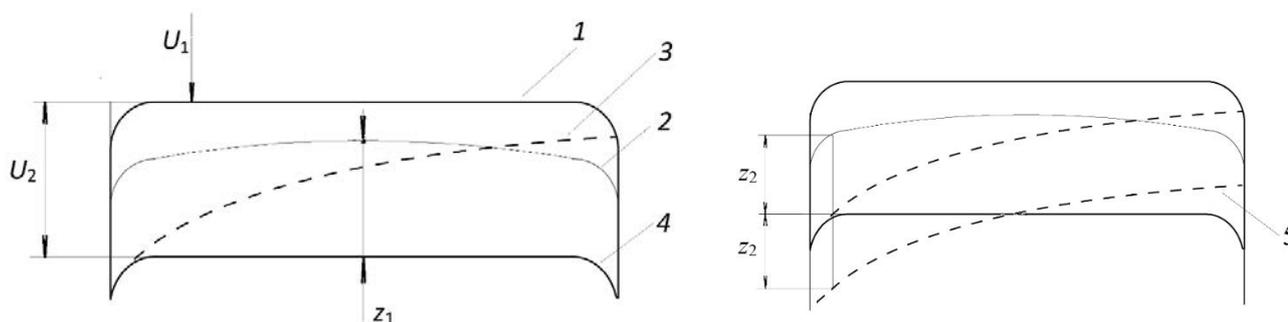


Рис. 7. Поперечные профили рабочей поверхности рельсов железных дорог:

1 – при изготовлении; 2 – износе на прямолинейном участке; 3 – износе на криволинейном участке; 4 – ремонте по существующей технологии; 5 – ремонте с использованием рельсообрабатывающего комплекса для реализации триботехнологического процесса

Fig. 7. Transverse profiles of rails working surfaces:

1 – during manufacture; 2 – wear on a straight section; 3 – wear on a curved section; 4 – repair using existing technology; 5 – repair using a railworking complex to implement a tribotechnological process

В качестве следующего примера рассмотрим создание наукоемкой триботехнологии обработки поверхности катания железнодорожных колес [5]. Технологическое обеспечение износостойкости криволинейных поверхностей трения, к которым относится профиль поверхности катания железнодорожных колес, возможно за счет обеспечения закономерно изменяющегося качества поверхностного слоя вдоль образующей поверхности трения, в частности закономерно изменяющейся микротвердости.

Широкими возможностями в этом отношении обладает импульсная электромеханическая обработка (ИЭМО). Закономерное изменение силы тока при электромеханическом упрочнении по импульсной схеме, теоретически рассчитанное и технологически обеспечиваемое на специальной установке, позволяет избежать отслаивания упрочненного слоя при эксплуатации, добиться минимального и равномерного износа вдоль образующих криволинейных поверхностей трения с сохранением их первоначальной геометрической формы.

В частности, повышение долговечности поверхности катания железнодорожных колес возможно за счет обеспечения определенного закона изменения износостойкости отдельных их участков. Для железнодорожных колес долговечность часто определяется стабильностью изнашивания профиля колеса вдоль образующей поверхности трения.

Неравномерность распределения рабочих давлений и скоростей на поверхности трения приводит к неравномерному износу. Для достижения равномерного и минимального износа необходимо технологически обеспечить закономерно изменяющееся качество поверхностного слоя поперечного профиля, при котором скорость изнашивания вдоль профиля будет постоянной.

Управлять качеством поверхностного слоя возможно при автоматизации электромеханической обработки как наиболее дешевым и перспективным методом упрочнения.

Для решения поставленной задачи был реализован следующий алгоритм исследований:

- а) рассчитана математическая модель профиля железнодорожного колеса;
- б) установлен закон изменения качества поверхности качения и гребня железнодорожного колеса, обеспечивающий равномерную скорость изнашивания различных участков

профиля в соответствии с математической моделью профиля железнодорожного колеса;

в) так как закон (б) справедлив для постоянно трущихся поверхностей, была принята зависимость контактирования участков профиля колеса во времени;

г) рассчитан коэффициент упрочнения в соответствии с алгоритмом (в), и в целях избежания резких перепадов применена сплайн-интерполяция;

д) рассчитана требуемая поверхностная микротвердость профиля колеса;

е) получена зависимость плотности тока при ЭМО для технологии изготовления и ремонта железнодорожных колес. Соответствующие расчетные графики приведены на рис. 8.

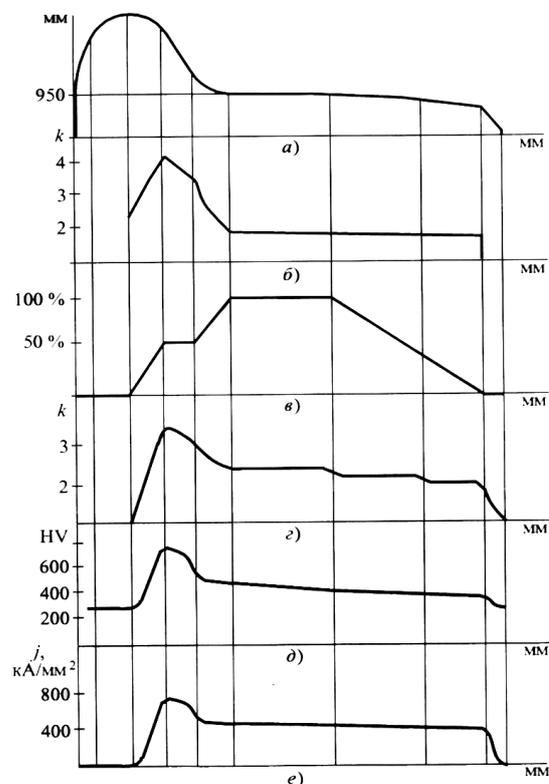


Рис. 8. Расчетные графики:

а – профиль железнодорожного колеса; б – расчетный коэффициент упрочнения ($HV_{исх} = 260$); в – контактирование профиля во времени; г – сплайн-интерполяция k с учетом контактирования во времени; д – микротвердость ж/д колеса по профилю; е – зависимость плотности тока при ЭМО вдоль профиля ж/д колеса

Fig. 8. Calculation graphs:

а – the profile of the railroad wheel; б – the calculated hardening coefficient ($HV_{prim} = 260$); в – the profile contacting over time; г – the spline interpolation of k taking into account the contacting over time; д – the microhardness of the railway wheel along the profile; е – the dependence of the current density at EMO along the profile of the railroad wheel

Для технологического обеспечения требуемого качества поверхностного слоя на промышленных предприятиях целесообразно использовать одну из разработанных в Брянской научной технологической школе автоматизированных установок для электромеханической обработки (рис. 9).

Установка с управляемым источником питания на переменном токе промышленной частоты предназначена для реализации процесса ЭМО рабочих поверхностей деталей машин с целью обеспечения и повышения их эксплуатационных показателей.

Применение переменного тока промышленной частоты по импульсной схеме на данной установке (от управляемого источника питания) обеспечивает большую глубину упрочнения (до 2 мм), высокую микротвердость упрочненного слоя (до 1000 HV), шероховатость поверхности (без отделочной обработки) в пределах $Ra = 0,8 \dots 3,2$ мкм.



Рис. 9. Схема обработки железнодорожных колес

Fig. 9. The scheme of railroad wheel processing

Отделочная обработка производится, когда не требуется большая глубина упрочнения (до 0,3 мм), а необходимо значительное уменьшение значений параметров исходной шероховатости (для Ra в 4 – 10 раз).

Применение переменного тока по импульсной схеме обеспечивает плавный переход твердости от поверхности к сердцевине, большую глубину упрочнения и высокую микротвердость упрочненного слоя.

Применяется технологическая оснастка,

состоящая из двухроликовой головки, закрепляемой в резцедержателе, и средств коммутации, что позволяет использовать технологию ЭМО мобильно в совокупности с любым токарным станком.

Таким образом, достигается равномерный и минимальный износ профиля железнодорожного колеса за счет электромеханического упрочнения с изменяющейся силой тока в процессе обработки, от которой в свою очередь зависит степень и глубина упрочнения. Это позволяет дольше сохранять профиль колеса в процессе эксплуатации, что ведет к увеличению срока службы в 1,3 – 1,5 раза.

Заключение

Научные исследования, практика и статистика 1960 – 2000 гг. показали, что надежность изделий машиностроения на 70 % определяется износом поверхностей трения [6]. Это говорит о необходимости повышения износостойкости поверхностей трения. В статье на конкретных примерах показано, что такую проблему частично можно решать технологически, создавая и развивая предложенное направление наукоемких триботехнологий. Авторы предлагают аспирантам и молодым кандидатам наук, технологам и трибологам подключиться к развитию и реализации на практике данного научного направления.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Наукоемкие** технологии в машиностроении / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. 528 с.
2. **Крагельский И.В.** Трение и износ. М.: Машиностроение, 1966. 480 с.
3. **Суслов А.Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
4. **Штайрман И.Я.** Контактная задача теории упругости. М: Гостехиздат, 1949. 272с.
5. **Фундаментальные** основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / под ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2022. 552 с.

6. Проников А.С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 590 с.

REFERENCES

1. Science-intensive technologies in mechanical engineering / A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Bezylazny et al.; edited by A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2012. 528 p.

2. Kragelsky I.V. Friction and wear. Moscow: Mashinostroenie, 1966. 480 p.

3. Suslov A.G. The quality of the surface layer of machine parts. Moscow: Mashinostroenie, 2000. 320 p.

4. Shtaerman I.Ya. Contact problem of the theory of elasticity. Moscow: Gostekhizdat, 1949. 272p.

5. Fundamental principles of technological support and reliability improvement of machine-building products / ed. by A.G. Suslov. Moscow: Innovative engineering, 2022. 552 p.

6. Pronikov A.S. Reliability of machines. Moscow: Mashinostroenie, 1978. 590 p.

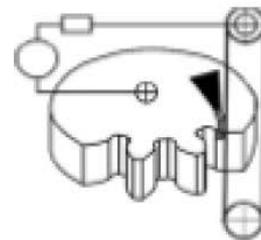
Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 04.03.2025; одобрена после рецензирования 28.04.2025; принята к публикации 12.05.2025.

The article was submitted 04.03.2025; approved after reviewing 26.10.2024; assepted for publication 12.05.2025.





Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 6 (168). С. 11-18.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 6 (168). P. 11-18.

Научная статья
УДК 621.9.047; 621.9.048
doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-11-18

Обеспечение качества продукции авиационно-космического машиностроения на этапах отработки технологичности изделий

Владислав Павлович Смоленцев¹, д.т.н.

Сергей Владимирович Сафонов², д.т.н.

Евгений Владиславович Смоленцев³, д.т.н.

^{1, 2, 3} Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

¹ vsmolen@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² SWsafonoff@gmail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ smolentsev.rabota@gmail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Представлены разработки путей достижения требуемого качества перспективных изделий применительно к специфичной продукции авиационно-космической отрасли машиностроения. Предложен новый механизм выбора согласованных в процессе отработки технологичности приемов для стабильного получения наукоемких объектов требуемого качества за счет разработки комбинированного управляемого технологического воздействия на детали с учетом условий их эксплуатации. В качестве основного критерия для построения методологии обоснованного выбора технологических режимов при создании перспективных методов обработки, включающих сочетание различных способов воздействий на объект, принят принцип полезности, который позволяет произвести дискретную оценку уровня производственной технологичности. Показано использование в качестве граничного условия при моделировании процессов обработки величины научно обоснованных трудовых и финансовых затрат рассматриваемого метода для обеспечения эксплуатационных показателей создаваемых и модернизируемых наукоемких изделий на этапах освоения серийной продукции машиностроения, параметры которых согласованы с заказчиком и обоснованы разработчиком изделия на стадии отработки его технологичности. Предложены новые, на уровне изобретений, технологические способы и устройства, обеспечивающие высокую эффективность создания изделий новых поколений на примерах авиационно-космической техники с требуемыми эксплуатационными показателями. Создана доказательная база для технологических служб машиностроительных предприятий, обеспечивающая согласование достигнутых эксплуатационных показателей изделий с требованиями заказчика и подтвержденными в процессе отработки технологичности продукции на этапах ее создания, совершенствования в ходе отладки, запуска в серийное производство и при эксплуатации.

Ключевые слова: рабочая среда, комбинированные методы обработки, производственная технологичность, этапы отработки показателей качества, отраслевое машиностроение

Для цитирования: Смоленцев В.П., Сафонов С.В., Смоленцев Е.В. Обеспечение качества продукции авиационно-космического машиностроения на этапах отработки технологичности изделий // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 6 (168). С. 11–18. doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-11-18

Quality assurance of aerospace engineering products at the stages of products performance development test

Vladislav P. Smolentsev¹, D. Eng.

Sergey V. Safonov², D. Eng.

Evgeny V. Smolentsev³, D. Eng.

^{1, 2, 3} Voronezh Flagship State Technical University, Voronezh, Russia

¹ vsmolen @inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² SWsafonoff@gmail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ smolentsev.rabota@gmail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Abstract. The paper presents the development of ways to achieve the required quality of promising products in relation to specific products of the aerospace engineering industry. A new selection mechanism for techniques agreed upon in the process of testing the performance for the stable production of high-tech objects of the required quality through the development of a combined controlled technological effect on parts, taking into account their in-service environment. The utility principle has been adopted as the main criterion for a methodology aimed at reasonable selection of technological modes when creating promising handling technique with a combination of various routes of exposure, which allows for a discrete assessment of industrial performance level. It is shown that the value of scientifically justified labor and financial costs of the considered method is used as a boundary condition in modeling processing operations to ensure the performance of high-tech products being created and upgraded at the stages of mechanical engineering mass production, the parameters of which are agreed with the customer and justified by the product developer at the stages of products performance development test. New technological methods and devices are proposed that ensure high efficiency in creating new-generation products using examples of aerospace technology with the required performance. New technological methods and devices at the stage of invention are proposed. They ensure high efficiency in creating new-generation products using examples of aerospace technology with the required performance. An evidence base has been created for the technological services of machine-building enterprises, ensuring that the achieved performance indicators of products are consistent with customer requirements and are confirmed in the process of products performance development test at the stages of their creation, improvement during debugging, mass production and operation.

Keywords: working environment, combined handling technique, production adaptability, testing quality indicators stages, industrial engineering

For citation: Smolentsev V.P., Safonov S.V., Smolentsev E.V. Quality assurance of aerospace engineering products at the stages of products performance development test / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 6 (168). P. 11–18. doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-11-18

Введение

Отработка технологичности конструкции – это непрерывный процесс оценки качества и совершенствования изделий на всех этапах их создания: освоения, запуска в серийное производство, выпуска, эксплуатации, обслуживания, ремонта и восстановления ремонтоспособности, утилизации продукции [1 – 3]. Технологичность включает обеспечение заданных и требуемых эксплуатационных показателей качества при минимизации сроков их выполнения на этапах проектирования [4] и затрат на выпуск, а также другие этапы ее отработки, формирующее содержание производственной технологичности [5 – 7].

Процесс отработки технологичности при создании наукоемких изделий

Прежде чем освоить и запустить в производство новое, более совершенное изделие, необходимо пройти этап отработки технологичности, на котором технологам требуется согласовать вопросы обеспечения эксплуатационных показателей, заявленных заказчиком (в общем случае – государственными корпорациями), детализированных разработчиком (чаще опытными конструкторскими бюро) и предназначенных для реализации мероприятий изготовителем после отработки производственной технологичности [4]. Для достижения согласия между ними технологическими службами предприятия используется доказательная система, которая определяет возможность,

целесообразность и эффективность изготовления предлагаемых разработчиком объектов, обеспечивающих получение изделия с заданными заказчиком эксплуатационными характеристиками, либо показывает необходимость получения новых комбинированных методов обработки, которые могут вызывать совершенствование эксплуатационных показателей, но обычно связаны с увеличением времени на получение таких методов и требуют дополнительных ограничений по финансированию на их создание и дальнейшее использование.

Требуется аргументированный ответ на вопрос о том, какие эксплуатационные показатели изделий в рассматриваемом случае можно реально оценить по уровню технологичности и обеспечить их величину при современном производстве путем использования и создания новых технологических решений, определяющих и развивающих базовые показатели в изделии и обеспечивающих возрастание его качества в целом.

В отечественном машиностроении существует обширный банк информации о комбинированных методах обработки различных материалов, используемых в ракетных и авиационных двигателях. В их числе разработки научных коллективов Воронежской школы технологов, приоритет которых защищен сотнями изобретений, часть которых признана в развитых зарубежных странах [2, 5].

При создании нового наукоемкого изделия может оказаться, что базовых объектов для сравнения объектов пока не существует даже в виде моделей. Тогда при отработке производственной технологичности требуется изучить прошлый мировой опыт выпуска аналогичной продукции, попытаться выявить опытные образцы подобных изделий у заказчика и разработчика, получить результаты их испытаний на стендах и макетах, учесть и проанализировать опыт использования продукции на всех этапах отработки технологичности. Такой материал дает возможность создать доказательную базу для формирования эффективной системы отработки производственной технологичности путем динамического совершенствования и выпуска изделий с требуемыми эксплуатационными показателями [3, 7].

Для качественного отбора возможных технологических способов изготовления ресурсопределяющих деталей в работе [4] был предложен новый критерий – «принцип

полезности», в котором учитывается возможность использования известных и создаваемых способов для повышения эксплуатационных показателей изделия желательно не ниже уровня, требуемого заказчиком. Так сразу сужается область поиска необходимых способов, но для выбора лучшего варианта, его адаптации к изделию, обоснования необходимости доработки или разработки нового, как правило, комбинированного способа совершенствования поверхностного слоя материала требуется критериальная оценка возможностей технологических способов по их потенциалу улучшения эксплуатационных показателей изделия.

В этом направлении ранее проводились исследования рядом ученых страны, например, Суловым А.Г. [5, 7], Михайловым А.Н., но они остановились на начале критериального анализа традиционных технологических процессов, где технолог может обеспечивать получение улучшенных технологических показателей в процессе обработки поверхности, но не может связать выбранный или разработанный технологический способ и его режимы с эксплуатационными показателями, запрашиваемыми заказчиком и разработчиком, т.к. они имеют различную размерность оценочных показателей.

В работах [1, 4] для реализации процесса отработки технологичности были использованы неравенства алгебры Буля, которые позволяют создать критериальные оценки между технологическими показателями комбинированного процесса воздействия на объект и эксплуатационными показателями изделия с таким же назначением. Для достижения требуемого уровня эксплуатационных показателей может понадобиться последовательное или одновременное воздействие нескольких конструкторских или технологических способов, которые могут, в конце концов, обеспечить нужный эксплуатационный показатель. При этом следует учесть такие факторы, как обоснование выбора, адаптации или разработки нового комбинированного способа, так и ограничения, снижающие эффективность мероприятия при отработке технологичности. Это могут быть недопустимо длительные сроки адаптации к изделию или разработки нового технологического способа, а также затраты на мероприятие, выходящие за рамки средств, выделенных на освоение и запуск в производство нового изделия. Предложенная в

[4, 6] критериальная система позволяет получить обобщенные показатели полезности, обеспечивающие требуемый эксплуатационный уровень при минимальном показателе отрицательного влияния на ограничения выбранного или создаваемого комбинированного способа обработки.

Механизм управления качеством создаваемой продукции на этапах отработки производственной технологичности

Описание механизма выполняется с использованием критериев, отражающих уровень полезности при выполнении операций по сравнению показателей технологичности различных возможных вариантов создания и применения продукции. Их можно характеризовать показателями $\Pi_{p1}, \Pi_{p2}, \dots, \Pi_{pn}$, заданными заказчиком и полученными разработчиками изделий (4). с учетом ограничений и перспектив их использования.

Для критериальной оценки уровня полезности введены следующие обозначения: $\Pi_{p1}, \Pi_{p2}, \dots, \Pi_{pn}$ – показатели заданных заказчиком, полученных создателем в текущее время эксплуатационных характеристик $\Pi_{o1}, \Pi_{o2}, \dots, \Pi_{on}$. $\Pi_{d1}, \Pi_{d2}, \dots, \Pi_{dn}$ – показатели перспективного изделия, зависящие от технологических, качественных показателей и других характеристик вариантов сравнения при оценке технологичности: $K_{o1}, K_{o2}, \dots, K_{on}$; $K_{d1}, K_{d2}, \dots, K_{dn}$ – величины критериев полезности технологических воздействия на достигнутые и перспективные эксплуатационные показатели сравниваемых вариантов, где $\vec{K}_1, \vec{K}_2, \dots, \vec{K}_m$ показывают возможность повышения требуемых характеристик, а остальные – динамику уменьшения или устранения нежелательных факторов

$$\vec{K}_1, \vec{K}_2, \dots, \vec{K}_m \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\vec{K}'_1, \vec{K}'_2, \dots, \vec{K}'_m \rightarrow \min. \quad (2)$$

В обобщенном виде критерий полезности при оценке технологичности имеет вид:

$$\begin{aligned} \vec{K}_{o1} \Pi_{o1} &\geq \Pi_{p1}, \\ \vec{K}_{o2} \Pi_{o2} &\geq \Pi_{p2}, \\ &\dots\dots\dots \\ \vec{K}_{om} \Pi_{on} &\geq \Pi_{pn}. \end{aligned} \quad (3)$$

При использовании критериев учтено как положительное влияние технологических решений (1), так и нежелательное или недопустимое изменение технико-экономических показателей (2). При использовании комбинированных технологических процессов необходимо учитывать взаимное воздействие факторов $\vec{K}_1, \vec{K}_2, \dots, \vec{K}_n, \vec{K}'_n$ при выполнении граничных условий (3).

Если $\Pi_{di} \geq \Pi_{pi}$, то для «i» технологического воздействия принимается $\Pi_{pi} = \Pi_{di}$ и согласовывается с разработчиком возможность снижения заданных эксплуатационных показателей до уровня Π_{di} . Здесь может быть несколько вариантов: согласиться с использованием технологических воздействий достигнутого уровня; предоставить технологам время на разработку новых методов и средств для совершенствования возможного варианта обработки и достижения или превышения первоначально заданного уровня эксплуатационных показателей изделий; использовать комбинированные технологии, учитывающие при одновременном воздействии на показатели варианта нескольких способов, которые способны эффективно воздействовать на положительные показатели рассматриваемых видов обработки.

Раскрытие механизма управления качеством путем оценки значимости принципа полезности в процессе отработки производственной и общей технологичности позволяет моделировать последовательность действий и разработать цифровые технологии, интенсифицирующие автоматизацию производства с использованием комбинированных методов обработки. В создаваемых моделях в качестве начальных условий используют: достоверную исходную цифровую базу, охватывающую предшествующий период жизненного цикла изделий; реальность создания новых технологических воздействий, известных хотя бы на уровне патентов на способы и устройства; параметры ограничений по срокам освоения новой продукции; ориентировочные затраты на выполнение экспериментальных исследований при запуске изделий в серийное производство и специфичные требования заказчика, отражающие отраслевые условия эксплуатации изделий. Полученные и проанализированные сведения позволяют на базе моделей, использующих принцип полезности и булевы переменные [1, 4], провести выбор приоритетов для

применения или создания новых технологических приемов с учетом ограничений технического, экономического плана и доступности средств технологического оснащения в условиях международных санкций. Устанавливаются и обосновываются связи между технологическими показателями комбинированных способов, ресурсные характеристики создаваемых или модернизируемых изделий с учетом всего цикла эксплуатации и утилизации объектов.

При выборе граничных условий на этапе изучения процесса на моделях, кроме вышеназванных показателей, требуется расширить область поиска вариантов. Например, по использованию резервов смежных предприятий, степени защищенности собственных изобретений, допустимые затраты на охрану труда и экологию.

На основе принятых в модели критериев выполняется многокритериальная оптимизация выбора вариантов с булевыми переменными [4]. Результат (R) расчетов по модели при синтезе технологических воздействий (U) выражается зависимостью:

$$R \subset \otimes U_n, n \in P_p, \quad (4)$$

где \otimes – декартово произведение; $i = 0$, P_{pi} – множество возможных технологий внешнего воздействия для конкретного изделия; P_p – заданный разработчиком параметр изделия U , где определяющее влияние на результат оказывает показатель полезности i -го воздействия P_{pi} .

Реализация процесса отработки технологичности при создании и модернизации наукоемких изделий машиностроения

Отработка технологичности является обязательной стадией работы технолога при изготовлении любой продукции. Но особое внимание уделяется такому вопросу в авиакосмической отрасли, где качество изделий постоянно совершенствуется по результатам качественной и количественной оценки общей технологичности и, в частности, производственной, достаточно полно раскрытой в [1, 4].

Исследования выполнялись как на создаваемой, так и универсальной технологической оснастке. На примере технологической оснастки для комбинированной размерной обработки реактивных и ракетных двигателей показаны пути последовательного использования мероприятий по отработке технологичности и совершенствования проточной части подачи топлива в горячей зоне изделия, приведенного на рис. 1.



Рис. 1. Система подачи топлива ракетного двигателя

Fig. 1. The fuel supply system through the nozzles of the rocket engine firing disc

На разрезе детали (рис. 1) показаны каналы для подвода охлаждающего топлива к форсункам (рис. 2), изготовление которых выполняется комбинированным эрозионно-химическим способом в среде, изменяющей агрегатное состояние от жидкого до парообразного [8]. Форсунки, рекомендованные для установки на изделие после отработки технологичности, выполняются в основном из нержавеющей стали и изготовление в них каналов традиционными методами механической обработки в большинстве случаев оказывается не технологичным или неосуществимым из-за ограничений для подвода металлорежущего инструмента. В рассматриваемом случае целесообразно применять комбинированные методы прошивки каналов, обеспечивающие получение проточной части с различными сечениями. Часть операций по изготовлению деталей на рис. 2. может выполняться по аддитивным технологиям, предложенными авторами путем наращивания порошкового металла. Здесь для очистки полученных отверстий может эффективно использоваться комбинированная обработка по патенту [9].

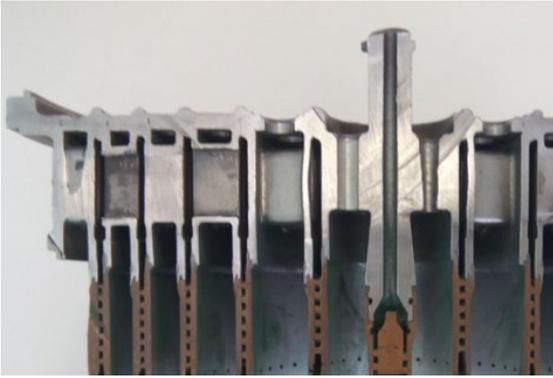


Рис. 2. Разрезы типовых форсунок

Fig. 2. Sections of typical injectors

Этот метод позволил создать в форсунках каналы с переменным по длине профилем, в том числе с формой сопла Лавалья, приведенного на рис. 3.



Рис. 3. Образец из жаропрочного материала, имеющий профиль отверстия с переменным сечением

Fig. 3. A sample made of heat-resistant material having a hole profile with a variable cross-section

Сечение канала может быть не только круглым, но и овальным, эллиптическим, многогранным. Его профиль формируется с помощью расчетов на ЭВМ, отрабатывается экспериментально на стадии внедрения по предложенной модели обоснования технологичности конструкций и выбора способа обработки каналов. В работах [1, 3, 4] указывается, что современные технологии позволяют за счет совершенствования геометрии проточной части систем подачи топлива значительно повысить эксплуатационные показатели жидкостных двигателей новых поколений.

На базе созданного нового способа и устройства [8] для подачи дозированной технологической среды по предложенному патенту получена возможность оценить эффективность влияния каждого этапа отработки производственной технологичности на повышение до требуемого или желаемого уровня качества изделий, а также достичь увеличения сроков работоспособности оснастки практически без роста себестоимости, изменения трудоемкости операции, которые могут выступать в виде ограничений при использовании способов [8, 9].

Основным узлом ракетного двигателя является турбонасосный агрегат, определяющий срок ресурса изделия (рис. 4).



Рис. 4. Рабочий диск турбонасосного агрегата

Fig. 4. The turbopump unit work disk

При создании агрегатов, приведенных на рис. 4. был проведен комплекс оценочных расчетов с использованием принципа полезности по предложенной в работе методике выполнены экспериментальные работы, на базе которых проведены мероприятия по повышению показателя технологичности на этапе проектирования изделия разработчиком (например, использование новых жаропрочных, стойких к воздействию окислителей материалов и др.), использованы для формирования межлопаточных каналов новые комбинированные методы обработки с наложением электрического поля.

Процесс уже освоен в имеющихся изделиях и был принят заказчиком за достоверный базовый показатель, обеспечивающий гарантированный одноразовый срок работоспособности изделия в течение 80 с. Однако в

перспективных аналогичных изделиях этот срок постоянно требует увеличения: сначала до 119 с., затем до 240 и 500 с., а с возникновением необходимости многократного использования двигателей ракетной техники он может достигать 800 с. Начиная с ресурса в 120 с., понадобилось создание новых комбинированных способов нанесения на лопатки термозащитных покрытий: сначала это было алитирование, потом нанесение карбида титана, далее использование способа по изобретению [10] для комбинированного эрозионно-плазменного нанесения тугоплавких многослойных покрытий. Далее в отрасли было освоено запатентованное многослойное ионно-плазменное покрытие керамическими материалами. Использование предлагаемых новых способов в создаваемых двигателях нового поколения космических систем подтверждено актами внедрения. Этот способ также используется в турбостроении, станкостроении и в других отраслях машиностроения.

В современных изделиях авиационно-ракетной техники используются однослойные и многослойные охлаждаемые лопатки, приведенные на рис. 5.



Рис. 5. Охлаждаемая металлическая лопатка с продольными и радиальными каналами

Fig. 5. Cooled metal blade with longitudinal and radial channels

Лопатка с внутренним каркасом для направления охлаждающей среды через отверстия малого сечения с различным профилем и наклоном оси показана на рис. 5. При обработке производственной технологичности были использованы сведения, полученные на

моделях цифровыми методами, что дало возможность в укороченные сроки создать, изготовить комбинированными методами и запустить в серийное производство облегченные конструкции с высокими эксплуатационными характеристиками.

Заключение

Сформирован новый подход к обоснованию применения известных и созданию новых технологий комбинированной обработки с наложением электрического поля для выбора технологических приемов, наиболее полно и эффективно обеспечивающих получение наукоемких изделий с требуемыми эксплуатационными характеристиками. В основу выбора приемов положен принцип полезности, реализуемый через критериальную оценку технологических воздействий, что в настоящее время решает крупную научную проблему по совершенствованию качества и эксплуатационных показателей создаваемых отечественных изделий новых поколений конкурентоспособной техники. Создана научно обоснованная доказательная база изготовителя для согласования при отработке технологичности возможности достижения требуемых эксплуатационных показателей. Разработаны новые способы и устройства для реализации технологий модификации и придания нужных параметров поверхностным слоям металлических изделий, отвечающих требованиям разработчиков. Для этого предложены новые принципы, критерии и разработана методология разработки комбинированных технологических процессов, синтезирующих полезные воздействия, снижающих уровень или устраняющих негативные факторы и обеспечивающих достижение заданных или возможных эксплуатационных показателей осваиваемых изделий.

Сформирован новый подход к применению известных и проектированию новых технологий, наиболее полно обеспечивающих получение отраслевых и общетехнических наукоемких изделий с высокими эксплуатационными характеристиками, в основу которого положен принцип полезности, реализуемый через синтез технологических воздействий, что решает крупную научную проблему по совершенствованию качества и эксплуатационных

показателей создаваемых изделий новых поколений конкурентоспособной техники.

Разработаны перспективные способы и устройства для реализации технологий модификации и придания нужных эксплуатационных параметров требуемой продукции, отвечающих требованиям разработчиков. Для этого предложены принципы, критерии и разработана методология автоматизированного выбора приоритетного эксплуатационного показателя и построения адаптивного технологического процесса, синтезирующего полезные воздействия и значительно снижающего действие негативных факторов, что позволяет уменьшить зависимость отрасли от импортных поставок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Бондарь А.В.** Качество и надежность. М.: Машиностроение, 2007. 326 с.
2. **Смоленцев В.П., Часовских А.И.** Отработка конструкций электрохимического оборудования на технологичность // Проектирование технологических машин: сб. научн. тр. М.: СТАНКИН, 1997. С. 77–82.
3. **Смоленцев Е.В.** Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М.: Машиностроение, 2005. 511 с.
4. **Сафонов С.В.** Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик изделий // Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2015. 232 с.
5. **Справочник технолога** / Под общей ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
6. **Смоленцев В.П., Мельников В.П., Сиргладзе А.Г.** Управление системами и процессами. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 336 с.
7. **Суслов А.Г., Федонин О.Н., Медведев Д.М.** Проектирование функционально ориентированных технологических процессов // Вестник машиностроения, 2019. № 9. С. 66–91.
8. **Патент на изобретение 2396153.** (РФ). В23Н. Заявка № 2008120420 от 22.05.2008. Способ

электроэрозионного восстановления детали из стали или чугуна / В.П. Смоленцев и др.

9. **Патент на изобретение 2516523.** (РФ). В08В. Заявка № 2011148556 от 29.11.2011. Способ очистки изделий от загрязнений / В.П. Смоленцев и др.

10. **Патент на изобретение 2333822.** (РФ). В23Н. Заявка № 2006140558 от 16.11.2000. Способ получения многослойного покрытия на восстанавливаемой стальной или чугунной детали / В.П. Смоленцев и др.

REFERENCES

1. Bondar A.V. Quality and reliability. Moscow: Mashinostroenie, 2007. 326 p.
2. Smolentsev V.P., Chasovskikh A.I. Testing the designs of electrochemical equipment for manufacturability // Designing technological machines: proceedings. Moscow: STANKIN, 1997. pp.77–82
3. Smolentsev E.V. Design of electrical and combined processing methods. Moscow: Mashinostroenie, 2005. 511 p.
4. Safonov S.V. Technological support of operational characteristics of products // Voronezh: VSU Publishing House, 2015. 232 p.
5. Technologist's Reference Book / under the general editorship of A.G. Suslov. Moscow: Innovation Mechanical Engineering, 2019. 800 p.
6. Smolentsev V.P., Melnikov V.P., Skhirtladze A.G. Management of systems and processes. Moscow: Publishing Center "Academy", 2010. 336 p.
7. Suslov A.G., Fedonin O.N., Medvedev D.M. Designing of functionally oriented technological processes // Bulletin of Mechanical Engineering, 2019. No. 9. pp. 66–91
8. Patent 2396153. (RF). B23N. A method of electroerosion restoration of a part made of steel or cast iron. Authors: V.P. Smolentsev et al. Application 2008120420 dated 05/22/2008, publ. 08/10/2010, bul. No. 22.
9. Patent 2516523. (RF). IN08B. The method of cleaning products from contamination. Authors: V.P. Smolentsev et al. Application 2011148556 dated 11/29/2011, publ. 05/20/2014, Bul. no. 14.
10. Patent 2333822 (Russian Federation). B23N. A method for obtaining a multilayer coating on a recoverable steel or cast iron part. Authors: V.P. Smolentsev et al. Application 2006140558 dated 11/16/2000, publ. 10.01.2001, bul. No. 1.

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 22.02.2025; одобрена после рецензирования 06.03.2025; принята к публикации 27.03.2025.

The article was submitted 22.02.2025; approved after reviewing 06.03.2025; assepted for publication 27.03.2025.

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 6 (168). С. 19-30.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 6 (168). P. 19-30.

Научная статья
УДК 536:621.9
doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-19-30

Повышение эффективности изготовления нежестких деталей введением в зону формообразования энергии модулированных ультразвуковых колебаний

Евгений Степанович Киселев, д.т.н.
Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия
kec.ulstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1745-9016>

Аннотация. Использование ультразвуковых размерных технологий для уменьшения технологических остаточных напряжений, возникающих в процессе механической обработки заготовок нежестких деталей из сплавов с низкой температурой плавления, является одним из наиболее эффективных методов изготовления конструктивно сложных деталей. Рассмотрены основные методы использования модулированных ультразвуковых колебаний (УЗК) и их преимущества при введении в зону обработки на операциях фрезерования. Особое внимание уделено применению различных видов модуляции УЗК для увеличения эффективности снижения технологических остаточных напряжений путем вовлечения в процесс релаксации перемещений дислокационных отрезков разной длины при обработке тонкостенных нежестких заготовок из алюминиевых сплавов. Технологические остаточные напряжения оценивались с использованием измерительно-вычислительного комплекса «Ситон-АРМ». Фазовые изменения в поверхностном слое алюминиевых деталей – рентгеновского измерительного комплекса «Рикор-7». Полученные данные обрабатывали на ЭВМ с использованием программы MD-10. Модуляцию УЗК осуществляли с использованием оригинальной установки, включающей в себя УЗ генератор, ПЭВМ, генерирующую сигнал модуляции на два канала: на первом формируется – синусоидальный, на втором – синусоидальный, квадратный или треугольный со смещением по фазе на 0, либо на 90°. Установлено, что наиболее эффективным методом является наложение модулированных УЗК, при котором сигнал первого источника имеет синусоидальную, а сигнал второго - квадратную форму и смещён по фазе на 90°. Исследования с измерением положений обработанных поверхностей тонкостенных деталей с использованием контактного датчика Renishaw OMP40 показали, что при этом их коробление уменьшается на 30...40%. Существенной разницы в результатах обработки заготовок из деформируемых алюминиевых сплавов Д16 и АК6 не зафиксировано.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, технологические остаточные напряжения, фазовый состав, ультразвук, модуляция, заготовка, нежесткая деталь, фрезерование

Благодарности: исследование выполнено с использованием финансовых средств гранта Российского научного фонда № 24-29-00206, <https://rscf.ru/project/24-29-00206/>

Для цитирования: Киселев Е.С. Повышение эффективности изготовления нежестких деталей введением в зону формообразования энергии модулированных ультразвуковых колебаний // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 6 (168). С. 19–30. doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-19-30

Improving the manufacturing efficiency of non-rigid parts by introducing the energy of modulated ultrasonic vibrations into the shaping zone

Evgeny S. Kiselyov, D. Eng.
Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia
kec.ulstu@mail.ru

Abstract. The use of ultrasonic dimensional technologies to reduce technological residual stresses occurring under machining of non-rigid blanks in parts made of alloys with a low melting point is one of the most effective methods for manufacturing structurally complex parts. The main methods of using modulated ultrasonic vibrations (UsV) and their advantages when introduced into the machining zone during milling operations are viewed. Special attention is paid to the use of various types of UsV modulation to increase the efficiency of reducing technological residual stresses by involving dislocation segments of different lengths in the relaxation process when machining thin-walled non-rigid aluminum alloy blanks. The technological residual stresses were evaluated using the Seton-ARM measuring and computing complex. Phase changes in the surface layer of aluminum parts of the Rikor-7 X-ray measuring complex. The data obtained was processed on a computer using the MD-10 program. The UsV modulation was carried out using an original installation that includes a ultrasonic generator, a PC that generates a modulation signal into two channels: on the first channel, a sinusoidal one, on the second, a sinusoidal, square or triangular one with a phase offset of 0 or 90 degrees. Studies measuring the positions of the treated surfaces of thin-walled parts using the Renishaw OMP40 contact sensor have shown that their twisted effect decreases by 30...40%. There was no significant difference in the results of processing workpieces made of deformable aluminum alloys D16 and AK6.

Keywords: aluminum alloys, technological residual stresses, phase composition, ultrasound, modulation, blank, non-rigid part, milling

Acknowledgments: The study was carried out using financial resources from the Russian Science Foundation grant No. 24-29-00206, <https://rscf.ru/project/24-29-00206/>

For citation: Kiselyov E.S. Improving the manufacturing efficiency of non-rigid parts by introducing the energy of modulated ultrasonic vibrations into the shaping zone / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 6 (168). P. 19–30 doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-19-30

Введение

В металлообрабатывающем машиностроении все чаще сталкиваются с проблемами, возникающими в процессе изготовления увеличивающегося количества сложных и нежестких, тонкостенных деталей. Такие детали изготавливаемые, в основном, из алюминиевых, титановых и жаропрочных сплавов, а также высоколегированных сталей, широко используются в летательных аппаратах, в авиационном моторостроении, наземном и водном транспорте. После механической обработки и снятия со станка или по истечению непродолжительного времени они чаще других подвержены опасности коробления из-за интенсивного перераспределения технологических остаточных напряжений (ТОН). Последнее объясняется тем, что детали, изготавливаемые из легкоплавких и обладающих высокой теплопроводностью алюминиевых сплавов, в процессе высокоскоростной обработки в зоне формообразования имеют контактные температуры, приближающиеся к температуре плавления (450...550 °С). Это приводит к

интенсивным фазовым превращениям, являющимися основными причинами возникновения ТОН.

При изготовлении деталей из высоколегированных сталей, титановых и жаропрочных сплавов, имеющих более высокую температуру плавления, но обладающих недостаточной теплопроводностью, вся теплота, образующаяся в зоне контакта инструмента с заготовкой, из-за повышенной теплосиловой напряженности процесса резания, интенсивно прогревает поверхностные слои (ПС) тонкостенных нежестких деталей, приводя к тем же результатам, что и при обработке алюминиевых заготовок.

Уменьшение теплообразований в зоне резания осуществляется на практике, главным образом, за счет рационального использования смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), потенциальные возможности которых всесторонне изучены, в основном, сотрудниками научных школ М.И. Клушина [1] и Л.В. Худобина [2]. После публикаций во второй половине XX в. монографий Бергмана Л. [3], Курмаба Д. [4], Маркова А.И. [5], Подураева В.Н.

[6] и др., возник интерес к другому методу снижения теплосилового напряжения – к введению в зону формообразования деталей при механической обработке энергии ультразвукового (УЗ) поля. Однако возможности реализации УЗ размерной механической обработки в действующем производстве ограничивались необходимостью создания специальных приспособлений для наложения ультразвуковых колебаний (УЗК) на заготовку (инструмент, СОЖ, детали станка и технологической оснастки и др.) [2 – 7]. В начале XXI в. компанией DMG MORI была разработана и серийно выпущена серия станков ULTRASONIC, в конструкцию шпиндельного узла которых было встроено устройство возбуждения УЗ колебаний (УЗК) [8]. В этих станках синусоидальные УЗ-колебания накладываются на инструмент вдоль его продольной оси, что позволяет до 30...40 % уменьшать силы резания, а следовательно, и контактные температуры в зоне резания. Такие станки находят широкое применение на аэрокосмических предприятиях промышленно развитых стран. Одновременно, серийно выпускаются и станки AXILE Machining, а также УЗ оправки (компания Altrasonic, CRENOIndustry, Pulchertool и др.), использование которых наблюдается на обрабатываемых центрах с ЧПУ [9].

Из основных эффектов использования энергии УЗ поля при механической обработке наиболее значимыми являются: эффект снижения трения и увеличение пластичности контуров как при параллельном, так и при нормальном направлении колебательных смещений относительно граничных поверхностей; возникновение в СОЖ массы пульсирующих пузырьков, заполненных паром, газом или их смесью (кавитация); УЗ релаксация ТОН в поверхностном слое (ПС) обработанных заготовок.

Методы исследований и материалы

Эффективность использования при механической обработке традиционных синусоидальных УЗ колебаний изучена достаточно

глубоко [3 – 7]. Однако характер распределения температурных полей в тонкостенных нежестких деталях существенным образом отличается от остальных. При их изготовлении, из-за относительно малых расстояний между границами стенок, заготовки достаточно быстро прогреваются до высоких температур, что неизбежно приводят к деформациям готовой детали, причинами которых могут быть ТОН. Поэтому было крайне необходимо найти новые методы, позволяющие повысить эффективность использования энергии УЗ поля при механической обработке на основе дополнительного изучения механизмов воздействия УЗК на процессы транспортирования СОЖ, фазовых изменений в ПС и формирования ТОН. Такие методы были найдены сотрудниками научной школы Ульяновского государственного технического университета после анализа и изучения перспективных путей интенсификации УЗ размерной обработки. Одним из них является модуляция УЗ сигнала. Модулированные колебания – это колебания с относительно медленным изменением амплитуды, частоты, формы или фазы таким образом, чтобы за период колебаний модулированный параметр изменялся со скоростью, существенно меньшей по сравнению с УЗК.

В настоящее время апробированы два основных направления использования модулированных УЗК для интенсификации процессов механической обработки:

- 1) возбуждение кавитации в среде СОЖ с целью вовлечения в её процессы разных по размерам паровоздушных пузырьков жидкости и пара;
- 2) воздействие на дислокации разных размеров ПС обрабатываемых заготовок для их движения в равновесное состояние.

На практике модуляцию можно реализовать, накладывая на УЗ волновод (насадок для подачи СОЖ, инструмент, заготовку или элемент приспособления) дополнительные модулированные по амплитуде, частоте, форме или фазе колебания. Как правило, модуляция УЗ сигнала осуществляется путем внесения

соответствующих изменений в схему УЗ генератора, генерирующего основные синусоидальные сигналы постоянной амплитуды и частоты [10], или с использованием оригинальной установки генерации УЗ волн, включающей в себя УЗ генератор (например, УЗГ 1002205), ПЭВМ, генерирующую сигнал модуляции на два канала, блок питания. В этом случае в качестве управляющего воздействия может быть выбрана программа Soundcard Score, использование которой позволяет реализовать на практике достаточно широкий спектр генерации сигналов разных частот и их продолжительности, а также форм сигнала. Имеется возможность выбора интенсивности звучания, что облегчает осуществление настройки отдельно правого и левого канала, а также фазы правого канала.

Принципиальная схема и общий вид УЗ установки представлены в работе [11]. Её отличие от ранее разработанной для модуляции по амплитуде и частоте [10], заключается в модуляции УЗК по форме сигнала и фазе от двух источников колебаний, а также в том, что заготовка является звеном колебательной системы. Размеры волновода и отражателя рассчитаны так, чтобы на ней возникал максимум амплитуды стоячей волны. УЗ система крепится к столу металлорежущего станка через универсальный динамометр УДМ-100, что позволяет в процессе обработки осуществлять измерения составляющих силы резания P_x , P_y , P_z .

Возбуждение модулированных УЗК в среде СОЖ с целью вовлечения в процессы кавитации разных по размерам паровоздушных пузырьков жидкости и пара для интенсификации её транспортирования в зоны формообразования деталей при шлифовании и глубоком сверлении достаточно подробно описано в работах [2, 7, 10]. Поэтому в данной работе более детально сосредоточимся на взаимодействии модулированных УЗК с дислокациями разных размеров поверхностного слоя металла обрабатываемых заготовок. Очевидно, для того чтобы обеспечить движение дислокаций в широком диапазоне размеров, необходимо расширять

как спектр частот, так и диапазон амплитуд применяемых УЗК. На практике это можно осуществить, накладывая на волновод модулированные по частоте, амплитуде, фазе колебания, по форме сигнала и др. [10].

При воздействии УЗК с частотой в килгерцевом диапазоне их поглощение дислокациями ПС обусловлено амплитудно-зависимым гистерезисом [12]. При этом с ростом амплитуды колебаний растёт петля гистерезиса, декремент затухания экспоненциально увеличивается. При дальнейшем расширении петли, встретив препятствия, дислокации способны преодолевать их с помощью механизма двойного поперечного скольжения. Поскольку в результате акта двойного поперечного скольжения в соседней параллельной плоскости скольжения возникают новые дислокационные источники (источники Франка-Рида), это приводит к увеличению плотности дислокаций. Переход дислокаций в соседние плоскости скольжения и образование новых источников двойного поперечного скольжения осуществляется в том случае, если расстояние до этих плоскостей больше критического расстояния $h_{кр}$:

$$h_{кр} = \frac{M \cdot v}{8\pi(1 - \nu)(\sigma - \sigma_f)}, \quad (1)$$

где M – модуль сдвига; v – вектор Бюргерса; σ – напряжение течения; σ_f – атермическая компонента напряжений трения вследствие взаимодействия дислокаций с точечными препятствиями.

Исследованиями [12] установлено, что по сравнению с деформацией в обычных условиях (без УЗК) дислокации материала, находясь в УЗ поле с частотой порядка десятков килгерц в 3 – 4 раза, чаще испытывают механизм двойного поперечного скольжения. При этом с увеличением амплитуды УЗК растёт площадь областей возможного старта дислокаций, что в свою очередь, увеличивает вероятность их выхода в поперечную плоскость скольжения с образованием источников Франка-Рида и их последующее размножение

методом двойного поперечного скольжения [12]. Длина свободного пробега дислокаций может изменяться в различных пределах от 10^{-5} до 10^{-3} м и ограничена размерами зерна кристалла и продолжительностью воздействия источника переменного напряженного поля того или иного знака, то есть частотой УЗК. При небольших размерах зерна и достаточно невысокой частоте приложенных УЗК в течение первой полуволны дислокация успевает достичь границ зерен. В более крупном зерне дислокация не успевает достичь границ зерен, и в течение отрицательного периода полу волны будет тормозиться из-за трения, обусловленного наличием точечных дефектов кристаллической решетки. Возрастание атермической компоненты напряжений трения приводит к увеличению значения критического расстояния $h_{кр}$.

Очевидно, что вероятность образования источника Франка-Рида в соседней плоскости уменьшается. Варьирование частотой и амплитудой УЗК в зависимости от микроструктуры обрабатываемого материала открывает возможность определенным образом воздействовать на процесс образования дислокаций и

упрочнения в целом. При этом эффективность того или иного вида модуляции УЗ воздействия (по амплитуде или частоте) существенно зависит как от соотношения режимов обработки и параметров УЗК, так и от микроструктуры обрабатываемого материала.

При модуляции амплитуды синусоидальным сигналом уравнение, описывающее такое колебание, имеет вид:

$$A = A_0(1 + m_a \sin \Omega \tau) \cdot \sin(\omega \tau + \varphi_0), \quad (2)$$

где A_0 – амплитуда исходного колебания параметра, м; $\omega = 2\pi f$ – частота, рад/с; f – циклическая частота, Гц; φ_0 – начальная фаза исходного колебания, рад; Ω – частота модулирующих колебаний, рад/с; m_a – глубина модуляции, характеризующая степень изменения амплитуды:

$$m_a = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}}, \quad (3)$$

где A_{\max} и A_{\min} – максимальное и минимальное значения амплитуды, м.

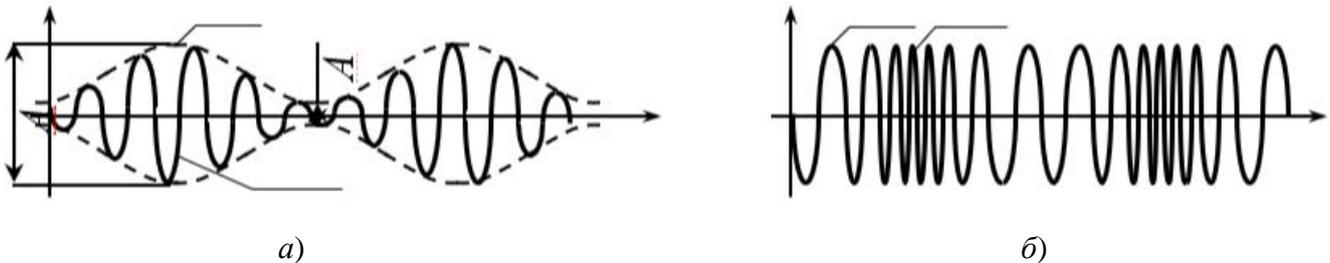


Рис. 1. Осциллограммы амплитудно- (а) и частотно- (б) модулированного сигнала

Fig. 1. Oscillograms of the amplitude (a) and frequency (b) modulated signal

Осциллограммы амплитудно- и частотно- модулированного сигнала (рис. 1) представляет собой сумму трех гармонических колебаний с частотами ω , $(\omega + \Omega)$ и $(\omega - \Omega)$. Колебание частотой ω называется несущим, его амплитуда равна амплитуде A_0 исходного колебания. Две другие частоты называются боковыми, амплитуда каждого из этих колебаний равна $m_a A_0/2$. Присутствие в спектре амплитудно-модулированного сигнала гармонических колебаний с частотой способствует

вовлечению в процессы поглощения ультразвука более крупных дислокаций, чем в случае при использовании немодулированного сигнала с фиксированной частотой ω . При частотной модуляции модулирующий сигнал вызывает изменения мгновенных значений частоты, не влияя на амплитуду колебаний. При модуляции синусоидальным сигналом частота колебаний изменяется по закону:

$$\Omega = \omega_n + \Delta\omega \cos(\Omega\tau), \quad (4)$$

где ω_n – несущая частота, рад/с; $\cos(\Omega t)$ – определяет форму модулирующего сигнала; $\Delta\omega$ – девиация частоты, представляющая собой амплитуду отклонения частоты ω от несущей частоты.

Полоса частот частотно-модулированного колебания зависит от величины $m_{\text{ч}} = \Delta\omega/\Omega$, которая называется индексом частотной модуляции. Полную ширину полосы частот, занимаемую частотно-модулированным колебанием с девиацией $\Delta\omega$ и частотной модуляцией Ω , можно считать равной $2(\Delta\omega + \Omega)$. Эта полоса шире, чем при амплитудной модуляции колебаний. Широкий спектр частот, занимаемый частотно-модулированным колебанием, очевидно, может способствовать и значительному расширению диапазона размеров объектов, способных к поглощению энергии ультразвука. Так, присутствие в этом спектре колебаний с минимальной частотой, как было показано выше, воздействует на объекты относительно большого размера. В то же время звуковое давление пропорционально колебательной скорости частиц, а та, в свою очередь – частоте колебаний и амплитуде колебательного смещения частиц. Поэтому наличие в спектре колебаний с максимальной частотой должно способствовать вовлечению в процессы поглощения ультразвука объектов относительно малого размера.

Результаты исследований

Эффективность методов обеспечения заданного уровня ТОН и фазового состава, в том числе – эффективность атермического снятия (релаксации) остаточных напряжений, оценивали в процессе УЗ обработки алюминиевых нежестких тонкостенных образцов из двух термоупрочняемых сплавов: ковочного сплава повышенной пластичности АК6 и жаропрочного сплава высокой прочности Д16. Оба сплава находят широкое применение при изготовлении деталей летательных аппаратов. Исследования осуществляли с использованием разработанной оригинальной установки генерации УЗ волн [11]. В процессе эксперимента с ЭВМ поступают сигналы частотой 22 кГц на оба канала. Данная установка позволяет осуществлять модуляцию УЗ сигнала второго канала. В серии экспериментов форма сигнала второго канала изменяли на синусоидальную, прямоугольную и треугольную с помощью ПЭВМ. Кроме того, в процессе исследований изменяли фазу колебаний сигнала второго канала с 0° на 90° . По данным ранее проведенных исследований это может обеспечить более эффективную релаксацию ТОН в процессе обработки. Примеры подаваемых сигналов приведены на рис. 2 – 4.

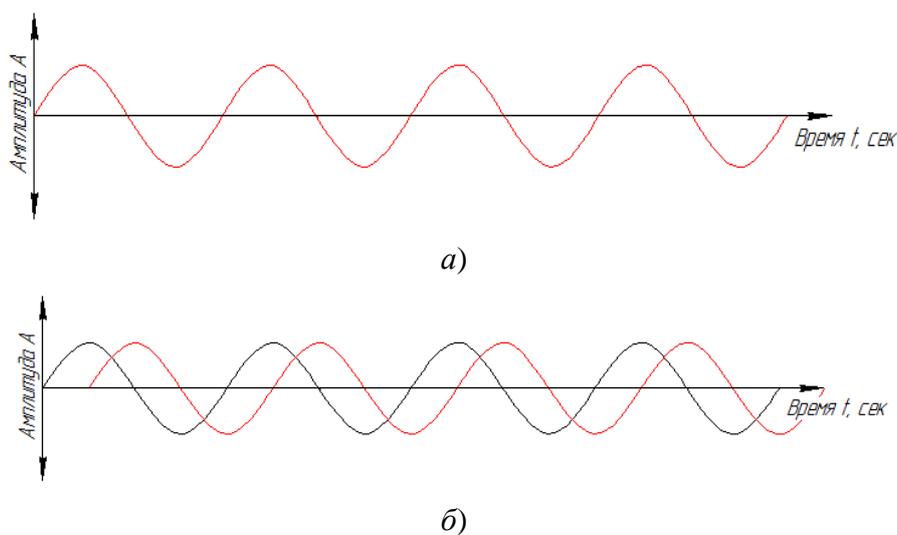


Рис. 2. Выходной сигнал при синусоидальной форме сигнала 2 канала:
а – фаза 0° ; б – фаза 90°

Fig. 2. Output signal with a sinusoidal waveform of the 2nd channel:
а – phase 0° ; б – phase 90°

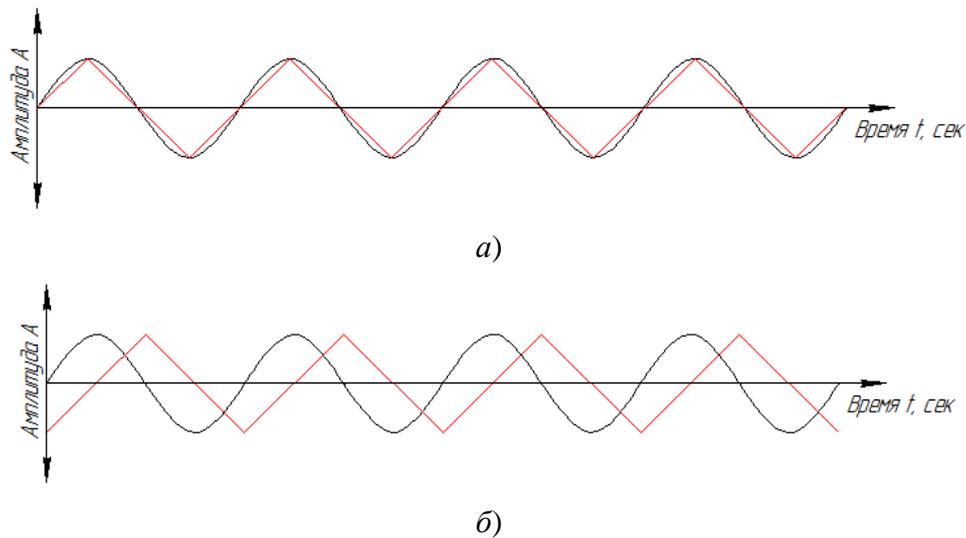


Рис. 3. Выходной сигнал при треугольной форме сигнала 2 канала:
a – фаза 0° ; *б* – фаза 90°

Fig. 3. Output signal with a triangular waveform of the 2nd channel:
a – phase 0° ; *b* – phase 90°

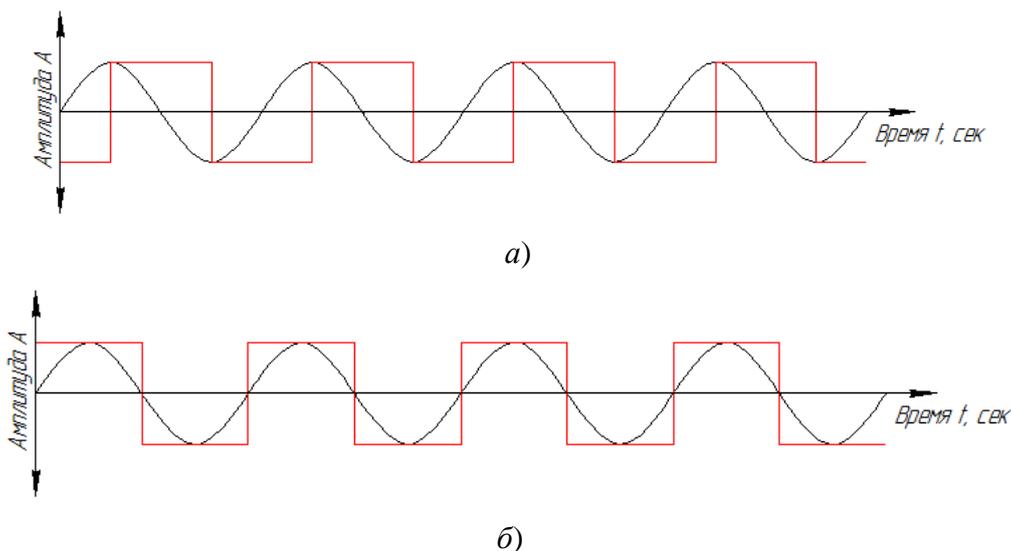


Рис. 4. Выходной сигнал при квадратной форме сигнала 2 канала:
a – фаза 0° ; *б* – фаза 90°

Fig. 4. Square waveform output of the 2nd channel:
a – phase 0° ; *b* – phase 90°

Анализ номенклатуры деталей, выпускаемых предприятиями аэрокосмической отрасли и приборостроения в нашей стране, позволил выявить ряд деталей и их элементов, процесс изготовления которых со снятием припуска вызывает наибольшие затруднения. Примерами таких деталей являются тонкостенные стенки приборных панелей, корпуса приборов,

крышки, выполняющие роль радиатора. Обобщив нежесткие элементы в анализируемой выборке, осуществлено разделение их на две основные группы: стенки с соотношением толщины к высоте 1:10 и 1:20 (рис. 5). Длина таких элементов варьируется от 10 до 300 мм, но большая их часть имеет длину не более 100 мм.

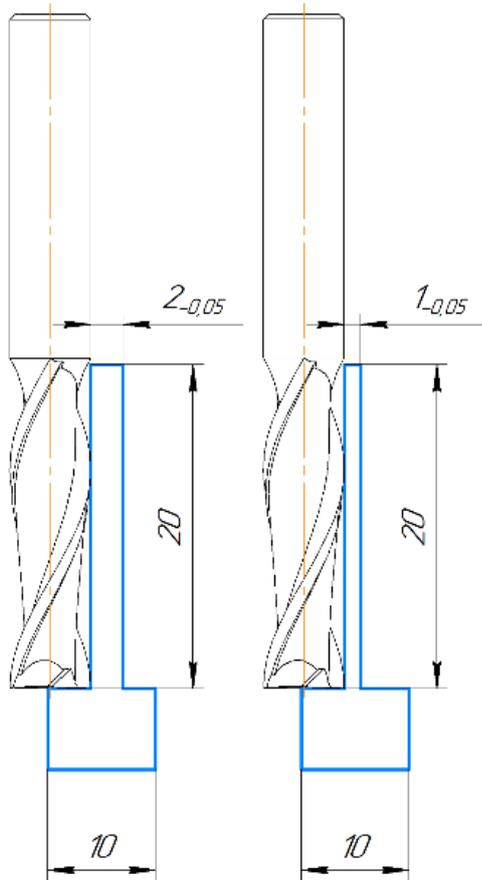


Рис. 5. Исследуемые образцы с соотношением толщины S к высоте L 1:10 и 1:20

Fig. 5. The studied samples with a ratio of thickness S to height L of 1:10 and 1:20

Исходные данные для назначения режима выбирались из каталогов производителей инструмента, в данном случае ГК ХАЛТЕК. Была выбрана фреза ХАЛТЕК MA2NNN100 070 000, двузубая, диаметром $D_t = 10$ мм, с количеством зубьев $z = 2$; с длиной фрезы $l_1 = 72$ мм, с длиной режущей кромки $l_2 = 25$ мм, материал фрезы VHM (ультра мелкодисперсный твердый сплав без покрытия). Использовали СОЖ на водной основе (10% - ный раствор концентрата Simcool). Эксперименты выполняли на обрабатывающем центре DMU 50 esoline. После завершения цикла фрезерования стенки осуществлялось измерение положения обработанной поверхности при помощи контактного датчика с оптической передачей сигнала Renishaw OMP 40,

оснащенного рубиновым стилусом диаметром 6 мм. ТОН первого рода в ПС обработанных деталей измеряли при помощи измерительно-вычислительного комплекса СИТОН-АРМ.

Фазовый состав материала в поверхностном слое обработанных образцов определяли рентгеновским методом на измерительном комплексе «Рикор-7». Полученные данные обрабатывали на ЭВМ с использованием программы MD-10. В результате обработки была получена экспозиция со значениями стандартного угла дифракции 2θ по горизонтальной оси и интенсивности пиков I по вертикальной. В процессе измерений значения углов дифракции сравнивали с эталонными значениями с помощью программы Match!, имеющей достаточно обширную базу данных неорганических веществ. Изменения фазового состава ПС оценивали по соотношению фаз Cu_2FeAl_7 и CuMgAl_2 . Соотношение фазы Cu_2FeAl_7 к CuMgAl_2 определяли по формуле:

$$k = \frac{I(\text{Cu}_2\text{FeAl}_7)_1 + I(\text{Cu}_2\text{FeAl}_7)_2}{I(\text{CuMgAl}_2)_1 + I(\text{CuMgAl}_2)_2}, \quad (5)$$

где $I(\text{Cu}_2\text{FeAl}_7)_1$; $I(\text{CuMgAl}_2)_1$ – интенсивность пиков Cu_2FeAl_7 и CuMgAl_2 фаз при угле наклона трубки $19,7^\circ$; $I(\text{Cu}_2\text{FeAl}_7)_2$, $I(\text{CuMgAl}_2)_2$ – интенсивность пиков Cu_2FeAl_7 и CuMgAl_2 фаз при угле наклона трубки $27,3^\circ$.

Изменение данного соотношения в процессе формообразования нежестких деталей свидетельствует о фазовых превращениях в ПС, возникающих под действием теплосилового напряжения процесса обработки. Оценка соотношения этих фаз позволяет оценить, какие явления происходят в поверхностном слое обрабатываемых заготовок: упрочнение или разупрочнение.

Фрезерование заготовок осуществляли на максимально возможных режимах:
 $v = 300$ м/мин; $S_z = 0,12$ мм/зуб.

Усредненные результаты исследований представлены в табл. 1 и табл. 2.

1. Влияние УЗК на фазовый состав ПС обработанных тонкостенных образцов

1. The influence of ultrasonic testing on the phase composition of PS of processed thin-walled samples

Сплав	Форма и фаза сигнала УЗ колебаний						
	Без УЗК	Синус + Синус		Синус + Квадрат		Синус + Треугольник	
		0°	90°	0°	90°	0°	90°
Соотношение фаз Cu ₂ FeAl ₇ / CuMgAl ₂							
АК6	69/31	61/39	60/40	63/37	53/47	56/44	57/43
		-12 %	-13 %	-9 %	-23 %	-19 %	-17 %
Д16	51/49	45/55	46/54	43/57	37/63	41/59	42/58
		-12 %	-10 %	-16 %	-27 %	-20 %	-18 %

2. Влияние УЗК на ТОН в ПС обработанных нежестких тонкостенных образцов

2. The influence of ultrasonic testing on the TON in the PS of processed non-rigid thin-walled samples

Сплав	Глубина замера, мкм	Форма и фаза сигнала УЗ колебаний						
		Без УЗК	Синус + Синус		Синус + Квадрат		Синус + Треугольник	
			0°	90°	0°	90°	0°	90°
Технологические остаточные напряжения, МПа								
АК6	80	126	99	97.5	93	88	102	95
			-21 %	-23 %	-26 %	-30%	-19 %	-25 %
	150	-178	-151	-149	-144	-139	-153	-147
			-15 %	-16 %	-19 %	-22 %	-14 %	-17 %
Д16	80	120	97	91	93	88	98	94
			-19 %	-24 %	-22 %	-27 %	-18 %	-22 %
	150	-172	-147	-139	-144	-139	-149	-145
			-15 %	-19 %	-16 %	-19 %	-13 %	-16 %

Соотношение фаз в ПС при обработке заготовок из сплава АК6 с введением в зону обработки УЗ сигнала с синусоидальной формой сигнала второго канала мало меняется от наличия смещения на 90° фазы колебаний. Поэтому малы и изменения ТОН (табл. 2) при обработке заготовок из сплава АК6 с введением в зону обработки энергии УЗ-поля с синусоидальной формой сигнала второго канала со смещением на 90° фазы колебаний. Введение в зону обработки энергии УЗ поля позволяет существенно уменьшить остаточные напряжения, возникающие в заготовке в процессе резания по сравнению с результатами обработки заготовок без УЗК. Эффективность релаксации ТОН от использования энергии модулированного УЗ поля с синусоидальной формой сигнала составляет порядка 20 % на глубине 40...200 мкм.

При обработке заготовки без наложения УЗК средняя величина ТОН на глубине ПС в 80 мкм составляет 126 МПа, на 150 мкм – 178 МПа. С использованием сигнала второго канала синусоидальной формы без смещения фазы колебаний – 99 МПа на глубине ПС в 80 мкм, на глубине 150 мкм – 151 МПа (уменьшение ТОН на 23 %). Со смещением фазы колебаний на 90° средняя величина ТОН на глубине поверхностного слоя в 80 мкм составляет 97,5 МПа, на 150 мкм – 149 МПа. Это несколько меньше, чем без смещения.

В результате наложения УЗ волн на зону формообразования детали меняется характер контактных взаимодействий на рабочих поверхностях режущего инструмента с заготовкой, приводящих к уменьшению деформаций при стружкообразовании, а также сил резания.

Все это вызывает уменьшение сил трения, снижение контактной температуры в зоне резания и, соответственно, способствует уменьшению величины ТОН. Снижается сопротивление ПС металла пластической деформации, поэтому при малой статической силе удается осуществлять высокоэффективную обработку. Улучшаются условия проникновения СОЖ в зону резания, что также позволяет уменьшить температуру в зоне контакта. Кроме того, учитывая особенности обработки нежестких заготовок со съемом малых припусков, может возникать явление кратковременной релаксации ТОН в промежутках между холостыми ходами.

При замене материала заготовки с АК6 на сплав Д16 введение в зону обработки УЗ сигнала второго канала без смещения фаз наблюдается большее увеличение в ПС готовой детали фазы Cu_2FeAl_7 и уменьшение фазы CuMgAl_2 (табл. 1). Данный результат может быть объяснен тем, что УЗ сигнал синусоидальной формы, вероятно, оказывает более существенное влияние на свободные атомы железа, давая им энергию для того, чтобы занять вакансии или же, чтобы преодолеть потенциальный барьер, создаваемый соседними атомами.

Смещение фазы колебаний на 90° ведет к росту в ПС материала обрабатываемой детали фазы CuMgAl_2 . Рост этой фазы, на наш взгляд, связан с тем, что УЗК, модулированные со смещением фазы на 90° , оказывают в отличие от сплава АК6, большее воздействие на атомы магния, давая им необходимое количество энергии для занятия свободных вакансий. Разница результатов для разных сплавов может быть объяснена различиями в их химическом составе, наличием инородных примесей, микроструктурой обрабатываемых материалов, а также соотношениями амплитуд и частот колебаний в технологической системе при выбранных режимах обработки и УЗК.

Как видно из данных табл. 2 при замене материала на Д16 заметно большее уменьшение ТОН, чем у возникающих в процессе изготовления в аналогичных условиях деталей из сплава АК6. Эффективность релаксации ТОН от использования энергии УЗ поля с синусоидальной формой сигнала без смещения фазы

колебаний составляет 21 % на глубине 40...200 мкм. При обработке заготовок из сплава Д16 без УЗК средняя величина ТОН на глубине ПС в 80 мкм составляет 120 МПа, на 150 мкм – 172 МПа. С использованием сигнала второго канала синусоидальной формы без смещения фазы колебаний на глубине 80 мкм средняя величина ТОН уменьшается до 97 МПа, на 150 мкм – до 147 МПа. Смещение фазы колебаний сигнала второго канала на 90° приводит к уменьшению величины ТОН – 139 МПа.

Изменения соотношения фаз колебаний при обработке заготовок из сплава АК6 с введением в зону обработки энергии УЗ сигнала с квадратной формой сигнала второго канала приводит к некоторому увеличению в составе ПС материала готовой детали фазы CuMgAl_2 , по сравнению с использованием сигнала синусоидальной формы. Как описывалось выше, это может быть результатом воздействия интенсивных микроударов режущего инструмента на ПС материала детали и более эффективным процессом релаксации в результате заполнения вакансий кристаллической решетки свободными атомами магния. При смещении фазы УЗ сигнала на 90° в ПС материала заготовки заметен больший рост фазы Cu_2FeAl_7 . Смещение сигнала на 90° расширяет количество дислокаций, с которыми УЗ волна от первого канала входит в резонанс. В связи с этим процесс релаксации ТОН интенсифицируется за счет вовлечения большего количества дислокаций. А так как в процентном содержании в составе сплава Д16 железа больше магния, то атомы железа, войдя в резонанс с излучаемой волной и получив достаточное количество энергии, могут занять свободные вакансии, которые образовались из-за пластической деформации в процессе обработки.

Изменения ТОН при обработке заготовок из сплава АК6 с введением в зону обработки модулированного УЗ поля с квадратной формой сигнала от второго канала представлены в табл. 2. Из анализа результатов следует, что введение в зону обработки энергии модулированного УЗ поля с квадратной формой второго сигнала позволяет существенно уменьшить остаточные напряжения, возникающие в

заготовке в процессе резания. Эффективность релаксации ТОН от использования энергии УЗ поля с квадратной формой УЗ сигнала без смещения фазы составляет 26 % на глубине 40 – 200 мкм.

При обработке заготовки из сплава АК6 без наложения УЗ колебаний средняя величина ТОН на глубине ПС в 80 мкм составляет 126 МПа, на 150 мкм – 178 МПа; с использованием сигнала второго канала квадратной формы без смещения фазы колебаний на глубине 80 мкм средняя величина ТОН составляет 93 МПа, на 150 мкм – 144 МПа.

Из анализа результатов следует, что введение в зону обработки сигнала второго канала с квадратной формой (табл. 2) приводит к увеличению фазы CuMgAl_2 , что сопровождается упрочнением ПС и повышением прочностных характеристик нежесткой детали в целом. Это, как уже отмечалось выше, может быть связано с изменением контактных взаимодействий при обработке и воздействием режущего инструмента на ПС. Как упоминалось ранее, можно предположить о возможном влиянии УЗК на атомы магния, энергии которых вполне достаточно для перемещения и занятия ими свободных вакансий в кристаллической решетке.

Анализ результатов показывает, что введение в зону обработки сплава Д16 энергии модулированного УЗ поля с квадратной формой второго сигнала позволяет уменьшить остаточные напряжения. При использовании сигнала второго канала квадратной формы без смещения фазы колебаний на глубине 80 мкм средняя величина ТОН составляет 93 МПа, на глубине 150 мкм – 144 МПа.

Введение в зону обработки сигнала второго канала треугольной формы без смещения фазы колебаний вызывает на глубине 80 мкм возникновение ТОН в 93 МПа, на глубине 150 мкм – 144 МПа.

Наличие модулированной энергии УЗ поля с сигналом от второго канала треугольной формой без смещения фаз УЗ колебаний приводит к увеличению в ПС детали из сплава АК6 фазы CuMgAl_2 примерно в тех же пределах, что и при использовании УЗ сигнала синусоидальной формы. Однако, по сравнению с

использование сигнала синусоидальной формы, замечен существенно меньший её рост. Такой результат может быть объяснен тем, что треугольная форма сигнала схожа с синусоидальной формой, но всё же имеет свои отличия, что вызывает лишь незначительное увеличение фазы CuMgAl_2 . При этом лишь на 19 % уменьшаются ТОН (глубина 40...200 мкм), что является наименьшей величиной среди трех рассмотренных сигналов.

Изменения соотношения фаз УЗК при обработке заготовок из сплава Д16 с введением в зону обработки ультразвукового сигнала с треугольной формой сигнала второго канала приводит к незначительным изменениям фазового состава в ПС. Объем фазы Cu_2FeAl_7 увеличивается, а CuMgAl_2 уменьшается. Смещение введения в зону обработки энергии модулированного УЗ поля приводит к некоторому уменьшению величину растягивающих ТОН на глубине ПС до 90 мкм.

Данные результаты мало отличаются от полученных при введении в зону обработки УЗК при обработке заготовок из сплава АК6.

Заключение

Анализ выполненных исследований позволяет сделать вывод, что наиболее эффективным является наложение модулированных УЗК, при котором сигнал первого источника имеет синусоидальную, а сигнал второго источника имеет квадратную форму и смещён по фазе на 90° . Дальнейшие исследования с изменением положений обработанных поверхностей тонкостенных деталей контактным датчиком Renishaw OMP40 показали, что коробление уменьшилось на 30...40 %. Существенной разницы в результатах обработки заготовок из сплавов Д16 и АК6 не зафиксировано

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Клушин М.И. Технологические свойства новых СОЖ для обработки резанием / под ред. М.И. Клушина. М.: Машиностроение, 1979. 192 с.
2. Худобин Л.В. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник / под общ. ред. Л.В. Худобина. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.

3. **Бергман Л.** Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Иностранная литература, 1957. 728 с.
4. **Кумабэ Д.** Вибрационное резание / Пер. с яп. С.Л. Масленникова, под ред. И.И. Портнова и В.В. Белова. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.
5. **Марков А.И.** Ультразвуковая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1980. 237 с.
6. **Подураев В.Н.** Резание труднообрабатываемых материалов. М.: Машиностроение, 1974. 252 с.
7. **Справочник** технолога / под общ. ред. А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
8. **Серия ULTRASONIC** [Электронный ресурс] // URL: t-sistem.ru/netcat_filles/multifile/2295/pugru13_ultrasonic_pdf_data.pdf (дата обращения 27.02.2022)
9. **Ультразвуковые технологии** [Электронный ресурс] // URL: https://carbide-tool.ru/ultrasonic_technology_pdf_data.pdf (дата обращения 27.02.2022)
10. **Киселев Е.С.** Интенсификация процессов механической обработки рациональным использованием энергии ультразвукового поля. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 186 с.
11. **Киселев Е.С., Назаров М.В.** Особенности технологии изготовления нежестких корпусных деталей: монография / под общ. ред. Е.С. Киселева. М.: РУСАЙНС, 2022. 218 с.
12. **Тяпунина Н.А.** Поперечное скольжение дислокации в ультразвуковом поле и влияние на этот процесс амплитуды и частоты ультразвука, ориентации образца и коэффициента динамической вязкости / Н.А. Тяпунина, Г.В. Бушуева, М.И. Силис, Д.С. Подсобляев и др. // Физика твердого тела. Т. 45. № 5, 2003. С. 836–841.

REFERENCES

1. Klushin M.I. Technological properties of new lubricating and cooling fluids (LCF) for machining operations /

edited by M.I. Klushin. Moscow: Mashinostroenie, 1979. 192 p.

2. Khudobin L.V. Lubricating and cooling technological means and their use in cutting processing: Handbook / under the general editorship of L.V. Khudobin. Moscow: Mashinostroenie, 2006. 544 p.

3. Bergman L. Ultrasound and its application in science and technology. Moscow: Inostrannaya literatura, 1957. 728 p.

4. Kumabe, D. Vibration cutting / Translated from the Japanese by S.L. Maslennikov; edited by I.I. Portnov and V.V. Belov. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 424 p.

5. Markov A.I. Ultrasonic processing of materials. Moscow: Mashinostroenie, 1980. 237 p.

6. Poduraev V.N. Cutting of hard-to-work materials. Moscow: Mashinostroenie, 1974. 252 p.

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

8. ULTRASONIC Series [Electronic resource] // URL: t-sistem.ru/netcat_filles/multifile/2295/pugru13_ultrasonic_pdf_data.pdf (accessed 02/27/2022)

9. Ultrasonic technology. [Electronic resource] // URL: http://carbide-tools.ru/ultrasonic_techny_pdf_data.pdf (accessed 02/27/2022)

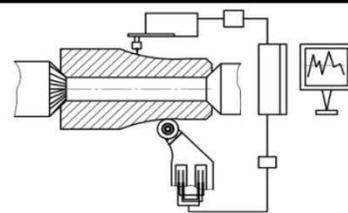
10. Kiselev E.S. Intensification of the processes of mechanical treatment using the ultrasonic field energy. Ulyanovsk: UISTU, 2003. 186 p.

11. Kiselev E.S., Nazarov M.V. Features of the technology for manufacturing non-rigid body parts: monograph / under the general editorship of E.S. Kiselev. Moscow: RUSAINS, 2022. 218 p.

12. Tyapunina N.A., Bushueva G.V., Silis M.I., Podsoblyayev D.S., et al. Tyapunina N.A. The cross slip of a dislocation in an ultrasound field and its dependence on the ultrasound amplitude and frequency, sample orientation, and dynamic viscosity. vol. 45. Issue 5. 2003. pp. 836–841.

Статья поступила в редакцию 19.02.2025; одобрена после рецензирования 25.02.2025; принята к публикации 10.03.2025.

The article was submitted 19.02.2025; approved after reviewing 25.02.2025; assepted for publication 10.03.2025.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 6 (168). С. 31-39.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 6 (168). P. 31-39.

Научная статья
УДК 621.865.8
doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-31-39

Технологическое обеспечение качества при роботизированной отделочной обработке на основе средств адаптации

Михаил Владимирович Вартанов¹, д.т.н.

Александр Игоревич Шварц², аспирант

Дмитрий Николаевич Миронов³, инженер-проектировщик

^{1,2} Московский политехнический университет, Москва, Россия

³ ООО «ЛАБ 316», Москва, Россия

¹ natalia.vartanova@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6057-9478>

² alex.schwarz101@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-2934-9685>

³ diman.mironov2010@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7872-5018>

Аннотация. Промышленные роботы применяются при механической обработке в машиностроении. Данная тенденция связана с увеличением геометрической сложности деталей и более широкими кинематическими возможностями промышленных роботов в сравнении с классическими станками с ЧПУ. В статье анализируются технологические возможности применения промышленных роботов на операциях отделочной механической обработки, приводятся причины, сдерживающие внедрение роботов. Приводятся схемы построения технологических операций: «деталь в руке» и «инструмент в руке». Анализируются факторы, влияющие на выбор предпочтительной схемы обработки. Рассматриваются доступные средства пассивной и активной адаптации, применяемые при роботизированной обработке. Приводятся области эффективного применения средств пассивной и активной адаптации. В статье приводятся две основные причины возникновения вибраций при роботизированной обработке: низкая жесткость конструкции промышленного робота и влияние погрешностей формы с предыдущей операцией. Обсуждается проблема разработки контроллера устойчивого управления по величине съема материала. Постановка задачи обусловлена тем, что модель процесса резания варьируется в значительной степени в зависимости от условий резания. Силовой контроль робота дает возможность учитывать жесткость робота без ущерба для точности перемещений по шести координатам. В статье рассматривается применение нейронной сети и генетического алгоритма при разработке операции роботизированного полирования плоской поверхности в условиях ограниченного доступа. Авторами статьи разработан постпроцессор управления промышленным роботом в условиях переменного вылета инструмента и неравномерного припуска. С этой целью спроектирована и изготовлена специальная технологическая оснастка. В лаборатории «Промышленные роботы и средства автоматизации» проведены эксперименты по апробации разработанного алгоритмического и программного обеспечения.

Ключевые слова: промышленный робот, роботизированная обработка, адаптивность, качество поверхности, позиционно-силовое управление.

Для цитирования: Вартанов М.В., Шварц А.И., Миронов Д.Н. Технологическое обеспечение качества при роботизированной отделочной обработке на основе средств адаптации // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 6 (168). С. 31–39. doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-31-39

Technological quality assurance in robotic finish based on adaptation tools

Mikhail V. Vartanov¹, D. Eng.

Alexander I. Schwartz², PhD student

Dmitry N. Mironov³, design engineer

^{1,2} Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

³ LAB 316 LLC, Moscow, Russia

¹ natalia.vartanova@bk.ru

² alex.schwarz101@gmail.com

³ diman.mironov2010@gmail.com

Abstract. Industrial robots are used for machining in mechanical engineering. This trend is associated with an increase in the geometric complexity of parts and wider kinematic capabilities of industrial robots in comparison with classical CNC machines. The article analyzes the technological capabilities of using industrial robots in finishing machining operations, and provides the reasons for limited robots introduction. Schemes of construction of technological operations are given: "part in hand" and "tool in hand". The factors influencing the choice of the preferred machining are studied. The areas of effective application of passive and active adaptation tools are given. The article provides two main reasons for possible vibrations under robotic manipulation: e.g. low rigidity of the industrial robot structure and shape errors effect in the previous operation. The problem of developing a sustainable code conversion for the amount of material removal is discussed. The problem statement is due to the fact that the model of the cutting process varies greatly depending on the cutting conditions. Force control work makes it possible to take into account the rigidity of the robot without sacrificing the running accuracy in six coordinates. The article discusses the use of a neural network and a genetic algorithm in the development of a robotic polishing operation for a flat surface within limited access constraints. The authors of the article have developed a postprocessor for controlling an industrial robot in case of variable tool overhang and uneven tolerance. Special technological equipment has been designed and manufactured for this purpose. Experiments on testing of the developed algorithmic and software have been conducted in the laboratory "Industrial Robots and Automation Tools".

Keywords: industrial robot, robotic manipulation, adaptability, surface quality, position-force control.

For citation: Vartanov M.V., Schwartz A.I., Mironov D.N. Technological quality assurance in robotic finish based on adaptation tools / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 6 (168). P. 31–39. doi: 10.30987/2223-4608-2024-6-31-39

Введение

Растущие требования промышленности к снижению затрат при обеспечении качества обработки считаются повседневной задачей. Опасные, повторяющиеся и утомительные ручные операции, которые выполнялись вручную, роботы могут выполнять быстрее, безопаснее и качественнее. Тем не менее, очень мало роботов применяется на операциях по удалению материала. В прецизионном производстве по-прежнему в основном используются станки с числовым программным управлением (ЧПУ) из-за их высокого уровня точности и жесткости.

На протяжении ряда лет отмечаются следующие основные проблемы, сдерживающие широкое распространение механической обработки роботами [1 – 4]: недостаточная жесткость руки робота; сложность преобразований на пути от CAD-модели к движениям

робота; возникновение вибраций при обработке заготовки.

В последние годы наблюдается тенденция усложнения конфигурации деталей, создание сложных профилей и поверхностей, которые трудно поддаются обработке на классических станках с ЧПУ. Для работы со сложными деталями может потребоваться доступность, которую обеспечивает только шестиосевой робот.

Эволюция промышленных роботов, постоянно увеличивает их точность и повторяемость, благодаря чему, роботы все чаще приходят на замену станкам с ЧПУ. Однако роботы не всегда обеспечивают требуемую жесткость и в настоящее время не способны обеспечивать микронную точность обработки и точное позиционирование. Производители роботов знают об этой проблеме и на рынке появились специальные модели роботов, имеющие повышенную жесткость. Например, фирма АВВ предлагает модели IRB 6660 и 6700. Модель IRB 6660

даже позиционируется как робот для черновой обработки отливок. Для подобных задач компания FANUC предлагает робот модели M-900iB.280. Данная модель робота уже применяется в аэрокосмической промышленности для сверления и клепки.

Базовые конфигурации для финишной обработки

Существует две принципиальные схемы роботизированной обработки поверхностей: «деталь в руке» или «инструмент в руке». Как следует из названий, конфигурация «деталь в руке» – это вариант применения, при котором робот переносит обрабатываемую деталь к стационарному устройству для финишной обработки поверхности. Во втором варианте выходное звено робота снабжается инструментальным шпинделем с настроенным инструментом, и робот движется по заданной траектории относительно неподвижной детали.

Схема «деталь в руке» (рис. 1) чаще всего используются в случае, когда обрабатываемая деталь имеет относительно небольшой размер.

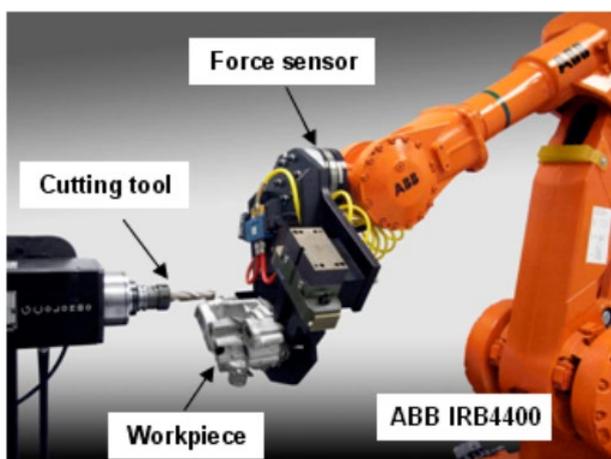


Рис. 1. Обработка с закреплением заготовки на роботе [5]

Fig. 1. Machining with the workpiece fixed on the robot [5]

Схват позволяет роботу брать деталь и манипулировать ею относительно устройства финишной обработки. Такие методы широко распространены в производстве из-за нескольких преимуществ их использования. Одно из преимуществ заключается в том, что операции робота часто можно совмещать с операцией

чистовой обработки поверхности на одной рабочей станции, т. е. робот может снять деталь с конвейера, обработать деталь, а затем поместить ее на окончательную упаковку или в промежуточные удерживающие матрицы для покраски и т. д.

Одним из недостатков схемы «деталь в руке» является то, что иногда невозможно обработать всю поверхность детали. Это может быть связано как с помехами схвату робота, так и с недостаточной ловкостью робота, чтобы захватить деталь со всех сторон. Часто единственным решением этой проблемы является размещение детали в промежуточном приспособлении и повторный захват детали в другом положении.

Конфигурация «инструмент в руке» (рис. 2) в настоящее время менее распространена в производстве, однако последние достижения в технологии активного управления усилием послужили расширению возможных случаев применения. Конфигурация «инструмент в руке» используется, когда обрабатываемая деталь громоздка для манипулирования роботом, а также в случаях, когда переустановка детали в схвате робота нежелательна. В этих случаях к роботу крепится инструмент, который по программной траектории проводит обработку. Управление инструментом может быть реализовано как на основе пассивного, так и активного управления.

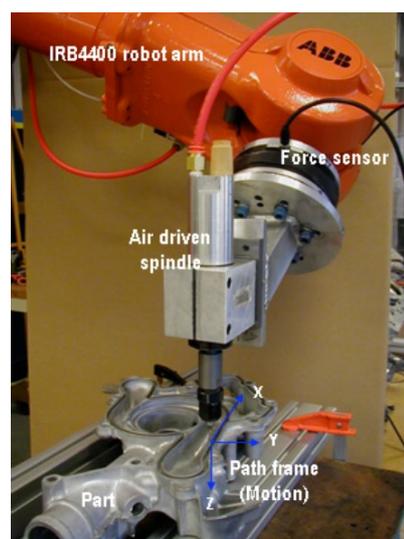


Рис. 2. Фрезерование с использованием пневмопривода с базированием заготовки на столе [5]

Fig. 2. Milling using a pneumatic actuator with the workpiece fixed on the table [5]

Менее дорогие пассивные адаптивные устройства (рис. 3) могут использоваться там, где нет необходимости в точном контроле силы. Поэтому они наиболее полезны для относительно плоских контуров или для грубых операций по удалению заусенцев или шлифованию. Особенность данного шпинделя заключается в том, что при помощи системы управления давлением воздуха возможно регулировать жесткость установленного в нем инструмента в осевом направлении.

С другой стороны, активные силовые устройства с замкнутым контуром управления идеально подходят для конфигураций «инструмент в руке».



Рис. 3. Шпиндель с пассивной адаптацией Schunk MFT-F-0-0:

1 – держатель инструмента; 2 – пыльник; 3 – пневматический шпиндель; 4 – опорный вал; 5 – компенсатор

Fig. 3. Schunk MFT-F-0-0 passive adaptation spindle:

1 – tool holder; 2 – dust cover; 3 – pneumatic spindle; 4 – support shaft; 5 – compensator

Эти устройства постоянно компенсируют ускорение и гравитационные эффекты, поэтому они могут обеспечивать точные уровни силы в любом направлении. Активные устройства, хотя и более дорогие, но способны выполнять широкий спектр отделочных операций – от грубой шлифовки до тонкой полировки различных материалов. Поскольку эти устройства имеют специальный контроллер, они предоставляют уникальные расширенные функции, которые значительно упрощают программирование роботов.

Конфигурация «инструмент в руке», с использованием силового контроля позволяет достичь более высокого качества поверхности и точности позиционирования робота при обработке. Наличие активного контроля силы позволяет провести анализ обработки с точки зрения виброустойчивости процесса.

Методы подавления вибраций при роботизированной обработке

Основным препятствием к использованию промышленных роботов при механической обработке, является их склонность к механическим воздействиям, индуцированным вибрациями и их неспособность противостоять им. В ходе экспериментальных исследований в Московском Политехе установлено, что существуют постоянные отклонения по оси Z при обработке (рис. 4). Как видно из рис. 4, при контакте с заготовкой, выходное звено начинает вибрировать. Это отрицательно влияет как на точность, так и на качество получаемой поверхности детали.

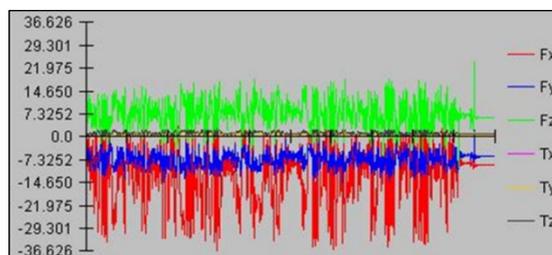


Рис. 4. Выводы с силомоментного датчика (скорость подачи 4 м/мин; число оборотов шпинделя – 1500 об/мин; глубина резания – 0,1 мм) [4]

Fig. 4. Conclusions from the power–torque sensor (feed speed 4 m/min; number of spindle revolutions – 1500 rpm; cutting depth – 0,1 mm) [4]

Для того чтобы подавить вибрации разработали активное выходное звено манипулятора (рис. 5) [2].

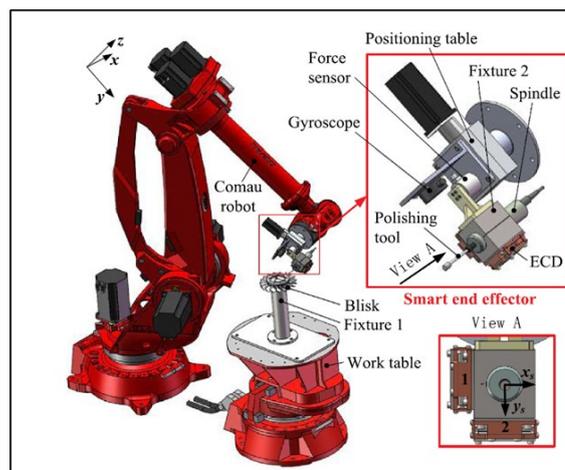


Рис. 5. Установка для финишной обработки лопаток ГТД с умным выходным звеном [2]

Fig. 5. Installation for blades finishing in a gas turbine engine with a smart output link [2]

В данной работе рассмотрено применение демпферов с постоянными магнитами и ПИД регуляторы собственной разработки. С помощью силового контроля получилось значительно уменьшить разброс контактных сил в зоне резания, и, как следствие, улучшить качество поверхности детали.

В то время, как для механической обработки на станках с ЧПУ тепловые погрешности – самый большой компонент, в роботизированной механической обработке наибольшую погрешность дают ошибки движения. Одним из основных недостатков использования робота в механической обработке, является недостаточная жесткость.

Например, сила резания в 500 Н при фрезеровании вызовет миллиметровую ошибку позиции для робота по сравнению с ошибкой меньше, чем 0,01 мм для станка с ЧПУ. Чтобы достигнуть более высокой размерной точности, должна быть компенсирована деформация от силы резания.

Главные ошибки в позиции робота при автоматизированном процессе механической обработки могут быть классифицированы на две категории: 1-я ошибка от силы резания и 2-я ошибка движения (кинематические и динамические ошибки).

Концепция контроля процесса по удельному съему материала должна динамично корректировать подачу, чтобы сохранить постоянную величину съема во время процесса механической обработки:

$$A_{уд} = \frac{F \cdot v}{V} = \text{const}, \quad (1)$$

где F – составляющая силы резания; v – величина подачи; V – объем удаляемого материала.

В свою очередь объем снимаемого материала прямо пропорционально связан с

подачей. Подача робота может корректироваться, чтобы поддерживать постоянную мощность резания, а, следовательно, и возникающие усилия.

Проблема разработки контроллера устойчивого управления по величине съема материала возникает из-за того, что модель процесса резания варьируется в значительной степени в зависимости от условий резания. Силовой контроль робота дает возможность учитывать жесткость робота без ущерба для точности перемещений по шести координатам.

Компенсация деформации в реальном времени базируется на основе модели структуры робота. Так как вызванная силой деформация – основной источник погрешности в автоматизированном процессе механической обработки, качество поверхности может быть улучшено за счет предложенного метода. Эта функция особенно важна при фрезеровании, где сила резания может превышать 1000 Н.

Регулирование сил при механической обработке дает значительные преимущества, повышая производительность работы и улучшая качество детали. Управление удельным съемом за счет силы резания реализуется при помощи корректировки в реальном времени подачи робота. Различные стратегии управления, включая ПИД-регулятор, адаптивное управление и использование нечеткой логики, может быть реализовано в зависимости от различных условий резания.

Наиболее эффективным в снижении погрешностей обработки представляется использование ПИД-контроллеров [12]. Смысл заключается в приложении обратной связи с перерегулированием. Решение проблемы заключается в том, что к закону управления добавляют третий терм, основанный на результатах интегрирования погрешности по времени:

$$at = K_p(Y(t) - X(t)) + K_I \int \partial(Y(t) - X(t))dt + K_D \frac{\partial(Y(t) - X(t))}{\partial t}, \quad (2)$$

где K_p , K_I , K_D – коэффициенты усиления по координате, интегральный и дифференциальный; at – управляющее воздействие.

Дифференциальный терм гасит колебания в системе, для управления которой он применяется. При этом производная такой

погрешности прикладывается в направлении, противоположном пропорциональному терму, что приводит к уменьшению общего отклика на возмущение. Однако, если та же погрешность продолжит свое присутствие и не изменится, то производная уменьшится до нуля и

при выборе управляющего воздействия будет доминировать пропорциональный терм.

Известен программный алгоритм [3] для предотвращения вибраций при обработке плоскостей. Было выявлено, что на возникновение и величину вибраций при обработке влияют следующие факторы: направление движения при обработке и угол выходного звена к обрабатываемой поверхности; положение звеньев робота, то есть конфигурация робота в момент обработки; расположение заготовки в рабочем пространстве робота; режимы резания.

Авторами было выбрано четыре произвольные конфигурации робота и углы наклона режущего инструмента к обрабатываемой поверхности. После проведения экспериментов были сделаны следующие выводы:

– вибрации можно избежать, изменив конфигурацию робота во время обработки. Есть определенные конфигурации роботов, более склонные к вибрации;

– вибрации можно избежать, используя другой угол между поверхностью резания и основанием робота. В большинстве случаев характер вибрации будет совершенно другим при повороте поверхности реза на $\pm 40^\circ$;

– если при встречном фрезеровании возникает вибрация, то при попутном, соответственно, её может и не быть. Силы резания, перпендикулярные поверхности заготовки, являются лучшим выбором;

– увеличение или уменьшение параметров резания, таких как DOC, WOC или скорость подачи, может изменить угол между силой резания и поверхностью заготовки;

– каждое положение при резании может привести к вибрации и каждое положение можно стабилизировать;

– выбрать правильный инструмент с точки зрения силы резания. Режущий инструмент, создающий более высокие усилия в трех направлениях, с большей вероятностью вызовет больший диапазон вибраций.

В работе [9] Schneider U. и соавторы повышают точность позиционирования промышленного робота с помощью внешних устройств контроля. При работе с роботом устанавливается специальное оснащение, которое отслеживает положение выходного звена и отправляет команды для корректировки.

Исследования, проводимые в Московском политехническом университете

На кафедре «Технологии и оборудование машиностроения» в Московском политехническом университете ведутся исследования в области технологического обеспечения качества на операциях полирования заготовок при производстве авиационных гидроагрегатов.

Цель работы заключается в сокращении трудоемкости полирования в производстве деталей авиационных агрегатов и обеспечении качества при роботизированном полировании. Основные задачи связаны с изучением режимов резания как основы для разработки алгоритмов позиционно-силового управления роботом, исследовании виброустойчивости процесса роботизированного полирования и взаимосвязей параметров процесса полирования с использованием технологии нейронных сетей, промышленной апробации разработанных алгоритмов и программ в производственных условиях.

Использование нейронных сетей (рис. 6) обусловлено тем, что на операции полирования можно обучить систему управления робота, подобно человеку, принимать решения на основе опыта. Включенный в систему генетический алгоритм должен создавать разнообразные наборы значений параметров путем перемешивания родительских данных из экспериментов и передавать их в нейронную сеть для оценки качества, которое зависит от качества поверхности, полученного с использованием этого набора данных.

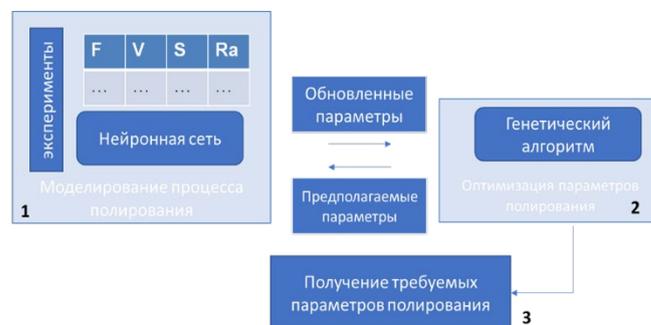


Рис. 6. Модель нейронной сети с генетическим алгоритмом [4]

Fig. 6. Neural network model with a genetic algorithm [4]

Известно применение нейронных сетей для распознавания связей в процессе полирования поверхности [13, 14].

Результаты пробных экспериментов обработки плоской поверхности позволяют утверждать, что роботизированные финишные операции могут применяться в технологических процессах изготовления деталей.

Также предметом исследований является возможность применения роботизированной отделочной обработки при изготовлении лопаток газотурбинных двигателей и последующего применения подобных решений в производстве. Авторами создан алгоритм позиционно-силового управления промышленным роботом с учетом жесткости робота.

Для определения фактической жесткости промышленного робота были проведены эксперименты по нагрузке статической силой выходного звена робота. На основе полученных результатов установлено, что на качество обработки влияет не только жесткость робота, но и ее изменение вылета руки робота.

При моделировании кинематики промышленного робота использован метод Денавита-Хартенберга [15]. Используя матрицы Якоби, может быть получена взаимосвязь сил реакции робота с силой резания, возникающей при обработке:

$$\tau = J^T(q) \cdot F, \quad (3)$$

где τ – сила (момент) в суставе; $J^T(q)$ – матрица Якоби; F – сила (момент) действующие на внешнее звено.

Учитывая результаты экспериментов по жесткости и зная требуемые параметры качества поверхности, выбираются ограничения внешних сил (либо моментов), действующих на выходное звено робота. Полученные зависимости являются основой для создания постпроцессора промышленного робота и моделирования процесса обработки (рис. 7). Постпроцессор играет ключевую роль при автоматизации программирования промышленных роботов, особенно в таких задачах, как обработка материалов.

После разработки управляющей программы робота были проведены эксперименты

по обработке криволинейной поверхности. Составляющие экспериментальной установки представлены на рисунке 8. Установлено снижение вибрации в процессе обработки и уменьшение отжима режущего инструмента в сравнении с позиционным управлением.

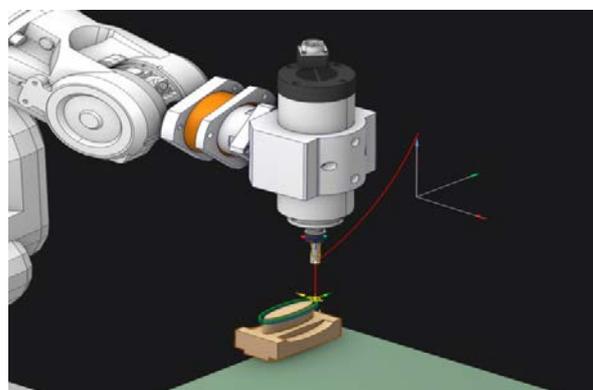


Рис. 7. Моделирование процесса обработки

Fig. 7. Finish simulation

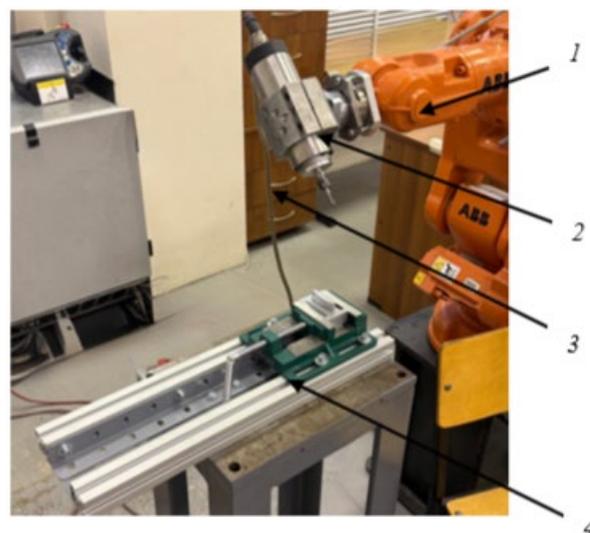


Рис. 8. Экспериментальная установка:

1 – робот ABB IRB 140; 2 – силомоментный датчик; 3 – инструментальный шпиндель; 4 – оснастка с заготовкой

Fig. 8. Experimental unit:

1 – ABB IRB 140 robot; 2 – force–torque sensor; 3 – tool spindle; 4 – tooling with a workpiece

Заключение

Промышленные роботы в настоящее время не могут полностью заменить классические станки с ЧПУ. Однако на данный момент в технологии изготовления многих деталей

сложной конфигурации присутствуют ручные слесарные операции, выполняемые рабочими высокой квалификации, но узкой специализации, что значительно усложняет и удорожает технологические процессы. Применение промышленных роботов в подобных операциях может значительно увеличить производительность и надежность технологического процесса. Исходя из возможностей роботов в совокупности с программным обеспечением, ручные операции тонкого фрезерования, шлифования и полирования возможно заменить на роботизированные. Для технологического обеспечения роботизированной обработки требуются дальнейшие исследования виброустойчивости процесса, а также возможностей позиционно-силового управления промышленными роботами. Будущие исследования будут направлены на создание универсального метода построения операций роботизированной обработки, учитывающего технологические возможности робота.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Xiaolong Ke and ets.** Review on robot-assisted polishing: Status and future trends // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102482>
2. **Fan Chen, Huan Zhao, Dingwei Li, Lin Chen, Chao Tan, Han Ding.** Contact force control and vibration suppression in robotic polishing with a smart end effector // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019. p. 391–403
3. **Gienke O., Pan Z., Yuan L. et al.** Mode coupling chatter prediction and avoidance in robotic machining process // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019. p. 104. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04053>
4. **Schwarz A.I., Mironov D.N., Vartanov M.V.** Methods of vibration suppression during robotic processing // *STANKOINSTRUMENT*, No. 3, (032), 2023. p. 34–41. <https://doi.org/10.22184/2499-9407.2023.32.3.34.41>
5. **Pan, Z. & Zhang, H.** Robotic machining from programming to process control: a complete solution by force control // *Industrial Robot*, 2008. 35. No. 5. p. 400–409. <https://doi.org/10.1108/01439910810893572>
6. **J. Zhang Y. Shi, X. Lin Z. Li,** Parameter optimization of five-axis polishing using abrasive belt flap wheel for blisk blade // *J. Mech. Sci. Technol* 31, 2017. 4805–4812. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0717-z>
7. **J. Pandremenos, C. Doukas, P. Stavropoulos, G. Chryssolouris** Machining with robots: a critical review // 7th International Conference on Digital Enterprise Technology. Athens. Greece. 2011.

8. **Cen, L., Melkote, S. N., Castle, J., and Appelman, H.** A Method for Mode Coupling Chatter Detection and Suppression in Robotic Milling // *ASME. J. Manuf. Sci. Eng.*, 2018. 140 (8). <https://doi.org/10.1115/1.4040161>
9. **Schneider, U., Drust, M., Ansaloni, M. et al.** Improving robotic machining accuracy through experimental error investigation and modular compensation // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2016. p. 85, <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6021-2>
10. **Tunc, L., Stoddart, D.** Tool path pattern and feed direction selection in robotic milling for increased chatter-free material removal rate // *Int J Adv Manuf Technol* 89, 2017. P. 2907–2918. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9896-2>
11. **Wei Ji, Lihui Wang.** Industrial robotic machining: a review // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019. p. 1239–1255, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03403-z>
12. **Russell Stewart, Norvig Peter.** Artificial intelligence: a modern approach // Publishing house "Williams", 2016. p. 1408.
13. **Segreto T., Karam, S. & Teti, R.** Signal processing and pattern recognition for surface roughness assessment in multiple sensors monitoring of robot-assisted polishing. // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 90. 2017. P. 1023–1033 <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9463-x>
14. **Khalick Mohammad A.E., Hong, J. & Wang, D.** Polishing of uneven surfaces using industrial robots based on neural network and genetic algorithm. // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 93, 1463–1471 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0524-6>
15. **Denavit, Jacques; Hartenberg, Richard Scheunemann** A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices // *Journal of Applied Mechanics*. 22 (2), 1955, P. 215–221. <https://doi.org/10.1115/1.4011045>

REFERENCES

1. Xiaolong Ke and ets. Review on robot-assisted polishing: Status and future trends // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102482>
2. Fan Chen, Huan Zhao, Dingwei Li, Lin Chen, Chao Tan, Han Ding, Contact force control and vibration suppression in robotic polishing with a smart end effector // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019. p. 391–403 <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.12.019>
3. Gienke, O., Pan, Z., Yuan, L. et al. Mode coupling chatter prediction and avoidance in robotic machining process // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019, p. 104. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04053>
4. Schwarz A.I., Mironov D.N., Vartanov M.V. Methods of vibration suppression during robotic processing // *STANKOINSTRUMENT*, No. 3, (032). 2023. pp. 34–41. <https://doi.org/10.22184/2499-9407.2023.32.3.34.41>
5. Pan, Z. & Zhang, H. Robotic machining from programming to process control: a complete solution by force control // *Industrial Robot*, 2008. No. 5. pp. 400–409 <https://doi.org/10.1108/01439910810893572>

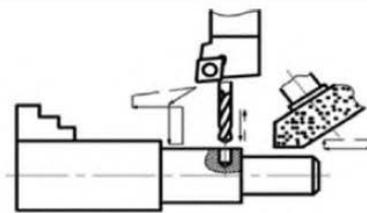
6. J. Zhang, Y. Shi, X. Lin, Z. Li, Parameter optimization of five-axis polishing using abrasive belt flap wheel for blisk blade // J. Mech. Sci. Technol 31, 2017. 4805–4812. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0717-z>
7. J. Pandremenos, C. Doukas, P. Stavropoulos, G. Chryssolouris Machining with robots: a critical review // 7th International Conference on Digital Enterprise Technology. Athens, Greece, 2011.
8. Cen, L., Melkote, S. N., Castle, J., and Appelman, H. A Method for Mode Coupling Chatter Detection and Suppression in Robotic Milling // ASME. J. Manuf. Sci. Eng., 2018. 140 (8): 081015. <https://doi.org/10.1115/1.4040161>
9. Schneider, U., Drust, M., Ansaloni, M. et al. Improving robotic machining accuracy through experimental error investigation and modular compensation // Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2016. p. 85, <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6021-2>
10. Tunc, L., Stoddart, D. Tool path pattern and feed direction selection in robotic milling for increased chatter-free material removal rate // Int J Adv Manuf Technol 89, 2017/ 2907–2918. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9896-2>
11. Wei Ji, Lihui Wang. Industrial robotic machining: a review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. 1239–1255, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03403-z>
12. Russell Stewart, Norvig Peter. Artificial intelligence: a modern approach // Publishing house "Williams", 2016. 1408 p.
<http://i.uran.ru/webcab/system/files/bookspdf/is-kusstvennyy-intellekt-sovremennyy-podhod/229021.pdf>
13. Segreto T., Karam, S. & Teti, R. Signal processing and pattern recognition for surface roughness assessment in multiple sensors monitoring of robot-assisted polishing. // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 90, 2017. 1023–1033 <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9463-x>
14. Khalick Mohammad A.E., Hong, J. & Wang, D. Polishing of uneven surfaces using industrial robots based on neural network and genetic algorithm. // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 93, 1463–1471 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0524-6>
15. Denavit, Jacques; Hartenberg, Richard Scheunemann A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices // Journal of Applied Mechanics. 22 (2), 1955. 215–221. <https://doi.org/10.1115/1.4011045>

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 14.03.2025; одобрена после рецензирования 21.03.2025; принята к публикации 10.04.2025.

The article was submitted 14.03.2025; approved after reviewing 21.03.2025; accepted for publication 10.04.2025.



Научно-технические технологии в машиностроении. 2025. №6 (168). С. 40-48.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №6 (168). P. 40-48.

Научная статья

УДК 621.9

doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-40-48

Проблема технологического обеспечения стабильности операций глубокого сверления при обработке крупногабаритных кузнечно-прессовых заготовок на многоцелевых станках с ЧПУ

Александр Рональдович Ингеманссон¹, д.т.н.

Никита Андреевич Толстяков², аспирант

¹ Федеральное научно-производственное учреждение «Титан-Баррикады», Волгоград, Россия

² Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

¹ aleing@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7963-393X>

² tolstijcov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. В статье рассматривается проблема технологического обеспечения стабильности операций глубокого сверления, выполняемых на автоматизированном оборудовании – многоцелевых станках с ЧПУ. Рассмотрена группа деталей, изготавливаемых из крупногабаритных кузнечно-прессовых заготовок. Показано, что перевод обработки с универсального горизонтально-расточного станка с использованием комплекта специальных сверл и зенкеров позволяет исключить необходимость изготовления специального инструмента и повысить режимы резания, однако сохраняется проблема стабильности обработки. Исследование твердости таких поковок обнаружило неравномерность данной характеристики на различных участках заготовки. Несмотря на то, что с точки зрения статистики совокупность экспериментальных данных является однородной и технологический процесс металлургического производства поковки является стабильным, выявленное непостоянство твердости оказывается весьма чувствительным для последующей стадии механической обработки, а именно для такого специального вида обработки как глубокое сверление. Экспериментальные исследования стружкообразования при обработке отверстий подтвердили приведенное положение. Отмечено, что задача управления работоспособностью инструментов и качеством получаемых поверхностей должна решаться как на стадии технологической подготовки производства, так и непосредственно при выполнении операций. Последнее может быть решено посредством адаптивного управления, которое на современных серийно выпускаемых многоцелевых станках с ЧПУ реализуется по величине действующей мощности резания, что не требует переоборудования автоматизированного станочного парка механообрабатывающих участков. Приведено обоснование выбора факторов и уровней их варьирования для построения регрессионных моделей, предназначенных для технологической подготовки и адаптивного управления операциями глубокого сверления на многоцелевых станках с ЧПУ.

Ключевые слова: глубокое сверление, твердость, работоспособность инструмента, шероховатость, адаптивное управление, режимы резания

Для цитирования: Ингеманссон А.Р., Толстяков Н.А. Проблема технологического обеспечения стабильности операций глубокого сверления при обработке крупногабаритных кузнечно-прессовых заготовок на многоцелевых станках с ЧПУ // Научно-технические технологии в машиностроении. 2025. № 6 (168). С. 40–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-40-48

Engineering support problem for the stability assurance in deep drilling operations for large-sized forging and pressing blanks work on multi-purpose CNC machines

Alexander R. Ingemansson¹, D.Eng.
Nikita A. Tolstyakov², PhD student

¹ Federal Research and Production Center "Titan-Barricades, Volgograd, Russia

² Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

¹ aleing@yandex.ru

² tolstijcov@mail.ru

Abstract. *the article discusses the problem of technological stability assurance of deep drilling operations performed on automated equipment – multipurpose CNC machines. A group of large-sized forging parts and pressing blanks is viewed. It is shown that using a set of special drills and counterboring tools instead of universal horizontal milling machine makes it possible to avoid making special tools and contributes to the improvement of cutting modes, but the problem of stability assurance remains. A study of the hardness of such forgings revealed the unevenness of this characteristic in various parts of the workpiece. Despite the fact that, from the point of view of statistics, the totality of experimental data is homogeneous and the flow process of metallurgical forging production is stable, the revealed hardness variability turns out to be very sensitive for the subsequent stage of machining, namely for its special type like deep drilling. Experimental studies of chip formation in hole-making operations have proved that. It is noted that the task of managing the operability of tools and the quality of the resulting surfaces should be solved both at the stage of process design and just within operations. The latter can be solved through adaptive control, which is implemented on modern mass-produced multipurpose CNC machines in terms of the operating cutting power, which does not require retrofitting an automated machine-tool fleet for machining sites. The rationale for the selection of factors and their variation levels in the construction of regression models used for design process and adaptive control of deep drilling operations on multipurpose CNC machines is given.*

Keywords: deep drilling, hardness, tool operability, roughness, adaptive control, cutting modes.

For citation: Ingemansson A.R., Tolstyakov N.A. Engineering support problem for the stability assurance in deep drilling operations for large-sized forging and pressing blanks work on multi-purpose CNC machines / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 6 (168). P. 40–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-6-40-48

Предпосылки проблемы обеспечения стабильности обработки глубоким сверлением на многоцелевых станках с ЧПУ

Технологическое обеспечение стабильности процессов механической обработки резанием остается актуальной проблемой для автоматизированных машиностроительных производств [1, 2]. От успешности ее решения зависят комплексные показатели надежности и эффективности использования технологической системы, в т.ч. коэффициент использования, коэффициент выхода годной продукции, коэффициент сохранения производительности.

В структурной модели процесса резания выделяют входные, функциональные и выходные параметры обработки. К входным переменным относят управляющие, определяющие и возмущающие факторы.

Стохастический характер свойственен возмущающим факторам, к которым принадлежат случайные изменения физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, припуска на обработку, статических и динамических характеристик станков и другие [3]. Нестабильность механических свойств, которую в цеховых условиях с достаточной степенью оперативности и универсальности можно оценивать по твердости, внутри партии заготовок или в пределах участков крупногабаритной заготовки имеет влияние на характер температурно-деформационной напряженности процесса резания. Постоянство силы резания, как функционального параметра обработки, находится в неотъемлемой зависимости от этого. В результате формируются предпосылки нестабильности периода стойкости инструмента и качества обработанных поверхностей как выходных

характеристик технологического процесса обработки резанием. Статистика гласит, что в механических цехах, укомплектованных автоматизированным оборудованием с ЧПУ, преждевременная потеря работоспособности является причиной замены инструментов в каждом втором случае [4].

Неравномерность механических свойств между различными участками крупногабаритных кузнечно-прессовых заготовок может оказывать заметное влияние на стабильность протекания процессов последующей механической обработки. Указанное непостоянство свойств является проявлением технологической наследственности предшествующих этапов получения кузнечного слитка, обработки давлением, термической обработки и переносит свое влияние на операции формообразования механической обработкой. Такое воздействие проявляется в особенности для специальных видов резания, таких как, например, глубокое сверление.

В полной мере указанные особенности можно наблюдать при обработке крупногабаритных корпусных деталей. В фокусе исследования находилась группа корпусных деталей, изготавливаемых из поковок призматической формы габаритами до 550×550×600 мм. Обработываемый материал – конструкционная легированная сталь. В маршруте изготовления присутствует объемная закалка с отпуском. Конструкторско-технологической особенностью рассматриваемого предмета является необходимость обработки глубоких сквозных отверстий с отношением длины к диаметру отверстия до $l/d_{отв.} = 20$.

Следует отметить, что конструктивные особенности деталей для изделий энергетической, нефтегазовой, атомной промышленности, специального машиностроения, а также судостроения вызывают необходимость выполнения сверления глубоких отверстий. Обработке подвергаются как тела вращения на станках для глубокого сверления токарной и вертлюжной компоновки, так и призматические корпусные детали с использованием специальных наладок и оборудования. На сегодняшний день

формируется тенденция концентрации выполняемых операций на многоцелевых станках с ЧПУ. Например, технология глубокого сверления корпусными сверлами со сменными пластинами или ружейными сверлами с напайными пластинами для обработки деталей энергетического машиностроения реализуется на токарно-фрезерных ОЦ [5]. Кроме этого, в современной промышленности применяются сверлильные станки для обработки решеток теплообменников, днищ, рабочих колес турбин, литейной форм, например, модели серии BW («ТВТ», Германия) и модели серий CAMDER G, GS, HS («WIM», КНР), с компоновкой, близкой к структуре горизонтального многоцелевого станка с ЧПУ. При этом кинематика оборудования позволяет осуществлять наклон оси шпинделя для получения глубоких отверстий в заготовках под заданным углом.

Внедренный ранее маршрут обработки с учетом уровня имевшихся средств технологического оснащения предполагал использование сконструированных и изготавливаемых специальных сверл, и зенкеров длиной до 1450 мм для горизонтально-расточного станка. С целью совершенствования технологии – исключения необходимости изготовления специальных инструментов и интенсификации режимов резания – была реализована обработка корпусными сверлами для глубокого сверления со сменными твердосплавными режущими и направляющими пластинами на горизонтальном многоцелевом станке с ЧПУ. Подача СОЖ выполняется по каналам внутри корпуса сверла под высоким давлением – 5 МПа. Непостоянство обрабатываемости материала в пределах одной крупногабаритной заготовки, между заготовками в одной партии, а также между заготовками из разных партий способствует недостаточной стабильности периода стойкости режущего инструмента и качества получаемых поверхностей [6].

Отсюда следует, что требуемое от технологического процесса обеспечение стабильности и качества обработки глубоких отверстий на многоцелевых станках с ЧПУ в условиях непостоянства свойств обрабатываемого материала и стохастического

характера процесса резания, формирует научную проблему, актуальную для современной практики машиностроительных предприятий.

Исследование нестабильности обрабатываемости крупногабаритных кузнечно-прессовых заготовок

С целью установления характера неоднородной обрабатываемости в пределах размеров крупногабаритной заготовки между заготовками одной плавки, проходившими совместную термическую обработку в одной партии, а также между заготовками разных плавков были выполнены нижеописанные исследования.

В кузнечно-прессовых заготовках габаритами 550×550×600 мм во взаимно перпендикулярных плоскостях в области объемов материала, предстоящего к удалению при обработке сквозных отверстий, с постоянным шагом были проконтролированы значения твердости. Измерения выполнялись с интервалом, позволяющим получить по 10 совокупностей замеров вдоль соответствующих поверхностей призматической заготовки. Для исследований использовался переносной твердомер «Константа КТ» («Константа», Россия). Статистически обработанные результаты исследований сведены в табл. 1 [7].

1. Результаты исследования стабильности твердости материала кузнечно-прессовых заготовок, поступающих на обработку глубоким сверлением

1. Hardness stability research results for the material in forging and pressing blanks subjected to deep drilling

Предприятие-изготовитель заготовки	Номер плавки	Номер садки термообработки (закалка с отпуском)	Номер заготовки	Среднее значение твердости, НВ	Стандартное отклонение НВ	Коэффициент вариации %
А	0051	79	№ 06	316	40	12,5
	0079	76	№ 24	276	50	18,2
	0054	68	№ 04	341	23	6,6
Б	7842	78	№ 43	308	53	17,2
	7142	71	№ 52	287	51	17,8
			№ 44	321	36	11,2
			№ 57	337	27	8,2
			№ 51	335	39	12,5
			№ 48	320	10	3,2
			№ 46	335	21	6,2
	7280	72	№ 75	324	8	2,4
			№ 74	326	10	3,0
			№ 76	323	21	6,6
	7986	79	№ 93	329	17	5,2
			№ 89	327	35	10,7
	7239	72	№ 66	322	32	10,1
			№ 60	313	32	10,3

Установленное по данным экспериментальных исследований распределение случайной величины твердости обрабатываемого

материала подчиняется закону нормального распределения (рис. 1).

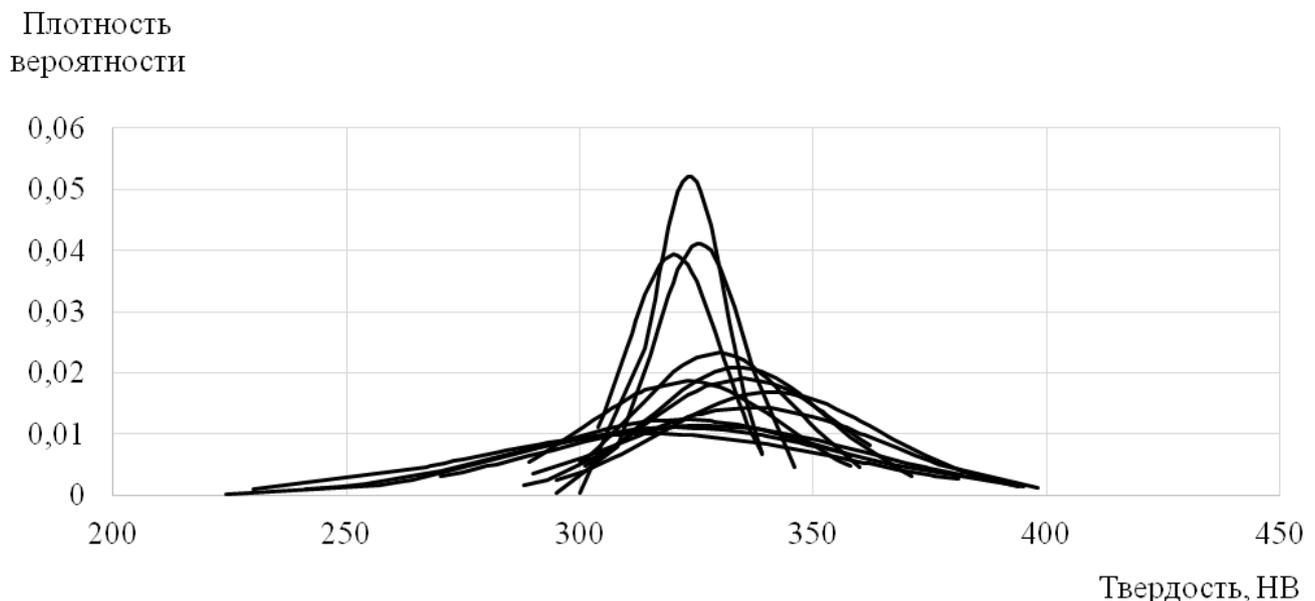


Рис. 1. Распределение случайной величины твердости обрабатываемого материала

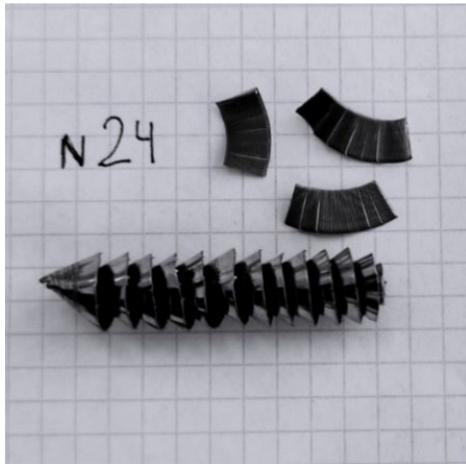
Fig. 1. Distribution of the random value of the work stock hardness

Анализ полученных величин стандартного отклонения и коэффициента вариации, который достигает 18,2 %, твердости материала крупногабаритных поковок демонстрирует непостоянство обрабатываемости в пределах объемов заготовки. Более того, зафиксировано трехкратное отличие величин коэффициента вариации твердости между заготовками одной плавки, проходившими совместную термическую обработку в одной партии, и между заготовками разных плавки (табл. 1). Несмотря на то, что с точки зрения статистики совокупность является однородной и технологический процесс металлургического производства поковок является стабильным (коэффициента вариации твердости не превышает 33 %), указанное непостоянство твердости оказывается весьма чувствительным для последующей стадии механической обработки, а именно для такого специального вида обработки как глубокое сверление [7].

Обнаруженный стохастический характер распределения твердости материала поковки переносит свое влияние на формирование

сопротивления деформированию в зоне первичных и вторичных деформаций, отсюда и на тепловыделение, а также на протекание процесса контактного взаимодействия в зоне резания. Представленные обстоятельства способствуют нестабильности периода стойкости инструмента и качества получаемых поверхностей. Операторы, встречающиеся с этим обстоятельством на практике при эксплуатации сверлильно-фрезерно-расточных станков с ЧПУ, называют такое непостоянство свойств обрабатываемого материала «разнотвердостью». Так, при прохождении сверлом «мягких» участков заготовки рабочий вынужден сверх нормативного прерывать обработку для вывода инструмента из глубокого отверстия с целью контроля состояния режущих пластин и процесса стружкодробления [6].

Выполнены также исследования морфологии стружки, образующейся при глубоком сверлении отверстий на горизонтальном многоцелевом станке с ЧПУ в заготовках из представленной выборки (рис. 2).



а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Фотографии стружек, полученных при глубоком сверлении:

а – заготовка № 24; б – заготовка № 75; в – заготовка № 89; г – заготовка № 66

Fig. 2. Photographs of chips obtained by deep drilling:

а – blank № 24; б – blank № 75; в – blank № 89; г – blank № 66

При обработке заготовки № 24, отличающейся наибольшей вариацией твердости, имело место наличие как элементных стружек с ненадежным скалыванием, так и сливных спиральных. Усредненный диаметр спиралей составлял 11 мм, а длина – 49,3 мм (рис. 2, а).

Во время сверления отверстий в заготовке № 75, имевший наименьший разброс механических свойств, стабильно образовывалась элементная стружка скалывания (рис. 2, б).

При обработке заготовок № 89 и № 66, характеризующихся коэффициентами

вариации 10,7 % и 10,1 %, соответственно, имели место как стружки с неравномерным скалыванием, так и спирали со средними диаметрами 10,3 мм и 9,8 мм и длиной 29 мм и 26 мм, соответственно (рис. 2, в, г).

Полученные результаты коррелируют с данными о непостоянстве механических свойств материала поковок. Наличие как элементной, так и сливной стружки при обработке заготовок № 24, 89 и 66, свидетельствует о наличии участков с неравномерной твердостью. В областях материала с повышенной пластичностью стружколом на сменной многогранной

пластине (СМП) при неизменной величине подачи инструмента работает ненадежно. В таких условиях эвакуация стружки затруднена, поэтому оператор многоцелевого станка вынужден принудительно прерывать обработку и варьировать подачу в ручном режиме. Особенно это заметно для заготовки № 24, имевшей наибольшую вариацию твердости.

Таким образом, результаты исследования непостоянства обрабатываемости крупногабаритных кузнечно-прессовых заготовок, свидетельствуют о необходимости разработки научно обоснованного подхода по учету выявленной нестабильности как на стадии технологической подготовки производства, так и на этапе непосредственного выполнения операции глубокого сверления.

Обоснование выбора факторов для построения математических моделей для управления обработкой глубоким сверлением на многоцелевых станках с ЧПУ

Задача управления работоспособностью инструментов и качеством получаемых поверхностей должна решаться как на стадии технологической подготовки производства, так и непосредственно при выполнении операций. Последнее может быть реализовано за счет использования адаптивного управления [8, 9].

Адаптивное управление на современных серийно выпускаемых многоцелевых станках с ЧПУ может реализовано по величине действующей мощности резания, что не требует переоборудования автоматизированного станочного парка механообрабатывающих участков. Для технологической подготовки производства и адаптивного управления необходимы надежные математические модели, связывающие входные, функциональные и выходные параметры процесса резания.

С целью разработки таких математических моделей для обработки глубоким сверлением выбраны следующие факторы: твердость обрабатываемого материала заготовки НВ; теплопроводность твердосплавной СМП, Вт/м·К; режимы резания – скорость резания м/мин и подача мм/об (табл. 2). Твердость является характеристикой обрабатываемости материала заготовки, которую с достаточной степенью универсальности и оперативности возможно определять в условиях механообрабатывающих участков. Теплопроводность инструментального материала определяет характер теплораспределения в зоне резания и, соответственно, характер контактного взаимодействия. В качестве функционального параметра процесса выбрана сила резания, *H*. В роли выходного параметра, отражающего качество обработанной поверхности, выбрана шероховатость *Ra*, мкм.

2. Факторы и уровни их варьирования для построения математической модели обработки глубоким сверлением

2. Factors and levels of their variation for constructing a mathematical model of deep drilling cut

Входные параметры	Уровень варьирования фактора		
	-1	0	+1
Твердость, НВ	220 НВ (КТ 60)	300 НВ (КТ 80)	380 НВ (КТ 100)
Теплопроводность λ , Вт/м·К	16 Вт/м·К	19 Вт/м·К	51 Вт/м·К
Подача <i>S</i> , мм/об	0,08 мм/об	0,1 мм/об	0,12 мм/об
Скорость резания <i>v</i> , м/мин	40 м/мин	55 м/мин	70 м/мин

В качестве материала заготовок, прошедших упрочняющую термообработку для достижения уровней варьирования твердости согласно табл. 2, использовалась конструкционная легированная сталь 12Х2НВФА.

В качестве инструмента применялись корпусное сверло мод. K5D34032-11 и СМП к нему, имеющие формы квадрата – периферийная (SPMT) и ломаного четырехгранника – центральная (ХОМТ) («Korloy», Ю. Корея). В экспериментальном исследовании для обеспечения уровней варьирования фактора теплопроводности запланированы твердосплавные СМП без износостойкого покрытия, а также с износостойкими PVD- и CVD-покрытиями, нанесенными методами химического осаждения из парогазовой фазы и физического осаждения из пароплазменной фазы, соответственно [10, 11]. При выборе уровней варьирования факторов скорости резания и подачи (табл. 2) учитывались рекомендации отечественной справочной литературы [12], производителей инструмента для сверления – «Votek» (Германия), «Korloy» (Ю.Корея), а также имеющийся опыт на механообрабатывающем участке, оснащенном многоцелевыми станками с ЧПУ.

Выводы

1. Обоснована актуальность проблемы технологического обеспечения стабильности операций глубокого сверления при обработке крупногабаритных кузнечно-прессовых заготовок на многоцелевых станках с ЧПУ.

2. Выполнено исследование непостоянства твердости на различных участках крупногабаритных поковок и, соответственно, нестабильной обрабатываемости на операциях сверления.

3. Приведено обоснование выбора факторов и уровней их варьирования для построения регрессионных моделей, предназначенных для технологической подготовки и адаптивного управления операциями глубокого сверления на многоцелевых станках с ЧПУ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Плотников А. Л., Чигиринский Ю. Л., Тихонова Ж. С., Фролов Е. М., Крайнев Д. В. Как научить систему ЧПУ решать технологическую задачу по выбору надёжных значений параметров процесса металлообработки // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №. 3. С. 32–39. DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-3-32-39>.
2. Бутенко В. И., Лебедев В. А., Колганова Е. Н., Кадач Р. Г. Эффективные способы заточки металлорежущих инструментов из быстрорежущей стали и твёрдых сплавов // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №. 11. С. 44–48. DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2024-44-48>.
3. Старков В. К. Физика и оптимизация резания материалов. М.: Машиностроение, 2009. 640 с.
4. Григорьев С. Н., Маслов А. Р. Обработка резанием в автоматизированном производстве: учебник. М.: Машиностроение, 2008. 372 с.
5. Шатцль Д., Коль Р. Глубокое сверление // РИТМ машиностроения. 2015. №. 5. С. 37–39.
6. Ингеманссон А. Р., Толстяков Н. А. Исследование рассеяния твердости крупногабаритных кузнечно-прессовых заготовок и влияния на обрабатываемость резанием // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2023. № 8. С. 18–21. doi: <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-8-279-18-21>.
7. Толстяков Н. А., Ингеманссон А. Р. Влияние неравномерного распределения твердости в крупногабаритных кузнечно-прессовых заготовках на характеристики стружкообразования на операциях глубокого сверления // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2024. № 3. С. 30–33. DOI: <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2024-3-286-30-33>.
8. Суслов А. Г., Петрушин Д. И., Шалыгин М. Г., Хандожко В. А. Автоматизированное технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей машин // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №. 7. С. 24–33. DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2024-24-33>.
9. Унянин А. Н., Финагеев П. Р. Исследование эффективности методики коррекции режима процесса механической обработки с изменяющимися во времени параметрами в условиях неопределённости технологической информации // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №. 12. С. 23–29. doi: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-23-29>.
10. Korloy. Metal cutting tools: catalogue. South Korea: Korloy Publ., 2017. P. 1060.
11. Верещака А. С., Третьяков И. П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1986. 192 с.
12. Справочник технолога / под общей ред. А. Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.

REFERENCES

1. Plotnikov A.L., Chigirinsky Yu.L., Tikhonova Zh.S., Frolov E.M., Krainev D.V. Training of CNC system for solving a process task of ranging reliable values of metalworking operation parameters // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2022. No. 3. pp. 32–39. DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-3-32-39>
2. Butenko V.I., Lebedev V.A., Kolganova E.N., Kalach R.G. Effective ways of sharpening metal-cutting tools made of rapid steel and hard alloys // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2024. No. 1., pp. 44–48. DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2024-44-48>
3. Starkov V.K. Physics and optimization of cutting materials. Moscow: Mashinostroenie, 2009. 640 p.
4. Grigoriev S.N., Maslov A.R. Machining in automated production: textbook. Moscow: Mashinostroenie, 2008. 372 p.
5. Schatzl D., Kohl R. Deep drilling // RHYTHM of mechanical engineering, 2015. No. 5. pp. 37–39.
6. Ingemansson A.R., Tolstyakov N.A. Investigation of hardness dispersion of large-sized forging and pressing blanks and their effect on machinability // Proceedings of the Volgograd State Technical University, 2023, No. 8, pp. 18–21. DOI: <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-8-279-18-21>
7. Tolstyakov N.A., Ingemansson A.R. The effect of uneven hardness distribution in large-sized forging and pressing blanks on the characteristics of chip formation during deep drilling operations // Proceedings of the Volgograd State Technical University, 2024, No. 3, pp. 30–33. DOI: <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2024-3-286-30-33>
8. Suslov A.G., Petrishin D.I., Shalygin M.G., Khandozhko V.A. Automated technological support and improvement of the operational properties of machine parts // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2024, No. 7, pp. 24–33, DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2024-24-33>.
9. Unyanin A.N., Finogeev P.R. Study of the technique performance for the correction of the mode of the machining process with time-varying parameters in the conditions of technological information uncertainty // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2023. No. 12. pp. 23–29. DOI: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-23-29>
10. Korloy. Metal cutting tools: catalogue. South Korea: Korloy Publ., 2017. P. 1060.
11. Vereshchaka A.S., Tretyakov I.P. Cutting tools with wear-resistant coatings. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 192 p.
12. Technologist's handbook: handbook / edited by A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2019. 800 p.

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 23.03.2025; одобрена после рецензирования 14.04.2025; принята к публикации 12.05.2025.

The article was submitted 23.03.2025; approved after reviewing 14.04.2025; accepted for publication 12.05.2025.

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

Верстка Н.А. Лукашов. Редактор А.Ю. Кленичева. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.06.2025. Выход в свет 30.06.2025.

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

