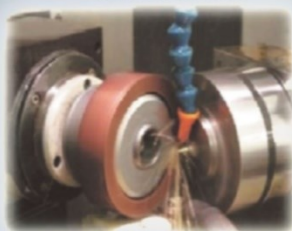


НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

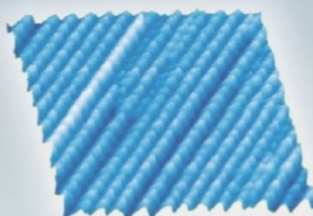
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

7(157)
2024

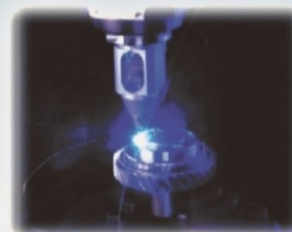
**ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
И КОМБИНИРОВАННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



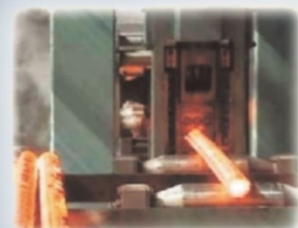
**НАНОТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**



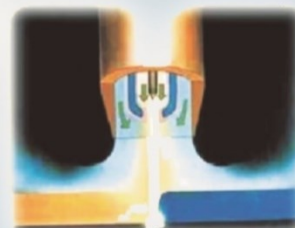
**ЛАЗЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



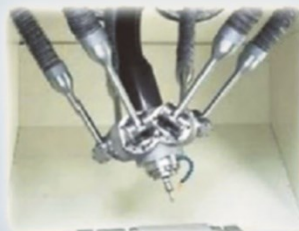
**ТЕХНОЛОГИИ
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В СВАРОЧНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



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

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 7 (157)

2024

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

Главный редактор

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

Зам. главного редактора

д.т.н., доц. ШАЛЫГИН М.Г. (г. Брянск)

Председатель редакционного совета

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

Зам. председателя редакционного совета

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

Редакционный совет:

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

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

д.н., доктор инженер ВАЛЬДЕНМАЙЕР Т.

(г. Штутгарт, Германия)

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

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

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

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

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

д.т.н., проф. ЛАРИН С.Н. (г. Тула)

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

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

д.т.н., проф. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)

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

д.т.н., акад. НАН Беларуси МЫШКИН Н.К.

(г. Гомель, Беларусь)

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

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

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

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

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

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

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

DOI:10.30987/issn.2223-4608

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

Подписной индекс: **Э79195**.

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

E-mail: editntm@yandex.ru

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

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

26 апреля 2019 года

рег. номер ПИ № ФС77-75524

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Петрова Л.Г., Белашова И.С. Газоциклические процессы
химико-термической обработки: регулирование строения
азотированного слоя в железе и сталях 3

ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Макаров В.Ф., Песин М.В., Коногорова Л.В., Хабарова А.В., Абзаев Р.С.
Особенности обрабатываемости резанием новых высокопрочных
титановых сплавов с ультрамелкозернистой структурой
для деталей авиационной техники 15

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПОДГОТОВКА И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Суслов А.Г., Петешин Д.И., Шалыгин М.Г., Хандожко В.А.
Автоматизированное технологическое обеспечение и повышение
эксплуатационных свойств деталей машин 24

Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Бровкова М.Б. Создание и развитие
высоконадежных информационно-управляющих систем с элементами
искусственного интеллекта для перспективных технологических
комплексов 34

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ СБОРКЕ МАШИН

Базров Б.М. Структура машиностроительного изделия 43

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

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 7 (157)

2024

Publishes from July 2011

MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

Comes out with assistance of Engineering Technologists Association

Editor-in-chief

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

Deputy chief editor

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

Chairman of Editorial Committee

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

Chairman Assistant

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

Editorial Committee:

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

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

PhD., Dr. Engineer WALDENMAIER T.

(Stuttgart, Germany)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

DOI:10.30987/issn.2223-4608

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

Subscription index: **379195**.

Editorial office Ph: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: editntm@yandex.ru

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

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

CONTENTS

MATERIALS SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING

Petrova L.G., Belashova I.S. Gas-cycling processes of chemical and thermal
treatment: regulation of the nitride layer structure for iron and steel. 3

TECHNOLOGIES OF MECHANICAL PROCESSING OF WORKPIECES

Makarov V.F., Pesin M.V., Konogorova L.V., Khabarova A.V., Abzaev R.S.
Cutting ability features for new high-strength titanium alloys with an
ultrafine-grained structure used for aircraft parts 15

TECHNOLOGICAL PROCESSES AUTOMATED CONTROL

Suslov A.G., Petreshin D.I., Shalygin M.G., Khandozhko V.A. Automated
technological support and improvement of the operational properties
of machine parts 24

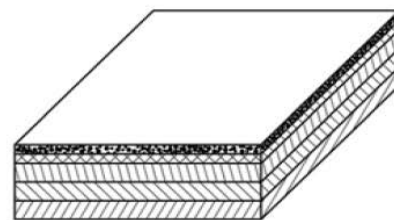
Brzhozovsky B.M., Martynov V.V., Brovkova M.B. Creation and development
of highly reliable information and control systems with elements of artificial
intelligence for advanced technological complexes 34

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MACHINE ASSEMBLY

Bazrov B.M. Mechanical product structure 43

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

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



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №7 (157). С.3-14.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №7 (157). P.3-14.

Научная статья
УДК 621.785.53
doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-14

Газоциклические процессы химико-термической обработки: регулирование строения азотированного слоя в железе и сталях

Лариса Георгиевна Петрова¹, д.т.н.
Ирина Станиславовна Белашова², д.т.н.

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

¹ petrova_madi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7248-2454>
² info@madi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1395-1027>

Аннотация. Актуальность проведенного исследования обусловлена потребностями машиностроения в развитии недорогих и эффективных технологий поверхностного упрочнения стальных изделий, к которым относится газовое азотирование. Целью работы является исследование влияния азотирования в газоциклическом режиме на кинетику роста диффузионных слоев и их фазовый состав в железе и сталях: инструментальной стали ХВГ и коррозионностойкой мартенситностареющей стали 03X11H10M2T (ВНС-17). Помимо изотермических процессов (при 520 °C и 620 °C) исследованы процессы с изменением температуры на активных и пассивных стадиях (термоциклирование 520 °C / 620 °C). Установлено, что газо- и термоциклирование существенно увеличивает толщину диффузионного слоя в железе по сравнению с традиционным азотированием в аммиаке, и в наибольшей степени это происходит за счет роста зоны внутреннего азотирования. Процессы с многократно повторяющимися короткими полуциклами, заканчивающиеся активной стадией насыщения в аммиаке, способствуют формированию развитой нитридной зоны. Формирование поверхностных слоев в железе без ε-фазы происходит при двухстадийных процессах с заключительной пассивной стадией. Показано, что термогазоциклические процессы обеспечивают кратное увеличение толщины зоны внутреннего азотирования в стали ХВГ. Процессы с длительностью полуциклов 1 и 1,5 ч с завершающей стадией деазотирования способствуют преобладанию γ'-фазы в карбонитридной зоне, что объясняет повышение износостойкости. Термогазоциклический процесс 530 °C / 580 °C в пульсирующей аммиачно-воздушной смеси с завершающей пассивной стадией применен для формирования зоны соединений на базе γ'-фазы в стали 03X11H10M2T (ВНС-17).

Ключевые слова: газоциклическое азотирование, стали, диффузионный слой, зона внутреннего азотирования, карбонитридная зона, износостойкость

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту №FSFM-2024-0001.

Для цитирования: Петрова Л.Г., Белашова И.С. Газоциклические процессы химико-термической обработки: регулирование строения азотированного слоя в железе и сталях // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 7 (157). С. 3–14. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-14

Gas-cycling processes of chemical and thermal treatment: regulation of the nitride layer structure for iron and steel

Larisa G. Petrova¹, D. Eng.

Irina S. Belashova², D. Eng.

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

¹ petrova_madi@mail.ru

² info@madi.ru

Abstract. The relevance of the research is determined by the needs of mechanical engineering in the development of inexpensive and effective technologies for surface hardening of steel products, which include gas nitride hardening. The aim of the work is to study the effect of nitride hardening in the gas-cyclic regime on the kinetics of growth of diffuse layers and their phase composition in case of iron and steel: ChWMn tool steel and corrosion-resistant maraging steel 03Ch11Ni10Mo2Ti (WSTST17). In addition to isothermal processes (at 520 °C and 620 °C), processes with temperature changes at active and passive stages (thermal cycling 520 °C / 620 °C) have been studied. It has been found that gas and thermal cycling significantly increases the thickness of the diffusion layer in iron compared to traditional nitride hardening in ammonia, and this is mainly due to the growth of the internal nitriding zone. Processes with multitime repeat short half-cycles, which end in an active saturation stage in ammonia and contribute to the formation of a developed nitride zone. The formation of surface layers in iron without an ϵ -phase occurs in two-stage processes with a final passive stage. It is shown that thermo-gas cyclic processes provide a multiple increase in the thickness of the internal nitriding zone in ChWMn steel. Processes with a duration of half cycles of 1 and 1,5 hours with the final stage of denitration contribute to the predominance of the γ' phase in the carbonitride zone, which explains the increase in wear resistance. A thermal gascyclic process of 530 °C / 580 °C in a pulsating ammonia-air mixture with a final passive stage is used to form a junction zone based on the γ' -phase in steel 03Ch11Ni10Mo2Ti (WSTST17).

Keywords: gas-cycling nitride hardening, steels, diffuse layer, internal nitriding zone, carbonitride zone, wear resistance

For citation: Petrova L.G., Belashova I.S. Gas-cycling processes of chemical and thermal treatment: regulation of the nitride layer structure for iron and steel / Science intensive technology in mechanical engineering. 2024. № 7 (157). P. 3–14. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-14

Введение

Среди существующих технологий химико-термической обработки (ХТО) газовое азотирование остается наиболее широко распространенным методом поверхностного упрочнения стальных изделий. Азотирование обладает определенными преимуществами перед другими процессами ХТО, из которых важнейшим является возможность создания многообразных структур диффузионных слоев. Азотированные слои с регулируемым фазовым составом могут обеспечивать различные свойства поверхности для заданных условий работы деталей машин и инструментов: твердость, износостойкость, коррозионную стойкость, усталостную прочность и т. п. [1].

Требования к фазовому составу азотированных слоев применяются на основе известных механизмов изнашивания, закономерностей процессов коррозионного разрушения и других особенностей нагружения поверхности в конкретных условиях работы изделий. Традиционно полагают, что для деталей, работающих в условиях трения, необходимо сформировать твердое внешнее поверхностное покрытие на основе химических соединений. Однако для наиболее эффективной защиты от износа нитридная зона должна «опираться» на упрочненную зону внутреннего азотирования (ЗВА). Например, для режущего инструмента, испытывающего высокие удельные давления, оптимальным является строение азотированного слоя, состоящего из тонкой поверхностной карбонитридной зоны на базе γ' -фазы и развитой зоны внутреннего

азотирования [2, 3]. Считается, что для инструмента формирование хрупкой ϵ -фазы является нежелательным, поскольку вызывает снижение его работоспособности [4].

Формирование протяженной зоны внутреннего азотирования без поверхностной зоны соединений является предпочтительным для многих деталей, работающих в условиях высоких динамических нагрузок [5]. Для тонкостенных изделий может применяться сквозное азотирование с формированием зоны внутреннего азотирования, с дисперсионным упрочнением нитридами, что способствует повышению жаропрочности специальных сталей и сплавов [6]. Существуют также особые технологические приемы, обеспечивающие формирование ЗВА в виде монослоя на базе легированного твердого раствора, сохраняющего коррозионную стойкость сталей [7].

Регулирование строения азотированных слоев в железе и сталях традиционно осуществляется путем контроля азотного потенциала насыщающей атмосферы, который поддерживается на уровне растворимости азота в определенных фазах системы Fe-N. При газовом азотировании изменение азотного потенциала может быть реализовано путем разбавления аммиака, например, азотом, воздухом, кислородом и т. п. [8 – 10].

Технологии газового азотирования являются в большинстве своем низкотемпературными, поэтому для получения протяженных азотированных слоев требуются процессы большой длительности. Задача интенсификации азотирования особенно актуальна для легированных сталей, в которых медленно протекает диффузия азота. Для ускорения процесса насыщения сталей азотом применяются способы ХТО с использованием высокоэнергетических воздействий тлеющего разряда, лазера, плазмы.

Свою эффективность в активизации формирования азотированных слоев показали процессы с циклическим изменением азотного потенциала [11 – 13]. Классический газоциклический процесс предусматривает чередование стадий с высокой и низкой активностью

азотосодержащей атмосферы при одной и той же температуре. На активной стадии насыщения с высоким азотным потенциалом образуется поверхностная зона соединений; слой ϵ -фазы оказывается препятствием для дальнейшего проникновения азота вглубь слоя, что тормозит развитие зоны внутреннего азотирования. Проведение последующей стадии с пониженным азотным потенциалом вызывает рассасывание богатой азотом ϵ -фазы, т. е. процесс деазотирования, под которым подразумевают поступление высвобождающихся атомов азота в твердый раствор [14]. Многократное циклическое повторение стадий азотирования и деазотирования обеспечивает прирост азотированного слоя [15].

Изменение температуры на стадиях газоциклического процесса создает дополнительные возможности для интенсификации азотирования и регулирования фазового состава диффузионного слоя благодаря протеканию фазовых превращений [16].

Отдельный интерес представляет влияние термо- и газоциклирования на строение диффузионных слоев в легированных сталях, т. к. при наличии в железе легирующих элементов многообразие возможных фаз в азотированном слое существенно возрастает.

Целью работы является экспериментальное исследование влияния режимов газо- и термоциклического азотирования на кинетику роста азотированных слоев и их фазовый состав в железе и легированных сталях.

Методика проведения исследований

Для лабораторного эксперимента использовали установку для азотирования в проточном аммиаке, в которой предусмотрена возможность регулирования состава насыщающей среды. На модельном материале – армко-железе – изучены несколько режимов азотирования, состоящих из активных стадий в чистом аммиаке и пассивных стадий при отключении подачи аммиака. Изотермические газоциклические (ГЦ) процессы проводились при одинаковых температурах активных и пассивных стадий: режим ГЦ 520 при

температуре ниже эвтектоидной в системе Fe-N ($t_a = t_n = 520^\circ\text{C}$) и режим ГЦ 620 при температуре выше эвтектоидной ($t_a = t_n = 620^\circ\text{C}$).

Термогазоциклический режим ТГЦ 520/620 предусматривал разные температуры на активных и пассивных стадиях процесса: $t_a = 520^\circ\text{C}$ и $t_n = 620^\circ\text{C}$ (рис. 1). При всех режимах поддерживали степень диссоциации аммиака: на активных стадиях $\alpha_a = 25\ldots 30\%$ при $t_a = 520^\circ\text{C}$ и $\alpha_a = 40\ldots 45\%$ при $t_a = 620^\circ\text{C}$; на пассивных стадиях $\alpha_n = 68\ldots 70\%$ при $t_n = 520^\circ\text{C}$ и $\alpha_n = 94\ldots 98\%$ – при $t_n = 620^\circ\text{C}$.

При общем времени процесса 6 ч варируют число циклов N , включающих активную и пассивную стадии (см. рис. 1). Каждый цикл состоит из двух полуциклов определенной продолжительности τ_{nc} , одинаковой для стадий насыщения и деазотирования (0,5, 1, 1,5 и 3 ч). Процессы, заканчивающиеся финальной пассивной стадией (П-режим), оказываются «асимметричными»; «симметричные» процессы предусматривали дополнительную активную стадию 0,5 или 1 ч (А-режимы).

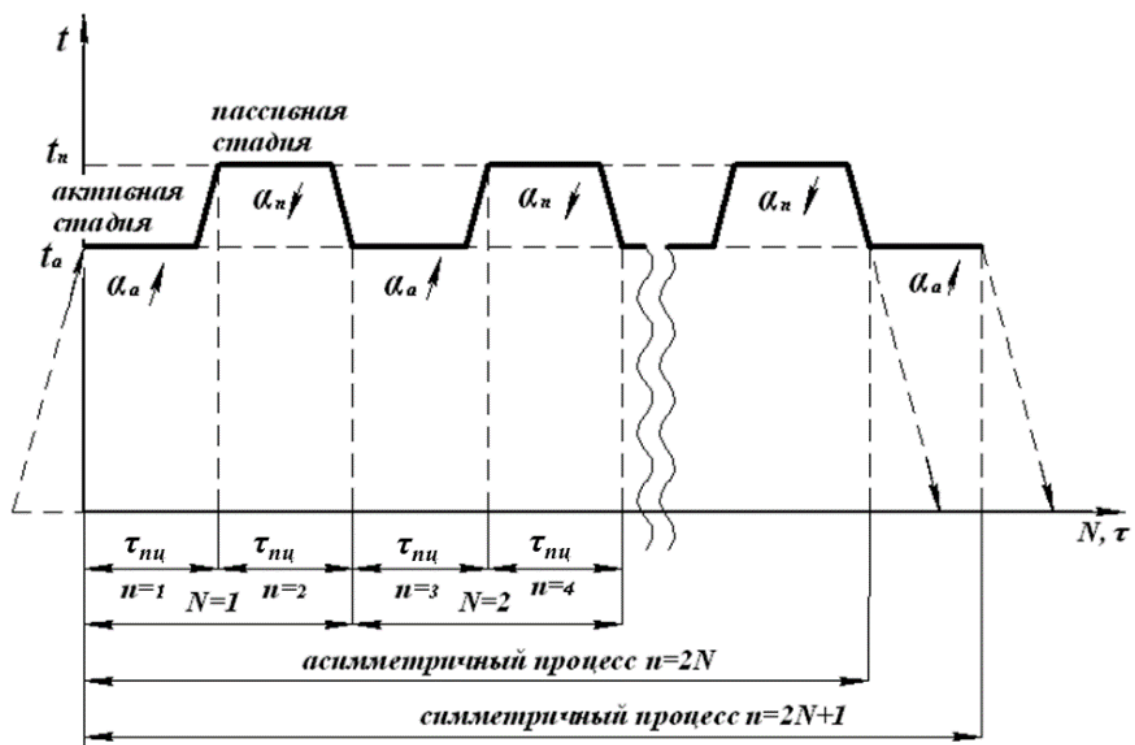


Рис. 1. Схема термогазоциклического процесса азотирования

Fig. 1. Diagram of the thermal gas-cycling nitride hardening process

При общем времени процесса 6 ч варируют число циклов N , включающих активную и пассивную стадии (см. рис. 1). Каждый цикл состоит из двух полуциклов определенной продолжительности τ_{nc} , одинаковой для стадий насыщения и деазотирования (0,5; 1; 1,5 и 3 ч). Процессы, заканчивающиеся финальной пассивной стадией (П-режим), оказываются «асимметричными»; «симметричные» процессы предусматривали

дополнительную активную стадию 0,5 или 1 ч (А-режимы).

Экспериментальные исследования термогазоциклических процессов азотирования выполнены также для высокоуглеродистой инструментальной стали ХВГ и для коррозионностойкой мартенситносталяющей стали 03X11H10M2T (ВНС-17). Для высоколегированной стали 03X11H10M2T, которая относится к

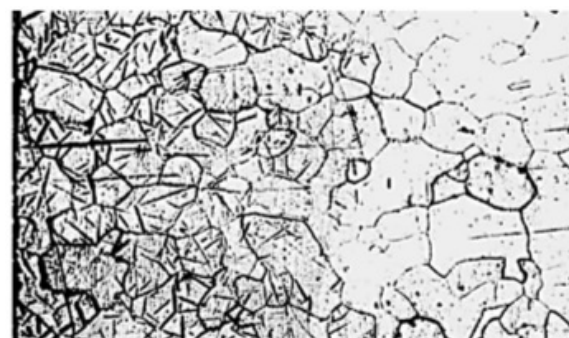
трудноазотируемым, режимы ТГЦ были несколько изменены. Активные стадии насыщения (530 °C и 580 °C) проводились в пульсирующей аммиачно-воздушной смеси в режиме микроциклирования [12], а общее время процесса составляло 12 ч. Пассивная стадия деазотирования проводилась при 580 °C в диссоциированном аммиаке (степень диссоциации 70...90 %).

Исследования микроструктуры образцов выполняли в металлографическом микроскопе «Neophot», фазовый рентгеноструктурный анализ – на установке ДРОН-3.

Результаты и их обсуждение

Установлено, что газоциклирование существенно увеличивает толщину диффузионного слоя в железе по сравнению с традиционным азотированием в аммиаке. В наибольшей степени это происходит за счет роста зоны внутреннего азотирования. Так, толщина ЗВА, определяемая визуально по участку с характерными выделениями γ' -фазы игольчатой формы в твердом растворе $Fe_\alpha(N)$, увеличивается почти в два раза при одинаковой температуре процессов 520 °C (рис. 2). При проведении завершающей активной стадии в аммиаке (А-процесс, $\tau_a = 0,5$ ч) происходит дополнительный прирост зоны внутреннего азотирования на 25 %.

Наиболее ускоренный рост ЗВА в результате газоциклирования достигается при большом числе полуциклов малой длительности (0,5 ч). Это объясняется тем, что кинетика азотирования, как и деазотирования, подчиняется известному параболическому закону, т. е. скорость формирования слоя затухает при увеличении продолжительности процесса. Поэтому при многократно повторяющихся коротких процессах азотирования-деазотирования в максимальной степени реализуется эффект ускорения как насыщения азотом, так и рассасывания высокоазотистых фаз.



а)



б)

Рис. 2. Микроструктуры зон внутреннего азотирования в армко-железе после традиционного азотирования при 520 °C (а) и газоциклического азотирования (П-процесс) при 520 °C $\tau_{\text{ин}} = 0,5$ ч (б), $\times 100$

Fig. 2. Microstructures of internal nitriding zones in armco iron after conventional nitride hardening at 520 °C (a) and gas-cycling nitride hardening (P-process) at 520 °C $\tau_{\text{pc}} = 0,5$ h (b), $\times 100$

Газоциклирование в определенной степени влияет на строение нитридной зоны, состоящей из участков ϵ -фазы и γ' -фазы. Симметричные процессы с финальной стадией насыщения в аммиаке несколько изменяют соотношение толщины этих участков (рис. 3, а, б) по сравнению с процессом при той же температуре в аммиаке.

Повышение температуры азотирования до 620 °C закономерно увеличивает толщину диффузионного слоя, главным образом, за счет зоны внутреннего азотирования; под нитридной зоной формируется участок эвтектоида $\alpha + \gamma'$ (рис. 3, в). Газоциклические процессы при этой температуре с короткими полуциклами позволяют увеличить толщину нитридной зоны (рис. 3, г).

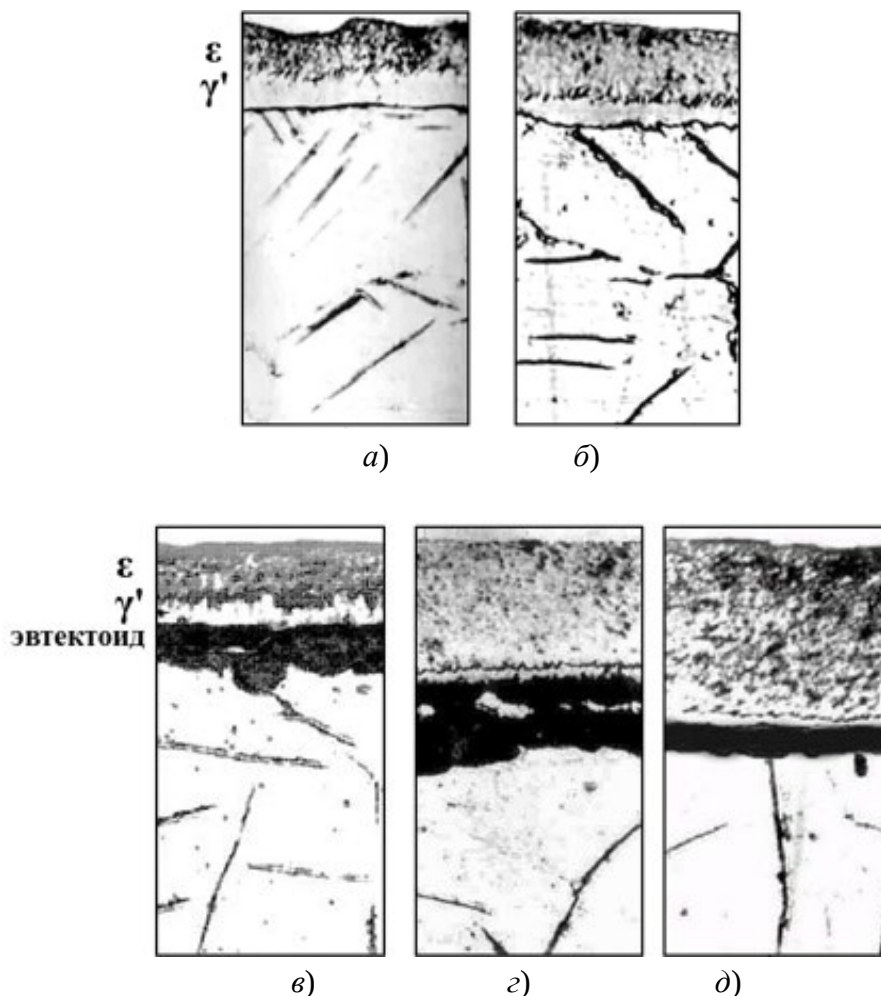


Рис. 3. Микроструктуры поверхностной зоны соединений в армко-железе:

a – азотирование в аммиаке при 520 °C; *б* – А-процесс ГЦ при 520 °C ($\tau_{\text{пц}} = 1$ ч); *в* – азотирование в аммиаке при 620 °C; *г* – А-процесс ГЦ при 620 °C ($\tau_{\text{пц}} = 0,5$ ч); *д* – А-процесс ТГЦ 520/620 ($\tau_{\text{пц}} = 0,5$ ч)

Fig. 3. Microstructure of the surface zone of compounds in armco-iron:

a – nitriding in ammonia at 520 °C; *b* – A-cycle per second process at 520 °C ($\tau_{\text{pc}} = 1$ h); *c* – nitriding in ammonia at 620 °C; *g* – A-cycle per second process at 620 °C ($\tau_{\text{pc}} = 0,5$ h); *d* – A-process tetracycle 520/620 ($\tau_{\text{pc}} = 0,5$ h)

Максимальный рост как зоны ВА, так и нитридной зоны, наблюдается после термогазоциклических процессов. Полученная в симметричном режиме ТГЦ 520/620 ($\tau_{\text{пц}} = 0,5$ ч) общая толщина азотированного слоя примерно в 3 раза превышает толщину слоя, формирующуюся после обычного азотирования при 520 °C, а толщина нитридной зоны возрастает до 30 мкм за счет уменьшения толщины участка эвтектоида (рис. 3, д).

Механизм ускорения роста слоя при повышении температуры на стадии деазотирования связывают с изменением объема сплавов Fe-N при протекающих фазовых

превращениях [11]. Во время первой активной стадии при 520 °C на поверхности железа образуется слой с большим содержанием азота. При нагреве до 620 °C происходит образование аустенита, который после охлаждения ниже 591 °C превращается в азотистый эвтектоид ($\alpha + \gamma'$), что сопровождается увеличением объема. Этот фактор способствует оттоку азота из поверхностных участков, а многократное повторение таких циклов обеспечивает диффузионное «закачивание» азота вглубь металла.

Толщина поверхностного участка высокоазотистой фазы после симметричного А-процесса ТГЦ 520/620 с короткими полуциклами

увеличивается вдвое по сравнению со стандартным азотированием, что видно из рис. 4. Концентрация азота в нитриде повышается от 7...8 % N до 10...11 % N и приближается к максимальной его растворимости в ϵ -фазе. Плато

максимальной концентрации азота на кривой распределения сдвигается вглубь слоя, что подтверждает механизм прироста диффузионного слоя при газоциклировании.

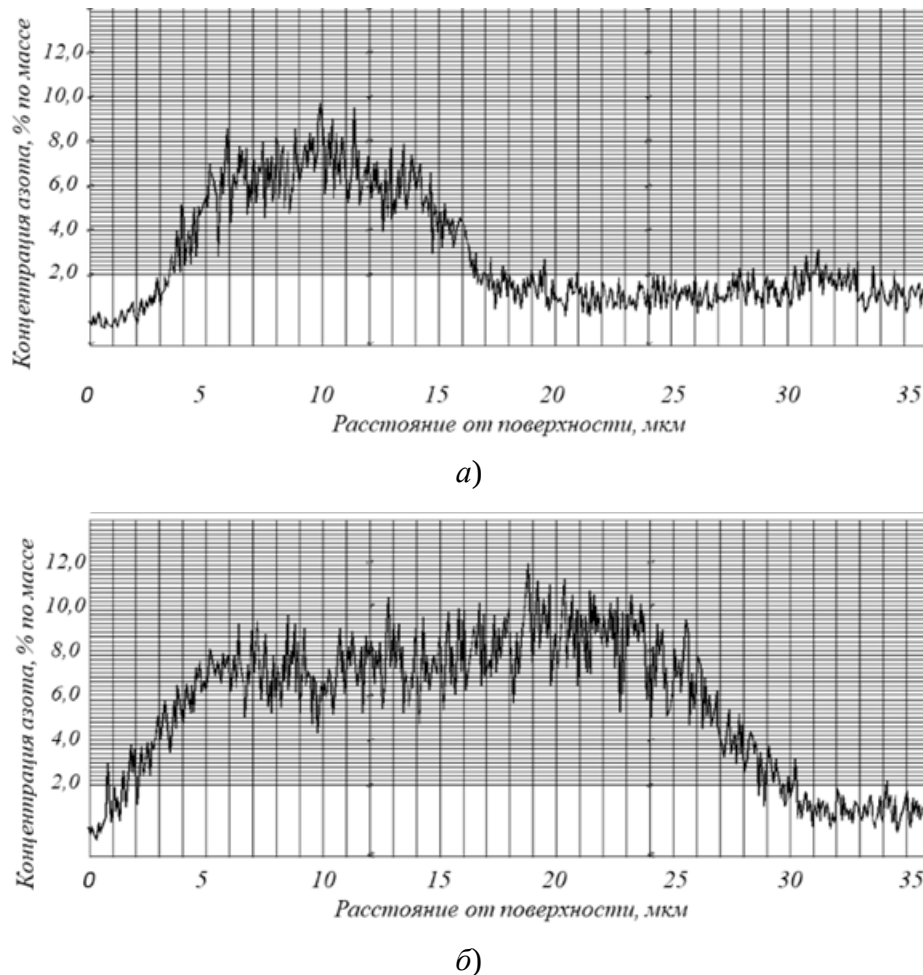


Рис. 4. Профили распределения концентрации азота по глубине (данные МРСА) в образцах армко-железа после азотирования в аммиаке при 520 °С (а) и после А-процесса ТГЦ 520/620, $\tau_{\text{тц}} = 0,5$ ч (б)

Fig. 4. Profiles of the distribution of nitrogen concentration by depth (MRSA data) in armco-iron samples after nitriding in ammonia at 520 °C (a) and after the A-process tetracycle 520/620, $\tau_{\text{tc}} = 0,5$ h (b)

К режимам, способствующим максимальной интенсификации роста азотированного слоя и формированию развитой нитридной зоны, относятся ГЦ и ТГЦ процессы с большим числом коротких полуциклов, заканчивающиеся активной стадией насыщения в аммиаке. Относительная мольная доля ϵ -фазы в поверхностном слое, выявляемая по результатам рентгеноструктурного анализа, растет при увеличении температуры изотермического

ГЦ процесса и достигает максимума при процессе ТГЦ 520/620 (рис. 5, а). Формирование поверхностных слоев в железе без ϵ -фазы происходит при ассиметричных режимах с заключительной пассивной стадией деазотирования (П-процессы). Оптимальными в этом случае являются процессы ГЦ 620 и ТГЦ 520/620, состоящие из двух полуциклов длительностью по 3 ч (рис. 5, б).

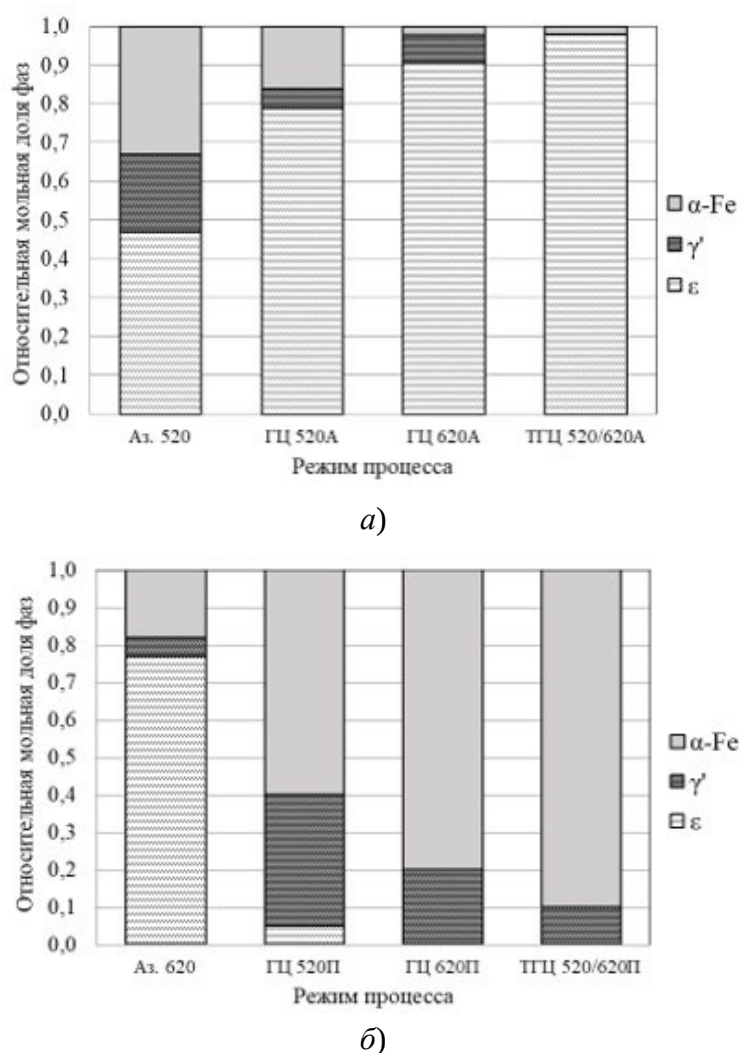


Рис. 5. Относительные мольные доли фаз (по данным РСА) в поверхностном слое армко-железа после традиционного азотирования и газоциклических процессов:

a – режимы с завершающей активной стадией и длительностью полуциклов $\tau_{\text{пц}} = 0,5$ ч; *б* – режимы с завершающей пассивной стадией и длительностью полуциклов $\tau_{\text{пц}} = 3$ ч

Fig. 5. Relative molar fractions of phases (according to X-ray crystal analysis data) in the surface layer of armco-iron after traditional nitriding and gas-cycling processes:

a – modes with the final active stage and the duration of half cycles $\tau_{\text{pc}} = 0,5$ h; *b* – modes with the final passive stage and the duration of half cycles $\tau_{\text{pc}} = 3$ h

Как уже упоминалось, минимальная толщина хрупкой ϵ -фазы является благоприятным фактором для повышения стойкости азотированного режущего инструмента. Для изыскания наиболее рационального режима газоциклического азотирования инструментальной стали ХВГ были проведены исследования строения диффузионных слоев после симметричных П-процессов. Эксперименты подтвердили

закономерности влияния режимов термо- и газоциклирования на фазовый состав слоя, выявленные для армко-железа. Различие заключается в том, что в высокоуглеродистой стали ХВГ химические соединения (ϵ - и γ' -фаза) представляют собой карбонитриды.

Исследования кинетики роста отдельных участков диффузионного слоя в стали ХВГ позволили смоделировать его строение

в зависимости от режима процесса (рис. 6). Установлено, что ТГЦ процессы с завершающей стадией деазотирования приводят к существенному уменьшению доли ϵ -фазы и преобладанию γ' -фазы в нитридной зоне. Толщина зоны ϵ -фазы тем меньше, чем больше продолжительность полуциклов. При П-процессах с $\tau_{\text{пц}}=1,5$ ч происходит образование несплошного слоя низкоазотистой ϵ -фазы минимальной толщины. Изотермические ГЦ процессы хотя и повышают долю γ' -фазы в слое и в 2,5 раза увеличивают толщину ЗВА, но не позволяют снизить

толщину ϵ -фазы по сравнению с обычным азотированием (см. рис. 6). Полученные данные по строению азотированных слоев в стали ХВГ коррелируют с изменением износостойкости. Испытания показали, что минимальный относительный показатель глубины износа (0,38) достигается после ТГЦ режима при продолжительности полуциклов 1,5 ч. Этому режиму соответствует структура азотированного слоя с наименьшей толщиной ϵ -фазы, развитой γ' -фазой и достаточно протяженной зоной внутреннего азотирования (см. рис. 6).

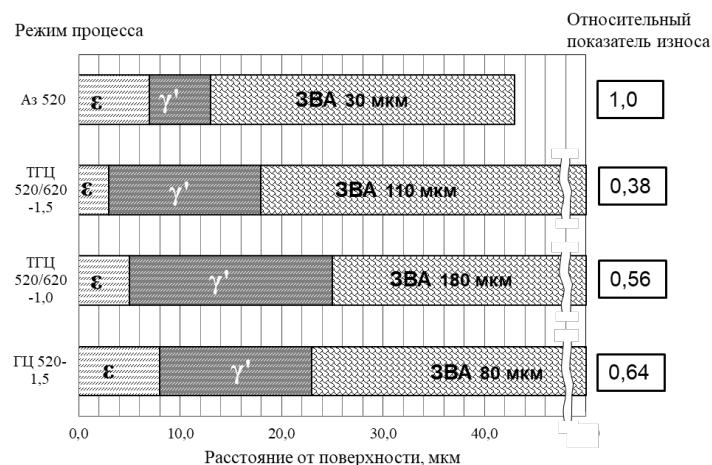


Рис. 6. Схемы строения азотированных слоев в стали ХВГ после азотирования в аммиаке при 520 °С и после газоциклических П-процессов ГЦ и ТГЦ с завершающей стадией деазотирования и временем полуциклов 1 ч и 1,5 ч в сравнении с относительным показателем износа

Fig. 6. Diagrams of the structure of nitride layers in ChWMn steel after nitriding in ammonia at 520 °C and after gas-cyclic P-processes cycle per second and tetracycle with the final stage of denitration and half-cycle time of 1 h and 1,5 h in comparison to the relative wear index

Структура азотированного слоя, не содержащая хрупкой ϵ -фазы, оптимальна также для высоколегированных низкоуглеродистых сталей, в том числе коррозионностойких и жаростойких. Установлено, что проведение азотирования стали 03X11N10M2T в пульсирующей аммиачно-воздушной смеси с повышением температуры на второй стадии процесса с 530 °С до 580 °С (ТЦ А-процесс) увеличивает толщину диффузионного слоя с 80 до 110 мкм по сравнению с изотермическим

процессом при 530 °С (рис. 7, а, б). Но данный режим не позволяет избавиться от ϵ -фазы и вызывает выделение нежелательных нитридов хрома (рис. 8), что понижает коррозионную стойкость сталей. При частичной замене второй высокотемпературной стадии на режим деазотирования, осуществляемый в практически полностью диссоциированном аммиаке (ТГЦ П-процесс), происходят существенные изменения в фазовом составе азотированного слоя. В нитридной зоне ϵ -фаза практически

полностью заменяется на низкоазотистую γ' -фазу, отсутствуют нитриды хрома и резко снижается доля оксидной фазы (см. рис. 8). Общая толщина диффузионного слоя увеличивается до 120 мкм (см. рис. 7, в). Полученная структура не только способствует повышению

износостойкости стали, но и обеспечивает снижение напряжений на границе диффузионного слоя с матричным металлом, поскольку на стадии деазотирования происходит внутренняя выравнивающая диффузия азота, сглаживающая перепад концентраций.

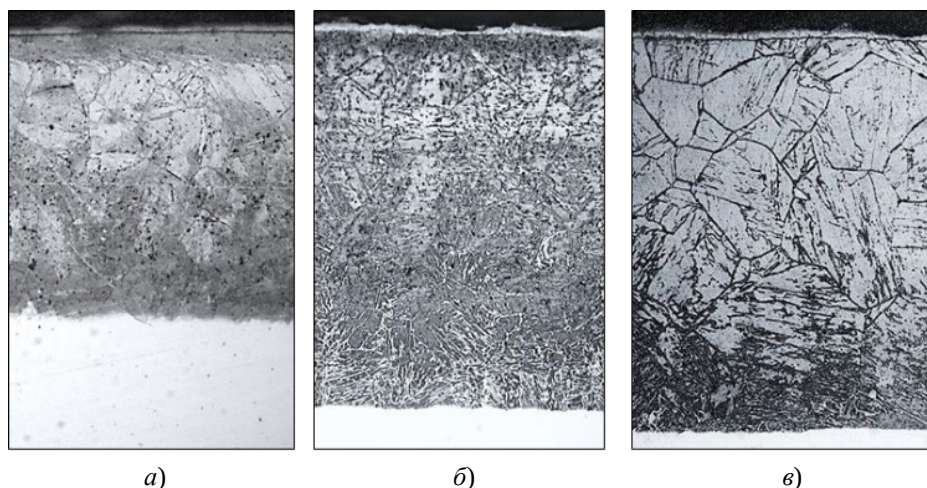


Рис. 7. Микроструктуры стали 03X11Ni10Mo2Ti после азотирования в пульсирующей аммиачно-воздушной смеси: а – изотермический процесс при 530 °С; б – А-процесс ТЦ 530/580; в – П-процесс ТГЦ 530/580/580 с завершающей стадией деазотирования

Fig. 7. Microstructure of steel 03Ch11Ni10Mo2Ti after nitride hardening in a pulsating ammonia-air mixture: a – isothermal process at 530 °C; b – A-process TC 530/580; c – P-process tetracycle 530/580/580 with the final stage of denitration

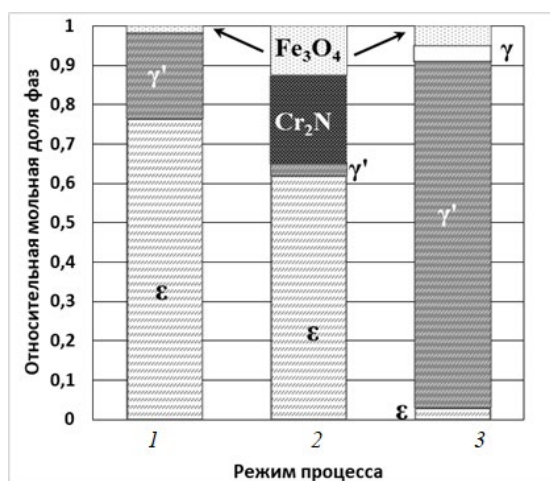


Рис. 8. Относительные мольные доли фаз (по данным PCA) в поверхностном слое стали 03X11Ni10Mo2Ti после: 1 – изотермического процесса при 530 °С; 2 – А-процесса ТЦ 530/580; 3 – П-процесса ТГЦ 530/580/580 с завершающей стадией деазотирования

Fig. 8. Relative molar fractions of phases (according to RSA data) in the surface layer of steel 03Ch11Ni10Mo2Ti after: 1 – isothermal process at 530 °C; 2 – A-process TC 530/580; 3 – P-process tetracycle 530/580/580 with the final stage of denitration

Заключение

Исследования процессов газоциклического азотирования на модельном материале – армко-железе показали, что наиболее широкие возможности регулирования фазового состава азотированного слоя реализуются в режиме термогазоциклирования с изменением температуры на отдельных циклах ниже и выше эвтектоидной в системе железо-азот. Для формирования нитридной зоны на базе ϵ -фазы является рациональным процесс с большим числом коротких полуциклов, завершающийся активной стадией. Для образования поверхностной зоны без ϵ -фазы рекомендуется двухстадийный процесс с большой длительностью полуциклов с конечной стадией деазотирования. Оба режима позволяют увеличить общую толщину азотированного слоя за счет прироста зоны внутреннего азотирования при разложении высокоазотистых нитридов на пассивной стадии процесса.

Определены режимы термогазоциклического процесса азотирования инструментальной стали ХВГ для получения оптимальной структуры азотированного слоя, состоящего из карбонитридной зоны с минимальной долей ϵ -фазы и развитой зоны внутреннего азотирования, что обеспечивает повышение износостойкости.

Процесс термогазоциклического азотирования с завершающей пассивной стадией применен для формирования зоны соединений на базе γ' -фазы в коррозионностойкой стали 03X11H10M2T. Данный режим также способствует интенсификации процесса и снижению напряжений на границе диффузионного слоя с основной стали благодаря протеканию выравнивающей диффузии на стадии деазотирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Шпис Г.-Й., Бемер З. Теория и технология азотирования. М.: Металлургия, 1991. 320 с.
2. Александров В. А., Богданов К.В. Азотирование инструмента из высокохромистых и быстрорежущих сталей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 5. С. 14–20.

3. Демин П.Е., Барабанов С.И., Малахов А.Ю., Александров В.А. Упрочнение штамповых сталей металлокерамическими покрытиями, получаемыми способом газового азотирования // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 2 (128). С. 17–21.

4. Петрова Л.Г., Александров В.А., Вдовин В.М., Демин П.Е. Повышение стойкости инструмента из быстрорежущей стали при азотировании с регулируемым азотным потенциалом // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 1 (127). С. 3–10.

5. Бибииков П.С., Белашова И.С., Прокофьев М.В. Особенности технологии азотирования высоколегированных коррозионностойких сталей авиационного назначения // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 2. С. 206–215.

6. Петрова Л.Г. Научные технологии в материаловедении: высокотемпературное сквозное азотирование жаростойкой стали // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 9 (147). С. 3–15.

7. Bottoli F., Jellesen M.S., Christiansen T.L., et. al. High temperature solution-nitriding and low-temperature nitriding of AISI 316: Effect on pitting potential and crevice corrosion performance // Appl. Surf. Sci. 2018. Vol. 431. P. 24–31.

8. Шестопалова Л.П., Александров В.А. Влияние циклического оксизазотирования на технические характеристики конструкционных легированных сталей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 5 (161). С. 220–224.

9. Бойназаров У.Р., Петрова Л.Г., Брежнев А.А., Бибииков П.С. Свойства оксинитридных покрытий на стали, полученных при трехстадийных процессах азотирования с оксидированием // Металлург. 2021. № 8. С. 64–68.

10. Эшкабилов Х.К. Изменение фазового состава нитридного слоя при последующем пароксидировании // Актуальные исследования. 2023. № 7-1 (137). С. 22–24.

11. Шашков Д.П., Горячев А.Б. Газоциклическое азотирование конструкционных сталей // Технология металлов. 1998. №3. С. 11–13.

12. Прокофьев М.В., Петрова Л.Г., Белашова И.С., Бибииков П.С. Влияние стадийного азотирования на строение и свойства мартенситной стали 13X11H2B2MF // Научные технологии в машиностроении. 2021. № 12 (126). С. 12–19.

13. Белашова И.С., Петрова Л.Г., Сергеева А.С. Интенсификация процесса насыщения железа азотом методом термогазоциклического азотирования // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2017. № 9. С. 2–9.

14. Кольцов В.Е., Сысоев М.И. Влияние технологических параметров процесса деазотирования на фазовый состав нитридного слоя // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 10. С. 21–22.

15. Белашова И. С., Петрова Л.Г., Бибииков С.П. Повышение качества диффузионного слоя в высоколегированных сталях после газоциклических процессов азотирования // Технология металлов. 2023. № 12. С. 2–8.

16. Петрова Л.Г., Белашова И.С., Лисовская О.Б., Маринин Е.А. Формирование азотированных слоев в железе в условиях термоциклирования // Черные металлы. 2023. № 7. С. 42–46.

REFERENCES

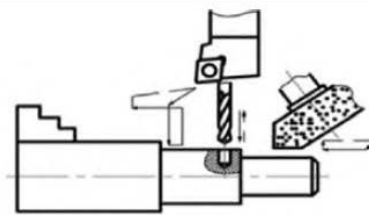
1. Lakhtin Yu.M., Kogan Ya.D., Shpis G.-Y., Boehmer Z. Theory and technology of nitriding. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991. 320 p.
2. Alexandrov V. A., Bogdanov K.V. Nitriding of tools made of high-chromium and high-speed steel // Strengthening technologies and coatings. 2005, no. 5, pp. 14–20.
3. Demin P.E., Barabanov S.I., Malakhov A.Yu., Alexandrov V.A. Hardening of stamped steels with metal-ceramic coatings obtained by the method of gas nitriding // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022, no. 2 (128), pp. 17–21.
4. Petrova L.G., Alexandrov V.A., Vdovin V.M., Demin P.E. Increasing the durability of high-speed steel tools during nitriding with controlled nitrogen potential // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022, no. 1 (127), pp. 3–10.
5. Bibikov P.S., Belashova I.S., Prokofiev M.V. Features of nitriding technology of high-alloy corrosion-resistant steels for aviation purposes // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2021, vol. 28, no. 2, pp. 206–215.
6. Petrova L.G. High-techs in materials science: through-the-thickness austenitic nitriding of heat-resistant steel // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023, no. 9 (147), pp. 3–15.
7. Bottoli F., Jellesen M.S., Christiansen T.L., et. al. High temperature solution-nitriding and low-temperature nitriding of AISI 316: Effect on pitting potential and crevice corrosion performance // Appl. Surf. Sci. 2018. Vol. 431. P. 24–31.
8. Shestopalova L.P., Alexandrov V.A. Influence of cyclic oxynitriding on the technical characteristics of structural alloy steels // Hardening technologies and coatings. 2018, vol. 14, no. 5 (161), pp. 220–224.
9. Baynazarov U.R., Petrova L.G., Brezhnev A.A., Bibikov P.S. Properties of oxynitride steel coatings obtained through three-stage processes of nitriding combined with oxidation // Metallurgist. 2021, no. 8, pp. 64–68.
10. Ishkobilov H.K. Change in the phase composition of the nitride layer under subsequent steam oxidation. 2023, no. 7-1 (137), pp. 22–24.
11. Shashkov D.P., Goryachev A.B. Gas-cyclic nitriding of structural steels // Technology of metals. 1998, no. 3, pp. 11–13.
12. Prokofiev M.V., Petrova L.G., Belashova I.S., Bibikov P.S. The effect of stadial nitrogenization on the structure and properties of martensitic steel 13X11N2V2MF // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2021. No. 12 (126). pp. 12–19.
13. Belashova I.S., Petrova L.G., Sergeeva A.S. Intensification of the process of iron saturation with nitrogen by the thermogas cyclic nitriding method // Proceedings. An encyclopedic reference book. 2017, no. 9, pp. 2–9.
14. Koltsov V.E., Sysoev M.I. Influence of technological parameters of the diazotization process on the phase composition of the nitride layer // Metallurgy and heat treatment of metals. 2002, no. 10, pp. 21–22.
15. Belashova I. S., Petrova L.G., Bibikov S.P. Improving the quality of the diffusion layer in high-alloy steels after gas-cyclic nitriding processes // Technology of metals. 2023, no. 12, pp. 2–8.
16. Petrova L.G., Belashova I.S., Lisovskaya O.B., Marinin E.A. Formation of nitrided layers in iron under thermal cycling conditions // Ferrous metals. 2023, no. 7, pp. 42–46.

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 03.04.2024; одобрена после рецензирования 22.04.2024; принята к публикации 26.04.2024.

The article was submitted 03.04.2024; approved after reviewing 22.04.2024; assepted for publication 26.04.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №7 (157). С.15-23.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №7 (157). P.15-23.

Научная статья

УДК УДК 621.91

doi: 10.30987/2223-4608-2024-15-23

Особенности обрабатываемости резанием новых высокопрочных титановых сплавов с ультрамелкозернистой структурой для деталей авиационной техники

Владимир Федорович Макаров¹, д.т.н.

Михаил Владимирович Песин², д.т.н.

Луиза Викторовна Коногорова³, аспирант

Анастасия Вячеславовна Хабарова⁴, аспирант

Ринат Саубанович Абзаев⁵, аспирант

^{1, 2, 3, 4, 5} Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

¹ makarovv@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0383-0208>

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

³ konogorova98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁴ habarovnanastya98@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

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

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния параметров резания (скорости резания, подачи, глубины резания) на шероховатость R_a , микроструктуру поверхностного слоя образцов сплава Ti-6Al-4V с обычной крупнозернистой (КЗ) и ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, полученной методом равнонапряженного углового прессования. В рамках решения задачи исследования обрабатываемости нового сплава ВТ6 с УМЗ структурой проведена разработка методики экспериментальных исследований при точении. Определены такие физические параметры, как вибрации и шум при резании, потребляемая мощность, численные параметры шероховатости, величина и характер распределения остаточных напряжений и др. в зависимости от режимов резания и применяемого инструмента. Показано, что при точении на небольшой скорости резания шероховатость КЗ образца лучше, чем УМЗ сплава. При повышении скорости резания в 1,5 раза, наоборот, образец с УМЗ структурой имеет более низкую шероховатость R_a по сравнению с КЗ образцом. Обсуждаются различия в морфологии и микроструктуре образующейся при сравнительной обработке стружки в зависимости от типа микроструктуры обрабатываемого сплава, а именно, наличие линий пластического течения в микроструктуре стружки после точения УМЗ образца, формирование крупных сдвигов, сколов и микротрещин в стружке после точения КЗ сплава. Установлено, что новые титановые сплавы при токарной обработке имеют лучшую обрабатываемость резанием по таким параметрам, как шероховатость поверхности, шум и вибрация при резании, более благоприятный характер остаточных напряжений и наклепа в поверхностном слое. По этим факторам можно предсказать значительное уменьшение износа инструмента и повышение его стойкости по сравнению с обработкой обычного крупнозернистого титана.

Ключевые слова: режимы резания, шероховатость, ультрамелкозернистая структура, титановые сплавы, микроструктура, стружкообразование, пластическая деформация, обрабатываемость резанием

Для цитирования: Макаров В.Ф., Песин М.В., Коногорова Л.В., Хабарова А.В., Абзаев Р.С. Особенности обрабатываемости резанием новых высокопрочных титановых сплавов с ультрамелкозернистой структурой для деталей авиационной техники // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 7 (157). С. 15–23. doi: 10.30987/2223-4608-2024-15-23

Cutting ability features for new high-strength titanium alloys with an ultrafine-grained structure used for aircraft parts

Vladimir F. Makarov¹, D. Eng.

Mikhail V. Pesin², D. Eng.

Louisa V. Konogorova³, PhD student

Anastasia V. Khabarova⁴, PhD student

Rinat S. Abzaev⁵, PhD student

^{1, 2, 3, 4} Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

¹ makarovv@pstu.ru

² m.pesin@mail.ru

³ konogorova98@mail.ru

⁴ habarovanastya98@yandex.ru

⁵ pineforest.car@yandex.ru

Abstract. The results of experimental studies of the cutting parameters effect (cutting speed, feed, depth-of-cut) on the roughness of Ra, the microstructure of the surface layer of Ti-6Al-4V alloy samples with a conventional coarse-grained (CG) and ultrafine-grained (UFG) structure obtained by equal-channel angular pressing are presented. In framework of solving the problem connected with studying the machinability of a new VT6 alloy having an UFG structure, the development of a methodology for experimental research under turning was carried out. Physical parameters such as vibrations and noise under cutting, power consumption, numerical parameters of roughness, the magnitude and the pattern of residual stresses distribution and others are determined according to cutting modes and the tool used for the operation. It is shown that when turning at a low cutting speed, the roughness of CG sample is better than UFG of the alloy. With an increase in the cutting speed by 1,5 times, on the contrary, a sample with an UFG structure has a lower roughness Ra compared to a CG sample. Differences in the morphology and microstructure of the chips formed within comparative machining are discussed, taking into account types of microstructure of the alloy being treated, namely, presence of plastic flow lines in the chip microstructure after turning an UFG sample, the formation of large shifts, chips and tiny fractures in the chips after turning a CG alloy. It is found that new titanium alloys under turning obtain better cutting machinability in terms of such parameters as surface roughness, noise and vibration under cutting, and a more favorable character of residual stresses and riveting in the surface layer. Studying these factors, it is possible to predict a significant reduction of tool wear and stabilization of its durability compared to conventional coarse-grained titanium treatment.

Keywords: cutting modes, roughness, ultrafine-grained structure, titanium alloys, microstructure, chip formation, plastic deformation, machinability (cutting ability)

For citation: Makarov V.F., Pesin M.V., Konogorova L.V., Khabarova A.V., Abzaev R.S. Cutting ability features for new high-strength titanium alloys with an ultrafine-grained structure used for aircraft parts / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 7 (157). P. 15–23. doi: 10.30987/2223-4608-2024-15-23

Введение

Сплавы на основе титана нашли свое широкое применение в авиастроении, в частности в конструкциях авиационных газотурбинных двигателей. Титановые сплавы используются преимущественно для изготовления таких ответственных деталей, как направляющие аппараты и диски компрессора, лопатки компрессора, втулки, валы и др. [1]. Большинство титановых сплавов относятся к высокопрочным труднообрабатываемым. Режимы резания и стойкость режущего инструмента намного ниже, чем при обработке сталей. Изучение и разработка таких сплавов в данной отрасли продолжают уже на протяжении более 50 лет [9, 10].

С появлением в нашей стране новых более эффективных моделей авиационных газотурбинных двигателей типа ПД-14, ПД-8, и др. получение еще более прочных высококачественных деталей из титановых сплавов и решение проблем обрабатываемости их резанием в процессе изготовления является одной из актуальных задач современного машиностроения.

Как известно, разрушение деталей в большинстве случаев начинается с поверхности, которая характеризуется такими параметрами, как шероховатость, остаточные напряжения, волнистость, наклеп, микроструктура и др. Качество поверхности деталей, в свою очередь, определяется режимами и условиями механообработки поверхности.

Низкая обрабатываемость резанием титановых сплавов определяется малой пластичностью, характеризующейся высоким коэффициентом упрочнения в процессе резания, примерно в два раза большим, чем у жаропрочных сталей и сплавов. Кроме этого, высокая химическая активность титановых сплавов к кислороду, азоту, водороду вызывает интенсивное охрупчивание поверхностного слоя сплавов вследствие диффузии в него атомов газов при повышении температуры в процессе резания. При этом растут контактные давления, напряжения и температура резания, что повышает интенсивность изнашивания инструмента. Из-за плохой теплопроводности титановых сплавов повышенный нагрев в зоне резания способствует усилению адгезионного взаимодействия обрабатываемого материала с материалом инструмента и появление чешуйчатости, задигов от разрушения наростов, ухудшению шероховатости обработанной поверхности на поверхности.

В последние десятилетия большое внимание уделяется исследованию наноструктурных и ультрамелкозернистых (УМЗ) металлов и сплавов, полученных методами интенсивной пластической деформации (ИПД) [2 – 4]. Сплавы с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, в том числе титановые сплавы с УМЗ структурой, имеют заметное преимущество перед крупнозернистыми, выпускаемые промышленностью, по прочности и сопротивлению усталости. Однако здесь возникает вопрос влияния более высокой твердости и прочности этих новых титановых сплавов на обрабатываемость их резанием. Поэтому необходимо провести широкие комплексные экспериментальные исследования по выбору наиболее рациональных параметров обработки резанием при изготовлении деталей из титановых сплавов с УМЗ структурой с целью получения требуемых показателей качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей. В данном направлении научных исследований проведено явно недостаточно. В частности, в работе [6] сообщается, что формирование в титане нано- или УМЗ структуры методами ИПД снижает

адгезионную составляющую коэффициента трения и уменьшает его склонность к схватыванию [8].

Для исследования обрабатываемости резанием новых титановых сплавов с УМЗ структурой использовались заготовки из сплава Ti-6Al-4V, полученные методом равноканального углового прессования на оборудовании УГАТУ (г. Уфа) [3]. При анализе микроструктуры заготовок установлено, что исходная бимодальная микроструктура (КЗ) сплава ВТ6 состоит из β -структуры со средним размером вторичной α -фазы 1 мкм и зерен первичной α -фазы размером около 8 мкм, объемная доля которой не превышала 25 %. После интенсивной пластической деформации методом равноканального углового прессования типичная УМЗ структура титанового сплава ВТ6 имеет средний размер зерен α - и β -фазы 250 нм [3]. В работах проф. Валиева Р.Р. [2] исследовалась прочность ультрамелкозернистого титанового сплава ВТ6. По результатам испытаний установлено следующее: предел прочности титанового сплава с УМЗ структурой составил в среднем 1450 МПа, для сплава (КЗ) с обычной бимодальной структурой - 1050 МПа, т. е. сплав ВТ6 с УМЗ структурой имеет повышенную в 1,5 раза прочность поверхности по сравнению с обычным сплавом. В статье Ильясовой А.Х. представлены данные, что измельчение микроструктуры титанового сплава ВТ6 до УМЗ состояния позволяет повысить не только прочность, но и микротвердость [4].

На формирование параметров качества поверхностного слоя деталей и прежде всего на величину численных параметров шероховатости обработанной поверхности детали оказывают влияния многие технологические факторы. При обработке резанием величина, форма и направление микронеровностей зависят от методов, режимов, схемы обработки и геометрии инструмента. Из параметров режимов резания наиболее существенное влияние на величину шероховатости поверхности оказывают скорость резания и подача инструмента [10].

Целью данной работы является проведение комплексных экспериментальных исследований влияния параметров резания (скорости резания v , м/мин; глубины резания t , мм; подачи S_0 , мм/об) на шероховатость обработанной поверхности образцов, остаточные напряжения, микротвердость и микроструктуру поверхностного слоя с обычной КЗ и УМЗ структурой, а также и на процесс стружкообразования.

Методики проведения исследований

Для проведения сравнительных исследований выбран наиболее применяемый в авиационной технике титановый сплав Ti-6Al-4V (Ti – основа, Al – 6,6 %; V – 4,9 %; Zr – 0,02 %; Si – 0,033 %; Fe – 0,18 %; C – 0,007 %; O₂ – 0,17 %; N₂ – 0,01 %; H₂ – 0,002 %). Температура полиморфного превращения сплава составляла 975 ± 5 °С. Для проведения исследования использованы исходные заготовки в виде прутков с крупнозернистой структурой и заготовки с УМЗ структурой, которая получена методом равноканального углового прессования (РКУП) в четыре прохода в оснастке с углом пересечения каналов $\psi = 120^\circ$ при температуре 700 °С [4]. Заготовки диаметром 40 мм и длиной 225 мм подвергались термообработке, которая включала предварительную термическую обработку закалкой с $T = 950$ °С (нагрев 20 мин) с последующим отжигом при 675 °С в течение 4 ч с целью повышения эффективности измельчения зерна в заготовке.

Для механической обработки выбран токарно-винторезный станок с УЦИ (устройство цифровой индикации) фирма JET, модель GH-1640ZX (Китай).

В качестве режущего инструмента выбран сборный токарный проходной резец державка – PCLNR2525-M16 с механическим креплением режущей сменной многогранной пластины CNMG 160608-46 производства фирмы «Сандвик МКТС» (Россия) из твердого сплава типа BK8.

Обработка заготовок проводилась точением нескольких участков длиной

8...10 мм на восьми различных режимах резания согласно многофакторному плану экспериментов. Исходный диаметр заготовки составлял 30 мм. Всего применено восемь вариаций режима обработки, определяющих скорость, интенсивность резания и т. п. Общий вид заготовки УМЗ сплава ВТ6 с поясками и номерами использованных режимов резания представлен на рис. 1.



а)



б)

Рис. 1. Общий вид исходной заготовки (а) и ступенчатого образца, обработанного на восьми режимах резания (б) из сплава ВТ6 с УМЗ структурой

Fig. 1. General view of the part blank (a) and the steplike sample machined by eight cutting modes (b) made of VT6 alloy having UFG structure

Выбор диапазона рациональных режимов резания образцов из сплава ВТ6 с КЗ и УМЗ структурой проведен с учетом данных, полученных при анализе литературы и рекомендаций каталогов производителей инструментов, а также возможностей применяемого оборудования. Для исследований и анализа результатов используется известный метод планирования многофакторных экспериментов со статической обработкой и регрессионным анализом результатов. Режимы резания заготовок представлены согласно разработанному плану экспериментов (табл. 1).

1. Режимы токарной обработки титановых сплавов с КЗ и УМЗ структурами

1. Turning modes of titanium alloys having CG and UFG structures

№ участка	v , м/мин	S_0 , мм/об	t , мм
1	48	0,06	0,25
2	48	0,06	0,50
3	48	0,11	0,25
4	48	0,11	0,50
5	72	0,06	0,25
6	72	0,06	0,50
7	72	0,11	0,25
8	72	0,11	0,50

Для записи на каждом режиме резания наиболее значимых, по нашим предварительным данным, физических параметров процесса резания – вибрации, шума резания, мощности резания на станке использован разработанный компьютерный центр диагностики процесса резания кафедры ИТМ в ПНИПУ [6].

Для исследований микроструктуры титановых сплавов на каждом режиме резания проведен разрез заготовок с КЗ и УМЗ структурами на две половины по оси вращения. С целью исключить влияние разогрева в процессе разрезания разрез проводился проволочным электроэрозионным методом с полным погружением заготовки в бак с рабочей жидкостью. Для удобства подготовки шлифов и помещения в камеру микроскопа исследуемая половина разделена на две части по четыре пояска с разными режимами обработки. После чего на каждом пояске срезы были отполированы и протравлены раствором кислот, соответствующим выявлению микроструктуры.

Исследование микроструктуры поверхностного слоя обработанных на различных режимах образцов проведены с помощью растрового электронного микроскопа TESCAN РЭМ во вторично отраженных электронах.

Для измерения величины шероховатости на поясках образцов выбран переносной профилометр MarSurf PS1. Максимальный

диапазон измерения – 350 мкм (от -200 мкм до +150 мкм).

Исследование влияния режимов резания на формирование поверхностных остаточных напряжений на всех участках обработанных образцов из титановых сплавов проводилось на рентгеновском дифрактометре мод. Xstress Robot (StressTech OY, Финляндия).

Микротвердость образцов по методу Виккерса определяли на автоматическом микротвердомере Emco Test DuraScan-50. Максимально прикладываемая нагрузка на индентор составляла 0,98 Н, время выдержки 10 с. Для расчета среднего значения микротвердости проводили не менее сорока измерений диагональных отпечатков. Проводились сравнительные измерения микротвердости на поверхности и в центре образцов, обработанных на низкой и повышенной скорости резания.

Анализ результатов исследований обрабатываемости титановых сплавов

Шероховатость. Результаты исследования, полученные методом планирования многофакторных экспериментов, влияния на величину шероховатости Ra поверхности глубины резания t , подачи S_0 и скорости резания v на восьми участках КЗ заготовки и УМЗ заготовки в среднем по трем опытам приведены в табл. 2.

2. Результаты измерения шероховатости Ra_{cp} на восьми участках образцов с КЗ и УМЗ структурами

2. The results of measuring the roughness of Ra_m in eight sections of samples having CG and UFG structures

№ участка	v , м/мин	S_0 , мм/об	t , мм	Ra_{cp} КЗ	Ra_{cp} УМЗ
1	48	0,06	0,25	0,408	0,429
2	48	0,06	0,50	0,468	0,692
3	48	0,11	0,25	0,446	0,772
4	48	0,11	0,50	0,453	0,795
5	72	0,06	0,25	0,677	0,410
6	72	0,06	0,50	1,069	0,446
7	72	0,11	0,25	0,797	0,759
8	72	0,11	0,50	1,427	0,787

По результатам обработки этих экспериментальных данных, со статической обработкой и регрессионным анализом результатов получены адекватные эмпирические

математические модели зависимости шероховатости от параметров режимов резания в следующем виде:

– для титанового сплава ВТ6 с УМЗ структурой:

$$Ra_{UMZ} = 0,014 - 0,004v + 1,25S_0 + 2,11t + 0,12vS_0 - 0,02vt - 6,74S_0t; \quad (1)$$

– для титанового сплава ВТ6 с КЗ структурой:

$$Ra_{KZ} = -4,22 + 0,10v + 27,12S_0 + 8,4t - 0,61vS_0 - 0,19vt - 57,98S_0t + 1,33vS_0t. \quad (2).$$

В результате анализа этих зависимостей (1) и (2) можно сделать выводы, что для сплава с УМЗ структурой с увеличением скорости резания шероховатость снижается, а для сплава с КЗ структурой увеличение скорости резания приводит к увеличению шероховатости. В обоих случаях с увеличением подачи шероховатость значительно повышается. Влияние же глубины резания на шероховатость незначительное.

Кроме того, установлено, что при обработке по режимам № 1 – 4 при меньшей скорости резания ($v = 48$ м/мин) заготовки с КЗ структурой имеют меньшую шероховатость ($Ra = 0,408...0,468$ мкм) по сравнению с заготовкой с УМЗ структурой ($Ra = 0,429...0,795$ мкм). При повышении скорости резания до $v = 72$ м/мин установлена обратная картина: Шероховатость заготовки с УМЗ структурой имеет более низкую величину ($Ra = 0,410...0,787$ мкм) по сравнению с

шероховатостью заготовки с КЗ структурой ($Ra = 0,677...1,427$ мкм). В целом, следует отметить, что наименьшая шероховатость при точении заготовки с УМЗ структурой $Ra = 0,410$ мкм получена на более высокой скорости резания по режиму № 5 ($v = 72$ м/мин), а при точении заготовки с КЗ структурой $Ra = 0,408$ мкм на меньшей скорости резания по режиму № 1 ($v = 48$ м/мин) при одинаковой наименьшей подаче $S_0 = 0,06$ мм/об и глубине резания $t = 0,25$ мм.

Остаточные напряжения. На основании полученных данных исследования образцов на рентгеновском дифрактометре мод. Xstress Robot построены графики фактических значений осевых остаточных напряжений на восьми участках образцов из сплавов ВТ6 с УМЗ и КЗ структурами. Диапазон значений остаточных напряжений для образцов из КЗ и УМЗ составил от -80 до 170 МПа. Установлено, что остаточные напряжения носят

преимущественно благоприятный сжимающий характер независимо от размера зерна титановых сплавов и режимов резания.

Микротвердость. Результаты сравнительных исследований микротвердости

поверхностного слоя и сердцевины образцов, обработанных на двух скоростях резания 48 м/мин и 72 м/мин приведены в табл. 3.

3. Результаты измерения микротвердости на поверхности и в центре образцов заготовок титановых сплавов с КЗ и УМЗ структурами

3. Results of measuring microhardness on the surface and in the center of samples of titanium alloy blanks with CG and UFG structures

Скорость резания v , м/мин	Микротвердость поверхности/центра КЗ заготовки, НВ	Микротвердость поверхности/центра УМЗ заготовки, НВ
48	$336 \pm 8/335 \pm 10$	$379 \pm 9/380 \pm 10$
72	$332 \pm 8/335 \pm 10$	$382 \pm 10/380 \pm 10$

В результате анализа табл. 3 установлено, что микротвердость титанового сплава с УМЗ структурой выше в среднем на 15 %, чем микротвердость титанового сплава с КЗ структурой, что связано с уменьшением размера структурных и фазовых составляющих после интенсивной пластической деформации методом РКУП. При этом средние значения микротвердости в центре и в поверхностном слое обработанной заготовки независимо от режимов резания практически одинаковые как для КЗ, так и УМЗ заготовки, что указывает на отсутствие значительных деформаций и локального перегрева структуры в зоне контакта с резцом при тчении.

Микроструктура. На рис. 2 и 3, приведены сравнительные фотографии микроструктур поверхности образцов титановых сплавов с КЗ и УМЗ структурами в исходном состоянии и после РКУП, а также микроструктур образцов после токарной обработки на различных режимах резания.

В результате анализа этих фотографий микроструктур установлено много интересных факторов. Например, микроструктура КЗ сплава ВТ6 в горячекатаном состоянии (см. рис. 2, а) представляет собой типичную β -превращенную структуру титанового сплава с размером зерен 8...10 мкм и состоит из пакетов пластин α -фазы (серого цвета), имеющих различную кристаллографическую ориентацию в зависимости от ориентации исходных β -зерен. Сплошные прослойки остаточной β -

фазы (белого цвета, см. рис. 2, а) расположены на межфазных границах.

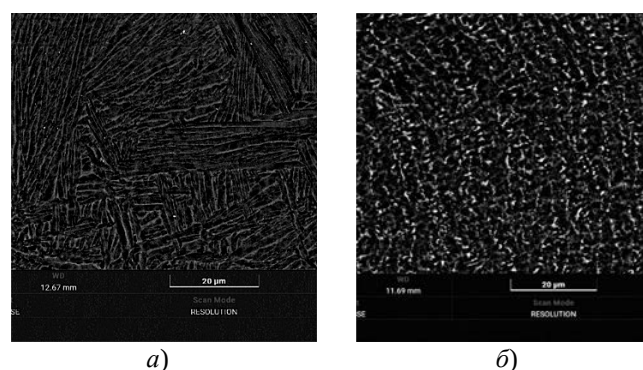


Рис. 2. Микроструктура заготовок сплава ВТ6 в исходном состоянии (КЗ) (а) и после РКУП (УМЗ) (б)

Fig. 2. Microstructure of VT6 alloy blanks in the initial state (CG) (a) and after EChAP (UFG) (b)

После интенсивной пластической деформации методом РКУП в сплаве ВТ6 с УМЗ микроструктурой (см. рис. 2, б) наблюдается деформация и искривление пластин, формирование внутри них мелких субзерен равноосной формы, β -фаза становится не сплошной, а локализованной в виде отдельных зерен размером менее 1 мкм (белого цвета). Таким образом, структура сплава ВТ6 после РКУП представляет собой смесь ультрамелких зерен размером около 250 нм и субзерен размером меньше 1 мкм.

В результате сравнительного анализа микроструктур титановых сплавов с КЗ и УМЗ структурами после токарной обработки на

восьми режимах резания установлено отсутствие поврежденного слоя вследствие тепловых или силовых деформаций на поверхности заготовок после точения сплавов КЗ и УМЗ (рис. 3, а и б) на одном и том же повышенном режиме резания ($v = 72$ м/мин; $S_0 = 0,11$ мм/об; $t = 0,5$ мм). Это позволяет говорить о возможности бездефектного применения повышенных скоростей резания.

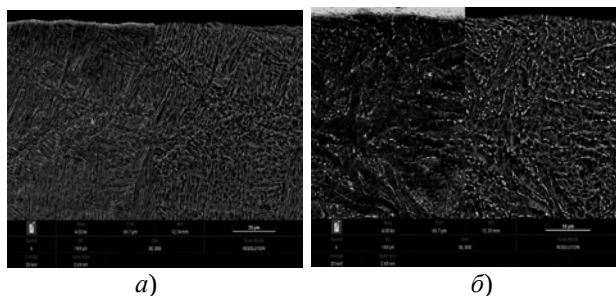


Рис. 3. Микроструктура поверхностной зоны образцов титанового сплава ВТ6 с КЗ структурой (а) и с УМЗ структурой (б) при режиме резания ($v = 72$ м/мин; $S_0 = 0,11$ мм/об; $t = 0,5$ мм)

Fig. 3. Microstructure of the surface zone of the samples of titanium alloy VT6 having CG structure (a) and UFG structure (b) in cutting mode ($v = 72$ m/min; $S_0 = 0,11$ mm/rpm; $t = 0,5$ mm)

При анализе влияния различных наиболее характерных режимов резания на изменение микроструктуры обработанного поверхностного слоя образцов титанового сплава с УМЗ структурой, полученные с помощью светового оптического микроскопа Olympus GX51, установлено что микроструктура сплава однородная по всей плоскости среза образцов и не имеет признаков локального перегрева. При более крупном увеличении снимков шлифов микроструктуры поверхностного слоя на глубине около 1 мм от поверхности признаков локального перегрева также не наблюдается. То есть можно сделать вывод, что токарная обработка сплава ВТ6 с УМЗ структурой на всех восьми режимах резания не приводит к формированию особого выраженного слоя со своей характерной только ему микроструктурой.

Вибрации, шум и мощность резания. На основании сравнительного анализа результатов записи физических параметров резания на компьютерном центре диагностики установлено снижение вибрации, шума и мощности резания при токарной обработке титанового сплава ВТ6

с УМЗ структурой на 15...20 % по сравнению с обработкой титанового сплава ВТ6 с КЗ структурой.

Заключение

Таким образом, результаты настоящего исследования особенностей обрабатываемости сплава Ti-6Al-4V с крупнозернистой и ультрамелкозернистой структурой, позволяют сделать следующие выводы:

1. Новый титановый сплав ВТ6 с УМЗ структурой имеет повышенную в 1,5 раза прочность и твердость, более высокое сопротивление усталости поверхности по сравнению с обычным крупнозернистым сплавом;

2. Новые титановые сплавы с УМЗ структурой при токарной обработке имеют лучшую обрабатываемость резанием по таким параметрам, как шероховатость поверхности, шум и вибрация при резании, более благоприятный характер остаточных напряжений и наклепа в поверхностном слое. По этим факторам можно предсказать значительное уменьшение износа инструмента и повышение его стойкости по сравнению с обработкой обычного крупнозернистого титана;

3. Наименьшая шероховатость ($Ra = 0,408...0,410$ мкм) достигнута для сплава с УМЗ структурой при более высокой скорости $v = 72$ м/мин, чем при обработке КЗ заготовки при скорости $v = 48$ м/мин, что является благоприятным фактором для повышения в 1,5 раза производительности механообработки.

4. Рекомендуемые режимы резания при полуставочном точении титанового сплава ВТ6 с УМЗ структурой, следующие: скорость резания 75...80 м/мин, подача 0,05...0,07 мм/об, глубина резания 0,25...0,35 мм. При этом обеспечивается требуемая для деталей ГТД шероховатость $Ra = 0.4...0.5$ мкм.

5. Таким образом, установлено, что обрабатываемость титанового сплава ВТ6 с УМЗ структурой лучше, чем применяемого для деталей ГТД титанового сплава ВТ6 с крупнозернистой структурой. Скорость резания и производительность обработки деталей из титанового сплава ВТ6 с УМЗ структурой увеличивается в 1,5 раза при обеспечении требований по качеству обработки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Иноземцев А.А., Башкатов И.Г., Коряковцев А.С. Титановые сплавы в изделиях разработки ОАО «Авиадвигатель» // Современные титановые сплавы и проблемы их развития: сб. М.: ВИАМ, 2010. С. 43–46.
2. Валиев Р.З., Усманов Л.Р., Резяпова Л.Р. Сверхпрочность наноструктурных металлических материалов: физическая природа и механизмы упрочнения // Физика металлов и металловедение. 2022.-Т.123. № 12. С.1355–1361.
3. Semenova I., Polyakov A., Gareev A., Makarov V., Kazakov I., Pesin M. Machinability Features of Ti-6Al-4V Alloy with Ultrafine-Grained Structure. Metals 2023, 13, x. <https://doi.org/10.3390/>
4. Ильясова А.Х., Сафин Э.В. Механические свойства и микротвердость титанового сплава ВТ6 с нанокристаллической и микрокристаллической структурами // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2010. №6. С. 120–121.
5. Макаров В.Ф., Койнов И.И., Абзаев Р.С., Ширинкин В.В., Мешкас А.Е. Особенности диагностики процесса резания при сверлении композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. 2016. № 12 (66). С. 24–28
6. Сафин Э.В. Формирование и оценка показателей качества титанового сплава ВТ6 с ультрамелкозернистой структурой // Universum: технические науки. 2017. № 12 (45).
7. Astakhov P.A. On the inadequacy of the single-shear plane model of chip formation // International Journal of Mechanical Science, 2005. № 47. P. 1649–1672.
8. Шустер Л.Ш., Мигранов М.Ш., Чертовских С.В. и др. Триботехнические характеристики титана с ультрамелкозернистой структурой // Трение и износ. 2005. Т. 26. № 2. С. 208–214.
9. Максаров В.В., Ефимов А.Е., Важеннин А.Ю. Совершенствование технологии механической обработки титановых сплавов посредством применения предварительного пластического воздействия // Металлообработка. 2019. № 3 (111). С. 20–26.
10. Ларионова Т.А., Жуков Э.Л., Плавник С.Л. Определение рациональных режимов резания перспективных титановых сплавов на основе математической модели - Неделя науки СПбПУ // Матер. Науч. форума с междунар. участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. М.С.

Кокорин (отв. ред.). СПб.: Изд-во Политех. ун-та. 2015. С. 223–225.

REFERENCES

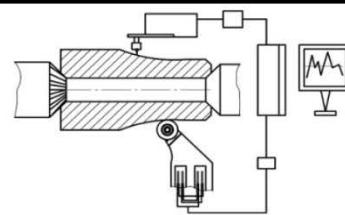
1. Inozemtsev A.A., Bashkatov I.G., Koryakovtsev A.S. Titanium alloys in products developed by Aviadvigatel OJSC // Modern titanium alloys and problems of their development: proc.: Moscow: VIAM, 2010, pp. 43–46.
2. Valiev R.Z., Usmanov L.R., Rezyapova L.R. Super strength of nanostructured metallic materials: the physical nature and mechanisms of hardening // Physics of metals and metallurgical science. 2022. vol.123, no.12. pp.1355–1361.
3. Semenova I., Polyakov A., Gareev A., Makarov V., Kazakov I., Pesin M. Machinability Features of Ti-6Al-4V Alloy with Ultrafine-Grained Structure. Metals 2023, 13, x. <https://doi.org/10.3390/>
4. Ilyasova A.H., Safin E.V. Mechanical properties and microhardness of titanium alloy VT6 having nanocrystalline and microcrystalline structures // Actual problems of aviation and cosmonautics. 2010, no. 6, pp. 120–121.
5. Makarov V.F., Konov I.I., Abzaev R.S., Shirinkin V.V., Meshkov A.E. Features of diagnostics of the cutting process when drilling composite materials // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2016, no. 12 (66). pp. 24–28.
6. 1. Safin E.V. Formation and evaluation of quality indicators of BT6 titanium alloy with the ultra-fine grain structure // Universum: Technical sciences. 2017, no. 12 (45).
7. Astakhov P.A. On the inadequacy of the single-shear plane model of chip formation // International Journal of Mechanical Science, 2005. № 47. P. 1649–1672.
8. Shuster L.Sh., Miganov M.Sh., Chertovskikh S.V., et al. Tribotechnical characteristics of titanium with an ultrafine-grained structure // Friction and wear. 2005, vol. 26, no. 2, pp. 208–214.
9. Maksarov V.V., Efimov A.E., Vazhenin A.Yu. Improvement of technology of machining of titanium alloys through use of preliminary plastic impact // Metalworking. 2019, no. 3 (111), pp. 20–26.
10. Larionova T.A., Zhukov E.L., Fin S.L. Determination of rational cutting modes of promising titanium alloys based on a mathematical model - Week of Science of SPbPU // Proceedings of Scientific forum with international participation. Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport. M.S. Kokorin (ed.), St. Petersburg: Publishing House of Polytech. Univ. 2015, pp. 223–225.

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

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

Статья поступила в редакцию 11.03.2024; одобрена после рецензирования 02.04.2024; принята к публикации 17.04.2024.

The article was submitted 11.03.2024; approved after reviewing 02.04.2024; assepted for publication 17.04.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №7 (157). С.24-33.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №7 (157). P.24-33.

Научная статья
УДК 621.9+681.532
doi: 10.30987/2223-4608-2024-24-33

Автоматизированное технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей машин

Анатолий Григорьевич Суслов¹, д.т.н.

Дмитрий Иванович Петрешин², д.т.н.

Михаил Геннадьевич Шалыгин³, д.т.н.

Виктор Александрович Хандожко⁴, к.т.н.

^{1, 2, 3, 4} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

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

²dipetreshin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9472-2167>

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

⁴vichandozhko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5212-0616>

Аннотация. В статье изложены два направления автоматизированного технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин (износостойкости, контактной жесткости и др.). Первое направление – традиционное, двухступенчатое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин: первая ступень – определение параметров качества рабочих поверхностей деталей, определяющих требуемые значения эксплуатационных свойств; вторая ступень – технологическое обеспечение параметров качества рабочих поверхностей деталей машин. Второе новое направление – одноступенчатое автоматизированное технологическое обеспечение непосредственно эксплуатационных свойств деталей машин активно развиваемое последние 25 лет в Брянском государственном техническом университете. Оно основано на базе теоретических и экспериментальных зависимостей взаимосвязи эксплуатационных свойств деталей машин непосредственно с режимами обработки их рабочих поверхностей. Для получения экспериментальных зависимостей разработаны различные автоматизированные системы научных исследований. Приведен пример такой автоматизированной системы исследования контактной жесткости. Для технологического обеспечения высокой точности требуемых параметров качества обрабатываемых поверхностей и их эксплуатационных свойств разработаны адаптивные системы управления, используемые на различных станках. При обработке новых материалов и отсутствии теоретических и экспериментальных данных возможно применение самообучающихся технологических систем. Приведен пример такой системы для токарного станка. Все эти разработки позволяют подойти к созданию станков с искусственным интеллектом.

Ключевые слова: качество поверхности, эксплуатационные свойства, технологическое обеспечение, адаптивные системы, самообучающиеся станки

Для цитирования: Суслов А.Г., Петрешин Д.И., Шалыгин М.Г., Хандожко В.А. Автоматизированное технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей машин // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 7 (157). С. 24–33. doi: 10.30987/2223-4608-2024-24-33

Automated technological support and improvement of the operational properties of machine parts

Anatoly G. Suslov¹, D.Eng.

Dmitry I. Petreshin², D. Eng.

Mikhail G. Shalygin³, D. Eng.

Viktor A. Khandozhko⁴, Ph.D. Eng.

^{1, 2, 3, 4} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹naukatm@yandex.ru

²dipetreshin@yandex.ru

³migshalygin@yandex.ru

⁴vichandozhko@gmail.com

Abstract. The article outlines two directions of automated engineering support for the operational properties of machine parts (wear resistance, contact stiffness, etc.). The first direction is a traditional one. It's a two-stage provision of the operational properties of machine parts: in the first stage it is the dimensioning of working surfaces quality of the part that determines the required values of operational properties; in the second stage it is technological provision of quality parameters for the working surfaces of machine parts. The second new direction is a single – stage automated engineering support for the current operational properties of machine parts, which has been actively developed over the past 25 years at the Bryansk State Technical University. It is based on the theoretical and experimental dependences of the relationship between the operational properties of machine parts directly with the processing modes of their working surfaces. Various automated systems of scientific research have been developed to obtain experimental dependencies. An example of such an automated system for studying contact stiffness is given. Adaptive control systems used on various machines for high-performance engineering support aimed at obtaining the required quality parameters of the treated surfaces and their operational properties have been developed. When processing new materials and taking into account the absence of theoretical and experimental data, it is possible to use self-learning technological systems. An example of such a system used for a lathe, is given. All these developments contribute to the creation of the machines with artificial intelligence.

Keywords: surface quality, operational properties, engineering support, adaptive systems, self-learning machines

For citation: Suslov A.G., Petreshin 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. № 7 (157). P. 24–33. doi: 10.30987/2223-4608-2024-24-33

Один из основных показателей качества изделий машиностроения – надежность, которая определяется рядом эксплуатационных свойств их деталей: статическая и усталостная прочность, износостойкость, коррозионная стойкость и т. д. [1]. Поэтому автоматизированное технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей машин является развитием науки по технологическому обеспечению качества изделий машиностроения и автоматизированной ее реализации на практике.

В настоящее время при конструкторско-технологической подготовке производства осуществляется двухступенчатая система обеспечения качества деталей машин.

На стадии конструкторской подготовки производства производится выбор материалов деталей, и определяются точность размеров и параметры качества их поверхностных слоев [2]. Это осуществляется в автоматизированном режиме с использованием программ, базирующихся на теоретических и экспериментальных данных взаимосвязи эксплуатационных свойств деталей машин с физико-механическими свойствами их материалов, точностью размеров и качеством поверхностного слоя.

Взаимосвязь эксплуатационных свойств деталей машин с параметрами качества их поверхностного слоя приведена в табл. 1.

1. Параметры, определяющие эксплуатационные свойства деталей машин и их соединений

1. Parameters determining the operational properties of machine parts and their connection joints

Эксплуатационные свойства		Контактная жесткость:		Износостойкость	Герметичность соединений	Усталостная прочность	Коррозионная стойкость
		первое нагружение	повторное нагружение				
Свойства материалов	σ_B	0	0	+	0	+	0
	σ_T	+	+	+	-	+	+
	E	+	-	+	-*	+	0
	HB	+	-	+	-	-*	0
Размер и его точность	d, l, B	+	+	+	-*	+	0
	T	-*	-*	-	-*	0	0
Параметры качества поверхностного слоя	$H_{\max}$	-*	-	-	-	0	0
	H_p	-*	-	-*	-*	0	0
	W_z	-	-*	-	-	0	-
	W_p	*_-	-	-*	-*	0	-
	Sm_{II}	-	-	+	-	0	+
	R_a, R_z	-	-	-	-	-	-*
	$R_{\max}$	-	-	-	-	-*	-
	R_p	-*	-*	-*	-*	+	-
	tp	+	+	+	+	-	+
	Sm	+	+	+	-*	+	+
	s	0	0	+	-	0	+
	$R_{\max}$	0	0	-	-	0	-*
	Sm	0	0	+	-	+	+
	$\sigma_{ост}$	+	-	+	-	+	+
	$h_{\sigma 0}$	0	0	0	0	+	+
	$H_{\mu 0}$	+	-	+	-	+	+
	h_{μ}	0	0	0	0	+	+
	ε	-*	-*	+	0	+	-*
	l_3	-*	-*	-*	0	-*	+
	ρ_D	-*	-*	-*	0	-*	-*

Примечание. Обозначение «+» и «-» показывают, что увеличение и уменьшение этих параметров вызывает соответственно улучшение или ухудшение данного эксплуатационного свойства: «*» – параметр оказывает основное влияние на данное эксплуатационное свойство; «0» – параметр не влияет на данное эксплуатационное свойство.

Численные значения параметров качества поверхностного слоя определяются по теоретическим или эмпирическим уравнениям, описывающим взаимосвязь эксплуатационных свойств деталей машин с – в период приработки:

$$I_h = \frac{1,2Ra^{2/3}}{n_{\phi} \cdot \lambda \cdot Sm \cdot tm^{3/2}} \left(\frac{\rho}{H_{\mu o}} \right)^{7/6} \sqrt{15\pi(2\pi \cdot Wz \cdot H \max)^{1/3} \cdot \left[1 + \frac{2\pi \cdot H_{\mu o} (1 - \mu^2)^2}{E} \right]}; \quad (1)$$

– в период нормального изнашивания:

$$I_h = \frac{1,2\rho^{7/6}}{n_{\phi} \cdot \lambda \cdot tm^{3/2} \cdot H_{\mu o}^{2/3}} \sqrt{\frac{30(1 - \mu^2)^2 (2\pi \cdot Wz \cdot H \max)^{1/3}}{Sm \cdot E}}, \quad (2)$$

$$\lambda = \left(\frac{\sigma_b - \sigma_o}{\sigma_a} \right)^{t_y}, \quad (3)$$

где Ra – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм; n_{ϕ} – число циклов; Sm – средний шаг неровностей профиля, мм, мм; tm – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии; ρ – радиус скругления режущей кромки; $H_{\mu o}$ – микротвердость материала, МПа; Wz – средняя высота волн, мкм; $H\max$ – максимальное макроотклонение, мкм; E – приведенный модуль упругости; σ_b – предел прочности; σ_a – действующее значение амплитудного напряжения в поверхностном слое.

На стадии технологической подготовки производства осуществляется автоматизированное проектирование технологических процессов, заключающееся в выборе оптимальных технологических методов и режимов обработки, обеспечивающих с минимальной себестоимостью или максимальной производительностью требуемую точность и параметры качества рабочих поверхностей деталей машин [3].

параметрами качества их рабочих поверхностей. Так, теоретическое уравнение по расчету интенсивности изнашивания имеет следующий вид:

Последние 25 лет в Брянском государственном техническом университете развивается новое научное направление – одноступенчатое технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. Оно базируется на получении теоретических и экспериментальных зависимостей различных эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей машин непосредственно от условий их обработки [4].

Теоретические уравнения могут быть получены на основе подстановки теоретических зависимостей параметров качества рабочих поверхностей деталей машин от режимов обработки в уравнения взаимосвязи эксплуатационных свойств с параметрами качества поверхностного слоя. Так, для износостойкости при шлифовании рабочих поверхностей трения получены следующие уравнения:

– в период приработки (при шлифовании):

$$I_h = \frac{6 \left(\frac{22,5 k_c t^{0,5}}{\rho_3^{0,25} \left(\frac{2,6 Fc H V^2 k_B m q v_K(A)^{0,5}}{N^2 v_3} \right)^{0,5}} \right)^{0,67}}{n 1 \lambda \left(\frac{22,5 \rho_3^{0,75} k_c t^{0,5}}{\left(\frac{2,6 Fc H V^2 k_B m q v_K(A)^{0,5}}{N^2 v_3} \right)^{0,5}} \right)^{0,5}} \times$$

$$\times \sqrt{\left(\frac{6,28 H \mu_{исх} (1 - \mu^2) (\sigma_T + (\sigma_B + 0,01 \sigma_B \psi_K - \sigma_T) EXP(-0,0015 T_{HC}))}{E \sigma_T} + 1 \right)} \times$$

$$\times (6,28 H \max_{исх} W \beta^{u-1})^{0,165} \left(\frac{P \sigma_T}{H \mu_{исх} (\sigma_T + (\sigma_B + 0,01 \sigma_B \psi_K - \sigma_T) EXP(-0,0015 T_{HC}))} \right)^{1,167}; \quad (4)$$

– в период нормального изнашивания (при шлифовании):

$$I_h = \frac{0,028}{n 1 \lambda \left(\frac{H \mu_{исх} (\sigma_T + (\sigma_B + 0,01 \sigma_B \psi_K - \sigma_T) EXP(-0,0015 T_{HC}))}{\sigma_T} \right)} \times$$

$$\times \frac{3000 (1 - \mu^2) \left(\frac{141,4 H \max_{исх} W \beta^{u-1} k_c t^{0,5}}{\rho_3^{0,25} \left(\frac{2,6 Fc H V^2 k_B m q v_K(A)^{0,5}}{N^2 v_3} \right)^{0,5}} \right)^{0,33}}{\sqrt{E \left(\frac{22,5 \rho_3^{0,75} k_c t^{0,5}}{\left(\frac{2,6 Fc H V^2 k_B m q v_K(A)^{0,5}}{N^2 v_3} \right)^{0,5}} \right)^{0,5}}}, \quad (5)$$

где ρ_3 – среднее значение радиуса скругления вершин абразивных зерен; t – глубина шлифования; k_c – коэффициент, учитывающий влияние смазочно-охлаждающего технологического средства на параметр Ra ; k_B – коэффициент учитывающий влияние колебаний рабочей поверхности круга относительно обрабатываемой поверхности (в большинстве случаев $k_B = 0,65 \dots 0,85$); m – коэффициент, учитывающий фактическое число зерен на рабочей поверхности круга; v_K – скорость вращения круга; v_3 – скорость вращения (перемещения) заготовки; $A = D_K$ – для плоского шлифования

периферией круга; $A = (D_3 D_K) / (D_3 \pm D_K)$ – для круглого наружного «+» и внутреннего «-» шлифования периферией круга; D_3, D_K – диаметр заготовки и круга соответственно; q – коэффициент, учитывающий микрорельеф вершин абразивных зерен; N – зернистость шлифовального круга; V – объемное содержание зерен в круге; Fc – параметр, учитывающий разновысотность вершин зерен на рабочей поверхности круга; H – число контактов рассматриваемого участка поверхности заготовки с кругом; W – высота волнистости обрабатываемой поверхности после одного рабочего хода инструмента;

β – коэффициент, характеризующий процесс изменения волнистости поверхности при выжигании шлифовальным кругом ($\beta = 0,8 \dots 0,9$); u – коэффициент, учитывающий процесс выжигания абразивным инструментом обрабатываемой поверхности; ψ_k – относительное сужение поперечного сечения образца из материала заготовки перед его разрывом при испытаниях на растяжение; T_{nc} – температура нагрева поверхностного слоя при шлифовании.

Наряду с методом подстановки можно получать теоретические уравнения с использованием энергетического подхода к идентичности формирования качества поверхностного слоя деталей, как при их обработке, так и при эксплуатации. Для интенсивности изнашивания уравнение имеет следующий вид:

– чистовое круглое врезное шлифование:
сталь 12ХН3А (58...63 HRCэ):

$$I_h = 1,65 \cdot 10^{-7} I^{0,314} v_z^{0,254} s_p^{0,318}, \quad (6)$$

где I – зернистость шлифовального круга (25...40); v_z – скорость вращения заготовки (20...40 м/мин); s_p – поперечная (радиальная) подача (0,001...0,005 мм/об).

Для получения экспериментальных зависимостей разработаны различные автоматизированные системы научных исследований (АСНИ) эксплуатационных свойств деталей машин. Общий вид АСНИ контактной жесткости представлен на рис. 1.



Рис. 1. АСНИ контактной жесткости деталей машин:

1 – комплектный электропривод; 2 – электродвигатель; 3 – винтовой механизм; 4 – индентор; 5 – образец; 6 – датчик перемещения; 7 – датчик силы; 8 – преобразователь А; 9 – преобразователь Б; 10 – аналого-цифровые преобразователи (АЦП); 11 – цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП); 12 – персональная ЭВМ; 13 – программное обеспечение (ПО)

Fig. 1. ARS for studying a contact stiffness of machine parts:

1 – electric drive package; 2 – electric motor; 3 – screw mechanism; 4 – indenter; 5 – sample; 6 – displacement sensor; 7 – force sensor; 8 – converter A; 9 – converter B; 10 – analog-digital converters (ADCs); 11 – digital-to-analog converter (DAC); 12 – personal computer; 13 – software

Для обеспечения работы АСНИ контактной жесткости используется программное обеспечение 13, которое регистрирует измерения в реальном масштабе времени и выводит

их результаты на дисплее ПЭВМ 12 в виде графиков и численных значений, что позволяет визуально контролировать ход измерений (рис. 2).

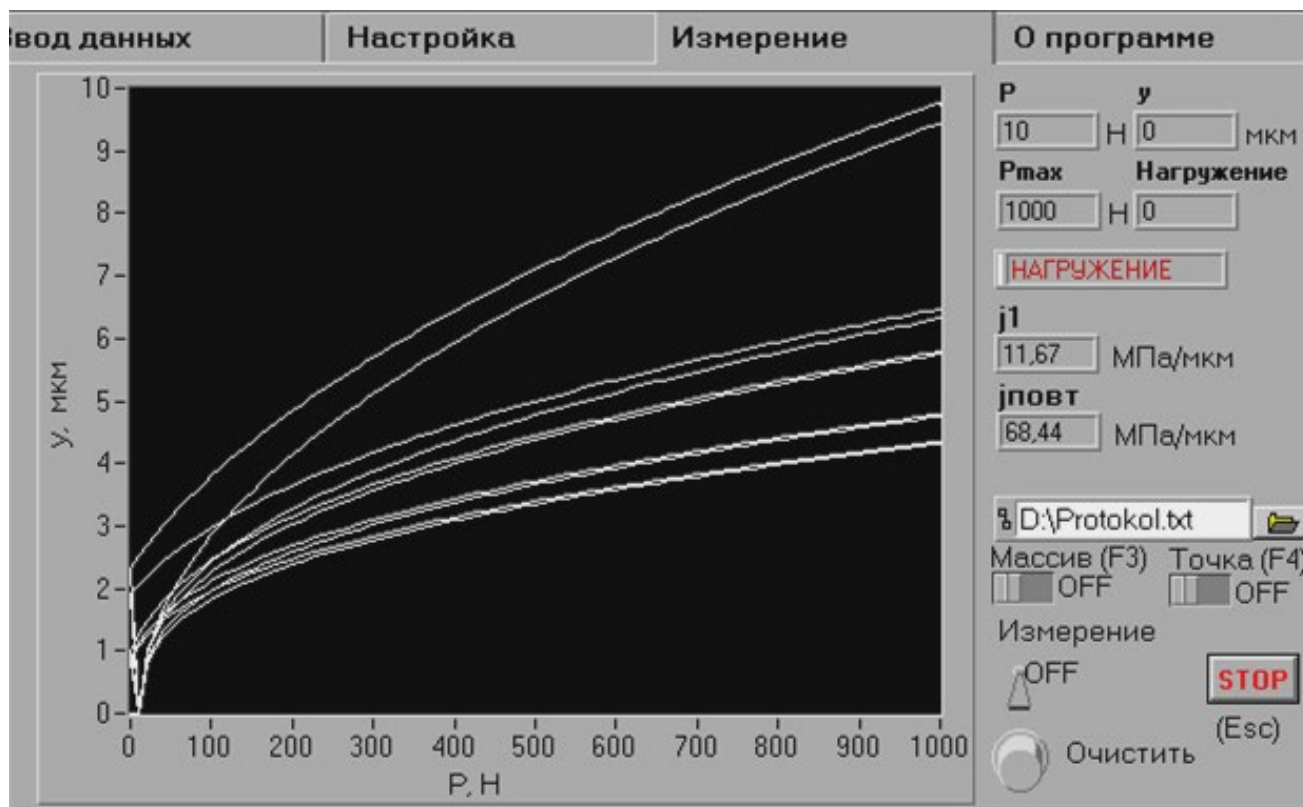


Рис. 2. Программное обеспечение АСНИ контактной жесткости

Fig. 2. Software ARS for studying a contact stiffness

Используя полученные теоретические и эмпирические уравнения, по разработанной программе рассчитываются режимы для различных методов обработки, обеспечивающие требуемые параметры качества поверхностного слоя и эксплуатационные свойства деталей машин.

Эмпирические уравнения взаимосвязи контактной жесткости плоских поверхностей с условиями их обработки получены с использованием полнофакторного эксперимента 2^n , где n – число факторов. Для проведения эксперимента предварительно были подготовлены образцы с соответствующей твердостью НВ и обработанные на соответствующих подаче S_0 и скорости резания v .

Эксперименты по определению контактной жесткости при первом и повторном нагружениях проводились в автоматизированном режиме с помощью АСНИ (см. рис. 1). Результаты экспериментов обрабатывались с помощью разработанного программного обеспечения для определения коэффициентов мультипликативной модели.

Полученные с помощью АСНИ зависимости контактной жесткости от условий обработки:

– для давления 1 МПа имеют вид:

$$j_1 = 0,008 \cdot S_0^{-0,5} \cdot v^{0,1} \cdot \text{HB}^{-0,02}, \quad (7)$$

$$j_{\text{повт}} = 2 \cdot S_0^{-0,16} \cdot v^{0,03} \cdot \text{HB}^{-0,66}; \quad (8)$$

– для давления 10 МПа зависимости имеют вид:

$$j_1 = 0,031 \cdot S_0^{-0,53} \cdot v^{0,12} \cdot HB^{-0,02}, \quad (9)$$

$$j_{\text{повт}} = 7,8 \cdot S_0^{-0,162} \cdot v^{-0,06} \cdot HB^{-0,65}. \quad (10)$$

Аналогичные эмпирические зависимости контактной жесткости непосредственно от режимов обработки на данной АСНИ получены также и для других методов механической обработки плоских наружных и внутренних поверхностей вращения.

Учитывая возможные колебания исходных параметров качества и твердости материалов при изготовлении ответственных деталей, могут быть использованы разработанные системы адаптивного управления режимами, гарантирующие получение эксплуатационных свойств обрабатываемых поверхностей деталей в заданных пределах.

Система адаптивного управления [6] (рис. 3) предназначена для обеспечения требуемых параметров шероховатости Ra ,

поверхностных остаточных напряжений, поверхностной микротвердости и комплексного параметра качества поверхностного слоя Sx [7], что, в свою очередь, обеспечит получение требуемых эксплуатационных свойства деталей машин.

Алгоритм работы (А) системы реализуется в виде программного обеспечения записанного в память устройства управления, в качестве которого используется ПЭВМ. Исполнительным устройством системы является технологическая система (ТС), управляемая устройством ЧПУ. Связь ПЭВМ и УЧПУ осуществляется через контроллер сопряжения (КС), подключаемый к ПЭВМ по последовательному интерфейсу RS 232. Управляющими воздействиями U являются скорость резания v , величина подачи S и глубина резания t . Внешними возмущениями F являются изменение жесткости технологической системы Δj , износ инструмента h_3 , разброс припуска Δt и твердости заготовок ΔHB и другие факторы. Для работы системы адаптивного управления необходима исходная информация, вводимая оператором (ОП) перед началом работы.

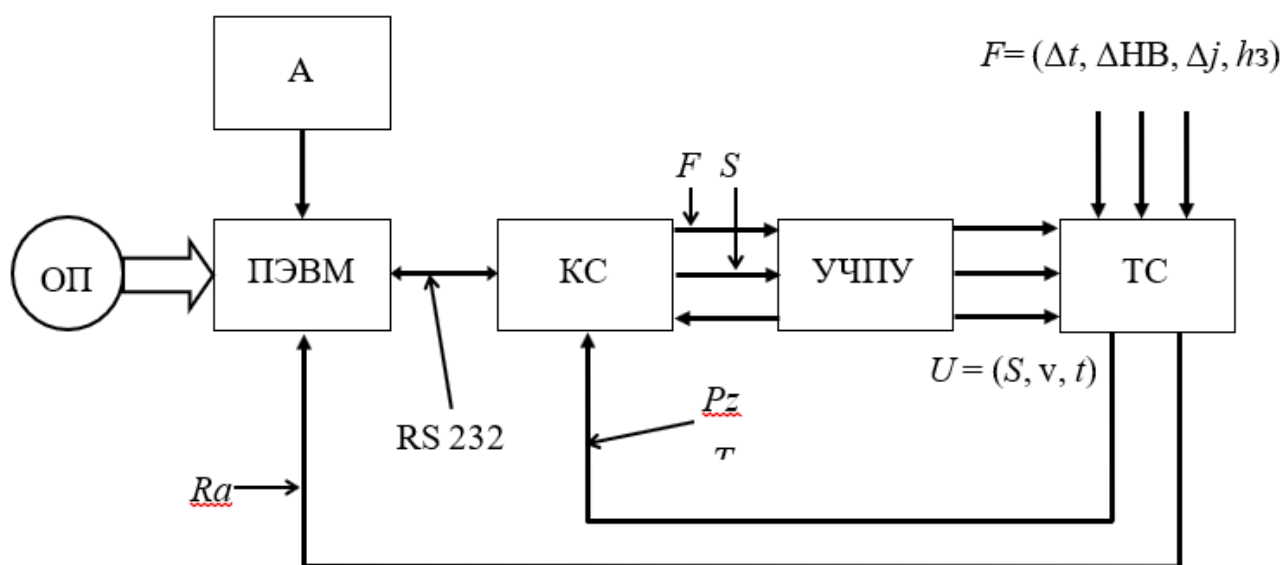


Рис. 3. Структура самообучающейся технологической системы управления

Fig. 3. Structure of the self-learning technological control system

Для определения физико-механических параметров обработанной поверхности используется косвенный метод, основанный на измерении во время обработки силы резания P_z и температуры T в зоне резания и вычислении на основе измерений физико-механических параметров качества обработанной поверхности. Сила резания P_z и температура T измеряются датчиками, установленными непосредственно вблизи зоны обработки. Параметр шероховатости R_a , обработанной поверхности, измеряется прямым методом с использованием лазерного датчика [8].

При обработке деталей из новых и (в том числе) неметаллических материалов, для которых отсутствуют теоретические и эмпирические зависимости, а также справочные данные, используемых для технологического обеспечения требуемых параметров качества и эксплуатационных свойств обрабатываемых поверхностей деталей машин, целесообразно использовать разработанные самообучающиеся технологические системы.

Технологическая система включает в себя станок с ЧПУ и персональный компьютер, подключенный к системе управления станком. Составляется матрица планирования эксперимента с входными параметрами максимальных и минимальных режимов, используемых для чистовой обработки данного материала. Затем в соответствии с данной матрицей планирования на соответствующих режимах по программе производится обработка небольших участков поверхности (20 мм) и осуществляется автоматизированное измерение параметров шероховатости силы резания и температуры в зоне резания. По разработанной программе осуществляется обработка экспериментальных данных и получается эмпирическая зависимость параметров шероховатости, силы резания и температуры в зоне резания от режимов обработки.

По теоретической зависимости определяются значения соответствующего

эксплуатационного свойства для каждого эксперимента. В результате получается экспериментальное уравнение взаимосвязи эксплуатационного свойства с режимами обработки. По данному уравнению рассчитываются режимы чистовой обработки рабочей поверхности деталей, обеспечивающие требуемое значение эксплуатационного свойства. Дальнейшая чистовая обработка рабочей поверхности деталей производится на установленных оптимальных режимах резания. При этом, учитывая возможные колебания физико-механических свойств обрабатываемого материала партии деталей и исходных параметров качества поверхности, перед ее чистовой обработкой также используется активный контроль и адаптивная система корректировки режимов резания. Таким образом, появляется возможность создания станков с искусственным интеллектом, обеспечивающих требуемые значения эксплуатационных свойств деталей машин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Машиностроение. Энциклопедия.** Ред. совет: К.В. Фролов и др. М.: Машиностроение. Надежность машин. Т. IV-3/ В.В. Ключев, В.В. Болотин, Ф.Р. Соснин и др.; под общ. ред. В.В. Ключева. 1998.
2. **Инженерия поверхности** деталей / Колл. авторов; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
3. **Справочник технолога** / под общ. ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
4. **Фундаментальные основы** технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / под ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2022. 552 с.
5. **Метод** определения нормальной контактной жесткости неподвижных стыков. Методические рекомендации. М.: ВНИИМАШ. 1982.
6. **Наукоемкие технологии** в машиностроении: [монография] / под ред. А. Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. 527 с.
7. **Суслов А.Г., Петрешин Д.И.** Автоматизированное обеспечение комплексного параметра качества поверхностного слоя S_x при механической

обработке // Научно-технические технологии в машиностроении. 2011. № 2 (02). С. 34–39.

8. Петрешин Д.И. Применение лазерного оптического датчика для измерения высотных параметров шероховатости поверхности деталей машин в самообучающейся адаптивной технологической системе // Контроль. Диагностика. 2009. № 11. С. 53–57.

REFERENCES

1. Mechanical engineering. Encyclopedia. Ed. council: K.V. Frolov et al. Moscow: Mechanical engineering. Reliability of machines. Vol. IV-3/ V.V. Klyuev, V.V. Bolotin, F.R. Sosnin, et al.; endorsed by V.V. Klyuev. 1998.

2. Surface engineering of parts / Joint authors; edited by A.G. Suslov. M.: Mechanical Engineering, 2008, 320 p.

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

4. Fundamentals of technological support and reliability improvement of mechanical engineering articles/ ed. by A.G. Suslov. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2022, 552 p.

5. Method for definition of normal contact stiffness in fixed joints: Methodical Recommendations. Moscow: VNIIMASH, 1982.

6. Science-intensive technologies in mechanical engineering: [monograph] / edited by A. G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2012. 527 p.

7. Suslov A.G., Petreshin D.I. Automated provision of the complex parameter of quality of the surface layer Cx during mechanical processing // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2011, no. 2 (02), pp. 34–39.

8. Petreshin D.I. Application of a laser optical sensor control for measurement of high-altitude parameters of machine parts surface roughness in self-learning adaptive technological system // Control. Diagnostics. 2009, no. 11, pp. 53–57.

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 02.04.2024; одобрена после рецензирования 19.04.2024; принята к публикации 26.04.2024.

The article was submitted 02.04.2024; approved after reviewing 19.04.2024; assepted for publication 26.04.2024.

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №7 (157). С.34-42.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №7 (157). P.34-42.

Научная статья

УДК 621.7

doi: 10.30987/2223-4608-2024-34-42

Создание и развитие высоконадежных информационно-управляющих систем с элементами искусственного интеллекта для перспективных технологических комплексов

Борис Максович Бржозовский¹, Д.Т.Н.

Владимир Васильевич Мартынов², Д.Т.Н.

Марина Борисовна Бровкова³, Д.Т.Н.

^{1, 2, 3} Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Россия

¹ bmb sar85@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8486-4467>

² v_martynov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4177-0963>

³ bmb sar@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1863-0709>

Аннотация. Представлены методы и средства улучшения сложного технологического оборудования за счет оперативного оценивания качества реализуемых технологий в реальном времени. Это связано с тем, что при реализации технологических операций на универсальном оборудовании каждый раз возникает необходимость моделирования динамических процессов и оценивания большого числа факторов неопределённости, оказывающих влияние на качество формообразования. Априорно учитывать эти факторы не представляется возможным. Возникает необходимость создания новых информационных технологий с возможностями универсального применения при оперативном оценивании различных динамических процессов в системах диагностики, идентификации и управления. Реализованы типовые компьютерные системы статистического оценивания и оптимизации динамических процессов с возможностями универсального применения для различных реализаций современных технологий. Показана возможность применять интегративные критерии и методы искусственного интеллекта для систем диагностики, идентификации и управления перспективными технологическими комплексами. Представлена реализация информационных систем при управлении сложными объектами различного технологического назначения. Предложенные методы и подходы моделирования апробированы на различных предприятиях машиностроения при обработке деталей на токарных, токарно-фрезерных и шлифовальных станках как универсальных, так и с ЧПУ. Результаты исследований позволили обосновать новые принципы автоматизированного контроля и оптимальной настройки технологических процессов в реальном времени и создать автоматизированную систему оценки их качества, позволяющую повысить оперативность и достоверность принимаемых управляющих решений за счет проведения оптимизации непосредственно на действующем оборудовании. На основе изложенных выше методов и подходов получены новые результаты при реализации плазменных технологий модификации геометрически сложных поверхностей изделий машиностроения, направленных на повышение износостойкости, твердости и других технических характеристик рабочих поверхностей изделий прецизионного машиностроения. Достаточно полная апробация методов, подходов, процедур и критериев принятия решений для различных технологий позволяет их рекомендовать для универсального применения.

Ключевые слова: оперативное оценивание, управление, интегративные критерии, плазменные технологии, методы искусственного интеллекта

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту РНФ № 19-19-00101 и по проекту РНФ № 20-19-00299.

Для цитирования: Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Бровкова М.Б. Создание и развитие высоконадежных информационно-управляющих систем с элементами искусственного интеллекта для перспективных технологических комплексов // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 7 (157). С. 34–42. doi: 10.30987/2223-4608-2024-34-42

Creation and development of highly reliable information and control systems with elements of artificial intelligence for advanced technological complexes

Boris M. Brzhozovsky¹, D. Eng.

Vladimir V. Martynov², D. Eng.

Marina B. Brovkova³, D. Eng.

^{1, 2, 3} Institute of Machine Science named after A.A. Blagonravov,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹ bmbars85@mail.ru

² v_martynov@mail.ru

³ bmbars@mail.ru

Abstract. Methods and means of improving complex technological equipment are shown through the operational assessment of the quality of implemented technologies realtime. This is proved by the fact that implementing technological operations on universal equipment each time requires modeling dynamic processes and taking into account a large number of uncertainty factors that affect the geometry generation quality. It is not possible to be a priori aware of these factors. There is a need to create new information technologies with the possibilities of universal application for immediate understanding of various dynamic processes in diagnostic, identification and control systems. Standard computer systems for statistical analysis and optimization of dynamic processes with the possibilities of universal application for various implementations of modern technologies have been introduced. The possibility of using integrative criteria and methods of artificial intelligence for diagnostic systems, identification and control of advanced technological complexes is shown. The implementation of information systems for the management of complex objects of various technological purposes is presented. The proposed modeling methods and approaches have been tested at various machine-building enterprises when processing parts on turning, milling and grinding machines, both universal and CNC. The research results made it possible to implement new principles of automated control and optimal adjustment of technological processes in real time and create an automated system for evaluating their quality, which allows increasing the efficiency and reliability of management decisions by conducting optimization directly on operating equipment. Based on the methods and approaches described above, new results have been obtained in the implementation of plasma technologies for the modification of geometrically complex surfaces of mechanical engineering products aimed at increasing wear resistance, hardness and other technical characteristics of the working surfaces of precision engineering products. A fairly complete approbation of methods, approaches, procedures and decision-making criteria for various technologies allows them to be recommended for universal applicability.

Keywords: operational assessment, management, integrative criteria, plasma technologies, artificial intelligence methods

Acknowledgements: the material was prepared as part of RHSF project No. 19-19-00 scientific research and RHSF project No. 20-19-00299 scientific research.

For citation: Brzhozovsky B.M., Martynov V.V., Brovkova M.B. Creation and development of highly reliable information and control systems with elements of artificial intelligence for advanced technological complexes / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 7 (157). P. 34–42. doi: 10.30987/2223-4608-2024-34-42

Введение

Сложность и разнообразие современного технологического оборудования определяют необходимость создания новых информационных технологий с возможностями универсального применения при оперативном оценивании различных динамических процессов в

системах диагностики, идентификации и управления. Это связано тем, что при реализации технологических операций на универсальном оборудовании каждый раз возникает необходимость моделирования динамических процессов и оценивания большого числа факторов неопределённости, оказывающих влияние на качество формообразования. Априорно

учитывать эти факторы не представляется возможным. Нами реализованы типовые компьютерные системы статистического оценивания и оптимизации динамических процессов с возможностями универсального применения для различных реализаций современных технологий. Предлагаемые методы и подходы обеспечивают возможности управления оборудованием в процессе функционирования за счет двухэтапного получения знаний о фундаментальных свойствах реализуемых технологических процессов и влиянии возмущений на качество формообразования.

На определенных этапах создания информационно-управляющих систем нами обоснованы и реализованы подходы с использованием методов искусственного интеллекта. Методы искусственного интеллекта и машинного обучения могут использоваться для отслеживания систем в реальном времени [1, 2]. С быстрым развитием искусственного интеллекта для решения задач автоматизированного контроля качества было предложено глубокое обучение. Глубокое обучение – это подобласть машинного обучения, которая пытается изучить абстракции высокого уровня в данных, используя иерархическую архитектуру [3 – 5]. Чтобы обеспечить алгоритмы эффективного интеллектуального мониторинга важно объединить аппаратное обеспечение (например камеру, источник света) и программные сервисы (например, масштабируемые вычислительные ресурсы и обновление моделей) для создания более сложных систем автоматизированного контроля и управления.

Предложенные методы и подходы моделирования апробированы на различных предприятиях машиностроения при обработке деталей на токарных, токарно-фрезерных и шлифовальных станках как универсальных, так и с ЧПУ. Результаты проверки позволили обосновать новые принципы автоматизированного контроля и оптимальной настройки технологических процессов в реальном времени и

создать автоматизированную систему оценки их качества, позволяющую повысить оперативность и достоверность принимаемых управляющих решений за счет проведения оптимизации непосредственно на действующем оборудовании. На основе изложенных выше методов и подходов получены новые результаты при реализации плазменных технологий модификации геометрически сложных поверхностей изделий машиностроения, направленных на повышение износостойкости, твердости и других технических характеристик рабочих поверхностей изделий прецизионного машиностроения. Достаточно полная апробация методов, подходов, процедур и критериев принятия решений для различных технологий позволяет их рекомендовать для универсального применения. Далее представлена реализация информационных систем при управлении сложными объектами различного технологического назначения.

Методы и подходы

Реализованы методы и сформировано программно-математическое обеспечение компьютерных систем статистического оценивания и оптимизации технологических процессов в реальном времени по критериям обеспечения их инвариантности к внешним возмущающим воздействиям на основе научного и эмпирического обоснования соответствующих математических моделей и информационных технологий. Обеспечена двухэтапная процедура настройки параметров системы управления. Для этого в работе обоснованы эффективные алгоритмы идентификации параметров и свойств рабочих процессов в реальном времени.

С учётом сложности динамических процессов, протекающих в системе при данных технологических операциях, а также большого числа факторов неопределённости, оказывающих влияние на качество продукции,

целесообразным в некоторых случаях является использование методов машинного обучения для расширения возможностей систем управления. Были учтены проблемные ситуации, связанные с отсутствием достаточно полной и апробированной научной базы в области отображения динамики процессов из-за их обозначенных выше свойств (квазистационарность и нелинейность реализуемых процессов) [6], возникновение новых динамических состояний при управляемом изменении режимных параметров, определяющих необходимость дополнительной идентификации этих состояний в пределах допустимых областей и времени их существования. При плазменной модификации эти свойства проявляются, например, под действием вариаций параметров структуры и физико-механических свойств материала рабочей части инструмента, приводящих к изменению скоростей тепловых процессов нагрева и охлаждения, что существенно влияет на повышение прочности и, как следствие, эксплуатационной надежности инструмента. При механической обработке проявление этих свойств связано с действием различных возмущений (прежде всего силовых), изменяющих состояние станка и процесса резания и порождающих новые состояния, которые существенно отличаются от начального. Полное и точное априорное моделирование основных характеристик процессов практически невозможно и нецелесообразно (даже с учетом возможностей современных ЭВМ и высокопроизводительных специализированных контроллеров) из-за их многообразия и конечного времени существования моделей. Также часто возникает необходимость дополнительного решения сложных задач, в частности задачи распознавания образов.

Оценивание идентифицируемых процессов осуществлялось на основе следующих статистических критериев и процедур. Критерий Краскела-Уоллиса – это обобщение критерия U Манна-Уитни. Этот критерий

представляет собой непараметрический аналог однофакторного дисперсионного анализа и обнаруживает различия в положении распределения. Этот критерий предполагает, что k генеральных совокупностей, из которых взяты выборки, априори не упорядочены. Целевое назначение критерия в наших исследованиях – оценка воспроизводимости результатов модификации. Критерий Фридмана является непараметрическим критерием, предназначенным для проверки однородности статистических данных. Используется для оценки значимости результатов модификации. «Ящик с усами» – график, использующийся в описательной статистике, компактно изображающий одномерное распределение вероятностей. Такой вид диаграммы в удобной форме показывает медиану (или, если нужно, среднее), нижний и верхний квантили, минимальное и максимальное значение выборки и выбросы. Несколько таких ящиков можно нарисовать бок о бок, чтобы визуально сравнивать одно распределение с другим; их можно располагать как горизонтально, так и вертикально. Расстояния между различными частями ящика позволяют определить степень разброса (дисперсии) и асимметрии данных и выявить выбросы.

Целевое назначение – оценка однородности результатов модификации. Линейный регрессионный анализ – это метод изучения статистической взаимосвязи между одной зависимой количественной зависимой переменной от одной или нескольких независимых количественных переменных. Позволяет оценить достоверность модификации. Непараметрический корреляционный анализ является статистическим методом, используемым для оценки силы и направления взаимосвязи между двумя переменными, которые не имеют линейной взаимосвязи. Он основан на рядах данных, а не на фактических значениях. Позволяет провести оценку

постэксплуатационного состояния модифицированного изделия.

Для количественной оценки сигналов используются статистика Херста H [6] и среднее значение интенсивности излучения плазменного облака J . Статистика H представляет собой угол наклона построенной в логарифмических координатах линии регрессии усредненных значений нормированных на стандартное отклонение S размахов сигнала R , представляющих собой разности между максимальными $X_{\max}$ и минимальными $X_{\min}$ накопленными на фиксированном интервале времени отклонениями сигнала от среднего значения, и отображает влияние каждого усредненного показателя (т. е. по сути структуры сигнала) на направление и степень его изменений. Достоверность вычисления статистики Херста зависит от длины реализации регистрируемого электрического сигнала и частоты его дискретизации.

Для механических систем (станочные системы и газоперекачивающие агрегаты) для оценки качества динамических процессов были применены интегративные критерии механических колебаний в системе [7].

Плазменные технологии

При формировании стратегии и алгоритмов управления процессом плазменной технологии были использованы изложенные выше методы и подходы статистического оценивания и моделирования. Модификация проводится в специальной технологической установке за счет формирования СВЧ газового разряда низкотемпературной плазмы непосредственно вокруг поверхности обрабатываемого изделия. Это является основным отличием от всех других подобных технологий и обеспечивает высокую концентрацию энергии воздействия плазмы на обрабатываемой поверхности при низкой потребляемой мощности оборудования. Для представленной

технологии на основе теоретических и экспериментальных исследований обоснована стратегия двухконтурного управления и реализована система адаптивного управления с каналом компенсации возмущений. Выполнена оптимизация взаимодействия электромагнитного и электростатического полей за счет изменения подаваемого на изделие потенциала смещения и анодного тока магнетрона, определяющего уровень подводимой к изделию СВЧ-мощности.

Для проведения исследований было выполнено сопоставление значений предложенного при разработке модели показателя стабильности процесса взаимодействия плазмы с поверхностью изделия с значениями статистики Херста, показавшее наличие сильной обратной пропорциональной связи между ними. Это позволило использовать показатель стабильности для проведения количественной оценки получаемых в ходе исследования данных. Регрессионный и корреляционный анализ полученных в ходе моделирования данных показали, что в условиях изменения параметров изделия имеется возможность повышения стабильности процесса взаимодействия его поверхности с плазмой за счет изменения значений режимных параметров. В ходе регрессионного анализа были получены и изучены зависимости скоростей изменения показателя стабильности от значений параметров изделия как функций потенциала или анодного тока магнетрона. Реализованы каналы обратной связи, позволяющие наблюдать за ходом процесса воздействия низкотемпературной плазмы на поверхность изделия по параметрам электрического и оптического сигналов. Для количественной оценки сигналов используются в первом случае статистика Херста H (рис. 1) [6], во втором – среднее значение интенсивности излучения плазменного облака J .

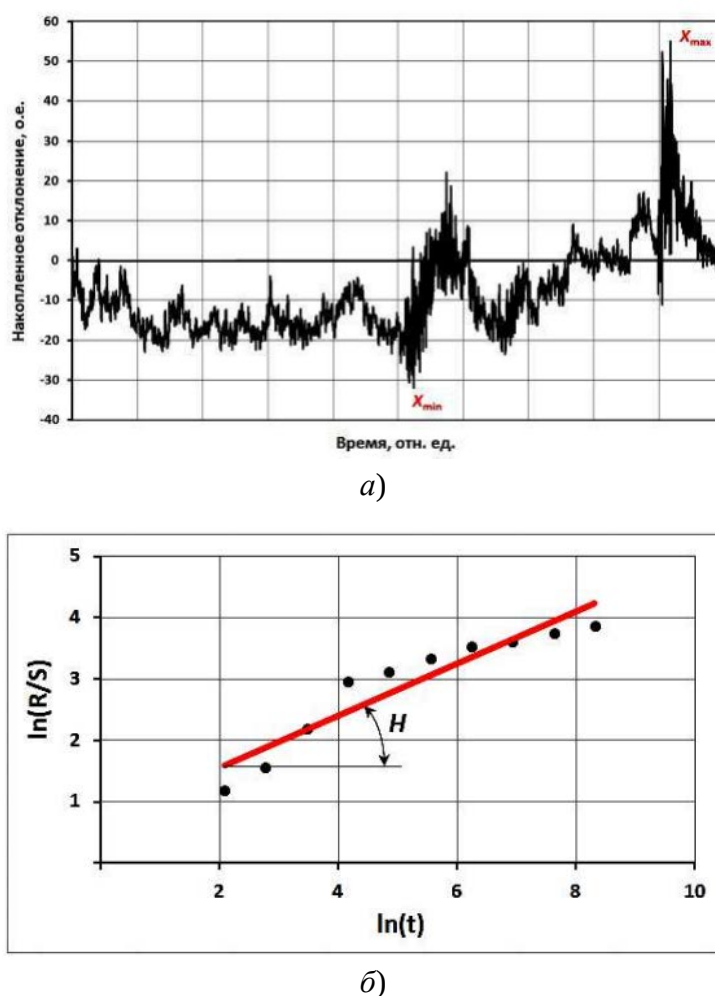


Рис. 1. Исходные данные (а) и схема вычисления (б) статистики Херста

Fig. 1. The initial data (a) and the calculation pattern (b) of Hearst statistics

Станочные системы

Для станочных систем новые принципы автоматизированного контроля и оптимальной настройки технологических процессов основываются на следующих методах и правил принятия решений. Наиболее продуктивным для математического описания данных о колебаниях является их представление смешанной дискретной моделью авторегрессии со скользящим средним (АРСС-модели). Это связано с тем, что АРСС-модель позволяет учитывать ситуацию, в которой каждое единичное возмущение a_t воздействует на динамическую систему не только в момент времени t , но и в последующие моменты, формируя т. о.,

зависимость данных от времени. Различие состоит лишь в том, что величина этого воздействия постепенно ослабевает функции Грина (2) и для устойчивой динамической системы должен быть сходящимся (в данном случае в пределах времени t_p регистрации вибросигнала).

В связи с этим он может рассматриваться как интегральный показатель, отображающий состояние динамической системы оборудования; при этом чем меньше его значение, тем лучше (устойчивее) состояние:

$$Y_t = a_t + G_1 a_{t-1} + G_2 a_{t-2} + \dots = \sum_{j=0}^{\infty} G_j a_{t-j}. \quad (1)$$

$$J = \int_0^{t_p} |G(t)| dt \quad (2)$$

Возможность использования интеграла (2) для мониторинга состояния была проверена по результатам вычисления времени его сходимости, которое характеризует скорость возвращения динамической системы в положение равновесия.

Обоснован для наблюдения интегральный показатель, названный коэффициентом преобразования спектра и представляющий собой отношение амплитуд колебаний динамической системы на резонансных частотах к суммарной амплитуде колебаний на остальных частотах спектра ее колебаний в пределах некоторого частотного диапазона (см. выражение (3)). В основу же критерия оценки эффективности преобразования энергии было положено обеспечение условий, при которых коэффициент (3) принимает минимальное значение, поскольку это означает максимальное рассеивание динамической системой энергии колебаний; спектр колебаний динамической системы станка при этом становится максимально приближенным к спектру сигнала типа «окрашенный шум», характеризующего состояние станка как устойчивое:

$$St = \sum_{i=1}^n Ampl_i / \sum_{j=1}^m Ampl_j. \quad (3)$$

Применение методов искусственного интеллекта

Для реализации отдельных информационных структур для станочных комплексов и при реализации плазменных технологий нами использовались методы искусственного интеллекта и машинного обучения. Научно обоснована возможность оценки качества поверхности по параметрам микро- и макрогеометрии (шероховатость, волнистость, отклонение от круглости) с помощью

искусственной нейронной сети. Для этих целей нами сформирован программно-математический аппарат, позволяющий проводить оценку качества поверхности (шероховатости) без дополнительных лабораторных замеров. Кроме этого, разработан программно-математический аппарат, позволяющий определять шероховатость поверхности по её изображению с помощью аппарата искусственных нейронных сетей [9]. На основе предложенных принципов формирования информационной технологии интеллектуального мониторинга разработаны алгоритм и программное обеспечение мониторинга состояния инструмента по результатам регистрации и анализа колебательных процессов [10].

В качестве основы при разработке алгоритма использована глубокая нейронная сеть. Разработан метод мониторинга исходного состояния режущего инструмента, основанный на качественном анализе фотографий его поверхности с использованием нейронной сети. Метод позволяет оценивать принципиальную возможность использования инструмента по целевому назначению; определять условия для использования, если оно признается как возможное; оценивать качество процесса эксплуатации. Проведено исследование возможности применения методов искусственного интеллекта для распознавания и количественной оценки качества наноструктурированной поверхности режущего инструмента; проведение апробации результатов оценки на данных, представленных изображениями рабочих поверхностей инструмента до и после низкотемпературного плазменного наноструктурирования. Результатом работы являются алгоритмы и показатели, позволяющие проводить количественную оценку качества поверхности режущего инструмента на основе морфологического анализа ее изображений.

Результаты

В целом, результаты выполненных исследований позволили сделать вывод о том, что использование интегральных показателей и критериев на их основе делает возможным адекватное оценивание процессов, протекающих в оборудовании (как в работоспособном состоянии, так и при его изменениях под действием возмущений) и отображенных через вибросигналы о колебаниях динамической системы, и предложить подход к организации и ведению мониторинга по интегральным показателям вибросигналов.

Алгоритм обработки предоставляет возможность выбора ее схемы: временной или спектральный анализ. В первом случае обработка предполагает построение АРСС-модели методом последовательного перебора моделей-претендентов с вычислением по найденной (по критерию точности представления данных) оптимальной модели интеграла функции Грина (2) и/или времени его сходимости. Во втором случае вначале вычисляются спектр вибросигнала, затем коэффициент его преобразования (3). Для выделения резонансных частот используется процедура «ящик с усами», применяемая в развешенном анализе для поиска выбросов в данных, поскольку основана на различной интерпретации понятия выброса (аномальный, внешний, примыкающий). Это позволяет реализовать несколько схем вычисления числителя коэффициента (3) с последующим выбором той, которая обладает наилучшей чувствительностью к отображению свойств динамической системы рассеивать энергию колебаний. Таким образом, в обоих случаях алгоритм обладает адаптивными свойствами.

Рассматривая алгоритм с позиций практического применения, необходимо отметить, что построение АРСС-модели требует больших временных затрат, но с ее помощью можно анализировать короткие

реализации вибросигналов. Для вычисления спектра времени требуется меньше (особенно при использовании быстрого преобразования Фурье), но необходимо получение более длинных реализаций вибросигналов для обеспечения необходимой точности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кабалдин Ю.Г., Кузьмишина А.М., Шатагин Д.А., Аносов М.С. Нейронно-сетевое моделирование процесса изнашивания твёрдосплавного инструмента // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 9. С. 398–402.
2. Тугенгольд А.К., Лукьянов Е.А., Волошин Р.Н., Бонилья В.Ф. Интеллектуальная система мониторинга и управления техническим состоянием мехатронных технологических объектов // Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Т. 20. № 2. С. 188–195.
3. Yanming Guo, Yu Liu, Ard Oerlemans, Songyang Lao, Song Wu, Michael S. Lew Deep learning for visual understanding: A review, Neurocomputing, Volume 187, 2016, pp. 27–48, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.09.116>.
4. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: an overview // Neural Netw. 61, 2015, pp. 85–117.
5. Ren R., Hung T., Tan K.C. A generic deep-learning-based approach for automated surface inspection // IEEE Trans. Cybernet. 48 (3), 2018, pp. 929–940, <https://doi.org/10.1109/TCYB.2017.2668395>.
6. Заковоротный В.Л., Гвинджиллия В.Е. Бифуркации притягивающих множеств деформационных смещений режущего инструмента в ходе эволюции свойств процесса обработки // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2018. Т. 26. № 5. С. 20–38.
7. Азиков Н.С., Бржозовский Б.М., Бровкова М.Б., Зинина Е.П., Мартынов В.В., Суцкий А.В. Повышение эффективности процесса низкотемпературного плазменного упрочнения на основе организации его мониторинга // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017, № 6. С. 68–75.
8. Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Бровкова М.Б., Свиридов С.В. Алгоритмизация процедур настройки и диагностирования сложного технологического оборудования по интегральным параметрам вибросигналов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 4. С. 53–56.
9. Купцов П.В., Бровкова М.Б., Мартынов В.В. Свидетельство о государственной регистрации

программы для ЭВМ № 2020667034 Российская Федерация. Создание датасета на основе сделанных во внелабораторных условиях фотографий шероховатостей с применением ресегментации и аугментации: № 2020665455: заявл. 30.11.2020: опубл. 21.12.2020 (РИД).

10. **Купцов П.В., Купцова А.В. Бровкова М.Б., Мартынов В.В.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667829 Российская Федерация. Нейронная сеть с архитектурой машинной ассоциации, осуществляющая оценку степени износа режущего инструмента: № 2021666126: заявл. 07.10.2021: опубл. 03.11.2021 (РИД).

REFERENCES

1. Kabaldin Yu.G., Kuzmishina A.M., Shalagin D.A., Anosov M.S. Neural network modeling of the wear process of a carbide cutting tool // Automation. Modern technologies. 2021, vol. 75, no. 9, pp. 398–402.

2. Tugengold A.K., Lukyanov E.A., Voloshin R.N., Bonilla V.F. Intelligent system for monitoring and controlling the technical condition of mechatronic technological facilities // Bulletin of the Don State Technical University. 2020, vol. 20, no. 2, pp. 188–195.

3. Yanming Guo, Yu Liu, Ard Oerlemans, Songyang Lao, Song Wu, Michael S. Lew Deep learning for visual understanding: A review, Neurocomputing, Volume 187, 2016, pp. 27–48, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.09.116>.

4. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: an overview // Neural Netw. 61, 2015, pp. 85–117.

5. Ren R., Hung T., Tan K.C. A generic deep-learning-based approach for automated surface inspection // IEEE Trans. Cybernet. 48 (3), 2018, pp. 929–940, <https://doi.org/10.1109/TCYB.2017.2668395>.

6. Zakorotny V.L., Gwindzhilia V.E. Bifurcations of attracting sets of cutting tool deformation displacements at the evolution of treatment process properties. // Izvestia of Higher educational institutions. Applied nonlinear dynamics. 2018, vol. 26, no 5, pp. 20–38.

7. Azikov N.S., Brzhozovsky B.M., Brovkova M.B., Zinina E.P., Martynov V.V., Sussky A.V. Improved efficiency of the process of low-temperature plasma hardening based on its monitoring // Problems of mechanical engineering and reliability of machines. 2017, no. 6, pp. 68–75.

8. Brzhozovsky B.M., Martynov V.V., Brovkova M.B., Sviridov S.V. Algorithmization procedures for configuring and diagnosing of complex process equipment on integral parameters of vibration signals // Mechatronics, automation, control. 2013, no. 4, pp. 53–56.

9. Kuptsov P.V., Brovkova M.B., Martynov V.V. Certificate of state registration of the computer program No. 2020667034 Russian Federation. Creating a dataset based on photographs of roughness taken in an out-of-laboratory environment using correction and augmentation: No. 2020665455: application 30.11.2020: publ. 12/21/2020 (RIA).

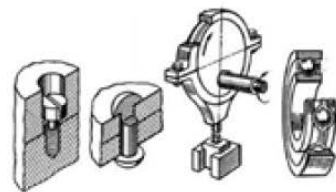
10. Kuptsov P.V., Kuptsova A.V. Brovkova M.B., Martynov V.V. Certificate of state registration of a computer program No. 2021667829 Russian Federation. Neural network with machine organization association, which evaluates the degree of wear of the cutting tool: No. 2021666126: application 07.10.2021: publ. 03.11.2021 (RIA).

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

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

Статья поступила в редакцию 16.04.2024; одобрена после рецензирования 20.04.2024; принята к публикации 23.04.2024.

The article was submitted 16.04.2024; approved after reviewing 20.04.2024; assepted for publication 23.04.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №7 (157). С.43-48.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №7 (157). P. 43-48.

Научная статья

УДК 621.92

doi: 10.30987/2223-4608-2024-43-48

Структура машиностроительного изделия

Борис Мухтарбекович Базров, д.т.н.

ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

modul_lab@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-8487-8649>

Аннотация. Структура конструкции изделия влияет на эффективность его эксплуатации и трудоемкость изготовления. Структуру конструкции изделия можно представить с помощью плоского и пространственного графов, которые характеризуются числом уровней и числом элементов, расположенных на каждом уровне, где в качестве элемента может выступать как узел, так и деталь. Плоский граф отражает связи между элементами конструкции изделия, их подчиненность, показывая базы каждого элемента, но при этом не отражает их пространственное расположение. Пространственный граф показывает компоновку конструкции изделия в пространстве. Отсюда под структурой конструкции изделия следует понимать относительное расположение элементов конструкции изделия, их видов и количество каждого вида. Между структурой конструкции изделия и уровнем его сложности существует непосредственная связь. Чем сложнее структура конструкции изделия, тем выше уровень сложности конструкции. Наличие этой связи позволяет сформулировать понятие сложности конструкции изделия, под которой следует понимать совокупность уровней и элементов конструкции изделия, расположенных на уровнях. В основу оценки уровня сложности конструкции изделия следует принять уровень сложности структуры конструкции изделия, используя плоский граф с его характеристиками. Структура конструкции изделия влияет на построение маршрута сборочного технологического процесса изделия. В связи с чем предлагается дополнить исходные данные для проектирования сборочного технологического процесса плоским графом с указанием на ребрах модулей соединений. Эта информация при наличии элементной базы средств технологического обеспечения модулей соединений позволит определить ожидаемую трудоемкость сборки изделия.

Ключевые слова: изделие, конструкция, структура, граф, уровень, элемент, модуль соединения

Для цитирования: Базров Б.М. Структура машиностроительного изделия // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 7 (157). С. 43–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-36-48

Mechanical product structure

Boris M. Bazrov, D.Eng.

Institute of Machine Science named after A.A. Blagonravov, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

modul_lab@mail.ru

Abstract. The structure of the product design affects the efficiency of its operation and the labor-output ratio. The structure of the product design can be represented using flat and spatial graphs, which are characterized by the number of levels and the number of elements located at each level, where both a node and a part can act as an element. Flat graph shows the connections between the elements of the product design, their dependence, indicating the bases of each element, but at the same time it does not reflect their spatial location. The spatial graph illustrates the layout of the product structure in space. Hence, the structure of the product design should be understood as the relative location of the product design

elements, their types and the number of each element. There is a direct connection between the structure of the product design and the level of its complexity. The more complex the product design structure, the higher the level of design complexity. Such connection allows

Keywords: product, design, structure, graph, level, element, connection module

For citation: Bazrov B.M. Mechanical product structure / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 7 (157). P. 43–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-43-48

Под структурой конструкции изделия будем понимать относительное расположение элементов конструкции изделия, их видов и количество каждого вида.

Рассмотрим возможность описания структуры конструкции изделия с помощью графа, представляющего собой число уровней с указанием числа элементов, располагающихся на каждом уровне. Для такого представления конструкции изделия необходимо определиться с понятием элемента изделия. В качестве элемента выступают как узлы, так и отдельные детали.

Однако неопределённость понятия узла приводит к неоднозначному описанию изделия, когда одно и то же изделие может быть представлено разной совокупностью узлов. В связи с этим предлагается в качестве понятия узла принять модуль, который представляет собой конструктивное решение, предназначенное выполнять соответствующую служебную функцию.

По функциональному назначению предлагается модуль изделия разделить на две группы: модуль функциональный технологический (МФТ) и модуль функциональный обслуживающий (МФО). Под МФТ будем понимать конструктивное решение, с помощью которого изделие выполняет свое служебное назначение. Под МФО будем понимать конструктивное решение, которое обеспечивает функционирование МФТ.

Разница между МФТ и МФО заключается в том, что МФТ принадлежит только конкретному виду изделия соответствующему его служебному назначению. Например, у автомобиля в качестве МФТ выступает кузов для размещения груза и ходовая часть, обеспечивающая перемещение груза. А в качестве МФО выступает двигатель, трансмиссия, рулевое управление, которые могут участвовать в изделиях различного служебного назначения, а кузов и ходовая часть принадлежат только транспортному изделию.

В качестве другого примера рассмотрим токарно-винторезный станок, у которого в качестве МФТ выступают патрон для установки заготовки и резцедержатель для установки инструмента. А в качестве МФО выступают коробка скоростей, коробка подач, электродвигатель.

Рассмотрим представление структуры конструкции изделия с помощью графа [1]. Граф конструкции изделия строится следующим образом (рис. 1). Вершиной графа является базовая деталь. На первом уровне располагаются элементы, базирующиеся непосредственно на базовой детали. На втором уровне располагаются элементы, базами которых являются элементы первого уровня и т. д.

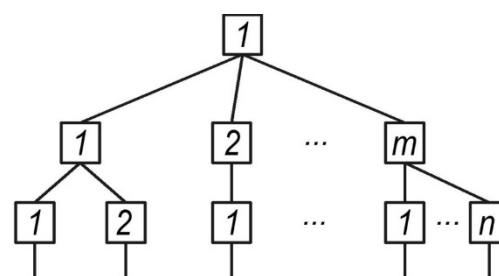


Рис. 1. Плоский граф конструкции изделия

Fig. 1. Flat graph of the product design

Представление структуры в виде такого графа отражает связи между элементами конструкции изделия, их подчиненность, показывая базы каждого элемента, но при этом не отражает их пространственное расположение. В результате расположенные на одном уровне графы элементов в пространстве могут располагаться на разной высоте. Поэтому данный граф является плоским.

Поскольку изделие является пространственной фигурой, то и структура является пространственной и представляет собой элементы, расположенные не на плоскости, а в пространстве. Это можно отразить в виде пространственного графа, где на каждом уровне

располагаются один или несколько элементов (рис. 2).

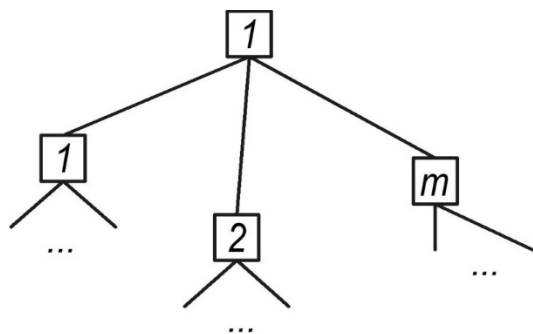


Рис. 2. Пространственный граф конструкции изделия

Fig. 2. Spatial graph of the product design

Отсюда следует, что структура конструкции изделия должна описываться числом уровней и количеством элементов на каждом уровне. В общем случае структуру изделия можно рассматривать на нескольких уровнях. На первом уровне располагаются узлы и детали непосредственно связанные с базовой деталью изделия, на втором уровне должны располагаться узлы и детали, входящие в элементы предыдущего уровня и т. д. В отличие от плоского графа пространственный граф отражает пространственную компоновку конструкции изделия, но при этом расположенные на одном уровне элементы конструкции изделия могут иметь базы, расположенные на разных уровнях. Построение графа должно заканчиваться уровнем, на котором располагаются только детали.

В свою очередь, как было показано в работах [2 – 4] любая деталь может быть представлена совокупностью модулей поверхностей (МП). Под МП понимается сочетание поверхностей детали, предназначенное для выполнения соответствующей служебной функции детали. В соответствии с классификацией модулей поверхностей детали [3] все МП делятся на три класса – базирующие (МПБ), рабочие (МПР) и связующие (МПС) МП.

Важными характеристиками конструкции изделия являются виды соединения, их разнообразие и количество в изделии, где под видом соединения деталей будем понимать модуль соединения (МС) [4]. Под МС понимается совмещение комплекта вспомогательных баз с комплектом основных баз деталей, где под комплектом вспомогательных баз понимается комплект баз присоединяемой детали, а под комплектом основных баз понимается комплект баз, принадлежащий базовой детали.

Базирующий модуль поверхностей представляет собой комплект баз, номенклатура которых ограничена 14-ю вариантами. При этом базирующим модулям Б11, Б211, Б221, Б311, Б321, Б41, Б51 соответствуют ответные им по конструктивному оформлению и характеристикам базирующие модули Б12, Б212, Б222, Б312, Б322, Б42, Б52.

Совмещение этих модулей создаёт соединение деталей, являющееся МС.

Как следует из парности базирующих модулей поверхностей номенклатура МС ограничена семью видами:

$$MC1 = \frac{B11}{B12}; MC2 = \frac{B211}{B212}; MC3 = \frac{B221}{B222}; MC4 = \frac{B311}{B312}; MC5 = \frac{B321}{B322}; MC6 = \frac{B41}{B42}; MC7 = \frac{B51}{B52}.$$

В тех случаях, когда базирующий модуль, расположенный в числителе МС переходит из категории комплекта вспомогательных

баз в категорию комплекта основных баз, тогда модули соединения имеют следующие виды:

$$MC1' = \frac{B12}{B11}; MC2' = \frac{B212}{B211}; MC3' = \frac{B222}{B221}; MC4' = \frac{B312}{B311}; MC5' = \frac{B322}{B321}; MC6' = \frac{B42}{B41}; MC7' = \frac{B52}{B51}.$$

Таким образом, все разнообразие соединений деталей в любых изделиях ограничено 14 вариантами модулей соединений (МС, МС').

В конечном итоге структуру любой конструкции изделия можно представить с помощью пространственного графа, представляющего собой многоуровневую схему, с расположенными на уровнях элементами, на нижнем уровне, которого располагаются множество МП

и множество МС с указанием вида МП и МС и количество каждого вида.

Таким образом, структура конструкции изделия характеризуется числом уровней и числом элементов, располагающихся на каждом уровне.

Надо отметить, что между структурой конструкции изделия и уровнем его сложности существует непосредственная связь. Чем сложнее структура конструкции изделия, тем выше

уровень сложности конструкции. Наличие этой связи позволяет сформулировать понятие сложности конструкции изделия и ее уровня.

В работах [5, 6] под сложностью конструкции изделия понимается: «с одной стороны, есть мера затрат производственных ресурсов на изготовление машиностроительного изделия, с другой стороны, она является неотъемлемым атрибутом самого изделия, комплексно учитывающим его структурные и субстантные характеристики в соответствии со сложившимся уровнем средств производства».

В этой формулировке показано влияние конструкции изделия на эффективность его производства, но при этом не нашло отражение понятие меры сложности конструкции изделия. Это препятствует количественной оценке уровня сложности конструкции изделия с одной стороны, а с другой стороны не показывает какие характеристики конструкции изделия надо улучшать, чтобы снизить уровень ее сложности. Это препятствует выбору лучшего варианта конструкции на этапе его проектирования, обеспечивающего наибольшую эффективность его эксплуатации и наименьшую трудоемкость его изготовления.

В другой работе [7] под сложностью конструкции изделия понимается: «относительная характеристика их состава и структурного исполнения. Она определяет конструктивные дополнительные признаки и соответствующие требования к обеспечению технологической рациональности конструкции изделия». И в этой формулировке понятия сложности конструкции изделия тоже отсутствует количественная оценка уровня сложности конструкции изделия, что не позволяет определить влияние сложности конструкции изделия на эффективность его эксплуатации и трудоёмкость изготовления. В связи с этим, предлагается под сложностью конструкции изделия понимать совокупность уровней и элементов конструкции изделия, расположенных на уровнях.

В работах [8, 9] предлагается оценивать уровень сложности изделия с помощью коэффициента $K = M/MA$, где M – число составных частей (элементов) в исполнении соответственно разрабатываемого образца; MA – число составных частей (элементов) в исполнении аналога.

Такая оценка сложности конструкции изделия сводится к сопоставлению количеств элементов проектируемого изделия и аналога. Недостатками такой оценки уровня сложности конструкции изделия являются, во-первых, при

одинаковом числе элементов, при котором считается одинаковая сложность сопоставляемых изделий, их трудоемкость может быть разной из-за различия сложности элементов у сравниваемых изделий. Иными словами, при одинаковом числе элементов у обоих изделий трудоемкость окажется разной. Во-вторых, оценка уровня сложности является относительной, т. к. ее значение зависит от выбранного аналога, т. е. при сопоставлении с другим аналогом уровень сложности конструкции изделия может быть другим. Кроме того, возможен случай, когда аналог отсутствует или он значительно отличается по своему служебному назначению от сопоставляемого изделия.

В связи с этим необходимо разработать оценку абсолютной сложности конструкции изделия.

Если оценивать уровень сложности конструкции изделия суммой уровней и элементов на каждом уровне одним числом, то при одном и том же числе двух разных конструкций изделий они могут существенно отличаться друг от друга числом уровней и числом расположения элементов на каждом уровне. В итоге это будут изделия разных конструкций, которые могут существенно отличаться эффективностью эксплуатации и трудоемкостью их изготовления. Поэтому оценивать уровень сложности изделия следует числом уровней и количеством элементов на каждом уровне.

В основу предлагаемой оценки уровня сложности конструкции изделия предлагается принять уровень сложности структуры конструкции изделия. Как следует из описания структуры конструкции изделия с помощью плоского и пространственного графов для оценки уровня сложности следует принять плоский граф.

Как отмечалось выше, структура конструкции изделия характеризуется числом уровней и числом элементов, расположенных на уровнях. Структура конструкции изделия влияет на построение маршрута сборочного технологического процесса изделия.

Уровни графа конструкции изделия показывают последовательность присоединяемых групп элементов изделия, расположенных на уровнях графа, при разработке маршрутного сборочного технологического процесса:

группа 1 – группа 2 – ... – группа N .

Отсюда следует, что исходные данные на проектирование сборочного технологического процесса целесообразно дополнить графом

конструкции изделия. На ребрах графа целесообразно указывать вид соединения в виде соответствующего МС.

Таким образом, структура конструкции изделия представляется графом, показывающим число уровней, число элементов на уровнях, их разнообразие и МС. Эта информация при наличии элементной базы средств технологического обеспечения (ЭБТО) МС позволит определить ожидаемую трудоемкость сборки изделия.

Построение ЭБТО МС должно начинаться с построения классификации МС, где в качестве первой отличительной характеристики должен выступать вид МС. Учитывая, что число видов МС ограничено семью наименованиями ЭБТО окажется громоздкой. Поэтому рекомендуется строить ЭБТО для каждого вида МС. В основе построения ЭБТО вида МС должна

быть положена классификация МС, где в качестве отличительных характеристик следует принять размерные характеристики и уровень точности.

Например, МС, представляющий собой конструкцию, содержащую три поверхности – отверстие, торец и шпоночный паз (рис. 3) имеют свою классификацию, где в качестве отличительных признаков выступают диаметр отверстия d , его длина l , диаметр торца D , ширина и высота шпоночного паза b, h . На первом уровне классификации принимается отношение l/d . На втором уровне принимается размер d , а учитывая связь характеристик высоты и ширины шпоночного паза с диаметром отверстия на третьем уровне принимается ширина паза b , а на четвертом – уровень точности.

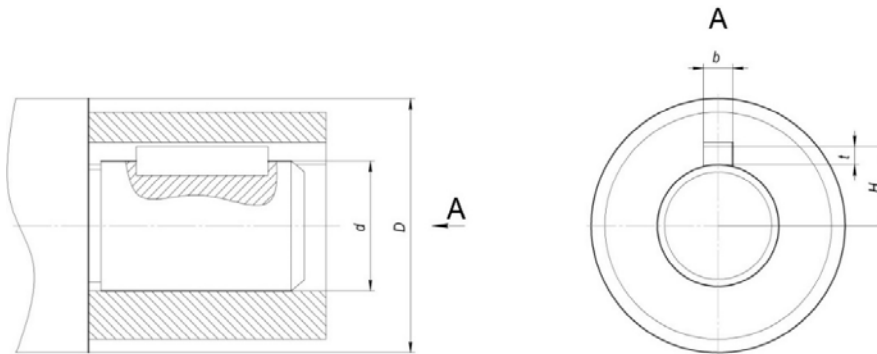


Рис. 3. Пример модуля соединения

Fig. 3. Example of a connection module

Диаметр d делится на диапазоны согласно системе допусков и посадок. Для каждого диапазона размерных характеристик МС в ЭБТО должна быть указана трудоемкость соединения.

Наличие ЭБТО позволит оценивать варианты структуры конструкции изделия по уровню трудоёмкости.

Выводы

1. Структура конструкции изделия – это пространственное расположение элементов конструкции изделия с указанием их видов и количества каждого вида.
2. Структура конструкции изделия – это многоуровневая схема расположения элементов конструкции изделия.

3. Структура конструкции изделия может быть представлена плоским и пространственным графами.

4. Плоский граф конструкции изделия отражает связи между элементами конструкции и их базы, но не показывает их относительное расположение в пространстве.

5. Пространственный граф конструкции изделия отражает пространственное расположение элементов конструкции изделия и характеризует компоновку изделия.

6. Структура конструкции изделия позволяет оценить уровень сложности конструкции изделия, чем сложнее структура, тем выше уровень сложности конструкции.

7. Предлагается уровень сложности конструкции изделия оценивать с помощью количества уровней структуры изделия и числом элементов, располагающихся на каждом уровне.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Базров Б.М.** Метод описания конструкции изделия характеристиками графа // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 3. С. 89–91.
2. **Базров Б.М.** Модульная технология // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2011. № 4. С. 3–10.
3. **Базров Б.М.** Организация мелкосерийного производства деталей на принципах модульной технологии // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №11(149). С. 24–29.
4. **Базров Б.М.** Базис технологической подготовки машиностроительного производства. М.: КУРС, 2023. 324 с.
5. **Коршунов А.И.** Исследование конструктивно-технологической сложности машиностроительного изделия // Фундаментальные исследования. 2006. № 11. С. 36–37.
6. **Коршунов А.И.** Введение в теорию конструктивно-технологической сложности изделий машиностроения // Современные научноёмкие технологии. 2004. № 2. С. 66.
7. **Ерёмин А.А., Ямникова О.А.** Конструктивная сложность как мера технологичности изделий в машиностроении В сборнике: АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ НАУКИ И ТЕХНИКИ // Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. 2015. С. 40–42.
8. **Машиностроение.** Энциклопедия / Ред. совет К.В. Фролов (пред.) и др. М.: Машиностроение. Технология сборки в машиностроении. Т. III-5 / А.А. Гусев, В.В. Павлов, А.Г. Андреев и др.; под общ. ред. Ю.М. Соломенцева. 2001. 640 с.
9. **Ямникова О.А., Троицкий Д.И., Ерёмин А.А.** Оценка конструктивно-технологической сложности деталей на этапе проектирования // Механика XXI века. 2016. № 15. С. 75–80.

REFERENCES

1. Bazrov B.M. Method of product design description using graph properties // Journal of machinery manufacture and reliability. 2016, no. 3, pp. 89–91.
2. Bazrov B.M. Modular technology in mechanical engineering // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2011, no. 4, pp. 3–10.
3. Bazrov B.M. Organization of small-scale production of parts based on module technology patterns // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023, no.11(149), pp. 24–29.
4. Bazrov B.M. Basis of manufacturing preparation of machine-building production. Moscow: Kurs, 2023, 324 p.
5. Korshunov A.I. Investigation of the constructive and technological complexity of a machine-building item // Fundamental research. 2006, no. 11, pp. 36–37.
6. Korshunov A.I. Introduction to the theory of structural and technological complexity of engineering products// Modern science-intensive technologies. 2004, no. 2, p. 66.
7. Yeryomin A.A., Yamnikova O.A. Constructive complexity as a measure of the manufacturability of products in machine building. Proceedings: CURRENT ISSUES OF SCIENCE AND TECHNOLOGY // Collection of scientific papers on the results of the international scientific and practical conference. 2015, pp. 40–42.
8. Mechanical engineering. Encyclopedia / Ed. Council K.V. Frolov (chief) et al. Moscow: Mashinostroenie. Assembly technology in mechanical engineering. Vol.III-5 / A.A. Gusev, V.V. Pavlov, A.G. Andreev, et al.; under the general editorship of Y.M. Solomentsev. 2001, 640 p.
9. Yamnikova O.A., Troitsky D.I., Eremin A.A. Assessment of the structural and technological complexity of parts at the design stage // Mechanics of the XXI century. 2016. No. 15. pp. 75–80.

Статья поступила в редакцию 07.02.2024; одобрена после рецензирования 26.02.2024; принята к публикации 27.02.2024.

The article was submitted 07.02.2024; approved after reviewing 26.02.2024; assepted for publication 27.02.2024.

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

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

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

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

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

Сдано в набор 17.07.2024. Выход в свет 30.07.2024.

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

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

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

