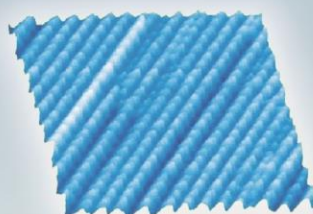


НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

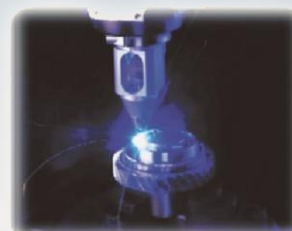
9(147)
2023

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

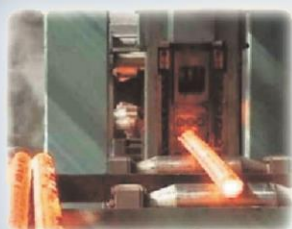


**НАНОТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

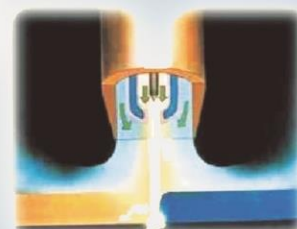
**ЛАЗЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



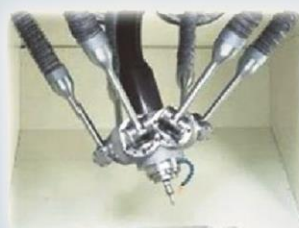
**ТЕХНОЛОГИИ
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В СВАРОЧНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



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

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 9 (147)

2023

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., доцент 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., доц. 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., проф., акад. НАН Беларуси

МЫШКИН Н.К., (г. Гомель, Беларусь)

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

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

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

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

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

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

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

DOI:10.30987/issn.2223-4608

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

Подписной индекс: **Э79195**.

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

E-mail: editntm@yandex.ru

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

Журнал зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и
массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
26 апреля 2019 года
рег. номер ПИ № ФС77-75524

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Петрова Л.Г. Научоёмкие технологии в материаловедении:
высокотемпературное сквозное азотирование жаростойкой стали 3

ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э. Проектирование технологии обработки в
гранулированных средах в условиях цифрового производства 8

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Макаров В.Ф., Песин М.В., Волковский А.А. Инновационные
технологии повышения производительности и качества механической
обработки полимерных композиционных материалов 33

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИХ СОЕДИНЕНИЙ

Чигиринский Ю.Л., Ингеманссон А.Р. Технологические аспекты
подготовки цифрового машиностроительного производства 39

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

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 9 (147)

2023

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., assoc. 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., prof. MYSHKIN N.K. Acad. of NAS
Belarus (Gomel, Belarus)

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

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

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

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

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

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

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

DOI:10.30987/issn.2223-4608

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

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

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

CONTENTS

MATERIALS SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING

Petrova L.G. High-techs in materials science: through-the-thickness
austenitic nitriding of heat-resistant steel 3

TECHNOLOGIES OF MECHANICAL PROCESSING OF WORKPIECES

Tamarkin M.A., Tishchenko E.E. Design of processing technology in
granulated media in the conditions of digital production 8

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF NONMETALLIC PARTS PRODUCTION

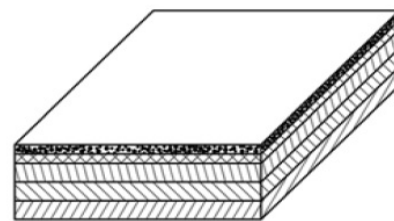
Makarov V.F., Pesin M.V., Volkovsky A.A. Innovative technologies for
improving the efficiency and machining operating quality for polymer
composite materials 33

TECHNOLOGICAL SUPPORT OF OPERATIONAL PROPERTIES OF MACHINE PARTS AND THEIR CONNECTIONS

Chigirinsky Yu.L., Ingemansson A.R. Engineering process aspects of
digitalization of machine-building production. 39

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. 2023. №9 (147). С.3-15.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №9 (147). P. 3-15.

Научная статья
УДК 621.785.53
doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-15

Научноёмкие технологии в материаловедении: высокотемпературное сквозное азотирование жаростойкой стали

Лариса Георгиевна Петрова, д.т.н.
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет
(МАДИ), Москва, Россия
petrova_madi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7248-2454>

Аннотация. Актуальность проводимого исследования обусловлена ужесточением условий работы изделий высокотемпературного применения из листовых жаростойких сплавов, к которым относятся, в частности, аустенитные хромоникелевые стали. При работе стальных деталей под нагрузкой в окислительной атмосфере и агрессивных средах наряду со стойкостью к электрохимической и газовой коррозии от них требуется повышенная прочность, твердость, жаропрочность. Повышение характеристик указанных свойств достигается методами объемного и поверхностного упрочнения, к числу которых относится процесс азотирования. Применение традиционных технологий печного газового азотирования к хромоникелевым сталям сталкивается с проблемами: низкая скорость процесса насыщения азотом, что существенно увеличивает время процесса, и образование нитридов хрома, что негативно сказывается на коррозионной стойкости и жаростойкости. Разработка новых технологий азотирования высоколегированных хромосодержащих сталей ведется в направлении интенсификации процесса насыщения и регулирования фазового состава азотированного слоя для минимизации образования нитридов хрома. В настоящей работе поставлена цель определить рациональные технологические варианты и режимы высокотемпературного газового азотирования аустенитной стали, позволяющие повысить прочностные характеристики при комнатной и повышенных температурах с сохранением ее жаростойкости. Термодинамическое моделирование фазового состава на основе CALPHAD-метода показало, что основными мерами по минимизации выделения нитридов хрома на азотированной поверхности являются увеличение концентрации титана в стали и снижение активности насыщающей газовой атмосферы, что достигается разбавлением азота инертным газом. Экспериментальные исследования проводились на листовых образцах 1,5 мм толщины стали аустенитного класса типа X18Ni10T со стандартным (0,5%Ti) и повышенным (1,0%Ti) содержанием титана. Эксперименты проводили на лабораторной установке для высокотемпературного азотирования (900...1200 °С); в качестве насыщающих сред использовали чистый азот и смеси азота с аргоном. Исследовали также двухступенчатые процессы, состоящие из азотирования в азоте с последующим отжигом в аргоне. Металлографическим анализом установлено, что при одной и той же температуре азотирования количество нитридов хрома снижается в экспериментальной стали с увеличенным содержанием титана, а разбавление азота аргоном снижает температуру выделения нитридов хрома. По исследованию кинетики процесса насыщения определено время сквозного азотирования листового образца при разных режимах насыщения, а также продолжительность деазотирующего отжига, рассчитанная на основании известной толщины зоны нитридов хрома. Установлено, что дисперсионное упрочнение зон внутреннего азотирования нитридами титана приводит к увеличению прочностных характеристик сталей как при комнатной, так и при повышенных температурах по сравнению с характеристиками базовой стали 08X18Ni10T после типовой термообработки, при этом наибольший эффект упрочнения достигается при сквозном азотировании стали с 1,0%Ti. Рекомендованы варианты процессов сквозного азотирования 1,5 мм листа экспериментальной стали: $t_{аз}=1050$ °С, N₂, 16 ч; $t_{аз}=1100$ °С, 50%N₂ + 50%Ar, 22 ч; $t_{аз}=1100$ °С, N₂, 5 ч + $t_{отж}=1200$ °С, Ar, 9 ч. Временное сопротивление разрыву азотированной стали при комнатной температуре повышается на 45...50 %, а при испытаниях при 800 °С – на 40...65 % в зависимости от режима процесса. Сквозное азотирование позволяет поднять рабочую температуру сталей на 100...150 °С с обеспечением такой же длительной прочности. Жаростойкость при

900 °C сохраняется на уровне азотированной стали после двухступенчатых процессов, обеспечивающих максимальное удаление с поверхности нитридов хрома на стадии отжига.

Ключевые слова: аустенитная сталь, высокотемпературное азотирование, зона внутреннего азотирования, дисперсионное упрочнение, жаростойкость

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту №FSFM-2020-0011 (2019-1342), экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования центра коллективного пользования МАДИ.

Для цитирования: Петрова Л.Г. Наукоёмкие технологии в материаловедении: высокотемпературное сквозное азотирование жаростойкой стали // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 9 (147). С. 3–15. doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-15

High-techs in materials science: through-the-thickness austenitic nitriding of heat-resistant steel

Larisa G. Petrova, D. Eng.
Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University
(MADI), Moscow, Russia
petrova_madi@mail.ru

Abstract. The topicality of the research is occasioned by exaggeration of working conditions of products used at high temperatures and made of heat-resistant sheet alloys, including in particular austenitic chromium-nickel steels. When steel parts under load are operated in an oxidizing atmosphere and aggressive environments, besides resistance to electrochemical and gas corrosion, they require increased strength, hardness, and heat resistance. The increase in the characteristics of these properties is achieved by three-dimensional and surface hardening techniques, which include the nitration process. The application of traditional technologies of furnace gas nitriding for chromium-nickel steels is complicated due to the problems of the low rate of the nitrogen saturation, which significantly increases the process time, and the formation of chromium nitrides, which negatively affects corrosion and heat resistance. The development of new technologies for nitrogen hardening of high-alloyed chromium-containing steels is carried out in the direction of saturation process intensification and regulation of the phase composition of the nitrided layer to minimize the formation of chromium nitrides. The article is aimed at defining rational technological options and modes of gas austenitic nitriding of austenitic steel, making it possible to increase strength characteristics at RT and higher temperatures without sacrificing its heat resistance. Thermodynamic modeling of the phase composition based on the CALPHAD technique shows that primary ways for minimizing the release of chromium nitrides on the nitrided surface are to increase the concentration of titanium in steel and to reduce the activity of the saturating gas atmosphere, which is achieved by inert gas dilution of nitrogen. Experimental studies were carried out on sheet samples of 1,5 mm thick austenitic steel of the type X18N10T with a standard (0,5%Ti) and increased (1,0%Ti) titane content. The experiments were carried out on a laboratory installation for high-temperature nitriding (900...1200 °C); pure nitrogen and mixtures of nitrogen with argon were used as saturating media. Two-stage processes consisting of nitrogen hardening in nitrogen followed by argon afterburning were also investigated. Metallographic analysis showed that at the same nitriding temperature, the amount of chromium nitrides decreases in experimental steel with an increased titanium content, and dilution of nitrogen with argon reduces the temperature of chromium nitride release. According to the study of saturation process kinetic, the time of through-the-thickness nitriding of a sheet sample under different saturation modes was determined, as well as the duration of de-nitriding annealing, calculated on the basis of the known thickness of the chromium nitride zone. It was found that the dispersion hardening of the zones of internal nitriding with titanium nitrides leads to an increase in the strength characteristics of steels both at RT and higher temperatures compared to the characteristics of base steel 08X18N10T after typical heat treatment, while the greatest hardening effect is achieved due to through-the-thickness nitriding of steel with 1,0%Ti. Recommended options for the processes of through-the-thickness nitriding of 1,5 mm sheet of experimental steel: $t_n = 1050$ °C, N_2 , 16 h; $t_n = 1100$ °C, 50% N_2 + 50%Ar, 22 h; $t_n = 1100$ °C, N_2 , 5 h + $t_{ann} = 1200$ °C, Ar, 9 h. The temporary passive hardness of nitrided steel at RT increases by 45...50 %, and when tested at 800 °C – by 40... 65 %, depending on the process mode. Through-the-thickness nitriding makes it possible to raise the working temperature of steels by 100...150 °C with the same long-term strength. The heat resistance at 900 °C remains at the level of non-carbonated steel after two-stage processes that ensure maximum chromium nitrides removal from the surface at the annealing stage.

Keywords: austenitic steel, austenitic nitriding, internal nitriding zone, dispersion hardening, heat resistance

Acknowledgements: the material was prepared within the framework of scientific research under project No. FSFM-2020-0011 (2019-1342), experimental studies were carried out using the equipment of the MADI Collective use Center.

For citation: Petrova L.G. High-techs in materials science: through-the-thickness austenitic nitriding of heat-resistant steel / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 9 (147). P. 3–15. doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-15

Введение

Детали машин, предназначенные для эксплуатации в окислительной атмосфере при высоких температурах, традиционно изготавливают из жаростойких сплавов, большую группу среди которых составляют хромоникелевые аустенитные стали [1]. При работе изделий под нагрузкой наряду со стойкостью к электрохимической и газовой коррозии от этих сталей требуется повышенная прочность, твердость, жаропрочность. Ужесточение условий работы нагруженных изделий высокотемпературного применения из листовых жаростойких сталей аустенитного класса обуславливает актуальность данного исследования.

Одним из эффективных способов упрочняющей обработки сталей является азотирование, которое традиционно относится к группе технологий поверхностного упрочнения. Однако тонкостенные изделия при помощи азотирования можно при определенных условиях упрочнить на всю толщину [2]. Показано, что процесс сквозного внутреннего азотирования существенным образом меняет объемные свойства как ферритных, так и аустенитных сталей [3, 4].

Применение традиционных технологий печного газового азотирования к хромоникелевым сталям сталкивается с двумя основными проблемами: низкая скорость процесса насыщения азотом, что существенно увеличивает время процесса, и образование нитридов хрома, что негативно сказывается на коррозионной стойкости и жаростойкости [5].

Известно, что в защите легированных сталей от окисления основную роль играет поверхностная пленка на основе оксида хрома Cr_2O_3 (либо шпинели $MeO \cdot Cr_2O_3$), защитные свойства которой увеличиваются с повышением содержания хрома в стали. Уход хрома в нитриды при азотировании и понижение степени легированности твердого раствора снижает эффективность механизма барьерной защиты [6].

Таким образом, усилия разработчиков технологий азотирования применительно к высоколегированным хромосодержащим сталям нацелены, во-первых, на интенсификацию процесса насыщения и, во-вторых, на

регулирование фазового состава азотированного слоя для минимизации образования нитридов хрома.

Обе эти задачи могут быть решены при использовании процессов высокотемпературного азотирования [7, 8]. Известно, что температура является самым мощным фактором, ускоряющим диффузию насыщающего элемента в металле. Как показали исследования никелевых жаропрочных сплавов [9 – 11], при высокотемпературном азотировании могут быть реализованы условия, исключающие образование нитридов хрома вследствие выделения нитридов более сильного нитридообразующего элемента, например, титана.

Процессы высокотемпературного азотирования аустенитной стали позволяют создать износостойкий поверхностный слой, сохраняющий свою коррозионную стойкость при условии насыщения в разбавленной азотосодержащей среде [8, 12]. Оптимизации фазового состава слоев в высоколегированных хромистых сталях способствует также проведение после азотирования заключительной стадии с пониженной активностью атмосферы [13]. Целью данной работы является определение рациональных технологических вариантов и режимов высокотемпературного газового азотирования аустенитной стали, позволяющих повысить прочностные характеристики при комнатной и повышенных температурах с сохранением ее жаростойкости.

Методика проведения исследований

Исследования проводили на классической хромоникелевой стали аустенитного класса типа X18H10T (AISI 321). Для лабораторного эксперимента использованы листовые (1,5 мм толщиной) образцы двух сталей со стандартным (0,5%Ti) и повышенным (1,0%Ti) содержанием титана. Целью повышения количества титана является, во-первых, более полное связывание азота в нитриды при азотировании, а во-вторых, увеличение упрочняющего эффекта от выделений нитридов титана. Содержание углерода в сталях понижено до 0,03...0,04%С для минимизации образования карбидной фазы.

Экспериментальные процессы азотирования проводили на лабораторной установке,

позволяющей проводить насыщение в температурном интервале (900...1200 °С) и изменять состав насыщающей атмосферы на разных стадиях процесса. В качестве насыщающих сред использовали чистый азот, а также смеси азота с аргоном в различных соотношениях. Для очистки технического азота от примесей кислорода использовали промежуточный контейнер с титановой стружкой.

Исследовали также двухступенчатые процессы, состоящие из азотирования в азоте с последующим отжигом в аргоне для изучения эффекта деазотирования (рассасывания образовавшихся нитридов).

Для изучения строения азотированных слоев использовали металлографические и электронномикроскопические исследования, а также стандартный метод определения микротвердости.

Прочностные испытания на растяжение проводили на плоских стандартных образцах на разрывной машине Р-5 при скорости деформации 2,5 мм/мин. Определяли временное сопротивление разрыву σ_b и относительное удлинение δ при комнатной температуре (20 °С), а также характеристики σ_b^t и относительное удлинение δ^t при повышенных температурах (600...1100 °С). Некоторые образцы были испытаны на высокотемпературную длительную прочность с определением времени до разрушения при разных нагрузках и последующим пересчетом в характеристику 100-часовой прочности σ_{100}^t .

Исследования жаростойкости проводили гравиметрическим методом по привесу – увеличению массы окисленного образца по сравнению с массой исходного образца. Окисление стандартных образцов проводили в течение 100 ч в фарфоровых тиглях, устанавливаемых в электропечь, нагретую до температуры испытаний.

Результаты и их обсуждение

Эффективность высокотемпературного азотирования аустенитной стали для предотвращения образования нитридов хрома показана коллективом ученых, которыми разработана технология т. н. «азотирования на твердый раствор» HTSN (High Temperature Solution Nitriding) [14]. На диаграмме распада

хромоникелевого аустенита (рис. 1) видно, что температура HTSN должна быть выше некоего значения, ограничивающего область термодинамической устойчивости нитридов Cr_2N и CrN . Но при этом, чтобы сдержать выделение нитридов хрома в процессе распада твердого раствора, необходимо быстрое охлаждение от температур азотирования, что влечет за собой технологические трудности. Применение данного способа сдерживается еще и тем, что твердорастворное упрочнение аустенита азотом невелико по сравнению с дисперсионным [15].

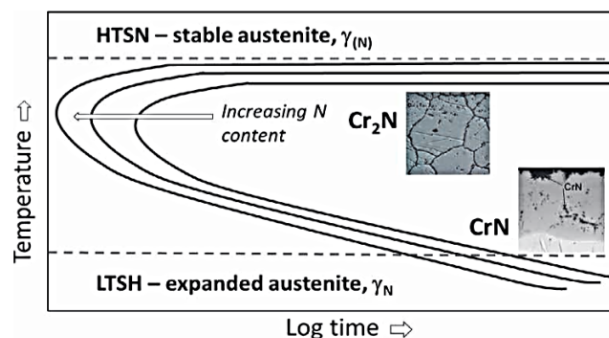


Рис. 1. Температурно-временная диаграмма распада аустенита хромоникелевой стали: HTSN – стабильный аустенит; LSTN – пересыщенный аустенит [14]

Fig. 1. Temperature-time decay diagram of austenite of chromium–nickel steel: HTSN – stable austenite; LSTN – supersaturated austenite [14]

Идея настоящей работы заключается в том, чтобы обеспечить в дополнение к твердорастворному упрочнению азотированной аустенитной стали дисперсионное упрочнение матрицы стабильными нитридами, которыми являются, в частности, нитриды титана. Титан может «оттянуть на себя» поступающий азот, что поможет избежать формирования менее стойких нитридов хрома, а тугоплавкие частицы нитридов титана стабилизируют структуру против деформации и ползучести, как при нормальной, так и при повышенных температурах [11].

Для решения поставленной задачи необходимо определить условия образования различных фаз в конкретной стали при предполагаемых температурах азотирования, что и было выполнено методами термодинамического моделирования (CALPHAD-метод) [16].

Расчеты на базе модельной системы легирования Fe-18Cr-10Ni-0,1C показали, что в

температурном интервале 900...1200 °C при поступлении в такую сталь 1,0%N в равновесии с азотистым аустенитом будут находиться нитриды хрома CrN и Cr₂N. Предел их

термодинамической устойчивости достигает 1150 °C (рис. 2, а), что практически исключает изыскание рациональных режимов HTSN.

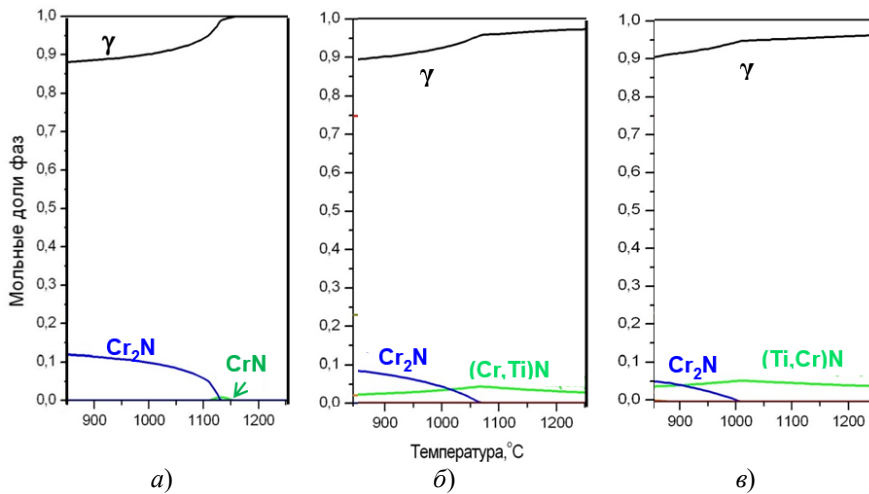


Рис. 2. Температурно-концентрационные диаграммы фазового состава в системе Fe-18%Cr-10%Ni-0,1C%-1,0%N без титана (а) и с содержанием титана 0,5%Ti (б), 1,0%Ti (в)

Fig. 2. Temperature-concentration diagrams of phase composition in the Fe-18%Cr-10%Ni-0,1C%-1,0%N system without titanium (a) and with a titanium content of 0,5%Ti (b), 1,0%Ti (c)

Согласно расчету, добавление 0,5 % титана к базовой системе Fe-18Cr-10Ni-0,1C-1,0%N понижает температуру существования Cr₂N до 1065 °C и переводит CrN в комплексный нитрид (Cr, Ti)N (рис. 2, б). В системе с 1,0%Ti идет дальнейшее снижение температурного предела устойчивости Cr₂N (до 1000 °C) и намечается преобладание титана в нитриде (Ti, Cr)N (рис. 2, в).

Из расчетной модели следует, что количество поступающего в сталь азота при азотировании является важным фактором, влияющим на химический состав выделяющихся фаз. Очевидно, что при насыщении из газовой фазы концентрация азота в стали будет снижаться по мере удаления от поверхности вглубь слоя. Рис. 3 моделирует изменение фазового состава азотированного слоя при понижении концентрации азота.

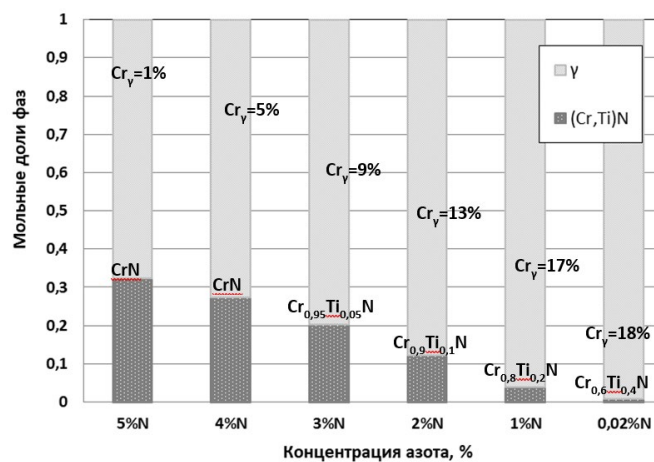


Рис. 3. Расчетные относительные мольные доли фаз (γ и CrN) в системе Fe-18Cr-10Ni-0,1C-0,5Ti с различным содержанием азота при 1100 °C (γ столбиков проставлены значения содержания хрома в аустените Cr_γ и состав нитрида)

Fig. 3. Calculated relative mole fractions of phases (γ and CrN) in the Fe-18Cr-10Ni-0,1C-0,5Ti system with different nitrogen content at 1100 °C (columns have the values of chromium content in austenite Cr_γ and nitride composition)

Основные выводы, следующие из этой модели:

– образование хромосодержащих нитридов неизбежно при стандартном содержании титана в системе;

– на азотированной поверхности в равновесии могут находиться полностью обеднённый хромом твёрдый раствор с нитридом CrN, что категорически неприемлемо;

– в системах с повышенным содержанием титана обеднение твердого раствора хромом происходит в меньшей степени;

– по мере снижения концентрации азота при удалении от поверхности относительная мольная доля нитридов хрома снижается, комплексный нитрид (Cr, Ti)N обедняется хромом и обогащается титаном; содержание хрома в аустените приходит к исходному значению.

Можно заключить, что основными мерами по регулированию фазового состава

азотированной поверхности могут являться увеличение концентрации титана в стали, а также понижение количества поступающего азота, что регулируется снижением активности насыщающей газовой атмосферы (разбавлением азота инертным газом).

Эксперименты по азотированию стали со стандартным содержанием титана (0,5%Ti) в чистом азоте подтвердили, что на поверхности образуется слой с выделениями нитридов хрома, преимущественно по границам зерен (рис. 4 а, б). В основной части зоны внутреннего азотирования присутствуют обособленные мелкодисперсные выделения (см. рис. 4, а), которые идентифицируются как нитриды титана по электронно-микроскопическому изображению в характеристическом излучении титана (рис. 4, в).

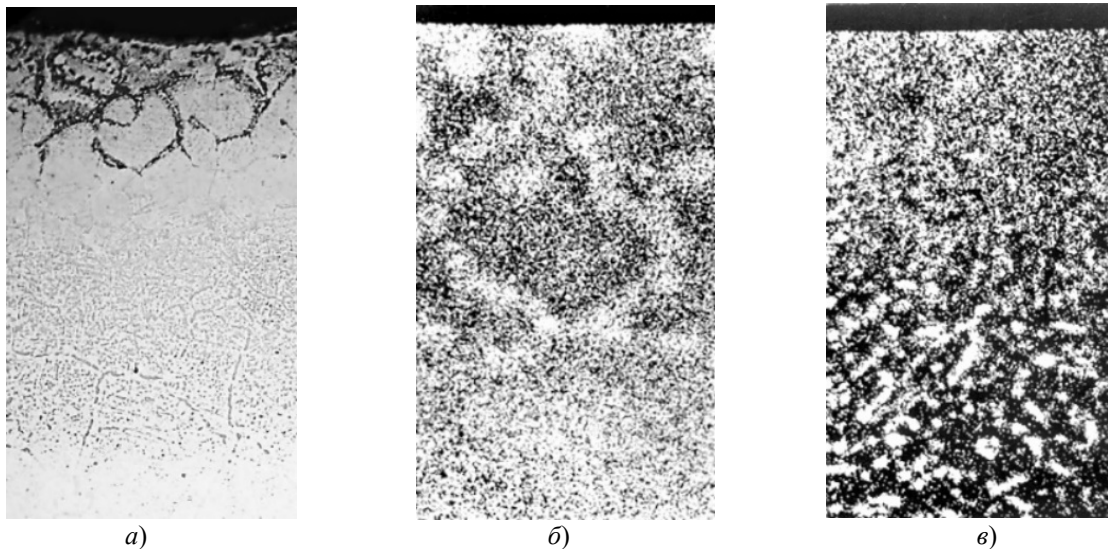


Рис. 4. Микроструктура азотированного слоя в стали с 0,5%Ti (режим процесса 1000 °С, 100%N₂, 10 ч) (а), и электронно-микроскопические изображения поверхностного участка в характеристическом излучении хрома (б) и титана (в)

Fig. 4. Microstructure of the nitrided layer in steel with 0,5%Ti (process mode 1000 °C, 100%N₂, 10 h) (a), and electron microscopic images of the surface area in the characteristic radiation of chromium (b) and titanium (c)

Образование нитридов хрома (их количество и толщина зоны выделений) зависит от температуры азотирования и от состава насыщающей среды, а также различается в сталях с разным содержанием титана.

Установлено, что при насыщении в чистом азоте нитриды хрома образуются после азотирования ниже температур 1150 °С в стали с 0,5%Ti, и ниже 1100 °С в стали с 1,0%Ti, что

в целом согласуется с результатами, полученными по термодинамической модели. Причем объемная доля нитридов тем больше, чем ниже температура процесса, а для протяжённости соответствующего участка характерна обратная зависимость. При одной и той же температуре азотирования нитридов хрома существенно меньше в стали с увеличенным содержанием титана.

Разбавление азота аргоном снижает температуру азотирования, при которой выделяются нитриды хрома. Так, азотирование стали с 1,0%Ti в смеси 15%N₂ + 85%Ar предотвращает образование нитридов хрома при температуре 1000 °С, а азотирование в смеси 50%N₂ + 50%Ar позволяет избежать выделения этих нитридов при температуре 1100 °С.

По видимой границе зоны выделений в микроструктуре можно оценить общую толщину азотированного слоя. Так, на рис. 4, а измеренная толщина слоя составила 160 мкм; это означает, что азотирование в указанном режиме не обеспечивает формирования сквозного слоя.

Для определения времени процесса, требуемого для сквозного азотирования листового образца при разных режимах насыщения, проведено изучение кинетики процесса. Исследования показали соответствие зависимости скорости роста азотированного слоя X от времени τ известному параболическому закону: $X = k\sqrt{\tau}$. Это позволило определить коэффициенты пропорциональности k по графикам зависимости толщины слоя от времени, которые спрямляются в координатах $X^2(\tau)$ (рис. 5).

По значениям этих коэффициентов были рассчитаны параметры времени

сквозного (с двух сторон) азотирования образцов 1,5 мм толщины ($\tau_{0,75}$). В табл. 1 выделены режимы азотирования, обеспечивающие приемлемую скорость роста азотированного слоя и формирование сквозного слоя за время менее 25 ч.

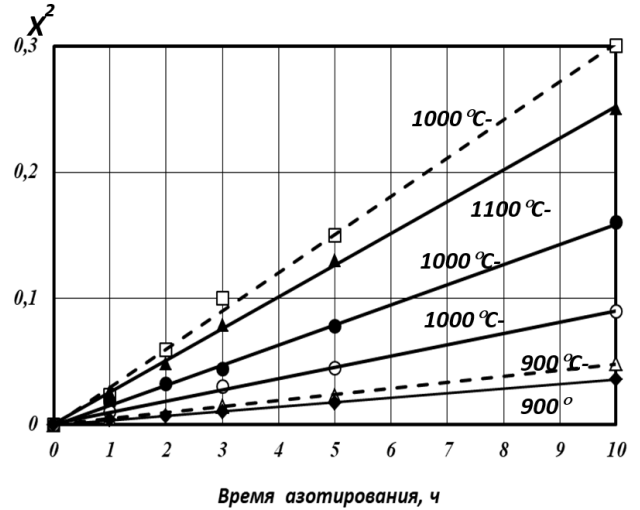


Рис. 5. Зависимости толщины зоны внутреннего азотирования (X^2) от времени насыщения при разных режимах сталей с содержанием 0,5%Ti (штриховые линии) и 1,0%Ti (сплошные линии)

Fig. 5. Dependences of the thickness of the internal nitriding zone (X^2) on the saturation time under different modes of steels with a content of 0,5%Ti (dashed lines) and 1,0%Ti (solid lines)

1. Время образования слоя 750 мкм ($\tau_{0,75}$) для сквозного азотирования образцов толщиной 1,5 мм сталей с 0,5%Ti и 1,0%Ti после разных режимов азотирования

1. The formation time of a layer of 750 microns ($\tau_{0,75}$) for through nitriding of 1,5 mm thick steel samples with 0,5%Ti and 1,0%Ti after different nitriding modes

Содержание титана	$t_{аз}, °C$	Насыщающая среда	$k, мкм/ч^{1/2}$	$\tau_{0,75}, ч$
0,5%Ti	900	N ₂	70	115
	950	N ₂	130	33
	1000	N ₂	172	19
	1050	N ₂	294	6,5
	1100	N ₂	375	4,0
1,0%Ti	900	N ₂	60	156
	950	N ₂	90	69
	1000	N ₂	127	35
	1000	15%N ₂ + 85%Ar	95	62
	1050	N ₂	187	16
	1100	N ₂	226	11
	1100	50%N ₂ + 50%Ar	160	22
	1100	15%N ₂ + 85%Ar	132	32

Полученные результаты наглядно показывают, что увеличение содержания титана в

стали замедляет скорость азотирования: при одних и тех же температурах процесса время

сквозного насыщения стали с 1,0%Ti оказывается в 1,5 – 2,5 раза больше. Несмотря на это, весомым фактором использования экспериментальной стали является наличие режимов азотирования, позволяющих минимизировать выделение нитридов хрома. Наиболее рациональными являются процессы азотирования стали с 1,0%Ti при 1050 °С в чистом азоте (16 ч) и при 1100 °С в смеси 50%N₂ + 50%Ar (22 ч).

Азотирование при 1100 °С, как наиболее «скоростной» процесс для данной стали, может быть применено в сочетании с последующим отжигом в аргоне для разложения образовавшихся нитридов хрома. Подобные двухступенчатые процессы позволяют сократить суммарную длительность процесса, поскольку при рассасывании нитридов высвобождающийся азот продвигается вглубь металла, увеличивая толщину зоны внутреннего азотирования.

Деазотирующий отжиг азотированной стали в инертном газе должен обеспечить полное рассасывание слоя нитридов хрома за

умеренное время. Выбор температуры отжига обусловлен двумя соображениями:

– она не должна быть ниже температуры азотирования, в противном случае, в некоторых участках слоя концентрация азота может оказаться достаточной для образования нитридов хрома даже без притока атомов азота из газовой фазы. Тогда вместо разложения нитридов хрома может наблюдаться процесс их дополнительного выделения.

– повышение температуры отжига ускоряет диффузионные процессы разложения нежелательных нитридов.

Продолжительность отжига определяется на основании известной толщины зоны нитридов хрома в предположении, что кинетика деазотирования также подчиняется параболическому закону. В табл. 2 показано расчетное время отжига сталей, азотированных при температурах 1000 °С и 1100 °С 5,0 ч в чистом азоте, где указаны также соответствующие значения толщины азотированного слоя.

2. Расчетное время отжига в аргоне азотированных сталей (100%N₂, 5,0 ч), необходимое для рассасывания слоя нитридов хрома толщиной X'_{CrN}

2. Estimated annealing time in argon of nitrated steels (100%N₂, 5,0 h) required for resorption of a layer of chromium nitrides with a thickness of X'_{CrN}

t _{аз} , °С	Сталь с 0,5%Ti				Сталь с 1,0%Ti			
	X, мкм	X' _{CrN} , мкм	t _{отж} , °С		X, мкм	X' _{CrN} , мкм	t _{отж} , °С	
			1100	1200			1100	1200
1000	390	60	32	22	280	35	12	7
1100	650	80	52	35	510	40	14	9

Из анализа табл. 2 видно, что для стали с 0,5%Ti требуемое время отжига слишком велико, т. к. образовавшиеся слои нитридов хрома имеют большую толщину. Для стали с повышенным содержанием титана (1,0%Ti) двухступенчатые процессы протекают существенно быстрее, например: азотирование 1100 °С, 5,0 ч, N₂ + отжиг 1100 °С, 14 ч, Ar, или азотирование 1100 °С, 5,0 ч, N₂ + отжиг 1200 °С, 9,0 ч, Ar.

В последнем случае за суммарное время процесса 14 ч достигается сквозное азотирование листового образца толщиной 1,5 мм. Это более чем в 1,5 раза меньше длительности альтернативного процесса сквозного азотирования при 1100 °С в смеси 50%N₂ + 50%Ar, а также на 2,0 ч короче процесса сквозного азотирования в чистом азоте при 1050 °С (см. табл. 1).

Получаемые при высокотемпературных процессах зоны внутреннего азотирования имеют повышенную микротвердость по сравнению с микротвердостью исходной стали в отожженном состоянии: на 1400 МПа для стали с 0,5%Ti, на 1700 МПа для стали с 1,0%Ti.

Показано [17], что в системах на основе железа с нитридообразующим элементом основным механизмом упрочнения является дисперсионное упрочнение частицами стабильных нитридов: чем выше концентрация элемента, тем больше объемная доля нитридов. Это объясняет более высокий прирост микротвердости в стали с повышенным содержанием титана.

Ход кривых распределения микротвердости по толщине слоя (рис. 6) отвечает характеру изменений в микроструктуре азотированных

образцов. Поверхностный слой с наибольшей микротвердостью соответствует зоне нитридов хрома; причем твердость этого участка примерно одинакова у обеих сталей. В зоне внутреннего азотирования микротвердость несколько снижается вглубь слоя, что связано с

укрупнением частиц нитридов титана. Спад микротвердости от зоны внутреннего азотирования к сердцевине происходит плавно, что обусловлено постепенным снижением концентрации азота в твердом растворе за пределами зоны выделений.

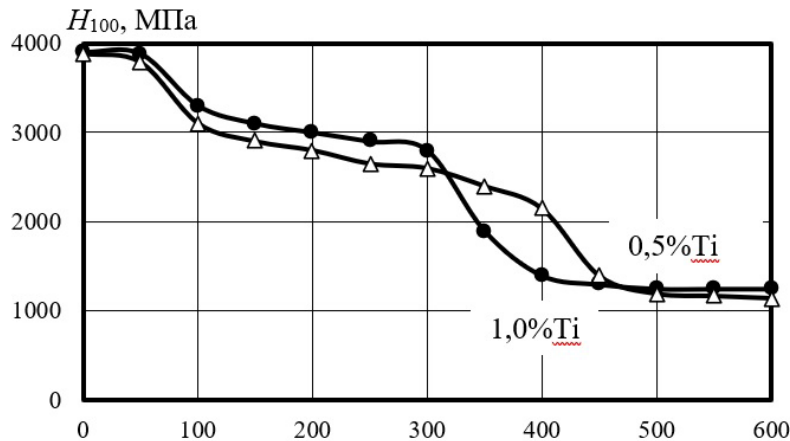


Рис. 6. Распределения микротвердости по толщине слоя образцов сталей с различным содержанием титана после азотирования в чистом азоте при 1000 °С в течение 5,0 ч

Fig. 6. Microhardness distributions over the layer thickness of steel samples with different titanium content after nitriding in pure nitrogen at 1000 °C within 5,0 h

Дисперсионное упрочнение зон внутреннего азотирования приводит к увеличению прочностных характеристик сталей как при комнатной, так и при повышенных температурах по сравнению с характеристиками базовой стали 08X18N10T после типовой термообработки (табл. 3). При этом наибольший эффект

упрочнения достигается при сквозном азотировании стали с 1,0%Ti (рис. 7, а). Временное сопротивление разрыву стали с 1,0%Ti при комнатной температуре повышается на 45...50 %, а при испытаниях при 800 °С – на 40...65 % в зависимости от режима процесса.

3. Механические свойства исследуемых сталей после азотирования в сравнении с нормируемыми характеристиками для стали 08X18N10T

3. Mechanical properties of the studied steels after nitriding in comparison with the normalized characteristics for 08X18N10T steel

Сталь	Способ обработки	При 20°С		При повышенных <i>t</i>			
		σ_b , МПа	δ , %	$t_{исп}$, °С	σ_b^t , МПа	δ^t , %	σ_{100} , МПа
08X18N10T	Закалка 1050 °С, воздух [15]	500	40	800	180	35	25
				850	-	-	10
0,5%Ti	Азотирование 1100 °С, N ₂	700	27	800	210	22	-
	Азотирование 1100 °С, 50N ₂ +50Ar	-	-	800	210	21	-
				900	160	17	13
1,0%Ti	Азотирование* 1050 °С, N ₂	750	15	800	250	12	30
	Азотирование* 1100 °С, 50N ₂ + 50Ar	730	20	800	300	15	-
				900	240	13	18
				800	300	13	-
Азотирование* 1100 °С, N ₂ + отжиг 1200 °С Ar	750	23	900	-	-	23	

* сквозное азотирование

Сквозное азотирование позволяет под-
нять рабочую температуру сталей минимум на
100 °С для деталей, работающих в условиях
кратковременного срока службы. Так, времен-
ное сопротивление разрыву при 900 °С азоти-
рованной стали с 1,0%Ti (1100 °С, 50N₂ + 50Ar)

выше, чем у неазотированной стали при 800 °С
(см. табл. 3). Увеличение рабочих температур
более 900 °С усугубляет разупрочнение и вы-
зывает резкое снижение пластичности азотиро-
ванных сталей (рис. 7, б).

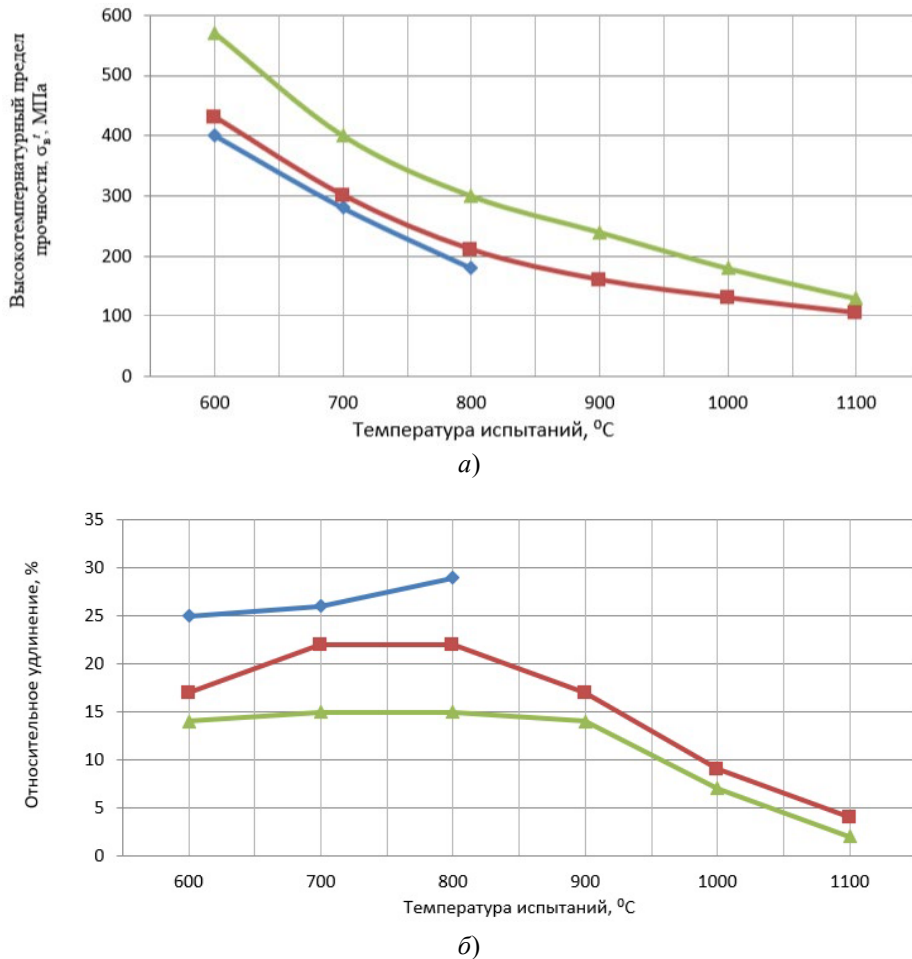


Рис. 7. Временное сопротивление разрыву (а) и относительное удлинение (б) образцов стали Fe-18Cr-10Ni с 0,5%Ti и 1,0%Ti после сквозного азотирования ($t_{аз} = 1100$ °С, 50%N₂ + 50%Ar) в зависимости от температуры испытаний в сравнении с параметрами для стали 08X18N10T после типовой термообработки (закалка 1050 °С, воздух)

Fig. 7. Temporary tear resistance (a) and elongation (b) of Fe-18Cr-10Ni steel samples with 0,5%Ti and 1,0%Ti after through-the-thickness nitriding ($t_n = 1100$ °С, 50%N₂ + 50%Ar) depending on the test temperature comparing to parameters for 08X18N10T steel after typical heat treatment (thermohardening 1050 °С, air)

Временное сопротивление разрыву при прочих одинаковых параметрах увеличивается при повышении температуры азотирования, что коррелирует с увеличением толщины упрочненного слоя (рис. 8). При азотировании стали с 1,0%Ti в чистом азоте при 1050 °С в течение 15 ч достигается максимальная прочность. Данный режим обеспечивает

практически полное азотирование с обеих сторон листового образца: доля упрочненного слоя составляет 97 % от его общей толщины. При более высокой температуре (1100 °С) за то же время азотирования в азоте образуется «излишек» азотированного слоя, частицы нитридов укрупняются, что негативно сказывается как на прочности, так и на пластичности стали.

Сквозное азотирование повышает длительную 100-часовую прочность аустенитной стали: показатель σ_{100} азотированной стали с 1,0%Ti при 900 °С выше, чем у базовой стали 08X18H10T при 850 °С (см. табл. 3). Наиболее существенный эффект наблюдается после двухступенчатого процесса, состоящего из азотирования с последующим отжигом в аргоне: σ_{100} при 900 °С имеет близкое значение к показателю для типовой стали при 800 °С. Данный процесс в наименьшей степени снижает пластичность стали, что обусловлено релаксацией возникающих напряжений в азотированном слое в результате отжига.

Испытания на жаростойкость показали, что двухступенчатые процессы сохраняют на приемлемом уровне стойкость стали к высокотемпературной газовой коррозии в воздушной среде, благодаря практически полному отсутствию нитридов хрома в азотированном слое. Скорость газовой коррозии при 900 °С, измеренная по привесу, составляет 0,067 г/м²ч, что лишь немного превышает этот показатель для неазотированной стали (0,061 г/м²ч). При повышении температуры испытаний до 1000 °С жаростойкость резко снижается как у базовой, так и у экспериментальной азотированной стали (показатели привеса на уровне 1,0...1,1 г/м²ч).

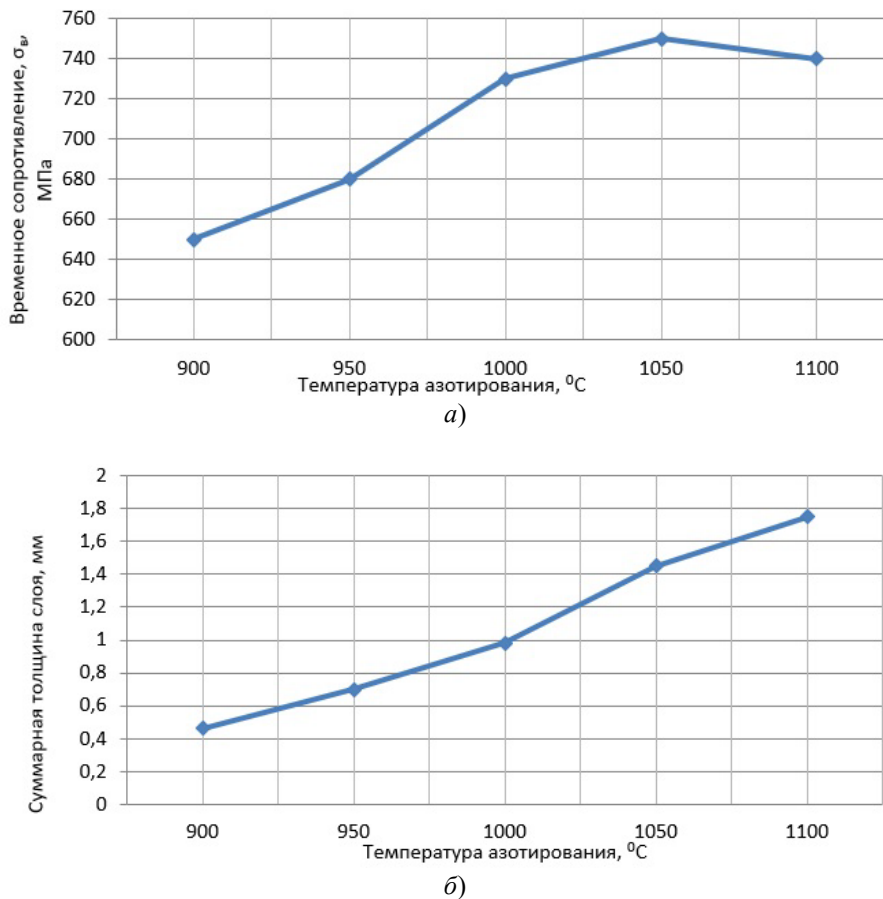


Рис. 8. Временное сопротивление разрыву (а) и расчетная суммарная толщина азотированного слоя (б) образцов стали с 1,0%Ti после азотирования в азоте при различных температурах ($\tau_{аз} = 15$ ч)

Fig. 8. Temporary tear resistance (a) and estimated total thickness of the nitrided layer (b) of steel samples with 1,0%Ti after nitriding in nitrogen at different temperatures ($\tau_n = 15$ h)

Заключение

Исследованы процессы высокотемпературного азотирования аустенитной стали X18H10T для упрочнения листовых изделий,

работающих в условиях повышенных температур. Показано, что эффект сквозного дисперсионного упрочнения азотированного слоя нитридами титана и минимизация выделения нитридов хрома для сохранения жаростойкости

достигается в экспериментальной стали с повышенным содержанием титана (1,0%Ti).

Преимуществом высокотемпературных процессов азотирования (1050...1100 °С) является возможность получать сквозные диффузионные слои за относительно небольшое время (менее 25 ч). Дополнительные возможности управления фазовым составом и кинетикой роста азотированного слоя реализуются при насыщении в смесях азота с аргоном, а также при реализации двухступенчатого процесса азотирования с последующим отжигом в аргоне.

Рекомендованы рациональные режимы сквозного азотирования экспериментальной стали, при которых достигается увеличение прочности как при комнатной, так и при повышенных температурах: азотирование при 1050 °С в чистом азоте 16 ч; азотирование при 1100 °С в смеси 50%N₂ + 50%Ar 22 ч; азотирование при 1100 °С в чистом азоте 5,0 ч с последующим отжигом в аргоне при 1200 °С 9,0 ч. Показано, что сквозное азотирование может повысить рабочую температуру жаростойкой стали. Некоторое снижение пластичности экспериментальной азотированной стали по сравнению с типовой сталью не влечет за собой технологических трудностей, т. к. после азотирования не требуется обработка давлением.

Сквозное азотирование позволяет поднять рабочую температуру стали до 900 °С с обеспечением почти такой же длительной прочности, как для базовой стали при 800 °С. Жаростойкость при 900 °С сохраняется на уровне неазотированной стали после двухступенчатых процессов, обеспечивающих максимальное удаление с поверхности нитридов хрома на стадии отжига.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Березовская В.В., Березовский А.В. Коррозионностойкие стали и сплавы: учебное пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2019. 244 с.
2. Петрова Л.Г., Александров В.А., Зюзин Д.М., Богданов К.В. Способ высокотемпературного азотирования деталей из коррозионностойких хромоникелевых сталей // Патент РФ № 2287608, опублик. 20.11.2006.
3. Рогачев С.О., Никулин С.А., Хаткевич В.М. Эволюция структуры и механические свойства объемно-азотированной коррозионно-стойкой ферритной стали при отпуске в интервале температур 400-700 °С //

Физика металлов и металловедение. – 2017. Т. 118. № 8. С. 824–828.

4. Рогачев С.О., Стомахин А.Я., Никулин С.А. Структура и механические свойства аустенитных Cr - Ni - Ti сталей после высокотемпературного азотирования // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 5. С. 366–373.

5. 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.

6. Иванов Д.И., Кожухов А.А., Уразова Л.Ф. Механизм высокотемпературной коррозии жаростойкой хромоникелевой стали // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 3. С. 180–184.

7. Рогачев С.О., Никулин С.А., Хаткевич В.М. Влияние высокотемпературного азотирования на коррозионную стойкость ферритных хромистых сталей // Физика и химия обработки материалов. 2019. № 2. С. 36–43.

8. Петрова Л.Г., Сергеева А.С. Контроль фазового состава аустенитных сталей при поверхностном упрочнении методом высокотемпературного азотирования // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 6 (108). С. 3–11.

9. Ахмедзянов М.В., Овсепян С.В., Родин А.О. Кинетика высокотемпературного азотирования и свойства сплава системы Ni - Co - Cr - W - Ti // Металловедение и термическая обработка металлов. 2022. № 4 (802). С. 45–49.

10. Ju Q., Zhang Y.-L., Tong J.-T., Ma H.-P. Evolution of microstructure and properties of internal nitride dispersion strengthened alloy before nitriding // Journal of Iron and Steel Research. 2018. Vol. 30 (2). P. 156–161.

11. Петрова Л.Г., Чудина О.В. Способ высокотемпературного азотирования хромоникелевых сплавов, легированных титаном // Патент РФ № 2148675, опублик. 10.05.2000.

12. Сергеева А.С., Петрова Л.Г., Коленько, Н.В. Повышение износостойкости хромоникелевых нержавеющей сталей путем высокотемпературного азотирования // Наука и техника в дорожной отрасли: Материалы конференции, Москва, 18 марта 2021 года. М. Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). 2021. С. 82–84.

13. 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.

14. Christiansen T. L., Villa M., Tibollo C., Dahl K.V. and Somers M.A.J. High Temperature Solution Nitriding of Stainless Steels; Current Status and Future Trends // HTM Journal of Heat Treatment and Materials. 2020. Vol. 75. No. 2. P. 69–82.

15. Петрова Л.Г., Белашова И.С. Оценка твердо-растворного упрочнения аустенитных сплавов при легировании азотом // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 1. С. 245–252.

16. Петрова Л.Г., Шапошников Н.Г., Сергеева А.С. Термодинамическое прогнозирование фазового состава азотированной хромоникелевой стали // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2019. №4. С. 66–74.

17. Петрова Л. Г. Оценка прогнозируемого упрочнения железа при поверхностном легировании металлом в сочетании с азотированием // Технология металлов. 2022. № 8. С. 41–52.

REFERENCES

1. Berezovskaya V.V., Berezovsky A.V. Corrosion-resistant steels and alloys. Yekaterinburg: Ural University Publishing House, 2019, 244 p.

2. Petrova L.G., Alexandrov V.A., Zyuzin D.M., Bogdanov K.V. Method of high-temperature nitriding of parts made of corrosion-resistant chromium-nickel steels // RF Patent No. 2287608, publ. 20.11.2006.

3. Rogachev S.O., Nikulin S.A., Khatkevich V.M. Evolution of the structure and mechanical properties of a bulk-nitrided corrosion-resistant ferritic steel upon tempering in the temperature range of 400–700°C. // Physics of Metals and Metal Science, 2017, vol. 118, no. 8, pp. 824–828.

4. Rogachev S.O., Stomakhin A.Ya., Nikulin, S.A. Structure and mechanical properties of austenitic Cr - Ni - Ti steels after high-temperature nitriding // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2019;62(5):366-373. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-5-366-373>.

5. 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.

6. Ivanov D.I., Kozhukhov A.A., Urazova L.F. Mechanism of high-temperature corrosion of heat-resistant chromium-nickel steel // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2016; vol. 59(3), pp.180–184. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-3-180-184>.

7. Rogachev S.O., Nikulin S.A., Khotkevich V.M. Influence of high-temperature nitriding on corrosion resistance of ferritic chromium steels // Physics and chemistry of materials processing, 2019, No. 2. pp. 36–43.

8. Petrova L.G., Sergeeva A.S. Control of the phase composition of austenitic steels during surface hardening by austenitic nitriding // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2020, no. 6 (108), pp. 3–11

9. Akhmetzyanov M.V., Ovsepyan S.V., Rodin, A.O. Kinetics of austenitic nitriding and properties of Ni- Co - Cr - W-Ti alloy system // Metal science and heat treatment of metals, 2022, no. 4 (802), pp. 45–49.

10. Ju Q., Zhang Y.-L., Tong J.-T., Ma H.-P. Evolution of microstructure and properties of internal nitride dispersion strengthened alloy before nitriding // Journal of Iron and Steel Research. 2018. Vol. 30 (2). P. 156–161.

11. Petrova L.G., Chudina O.V. Method of austenitic nitriding of chromium-nickel alloys alloyed with titanium // RF Patent No. 2148675, publ. 10.05.2000.

12. Sergeeva A.S., Petrova L.G., Kolenko, N.V. Improving the wear resistance of chromium-nickel stainless steels by austenitic nitriding // Science and Technology in the road industry: Proc. of the conference, Moscow, March 18, 2021. - Moscow – Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), 2021, pp. 82–84.

13. 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.

14. Christiansen T. L., Villa M., Tibollo C., Dahl K.V. and Somers M.A.J. High Temperature Solution Nitriding of Stainless Steels; Current Status and Future Trends // HTM Journal of Heat Treatment and Materials. 2020. Vol. 75. No. 2. P. 69–82.

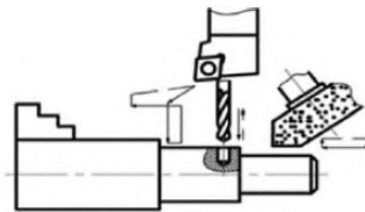
15. Petrova L.G., Belashova I.S. Evaluation of solid-solution hardening of austenitic alloys during nitrogen alloying // Bulletin of the Moscow Aviation Institute, 2022, vol. 29, No. 1, pp. 245–252.

16. Petrova L.G., Shaposhnikov N.G., Sergeeva, A.S. Thermodynamic prediction of the phase composition of nitrided chromium-nickel steel // Problems of ferrous metallurgy and material science, 2019, No. 4, pp. 66–74.

17. Petrova L. G. Evaluation of the predicted hardening of iron during surface alloying with metal in combination with nitriding // Technology of metals, 2022, No. 8, pp. 41–52.

Статья поступила в редакцию 01.07.2023; одобрена после рецензирования 06.07.2023; принята к публикации 11.07.2023.

The article was submitted 01.07.2023; approved after reviewing 06.07.2023; assepted for publication 11.07.2023.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №9 (147). С.16-268.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №9 (147). P. 16-26.

Научная статья
УДК 621.9
doi: 10.30987/2223-4608-2023-16-26

Проектирование технологии обработки в гранулированных средах в условиях цифрового производства

Михаил Аркадьевич Тамаркин¹, д.т.н.
Элина Эдуардовна Тищенко², к.т.н.

^{1, 2} *Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия*

¹ *tehn_rostov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9558-8625>*

² *lina_tishenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5156-5544>*

Аннотация. Рассмотрена проблема проектирования технологии механической обработки деталей в гранулированных средах в условиях цифрового производства. Рассмотрены особенности обработки в абразивных средах и в среде стальных шариков (отделочно-упрочняющие методы обработки). Получены зависимости для определения параметров единичного взаимодействия частицы среды с поверхностью детали при обработке в гранулированных средах. Получены зависимости для определения максимальной глубины внедрения частицы в поверхность обрабатываемой детали, параметры единичного следа, шероховатости поверхности, времени обработки. Для отделочно-упрочняющих методов обработки в гранулированных рабочих средах также получены зависимости для определения глубины упроченного слоя и степени деформации. Полученные теоретические зависимости прошли проверку адекватности путем сравнения с результатами экспериментальных исследований. При проведении исследований установлено, что разработанная система моделей не учитывает особенности динамики различных методов обработки и форму частиц среды. Для учета этих параметров применен пакет прикладных программ Rosky DEM. Пакет позволяет задавать форму рабочей камеры, динамические параметры процесса обработки, количество частиц в рабочей камере по массе, форму и размеры частиц, массу и форму обрабатываемой детали и её расположение в рабочей камере, материал обрабатываемой детали, соотношение массы детали и массы абразивной среды, физико-механические свойства обрабатываемого материала и частиц среды, коэффициент трения абразивной среды о поверхность детали, свойства технологических жидкостей и другие параметры. Пакет позволил уточнить теоретические модели и получить результаты более близкие к условиям производства. На основании проведенных исследований и с целью их внедрения в современное цифровое производство разработана методика проектирования технологических процессов и предложен программный продукт, который позволяет по характеристике детали выбрать возможные методы обработки в гранулированных средах (в порядке предпочтительности), для каждого из них определить технологические режимы и характеристики рабочих сред.

Ключевые слова: обработка в гранулированных средах, качество поверхностного слоя, цифровое производство

Благодарности: авторы благодарят издателей журнала за внимательное отношение к публикации.

Для цитирования: Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э. Проектирование технологии обработки в гранулированных средах в условиях цифрового производства // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 9 (147). С. 16–26.
doi: 10.30987/2223-4608-2023-16-26

Design of processing technology in granulated media in the conditions of digital production

Mikhail A. Tamarkin¹, D. Eng.
Elina E. Tishchenko², PhD. Eng.

^{1,2} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

¹ tehn_rostov@mail.ru

² lina_tishenko@mail.ru

Abstract. The problem of mechanical technology design for machining parts in granulated media in the conditions of digital production is viewed. The peculiarities of part process in abrasive media and with steel balls (finish- machining and strengthening treatment techniques) are shown. Dependences for determining the parameters of a single interaction of a medium particle with the surface of a part during processing in granulated media are obtained. Dependences for depth maximizing in cases of particle penetration into the surface of the machined part, the parameters of a single trace, surface roughness, processing time are found. For finish- machining and strengthening treatment techniques for granulated working media, dependences for determining the depth of the hardened layer and the degree of deformation are also obtained. The obtained theoretical dependences have been tested for adequacy through drawing an analogy with the results of experimental studies. During the research, it was found that the developed system of models does not take into account the peculiarities of various processing methods and their dynamics, and shape of the particles of the medium. To account all these parameters, the Rocky DEM application software package is used. The package allows modeling the processing chamber, the dynamic parameters of the machining process, the number of particles in the working space according to their mass, the shape and dimensions of the particles, the mass and shape of the machined part and its location in the processing chamber, the material of the machined part, the ratio of the mass of the part and the mass of the abrasive medium, some physical properties of the material of the processed part, slip coefficient of the abrasive medium on the part surface, process liquid properties and other parameters. The package made it possible to refine theoretical models and obtain results closer to production conditions. Based on the research carried out and being aimed at their introduction into modern digital production, the design technique of technological processes has been developed and a software product has been proposed allowing to select possible working methods in granulated media (in order of preference) according to the characteristics of the part, and to determine the technological modes for each of them and characteristics of working environments.

Keywords: processing in granulated media, surface layer quality, digital production

Acknowledgements: the authors express their gratitude to journal publishers for their kind attention to the publication

For citation: Tamarkin M.A., Tishchenko E.E. Design of processing technology in granulated media in the conditions of digital production / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 9 (147). P. 16–26. doi: 10.30987/2223-4608-2023-16-26

Введение

Современное цифровое производство предъявляет новые требования к проектированию технологических процессов механической обработки деталей и в первую очередь это касается технологий финишной обработки. Как известно, именно на заключительных этапах обработки детали окончательно формируется ее поверхностный слой, который, в свою очередь, отвечает за её высокие эксплуатационные характеристики. Высокое качество поверхностного слоя детали можно получить с использованием значительного количества методов обработки, имеющих в арсенале технолога. Однако общеизвестно, что есть группа методов, позволяющая обеспечить высокие параметры эксплуатационных характеристик

деталей с использованием несложных схем обработки и относительно простого по конструкции оборудования. К таким методам относится обработка деталей в гранулированных рабочих средах.

Методы обработки в гранулированных рабочих средах довольно давно используются в промышленности. Еще в середине 1960-х гг. профессор Бабичев А.П. создал научную школу, которая занималась исследованием вибрационной технологии обработки деталей на базе кафедры «Технология машиностроения» Ростовского института сельхозмашиностроения (ныне Донской государственной технической университет). Многие ученики профессора внесли свой вклад в науку и расширили область научных исследований этой школы. В 1990-х гг. школа в своих

исследованиях охватывала значительную долю методов обработки свободным абразивом и вела научные исследования в области вибрационной абразивной обработки, центробежно-ротационной обработки, струйно-абразивной обработки, турбоабразивной обработки, магнитно-абразивной обработки, обработки свободным абразивом, уплотненным инерционными силами, гидроабразивной обработки и многих других [1, 2].

Параллельно на кафедре велись исследования в области отделочно-упрочняющей обработки в гранулированных рабочих средах. Здесь также проводились исследования вибрационной отделочно-упрочняющей обработки, центробежно-ротационной отделочно-упрочняющей обработки, дробеструйной обработки, обработки дробью, центробежной обработки, обработки шарико-стержневым упрочнителем, обработки осциллирующим инструментом и других подобных методов [3 – 14].

Методы обработки в гранулированных средах заняли свою нишу и получили широкое распространение на машиностроительных производствах. Они нашли свое применение на операциях шлифования, полирования, упрочнения поверхностного слоя, скругления острых кромок, удаления заусенцев и облоя, подготовки поверхности под покрытие и т. п. Обработка с помощью гранулированной среды, находящейся в свободном состоянии, позволяет одновременно обрабатывать значительное количество деталей, в том числе и сложной конфигурации, не требует базирования и закрепления этих деталей, что в конечном счете приводит к снижению затрат на обработку.

Ученые школы А.П. Бабичева работали над созданием обобщенной теории обработки в гранулированных средах. Такая теория была получена. Она прошла комплексную экспериментальную проверку и используется для проектирования технологических процессов [1 – 14], однако в условиях цифрового производства необходима её доработка и актуализация.

Материалы и методы

Теоретическое моделирование взаимодействия режущей кромки инструмента с поверхностью обрабатываемой детали является важным вопросом при исследовании любого

метода обработки. Особенностью методов обработки в гранулированных рабочих средах является то, что режущий инструмент формируется непосредственно в процессе обработки как среда с особыми свойствами и определенными внутренними связями. Частицы среды осуществляют многократное взаимодействие с выступами микронеровностей обрабатываемой поверхности детали. Часть соударений приводит к микрорезанию. Царапины, оставленные на обрабатываемой поверхности, многократно накладываются друг на друга и образуют специфический микрорельеф, который воспроизводится при продолжении обработки, формируя так называемую установившуюся шероховатость, характерную для методов обработки в гранулированных средах.

При упрочняющей обработке происходит деформирование в поверхностном слое детали, подвергаемой обработке. Образование микрорельефа поверхности в процессе обработки происходит путем многократного наложения и пересечения единичных следов, оставленных обрабатывающими телами. Выступы микронеровностей постепенно скругляются, высотные параметры шероховатости снижаются, а шаговые имеют незначительные изменения. Так происходит до появления на поверхности установившейся шероховатости, которая в дальнейшем не изменяется и воспроизводится при продолжении обработки.

Для правильного описания процессов, происходящих в поверхностном слое обрабатываемой детали при её взаимодействии с частицей среды необходимо рассмотреть процесс единичного взаимодействия и определить его количественные параметры с использованием теории вероятностей. Необходимо выполнить расчет числа взаимодействий в единицу времени на единице площади детали и определить максимальную глубину внедрения частицы среды при обработке в гранулированных абразивных средах [1]. Её можно определить по зависимости:

$$h_{\max} = 2 \cdot v_{\text{эф}} \cdot R \cdot \sin \beta \sqrt{\frac{\rho_{\text{ч}}}{3 \cdot K_R \cdot c \cdot \sigma_s}}, \quad (1)$$

где $v_{\text{эф}}$ – эффективная скорость движения частицы; R – радиус частицы среды; $\rho_{\text{ч}}$ – плотность материала частицы; c – коэффициент,

оценивающий несущую способность контактной поверхности; β – угол удара частицы среды о поверхность обрабатываемой детали; σ_s – предел текучести материала детали; K_R – коэффициент, учитывающий влияние зернистости абразивной частицы на фактическую площадь контакта, который определяется по зависимости:

$$k_R = \sqrt[3]{\frac{48 \cdot \rho_{\text{ч}}}{c \cdot \sigma_s} \cdot \left(\frac{k_p \cdot v_{\text{эф}} \cdot \sin \beta \cdot \chi \cdot Y(\alpha) \cdot (1 - \varepsilon_3) \cdot \bar{x}}{\alpha^2 \cdot (\bar{x}^2 + 3 \cdot \sigma^2)} \right)^2}, \quad (2)$$

где χ – доля, занимаемая абразивными частицами в единице объема частицы; k_p – коэффициент, определяющий число абразивных зерен, вступивших в контакт с поверхностью детали при внедрении частицы; α – коэффициент формы зерна; $Y(\alpha)$ – функция, зависящая от α ; ε_3 – коэффициент, учитывающий заделку зерен в связке; σ – среднеквадратичное отклонение размера зерен; \bar{x} – средний размер абразивных зёрен, который зависит от зернистости и определяется по формуле:

$$\bar{x} = 10,6 \cdot N_3, \quad (3)$$

где N_3 – зернистость частиц среды.

Подобные зависимости были получены исследователями научной школы для различных методов обработки в гранулированных средах. Например, для струйно-абразивной и гидроабразивной обработки их можно записать соответственно:

$$h_{\text{max}} = v_0 \bar{x} \sin \beta \sqrt{\frac{\rho_{\text{ч}}}{3c\sigma_s}}; \quad (4)$$

$$h_{\text{max}} = 4v_0 \bar{x} \sin \beta \sqrt{\frac{\rho_{\text{ч}}}{9\sigma_s}}, \quad (5)$$

где v_0 – скорость встречи частицы с поверхностью детали

Как установлено на основании результатов многочисленных исследований след единичного контакта частицы среды с поверхностью детали представляет собой эллипсоид. Его оси можно определить по зависимостям:

$$b = \sqrt{R^2 - (R - h_{\text{max}})^2}; \quad (6)$$

$$a = \frac{\pi}{2} (\text{ctg} \beta - f) \cdot h_{\text{max}} + b,$$

где f – коэффициент пропорциональности.

Для определения параметров качества поверхностного слоя (шероховатости поверхности) исследователи научной школы профессора Бабичева А.П. с использованием методики профессора А.В. Королева [13] определили обобщенную зависимость для её расчета при обработке в гранулированных абразивных средах:

$$Ra_{\text{уст}} = K \cdot K_{\text{ТЖ}} \sqrt{\frac{h_{\text{max}} \cdot l_{\text{ед}}}{z_0}}, \quad (7)$$

где $l_{\text{ед}}$ – единичная длина; z_0 – номинальное число вершин зерен над единицей поверхности связки; K – эмпирический коэффициент (определен для различных методов обработки в гранулированных абразивных средах); $K_{\text{ТЖ}}$ – коэффициент, учитывающий влияние технологической жидкости.

Имеются также частные зависимости для определения шероховатости поверхности при различных видах абразивной обработки в гранулированных средах.

При проведении исследований установлен экспоненциальный характер снижения высотных параметров шероховатости поверхностного слоя. Зависимость $Ra(t)$ была аппроксимирована и получено следующее выражение, позволяющее определить продолжительность периода достижения установившейся шероховатости поверхности:

$$Ra(t) = (Ra_{\text{исх}} - Ra_{\text{уст}}) e^{-k_{\text{и}} t} + Ra_{\text{уст}}, \quad (8)$$

где $Ra_{\text{исх}}$ – среднее арифметическое отклонение профиля исходной шероховатости; $k_{\text{и}}$ – коэффициент интенсивности уменьшения шероховатости; t – время обработки.

Если определить значение $k_{\text{и}}$ и $Ra_{\text{уст}}$ для конкретных условий обработки, то подставляя в (8) вместо Ra заданное значение

этого параметра $Ra_{зад}$ при условии $Ra_{зад} > Ra_{уст}$ получим требуемую продолжительность обработки для изменения шероховатости от $Ra_{исх}$ до $Ra_{зад}$.

Определение времени достижения заданного значения среднего арифметического отклонения профиля шероховатости обрабатываемой поверхности Ra является важной задачей при проектировании любого технологического процесса механической обработки детали. В связи с этим была получена формула для его расчета:

$$t = -\frac{1}{k_{и}} \cdot \ln \frac{Ra_{зад} - Ra_{уст}}{Ra_{исх} - Ra_{уст}}. \quad (9)$$

Коэффициент $k_{и}$, входящий в эту формулу, не представляется возможным получить теоретически, однако есть возможность его экспериментального определения. Для различных методов обработки в гранулированных абразивных средах получены банки данных таких коэффициентов. Это позволяет сравнивать различные варианты сочетаний технологических параметров и режимов для достижения соответствующих значений $k_{и}$ при обработке деталей из различных материалов, снижать время обработки и оптимизировать технологический процесс.

При создании обобщенной теории отделочно-упрочняющей обработки в гранулированных средах использовались те же подходы, что и при изучении обработки в среде абразива. При этом было учтено, что при обработке в среде стальных шариков отсутствует съём с поверхности детали, но имеется поверхностное упрочнение [3 – 12]. Получена зависимость для определения максимальной глубины внедрения стального шарика в поверхность детали при отделочно-упрочняющей обработке в гранулированных рабочих средах:

$$h_{max} = 2 \cdot v_{эф} \cdot R \cdot \sin \beta \sqrt{\frac{\rho_{ш}}{3 \cdot k_c \cdot c \cdot \sigma_s}}, \quad (10)$$

где k_c – коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта.

Определено среднее арифметическое

отклонение профиля установившейся шероховатости поверхности по следующей формуле:

$$Ra_{уст} = k \cdot k_{ТЖ} \sqrt{\frac{h_{max} \cdot a \cdot b \cdot l_{ед}}{R}}, \quad (11)$$

где k – эмпирический коэффициент (определен для различных методов отделочно-упрочняющей обработки); $k_{ТЖ}$ – коэффициент, учитывающий влияние технологической жидкости.

Выполнен аналитический расчет значений глубины упрочненного слоя h_H и степени деформации ϵ , который позволит оценить увеличение эксплуатационных свойств обработанной детали, например таких, как усталостная прочность и долговечность. Значение глубины упрочненного слоя позволяет установить нахождение в поверхностном слое остаточных деформаций зерен и дислокаций кристаллической решетки, появившихся в результате приложения внешних нагрузок. С переходом от статического нагружения поверхности к ударному контакту происходит увеличение сопротивления материала вдавливанию в него инденторов, которыми являются стальные шарики. При этом происходит увеличение уровня твердости материала, вследствие чего динамическая твердость HD_d оказывается больше пластической твердости при статическом нагружении HD . Количественной мерой возрастания твердости при динамическом нагружении служит динамический коэффициент твердости η [14], который представляет собой отношение $\eta = \frac{HD_d}{HD}$.

Зависимость динамического коэффициента твердости от скорости внедрения индентора при обработке стали, которая позволяет определить динамическую твердость сталей по их статической твердости и начальной скорости удара как для случая контакта сферы и плоскости, так и для контактирующих тел произвольной формы и кривизны [6], можно определить по формуле:

$$\eta = 0,5 \left(1 - \frac{137v_0}{HD} + \sqrt{1 + \frac{2250v_0}{HD}} \right), \quad (12)$$

где HD – пластическая твердость при статическом нагружении; v_0 – начальная скорость удара.

Произведя перерасчет с использованием работы [14] твердость по Бринеллю определим по формуле:

$$HB = 0,2HD^{0,89}.$$

С учётом представленной зависимости и коэффициента твердости, а также условия пластичности Генки-Мизеса [7 – 10, 14], при

описании пластически деформированной области, распространяющейся на некоторую глубину вокруг остаточной вмятины (пластического отпечатка), получены следующие формулы для расчёта глубины упрочненного слоя h_n и степени деформации ε для методов обработки ППД в гранулированных средах:

$$h_n = k \cdot k_{ТЖ} \cdot R \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{b}{a} \right)^4 \right] \cdot \sqrt{v_{эф}} \cdot \sin \beta \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_q}{k_c \cdot c \cdot \sigma_s}}; \quad (13)$$

$$\varepsilon = k \cdot k_{ТЖ} \cdot \sqrt{v_{эф}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_q}{HB^{1,12} \cdot 10^6}}. \quad (14)$$

Для многих методов отделочно-упрочняющей обработки в гранулированных средах определены частные зависимости. Например, для вибрационной отделочно-упрочняющей

обработки глубину упрочненного слоя и степень деформации можно определить по формуле:

$$h_n = 3,8 \cdot R \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{b}{a} \right)^4 \right] \cdot \sqrt{k_{эф}} \cdot A \cdot \gamma \cdot \sin \beta \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_q}{k_c \cdot c \cdot \sigma_T}}; \quad (15)$$

$$\varepsilon = 0,8 \cdot \sqrt{k_{эф}} \cdot A \cdot \gamma \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_q}{HB^{1,12} \cdot 10^6}}, \quad (16)$$

где $k_{эф}$ – обобщающий коэффициент эффективной скорости; A – амплитуда колебаний рабочей камеры; γ – частота колебаний рабочей камеры.

Для центробежно-ротационной обработки в среде стальных шариков формулы выглядят следующим образом:

$$h_n = 3,8 \cdot R \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{b}{a} \right)^4 \right] \cdot \sqrt{k_{эф}} \cdot \omega \cdot R_{эф} \cdot \sin \beta \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_q}{k_c \cdot c \cdot \sigma_T}}; \quad (17)$$

$$\varepsilon = 0,8 \cdot \sqrt{k_{эф}} \cdot \omega \cdot R_{эф} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_q}{HB^{1,12} \cdot 10^6}}, \quad (18)$$

где $R_{эф}$ – эффективный радиус вращающегося ротора; ω – частота вращения дна рабочей камеры (ротора).

Аналогичные зависимости имеются и для других рассматриваемых методов упрочняющей обработки в гранулированных средах.

Формула для определения времени обработки была получена в следующем виде [5]:

$$t = \frac{4h_{max} \cdot F \cdot R^2}{V_S \cdot f_B}, \quad (20)$$

где F – число повторяющихся ударов в одну и ту же точку обрабатываемой поверхности (зависит от твердости материала и варьируется в диапазоне от 10 до 20) [7 – 10]; V_S – объём деформируемого металла при единичном

взаимодействии частицы среды с обрабатываемой поверхностью; f_b – частота циклов воздействия рабочей среды на поверхность детали.

Результаты исследований

Разработанная система аналитических моделей прошла проверку на адекватность с использованием соответствующих современных критериев и методов статистической обработки результатов экспериментальных исследований. Она позволяет с высокой точностью прогнозировать результаты обработки в гранулированных рабочих средах. На рис. 1 и рис. 2 приведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований. Теоретические зависимости построены с помощью программы MATH CAD и выполнены сплошной линией. Точками обозначены экспериментальные значения. Доверительные интервалы построены с доверительной вероятностью 95 %. Установлена высокая сходимость результатов теоретических и экспериментальных данных. Расхождение не превышает 20 %, что свидетельствует об адекватности полученных зависимостей и возможности осуществления правильных расчетов по ним.

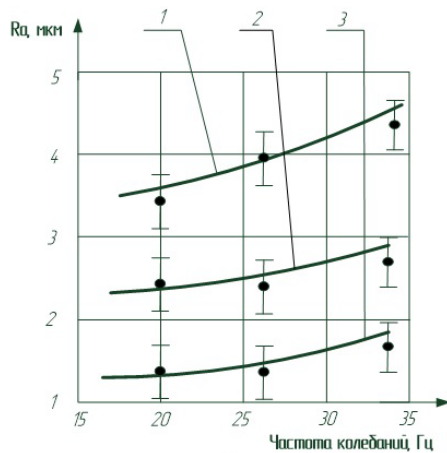


Рис. 1. Зависимость шероховатости от частоты колебаний рабочей камеры при вибрационной обработке в среде абразива. Материал детали – сплав Д16. Амплитуда колебаний камеры – 2,5 мм. Рабочие среды: 1 – призмы трехгранные ПТ 25×25 (зернистость 25); 2 – конуса (зернистость 16); 3 – призмы трехгранные ПТ 15×15 (зернистость 12)

Fig. 1. Dependence of roughness on the oscillation frequency of the processing chamber during vibration treatment in an abrasive medium. The material of the part is alloy D16. The oscillation amplitude of the chamber is 2,5 mm. Working environments: 1 – prisms PT 25×25 (grain size 25), 2 – cones (grain size 16), 3 – prisms PT 15×15 (grain size 12)

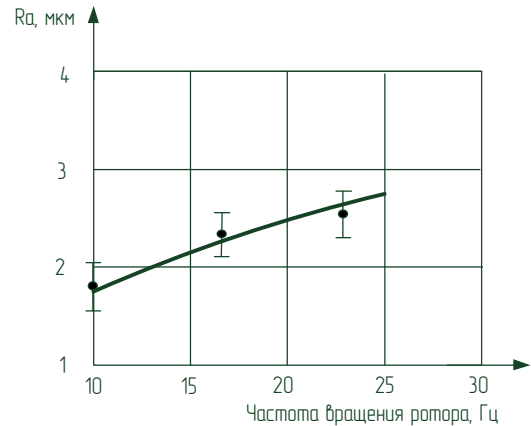


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности от частоты вращения ротора при центробежно-ротационной обработке в среде абразива. Материал детали – сталь 45. Среда – фарфоровые шары (зернистость 8)

Fig. 2. The dependence of the surface roughness on the rotor speed during centrifugal swaging in an abrasive medium. The material of the part is steel 45. Medium – porcelain balls (grain size 8)

Разработана система автоматизированного проектирования технологических процессов. Результаты обработки в гранулированных рабочих средах можно задавать при помощи различных критериев, например, шероховатости обработанной детали, глубины упроченного слоя, степени деформации и т. п. Представленная выше обобщенная теория позволяет прогнозировать величину этих критериев при использовании различных режимов обработки в различных рабочих средах.

В расчетные зависимости также входят физико-механические свойства материала обрабатываемых деталей. Однако, при проведении исследований установлено, что разработанная система моделей не учитывает особенности динамики различных методов обработки и форму частиц среды. Учет этих параметров возможен при использовании пакета прикладных программ Rocky DEM.

Для исследований использовалась методика абразивного износа при трении твердых тел, представленная в работах работ Крагельского И.В. и его учеников [15], а также закон Арчарда, позволяющий оценить степень изнашивания твердых поверхностей детали за счет ударного воздействия частиц. Этот закон связывает потерю объема материала твердой поверхности с работой сил трения, возникающих между частицами и поверхностью.

Использование пакета прикладных программ Rocky DEM позволяет задавать форму рабочей камеры при вибрационной обработке (*U*-образную, торовую, цилиндрическую и др.), динамические параметры процесса обработки, позволяющие рассчитывать эффективную скорость взаимодействия частиц с поверхностью детали, количество частиц в рабочей камере по массе, форму и размеры частиц, массу и форму обрабатываемой детали и её расположение в рабочей камере, материал обрабатываемой детали, соотношение массы детали и массы абразивной среды, физико-механические свойства обрабатываемого материала (твердость, пластичность) и абразивных гранул (плотность, модуль Юнга), коэффициент трения абразивной среды о поверхность детали, свойства смазочно-охлаждающих технологических средств. Пакет позволяет для описания численной модели характеристики обрабатывающих сред (форма и размеры гранул) подбирать их таким образом, чтобы максимально точно повторить поведение сыпучей среды в целом.

В результате выполненной серии численных калибровочных расчетов были подобраны характеристики гранул обрабатывающих сред и обрабатываемой детали. Анализ численных экспериментов показал, что на формирование качества поверхностного слоя существенное влияние оказывают гранулометрические характеристики обрабатывающей среды, геометрические параметры рабочей камеры станка и состояние материала.

Наличие адекватных теоретических зависимостей позволяет произвести ранжирование технологических факторов, выделить главные, которые при проектировании вводятся в виде массивов их значений, и второстепенные, которые можно задавать одним или двумя-тремя значениями. Это позволяет при расчетах технологических параметров получить множество вариантов их соотношения, приводящих к достижению заданных критериев обработки.

После расчета множества вариантов, удовлетворяющих заданным условиям, можно производить выбор наиболее рационального из них, либо оптимизацию технологических процессов обработки детали в гранулированных рабочих средах.

При проектировании соответствующего модуля САПР ТП используется структурная оптимизация (выбор метода обработки, оборудования и рабочих сред) и параметрическая оптимизация (режимы обработки, материал частиц среды и их размеры).

Обсуждение результатов

На основании проведенных исследований и с целью их внедрения в современное цифровое производство разработан программный продукт с использованием среды разработки программного обеспечения Microsoft Visual Studio на языке программирования C#, который позволяет по характеристике детали выбрать возможные методы обработки в гранулированных средах (в порядке предпочтительности), для каждого из них определить технологические режимы и характеристики рабочих сред, обеспечивающие минимальное время обработки, рассчитать необходимое количество станков и рабочих сред для выполнения годовой программы, затем путем экономического сравнения выбрать оптимальный вариант технологического процесса.

Программа имеет удобный интерфейс (рис. 3) и позволяет в диалоговом режиме задавая материал и конструктивные особенности обрабатываемой детали, необходимые параметры качества поверхности и характеристики упрочнения в автоматическом режиме проектировать технологический процесс, выполняя оптимизацию по производительности (времени) обработки (рис. 4) [2, 3, 10].

Аналогичным образом программа описывает другие варианты предлагаемых технологий. Разработка нескольких вариантов позволяет применять в условиях конкретного предприятия уже имеющееся оборудование и рабочие среды без дополнительных затрат на их приобретение.

Планируется внедрение модуля автоматизированной системы проектирования технологических процессов обработки в гранулированных средах на ведущих предприятиях машиностроительного профиля. Ведутся переговоры по апробации программного продукта.

Технологии механической обработки заготовок Technology and equipment of metal processing by pressure

Проектирование технологического процесса обработки в гранулированных средах

Введите исходные данные для проектирования:

Выберите тип детали по классификации: тело вращения

Выберите из перечня конструктивные особенности детали, которые необходимо учитывать при проектировании технологического процесса: у детали нет отверстий

Выберите материал детали: сталь 12X18H10T

Введите массу детали: 0,035 кг

Введите количество деталей, которые необходимо обработать: 349 шт

Введите исходную шероховатость поверхностей (Ra): 3,2 мкм

Введите параметр шероховатости поверхностей, который необходимо получить (Ra): 0,8 мкм

Введите параметры упрочнения, которые необходимо получить:

Глубина упрочненного слоя должна составлять не менее: 150 мкм

Степень деформации должна составлять не менее: 10 %

Сбросить Обработать

Рис. 3. Панель ввода исходных данных для проектирования технологического процесса

Fig. 3. Input panel for input data for process design

Проектирование технологического процесса обработки в гранулированных средах

Предлагаемое количество вариантов технологических процессов: 3

Минимальное время обработки обеспечивает вариант технологии: 1

Для получения заданных параметров обработки детали предлагается

Вариант 1

Использовать в качестве оборудования: станок для вибрационной обработки УВГ 2х50

Одновременно можно обработать: 349 деталей

Необходимое количество станков: 1

Установить следующие режимы обработки:

Частота колебаний рабочей камеры: 26 Гц

Амплитуда колебаний рабочей камеры: 2 мм

Объем загрузки рабочей камеры: 4 дм³

Использовать в качестве рабочей среды: стальные полированные шарики диаметром 6 мм

Осуществлять промывку: 0,2% раствор кальцинированной соды

Время обработки составит: 48 мин

Сохранить Показать следующий вариант Закреть

Рис. 4. Предлагаемый вариант технологии обработки детали

Fig. 4. The proposed version of the part processing technique

Заключение

Повышение требований к качеству поверхностного слоя деталей вызывает необходимость применения современных методов проектирования технологических процессов обработки и расширения применения методов обработки в гранулированных средах на предприятиях различных отраслей промышленности. Несмотря на достаточно глубокое изучение рассматриваемых методов, исследования в данной области можно и нужно продолжать.

В качестве перспективных направлений хотелось бы отметить разработку новых комбинированных методов обработки в гранулированных средах и автоматизацию проектирования технологических процессов обработки. В настоящее время имеются работы по интенсификации вибрационной обработки ультразвуком, нагревом, электрохимическими методами, наложением магнитного поля и др. Аналогичные исследования можно провести и для других вышеуказанных методов, используя различные виды энергии, которые позволяют интенсифицировать процесс обработки. Необходимо создание современных программных продуктов для автоматизации труда инженерных работников машиностроительных предприятий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э.** Основы оптимизации процессов обработки деталей свободным абразивом / Saarboniken / Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015.
2. **Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Murugova E.V.** Technological design processes of vibration processing of particularly accurate parts of agricultural machinery/E3S Web of Conferences. 14th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2021. Rostov-on-Don, 2021. С. 07032. DOI: 10.1051/e3sconf/202127307032
3. **Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Тищенко Р.Г.** Разработка модуля автоматизированной системы проектирования технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки в гранулированных средах/Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса. Сборник научных трудов XXIV Международной научно-практической конференции. В рамках Агропромышленного форума юга России: выставок «Интерагромаш», «Агротехнологии». 2021. С. 185–189.

4. **Тамаркин М.А., Рыжкин А.А., Боков А.И., Тищенко Э.Э.** Разработка технологических процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования с учетом увеличения их жизненного цикла/Физико-механические свойства поверхностного слоя. 2020. С. 54–64.

5. **Шведова А. С., Казаков Д.В.** Формирование параметров упрочнения поверхностного слоя деталей при вибрационной отделочно-упрочняющей обработке / Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. науч. тр. XII-й междунар. науч.-техн. конф., 19-20 марта. Курск, 2015. С. 268–271.

6. **Kolganova E. N., Azarova A.I., Soldatov B.G., Koval N.S., Sanamian G.V.** Properties of vibro-abrasive treatment by combination the kinds and granulometric characteristics of the medium/ // Intelligent Manufacturing and Materials: Intelligent Manufacturing and Materials, IMM 2021, Sevastopol: Scientific.net, 2021. DOI 10.4028/MSF.1037

7. **Шведова А. С.** Повышение эксплуатационных свойств деталей при обработке динамическими методами поверхностного пластического деформирования / Вестник ДГТУ. 2015. Т. 15. № 1 (80). С. 114–120.

8. **Шведова А. С., Стельмах А. В.** Оптимизация технологических процессов обработки динамических методов обработки поверхностным пластическим деформированием /Инновационные технологии в машиностроении и металлургии: сб. ст. VII науч.-практ. конф., 9-11 сентября. Ростов н/Д, 2015. С. 7–17.

9. **Шведова А. С., Исаев А. Г., Новокрещенов С. А.** Технология оптимизации процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования / Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2015: сб. тр. XVI Всероссий. науч.-техн. конф. 17-18 ноября. Пермь, 2015. С. 240–244.

10. **Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Murugova E.V.** Design of high precision machining part processes in free abrasives / Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. Т. 247. С. 157-164/ DOI:10.1007/978-981-16-3844-2_17

11. **Колганова Е.Н.** Теоретические и экспериментальные исследования процесса удаления заусенца свободными абразивами / Упрочняющие технологии и покрытия. – 2020. Т. 16. № 7 (187). С. 300–305.

12. **Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Shvedova A.S.** Optimization of Dynamic Surface Plastic Deformation in Machining/ Russian Engineering Research, 2018, Vol. 38, No. 9, pp. 726–727. DOI:10.3103/S1068798X18090277

13. **Королёв А.В.** Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. Саратов: из-во Саратов. ун-та, 1975. 191 с.

14. **Сидякин Ю.И.** Разработка методов расчета упругопластических контактных деформаций в процессах упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием: автореф. дисс. докт. техн. наук: 01.02.06 / Сидякин Юрий Иванович. М., 2002. 34 с.

15. **Крагельский И.В.** и др. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение. 1977. 526 с.

REFERENCES

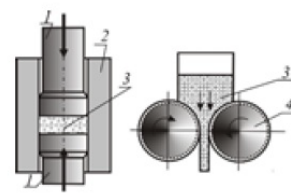
1. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E. Fundamentals of process optimizing for abrasive working of parts / Saarbrücken / Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015
2. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Murugova E.V. Technological design processes of vibration processing of particularly accurate parts of agricultural machinery/E3S Web of Conferences. 14th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2021. Rostov-on-Don, 2021. C. 07032. DOI: 10.1051/e3sconf/202127307032
3. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Tishchenko R.G. Development of a module of an automated system for designing technological processes of finishing and hardening processing in granulated media/The state and prospects of development of the agro-industrial complex. Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conference. Within the framework of the Agro-Industrial forum of the South of Russia: exhibitions «Interagromash», «Agrotechnologies», 2021. pp. 185–189.
4. Tamarkin M.A., Ryzhkin A.A., Bokov A.I., Tishchenko E.E. Development of technological processes of processing of plates by dynamic methods of surface plastic deformation taking into account the increase in their life cycle / Physico-mechanical properties of the surface layer, 2020, pp. 54–64
5. Shvedova A.S., Kazakov D.V. Formation of parameters of hardening of the surface layer of parts during vibration finishing and hardening treatment / Modern tool systems, information technologies and innovations: proceedings of XII-th International Scientific and Technical Conference, March, 19-20. Kursk, 2015, pp. 268–271.
6. Kolganova E.N., Azarova A.I., Soldatov B.G., Koval N.S., Sanamian G.V. Properties of vibro-abrasive treatment by combination the kinds and granulometric characteristics of the medium/ // Intelligent Manufacturing and Materials: Intelligent Manufacturing and Materials, IMM 2021, Sevastopol: Scientific.net, 2021. DOI 10.4028/MSF.1037
7. Shvedova A.S. Improvement of operational properties of parts during processing by dynamic surface plastic deformation / Bulletin of DSTU, 2015, vol. 15, No. 1 (80), pp. 114–120.
8. Shvedova A.S., Stelmakh A.V. Engineering techniques optimization of dynamic processing methods for surface plastic deformation / Innovation Technologies in Mechanical Engineering and Metallurgy: Proceedings of the VII-th Scientif.-Pract. Conf., September 9-11. Rostov-upon-Don, 2015, pp. 7–17.
9. Shvedova A.S., Isaev A.G., Novokreshchenov S. A. Machining processes optimization technology in dynamic methods of surface plastic deformation / Aerospace engineering, high technologies and innovations, 2015: proceedings of the XVI-th All-Russian Scientific and Technical Conf., November, 17-18. Perm, 2015, pp. 240–244.
10. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Murugova E.V. Design of high precision machining part processes in free abrasives / Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. T. 247. C. 157–164/ DOI:10.1007/978-981-16-3844-2_17
11. Kolganova E.N. Theoretical and experimental studies of the deburring process using free abrasives / Hardening technologies and coatings, 2020, vol. 16, No. 7 (187), pp. 300–305.
12. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Shvedova A.S. Optimization of Dynamic Surface Plastic Deformation in Machining/ Russian Engineering Research, 2018, Vol. 38, No. 9, pp. 726–727. DOI:10.3103/S1068798X18090277
13. Korolev A.V. Investigation of the processes of formation of tool surfaces and parts during abrasive processing. Saratov, Izdatel'stvo Sarat. Un-ta, 1975. 212 p.
14. Sidyakin Yu.I. Development of methods for calculating elastoplastic contact deformations in the processes of hardening of parts by surface plastic deformation: extended abstract of Doctor's thesis, 01.02.06 / Sidyakin Yuri Ivanovich, Moscow, 2002, 34 p.
15. Kragelsky I.V. et al. Fundamentals of calculations for friction and wear. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 526 p.

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

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

Статья поступила в редакцию 10.07.2023; одобрена после рецензирования 17.07.2023; принята к публикации 25.07.2023.

The article was submitted 10.07.2023; approved after reviewing 17.07.2023; asseped for publication 25.07.2023.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №9 (147). С.27-38.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №9 (147). P. 27-38.

Научная статья
УДК 621.923.9
doi: 10.30987/2223-4608-2023-27-38

Инновационные технологии повышения производительности и качества механической обработки полимерных композиционных материалов

Владимир Федорович Макаров¹, д.т.н.

Михаил Владимирович Песин², д.т.н.

Артем Александрович Волковский³, аспирант

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

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

² m.pesin@mail.ru://orcid.org/0000-0000-0000-0000

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

Аннотация. В работе решена актуальная задача повышения производительности и качества обработки новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углепластика при обработке деталей ракетно-космической и авиационной техники. Одним из прорывов российского отечественного машиностроения является внедрение элементов крыла нового гражданского лайнера МС-21, производство корпусов шумоглушения, лопаток компрессора и других деталей газотурбинных двигателей из углепластика, требующих проведения высококачественной и производительной механической обработки. Механическая обработка данных изделий включает в себе сложности, вызванные требованиями конструкторской документации по обеспечению необходимой шероховатости, отсутствия дефектов обработанной поверхности и высокой прочности окончательно обработанной детали. В данной статье представлены результаты исследования применения высокопроизводительной технологии последовательной лезвийно-абразивной обработки изделий из ПКМ на основе углеволокна. Определена рациональная геометрия лезвийного режущего инструмента для предварительной черновой обработки ПКМ. Разработана адекватная эмпирическая математическая модель влияния режимов резания при фрезеровании на шероховатость поверхностного слоя, а также определены рациональные режимы обработки. Представлены результаты экспериментальных исследований абразивной обработки ПКМ жесткими шлифовальными кругами из электрокорунда белого, карбида кремния зеленого и эльбора. Представлены зависимости шероховатости поверхностного слоя от режимов шлифования. По результатам исследований согласно разработанной математической модели определены рациональные характеристики шлифовальных кругов и режимы обработки. Впервые рассмотрены вопросы влияния дефектов механической обработки на прочность ПКМ. Представлены сравнительные испытания на прочность при растяжении и разрыве образцов, изготовленных традиционной лезвийной обработкой и последовательной лезвийно-абразивной обработкой. Доказано повышение прочности на растяжение и разрыв деталей из ПКМ, изготовленных согласно технологии последовательной лезвийно-абразивной обработки на 20...30 % по сравнению с традиционной лезвийной обработкой.

Ключевые слова: последовательная лезвийно-абразивная обработка, полимерные композиционные материалы, абразивная обработка ПКМ, шлифование, фрезерование ПКМ, механическая обработка

Для цитирования: Макаров В.Ф., Песин М.В., Волковский А.А. Инновационные технологии повышения производительности и качества механической обработки полимерных композиционных материалов // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 9 (147). С. 27–38. doi: 10.30987/2223-4608-2023-27-38

Innovative technologies for improving the efficiency and machining operating quality for polymer composite materials

Vladimir F. Makarov¹, D. Eng.

Mikhail V. Pesin², D. Eng.

Artem A. Volkovsky³, PhD student

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

¹ makarovv@pstu.ru

² m.pesin@mail.ru

³ VolkovskiiWork@mail.ru

Abstract. An urgent problem for improving the efficiency and machining operation quality for new polymer composite materials (PCM) based on carbon fiber in the operation of rocket and space equipment and aircraft engineering parts is solved in the article. One of the breakthroughs of the Russian domestic engineering is the introduction of wing elements of the new MS-21 civil airliner, the production of noise suppression bodies, compressor blades and other parts of gas turbine engines made of carbon fiber, requiring high-quality and productive machining. Machining operation of these products involves difficulties caused by the requirements of the design documentation to ensure the necessary degree of roughness, soundness of the machined surface and high strength of the finish-machined component. This article presents the results of a study of the application of high-performance technology of sequential blade-abrasive processing of carbon fiber-based PCM products. This article presents the results of a study of the application of high-performance technology of sequential blade-abrasive operation of carbon fiber-based PCM products. The rational geometry of the blade cutting tool for primary machining of the PCM is determined. An adequate empirical mathematical model of cutting modes influence on the surface layer roughness in the milling operation has been developed, as well as rational processing modes have been determined. The results of experimental studies of the abrasion of PCM with rigid grinding wheels made of white electrocorundum, green silicon carbide and elborum are presented. The dependences of the surface layer roughness on the grinding modes are given. According to the research results and the developed mathematical model, the rational characteristics of grinding wheels and processing modes are determined. For the first time, the issues of the influence of machining defects on the strength of PCM are viewed. Comparative tensile and tear strength tests of samples made by traditional edge cutting machining and sequential edge-cutting-abrasive operation are presented. The increase in tensile and tear strength of PCM parts manufactured according to the technology of sequential edge-cutting-abrasive operation by 20...30 % compared to traditional edge-cutting operation has been proved.

Keywords: sequential edge-cutting-abrasive operation, polymer composite materials, abrasion of PCM, grinding, milling of PCM, machining

For citation: Makarov V.F., Pesin M.V., Volkovsky A.A. Innovative technologies for improving the efficiency and machining operating quality for polymer composite materials / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 9 (147). P. 27–38. doi: 10.30987/2223-4608-2023-27-38

Введение

Настоящие темпы развития машиностроительной отрасли на территории Российской Федерации влекут за собой необходимость быстрой разработки и внедрения инновационных технологий в производственные процессы предприятий. Однако, несмотря на высокий уровень квалификации инженерно-технического состава, наиболее актуальным является вопрос освоения технологий механической обработки новых конструкционных материалов. Наибольшее развитие в данном направлении получают композиционные материалы на полимерной основе [1, 2]. Полимерные композиционные материалы представляют собой двухсоставной элемент, заключающий в себе полимерную матрицу и

армирующие волокна, соединенные между собой на основе адгезионного сцепления при высокотемпературном прессовании. Комбинация вышеуказанных материалов позволяет обеспечить совокупность низкой массы и высокой прочности изделия, что влияет на повышение энергосиловых характеристик машин, путем замещения традиционных материалов и сплавов композитами [3].

Наиболее передовыми направлениями в машиностроительной отрасли, где композиты на полимерной матрице получили широкое применение, является авиастроение в конструкции нового магистрального лайнера MS-21, новых авиадвигателей ПД8, ПД-14 и ПД-35, автомобилестроение в виде разработок кузовов, бамперов и других деталей из углепластика, в конструкциях изделий военно-

промышленного комплекса, обечаек и корпусов ракетно-космической техники.

В свою очередь, ввиду особых анизотропных свойств полимерных композитных материалов (ПКМ) при механической обработке этих материалов возникает много проблем с обеспечением качества поверхностного слоя и образования дефектов. Оказалось, что прочности адгезионных связей между углеволокном и полимерной матрицей недостаточно при механической обработке. Происходит разрушение поверхностного слоя с образованием дефектов. К основным типам дефектов относятся деламинация крайних слоев, ворсистость обработанной поверхности, термострукция и образование микротрещин в матрице композита [4 – 6].

При исследовании причин возникновения и разработки методики устранения вышеуказанных дефектов определены основополагающие факторы, которые оказывают непосредственное влияние на качество обработанной поверхности. К ним относятся: геометрия режущего инструмента, твердость режущего инструмента и режимы механической обработки [6].

По результатам литературного обзора установлено, что обеспечение показателей качества поверхностного слоя, достигается путем применения высокоскоростного фрезерования, применения методики термомеханического воздействия, разработки специальной геометрии режущего инструмента и применения сверхтвердых режущих материалов. Каждая из представленных технологий не исключает образование дефектного слоя и сопровождается трещинами в матрице, деламинацией и другими отклонениями от требований конструкторской документации.

Одним из эффективных методов механической обработки ПКМ является абразивная обработка гибким инструментом. Однако применение гибких лепестковых шлифовальных кругов является безразмерной обработкой и не может применяться в серийных технологических процессах ввиду отсутствия контроля над снимаемым припуском и, как следствие, над производительностью процесса.

На основании проведенного анализа механической обработки ПКМ различными лезвийными инструментами предполагается, что

обработка жестким абразивным инструментом, позволит обеспечить наилучшую шероховатость обработанной поверхности $Ra = 0,4 \dots 0,8$ мкм и точность IT6, IT7, однако, этот метод механической обработки является малоисследованным [7 – 9]. При предварительном сопоставлении показателей качества, полученных при обработке лезвийным и абразивным инструментом, последний занимает преимущественную позицию.

Повышение качества поверхностного слоя при абразивной обработке обеспечивается за счет применения высоких скоростей резания 35...50 м/с, что превосходит лезвийную обработку в 10 – 15 раз, а так высокое режущее воздействие на перерезаемые тонкие волокна углепластика острой и твердой режущей кромки абразивных зерен. В результате, абразивное зерно перерезает с высокой скоростью весьма твердое углеволокно ПКМ не деформируя, не вытягивая и не ломая его, что, как доказано, происходит при лезвийной обработке [8].

В тоже время, стоит отметить, что применение абразивной обработки не позволяет снимать большие припуски с заготовки, требуется проведение большого числа проходов, что влияет на снижение производительности механической обработки. Отсюда следует, что обеспечение высокой производительности технологического процесса механической обработки может быть достигнуто путем применения последовательной лезвийно-абразивной обработки. Эффективность данной технологии возникает в результате снятия большого припуска на черновом этапе обработки и последующей финишной обработкой жестким шлифовальным кругом с целью устранения дефектов и повышения качества поверхностного слоя и прочности деталей из ПКМ. Эти предположения необходимо проверить экспериментально.

Методика проведения экспериментального исследования

В основу экспериментальных исследований заложен сравнительный анализ качества поверхностного слоя по параметру шероховатости Ra , полученного в результате механической обработки тремя видами специального лезвийного режущего инструмента для

обработки композитов и различных видов абразивного инструмента. В работе использовался метод применения полного факторного эксперимента вида 2^3 . Определялась рациональная геометрия и режимы лезвийной обработки. Также проводился сравнительный анализ качества поверхностного слоя по шероховатости при обработке жесткими

шлифовальными кругами, где определялись рациональные характеристики шлифовальных кругов и режимов резания. Эксперименты проводились по плану 2^3 в виде восьми опытов с получением линейной математической модели зависимости шероховатости от переменных режимов резания (табл. 1).

1. Матрица планирования 2^3

1. Planning matrix 2^3

№ опыта	x_0	Планирование							Параметр Ra , мкм		
		x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y_{i1}	y_{i2}	y_{i3}
1	+1	-	-	-	+	+	+	-			
2	+1	+	-	-	-	-	+	+			
3	+1	-	+	-	-	-	-	+			
4	+1	+	+	-	+	+	-	-			
5	+1	-	-	+	+	+	-	+			
6	+1	+	-	+	-	-	-	-			
7	+1	-	+	+	-	-	+	-			
8	+1	+	+	+	+	+	+	+			

В качестве переменных факторов приняты такие режимы лезвийной обработки фрезерованием как глубина резания t , мм; частота вращения шпинделя n об/мин (диаметр фрезы 10 мм); минутная подача S , мм/мин. Уровни варьирования факторов представлены в табл. 2. В качестве переменных факторов,

влияющих на качество поверхностного слоя при абразивной обработке, определены: глубина шлифования на проход t , мм; скорость подачи стола S , м/мин; зернистость F шлифовального круга. Уровни варьирования представлены в табл. 2.

2. Уровни варьирования факторов

2. Levels of factors variation

Вид обработки	Лезвийная обработка (фрезерование)			Абразивная обработка (плоское шлифование)		
	$X1$ n , об/мин	$X2$ S , мм/мин	$X3$ t , мм	$X1$ F	$X2$ t , мм	$X3$ S , м/мин
Основной уровень	1250	100	2,0	63	0,15	7,5
Интервал варьирования	990	35	1,0	17	0,1	2,5
Верхний уровень	2240	135	3,0	80	0,25	10
Нижний уровень	260	65	1,0	46	0,05	5,0

В качестве обрабатываемого материала принимался углепластик ВКУ-39 с укладкой слоев 0/45/90/-45. Станочное оборудование и средства технического оснащения представлены (СТО) в табл. 3. Станочное оборудование модернизировано дополнительно

системой вытяжки отработанных продуктов в виде пыли при резании ПКМ с целью обеспечения дополнительной защиты здоровья оператора (рис. 1).

3. Средства технического оснащения экспериментального исследования

3. Means of technical equipment of experimental research

Оборудование и СТО	Наименование	Назначение
Универсально-фрезерный станок	JET 1452TSDRO	Предварительная обработка ПКМ фрезерованием
Фреза роутер для обработки ПКМ, диаметр 10 мм	Концевая	
	Роутер	
Плоскошлифовальный станок	Концевая прямоугольная $Z = 6$	Финишная обработка ПКМ плоским шлифованием
	JETJPSG 1224H	
Режущий инструмент 300×76×40мм	25AF46G14V 35 2250 25AF46K 7 V 35 2250 64CF60 K 7 V35 2250 25AF60 K 7 V 35 2250 64CF80 K 7 V35 2250 1A1-100/80 K5 V35	
Пирометр	BoschUniversalTerm	Измерение температуры в верхних слоях заготовки
Профилометр	MarSurf PS10	Оценка качества обработанной поверхности по параметру шероховатости Ra , мкм
Цифровой микроскоп	BM-200 LCD	Визуальная оценка наличия и вида дефектного слоя

Выбор параметров исследования обосновывается физико-механическими свойствами связующего материала композита, который представляет собой эпоксидную смолу. Последняя, относится к классу термореактивных полимеров, поэтому необходимо вести контроль температуры с целью снижения вероятности достижения температуры разложения смолы. Параметр шероховатости Ra

определен с учетом комплексности предоставляемой информации о качестве обработанной поверхности, в том числе и наличии дефектного слоя.

Общий вид проведения экспериментальных исследований при шлифовании на плоскошлифовальном станке типа ЗГ71 представлены на рис 1.

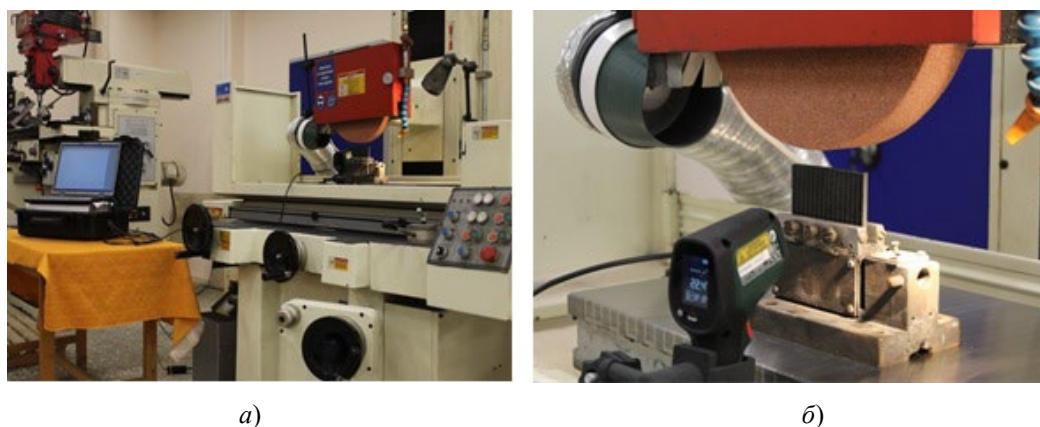


Рис. 1. Экспериментальная установка:

a – общий вид проведения исследований; b – зона обработки при плоском шлифовании

Fig. 1. Experimental apparatus:

a – general view of the research; b – cutting zone during flat grinding

Выбор параметров исследования обосновывается физико-механическими свойствами связующего материала композита, который представляет собой эпоксидную смолу. Последняя, относится к классу термореактивных полимеров, поэтому необходимо вести контроль температуры с целью снижения вероятности достижения температуры разложения смолы. Параметр шероховатости Ra определен с учетом комплексности предоставляемой информации о качестве обработанной поверхности, в том числе и наличии дефектного слоя.

Общий вид проведения экспериментальных исследований при шлифовании на плоскошлифовальном станке типа 3Г71 представлены на рис 1.

Анализ результатов исследований

В результате проведенных сравнительных экспериментальных исследований фрезерования различными концевыми фрезами установлено, что наилучшие показатели шероховатость поверхностного слоя обеспечивает применение твердосплавной концевой прямозубой фрезы. Данный инструмент позволяет снизить шероховатость поверхностного слоя с $Ra = 1,303$ мкм до $Ra = 0,537$ мкм при прочих равных режимах обработки, что и стандартной концевой фрезой, и специальной фрезой роутером. Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 4.

4. Результаты экспериментальных исследований влияния режимов резания на шероховатость поверхностного слоя Ra и время T при фрезеровании торцов заготовки из углепластика ВКУ-39

4. The results of experimental studies of cutting modes influence on the roughness of the surface layer Ra and the time T when milling the ends of a carbon fiber workpiece VCU-39

№	n , об/мин	S , мм/мин	t , мм	Ra_1 мкм	Ra_2 мкм	Ra_3 мкм	Ra_{cp} мкм	T_1 , с	T_2 , с	T_3 , с	T_{cp} , с
1	260	65	1,0	0,566	0,583	0,579	0,576	35,8	35,5	36,0	35,8
2	2240	65	1,0	0,537	0,541	0,535	0,539	31,3	32,1	35,3	32,9
3	260	135	1,0	0,805	0,819	0,823	0,816	32,9	33,3	32,7	32,97
4	2240	135	1,0	0,611	0,618	0,619	0,616	26,5	28,1	29,2	27,9
5	260	65	3,0	0,692	0,683	0,68	0,685	42,3	40,0	40,2	40,8
6	2240	65	3,0	0,547	0,559	0,568	0,558	36,6	36,8	36,6	36,7
7	260	135	3,0	0,942	0,961	0,933	0,945	36,1	34,7	34,8	35,2
8	2240	135	3,0	0,886	0,9	0,906	0,897	32,8	33,5	32,7	33

При визуальном анализе поверхностного слоя под микроскопом обнаружено наличие дефектов, т. е. обработка фрезерованием

лучшим инструментом сопровождается образованием трещин между препрегами заготовки (рис. 2).

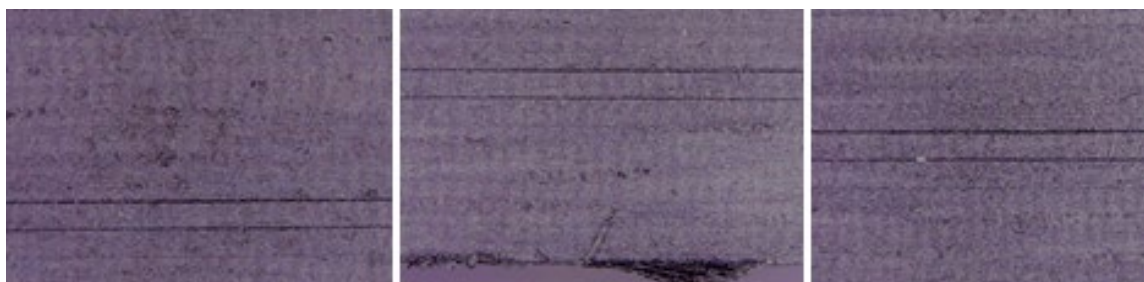


Рис. 2. Общий вид трещин в поверхностном слое углепластика в результате фрезерования концевой прямозубой твердосплавной фрезой на рациональных режимах резания

Fig. 2. General view of cracks in the surface layer of carbon fiber as a result of milling with a straight-toothed solid-alloy milling cutter at rational cutting modes

Кроме того, проявились дефекты, характерные для фрезерования в виде образования деламации и ворсистости крайних слоев заготовки (рис. 3).

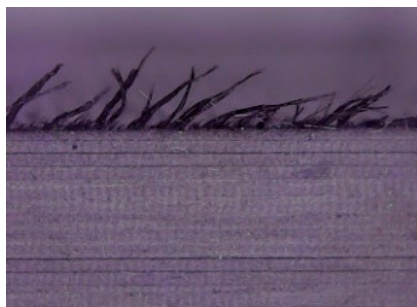
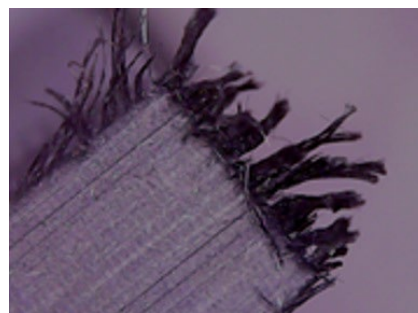


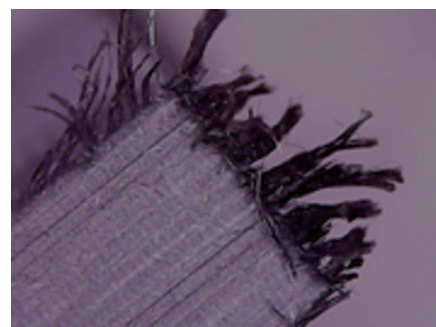
Рис. 3. Общий вид дефектов в виде деламации и ворсистости краевых слоев заготовки в результате фрезерования прямозубой фрезой при $n = 2240$ об/мин, $S = 65$ мм/мин и $t = 1,0$ мм

Fig. 3. General view of defects in the form of delamination and hairiness of the edge layers of the workpiece as a result of milling using a straight-toothed milling cutter at $n = 2240$ ob/min, $S = 65$ mm/min and $t = 1,0$ mm

Причинами образования этих дефектов является упругая деформация твердых армирующих волокон, хрупкое разрушение матрицы под действием силы давления передней поверхности режущих лезвий фрезы, что приводит к разрушению адгезионных связей матрицы и волокон, изгибу и вырыву волокон из матрицы, обрыву, поломки части волокон и частичному их разрушению. Наибольшую величину ворсистости можно наблюдать у выходной кромки, что говорит о накопительном характере упругой деформации волокон эффекте и предразрушении связующего композита в виде трещин (рис. 4).



а)



б)

Рис. 4. Дефектообразование на входной и выходной кромке при обработке прямозубой фрезой для ПКМ: а – входная кромка; б – выходная кромка

Fig. 4. Defect formation on the input and output edges in the operation of a straight-tooth cutter for PCM: а – input edge; б – output edge

Стабильно течение процесса обработки, влечет за собой низкое образование дефектов на обработанной поверхности, располагающихся в теле заготовки, но не исключая их наличие на боковых кромках. Так же следует отметить, что основной причиной снижения параметра шероховатости обработанной поверхности является износ инструмента и образование трещин, что представлено на рис. 5.

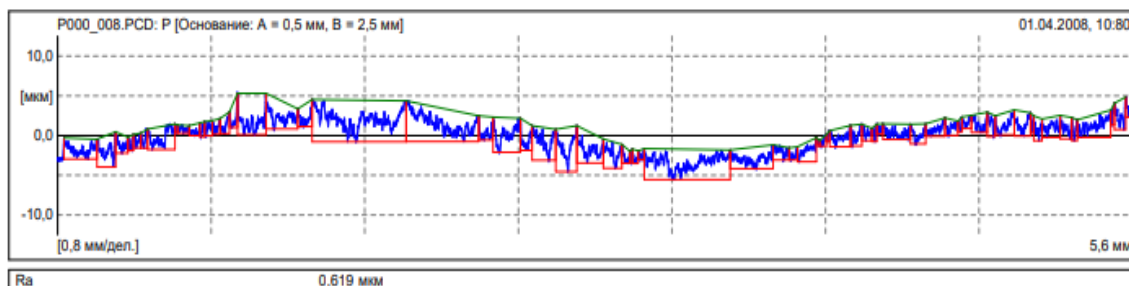


Рис. 5. Микронеровности обработанной поверхности

Fig. 5. Micro-roughness of the machined surface

Образование микронеровности в поперечном сечении заготовки вызвано трещинами в матрице полимерного

композиционного материала, что приводит к деламации и образованию волнистости поверхностного слоя (рис. 6).

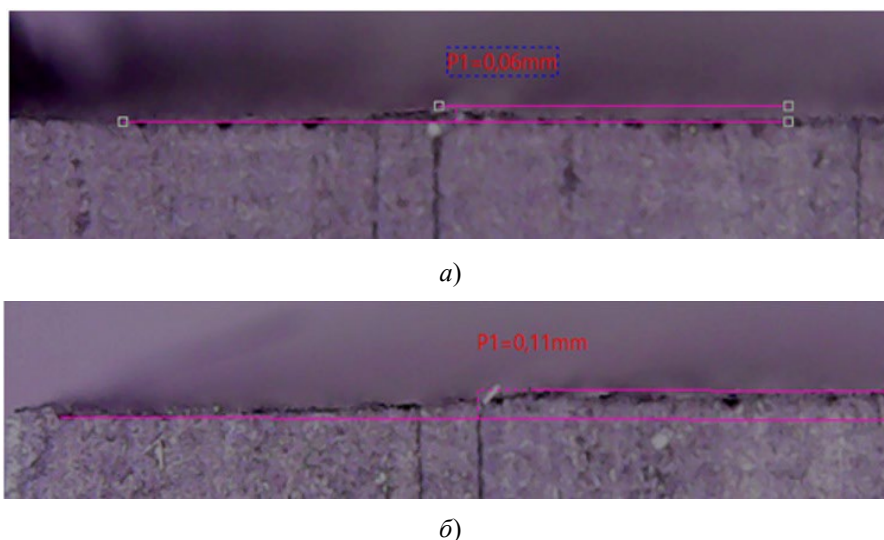


Рис. 6. Измерение высоты микронеровности в поперечном сечении в результате образования трещины между слоями заготовки при режимах обработки $n = 260$ об/мин, $S = 135$ мм/мин и $t = 3,0$ мм:

a – входная кромка; b – выходная кромка

Fig. 6. Measurement of the height of the microroughness in the cross section as a result of the formation of cracks between the layers of the workpiece at processing modes $n = 260$ rpm, $S = 135$ mm/min and $t = 3,0$ mm:

a – input edge; b – output edge

Как можно отметить, в поперечном сечении заготовки по причине трещинообразования возникает возвышение и волнистость поверхности, достигающей в размере от 0,05 мм, до 0,15 мм. В дополнение к образованию микронеровностей обработанная поверхность содержит в себе элементы вырывания образованные вдоль линии микротрещины, что при измерениях параметра шероховатости представляет собой максимум впадины. На основании проведенного экспериментального исследования можно утверждать, что применение лезвийного инструмента при фрезеровании полимерных композиционных материалов из углепластика ВКУ-39 может сопровождаться использованием специальной твердосплавной концевой фрезой роутером при глубине резания $t = 1,0$ мм, частоте вращения шпинделя $n = 2240$ об/мин и подаче $S = 65$ мм/мин, что позволит обеспечить наилучшие показатели шероховатости обработанной поверхности.

В свою очередь, устранение дефектов поверхностного слоя в результате абразивной обработки исследовано с применением абразивных шлифовальных кругов из электрокорунда белого, карбида кремния зеленого и эльбора. Наихудшие результаты шероховатости обработанной поверхности в ходе экспериментальных исследований продемонстрировал шлифовальный круг из эльбора. Данное

явление может быть объяснено следующим механизмом протекания процесса резания: ввиду высокой твердости абразивного зерна исключается его износ и вырывание из связующего круга, что приводит к забиванию пор между абразивными частицами. Отсутствие явления самозатачивания влечет за собой рост упругих деформаций, т. к. снижается режущая способность периферии абразивного круга.

Упругие деформации, в свою очередь, вызывают рост сил резания и напряжений внутри заготовки, т. о. стимулируется повышение температуры и образование трещин, деламинации и термодеструкции на поверхностном слое заготовки. Аналогичную динамику течения процесса резания показывает применение в качестве материала абразивных частиц карбида кремния зеленого. На основании возникновения дефектов данного рода, вышеуказанные шлифовальные круги не рекомендуются к применению при абразивной обработке ПКМ.

Наиболее лучшие показатели шероховатости обработанной поверхности были достигнуты путем применения высокопористых шлифовальных кругов из электрокорунда белого 25AF46 G14 V35 2250. Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 5.

5. Результаты экспериментальных исследований влияния режимов шлифования и характеристик шлифовальных кругов на шероховатость поверхностного слоя

5. Results of experimental studies of the effect of grinding modes and characteristics of grinding wheels on the roughness of the surface layer

№	F	t , мм	S , мм/мин	Ra_1 , мкм	Ra_2 , мкм	Ra_3 , мкм	Ra_{cp}
1	46	0,05	5,0	0,218	0,224	0,241	0,227
2	80	0,05	5,0	0,587	0,596	0,581	0,588
3	46	0,25	5,0	0,35	0,376	0,368	0,365
4	80	0,25	5,0	0,622	0,634	0,641	0,632
5	46	0,05	10	0,476	0,481	0,462	0,473
6	80	0,05	10	0,604	0,619	0,621	0,615
7	46	0,25	10	0,536	0,544	0,534	0,538
8	80	0,25	10	0,662	0,671	0,668	0,667

Стабильность процесса плоского шлифования и сохранения режущей способности обеспечивается при глубине резания до 0,15 мм, что подтверждается оценкой износа абразивного круга. Рис. 7 демонстрирует локальное изнашивание периферии полимерной матрицей и перерезанными армирующими волокнами композита. Сохранение пористости режущего инструмента, обеспечивает действие свойства его самозатачивания. Так же стоит отметить, что вышеуказанные значения глубины обработки, сопровождаются допустимой температурой верхних слоев заготовки.

Как можно отметить, повышение качества поверхностного слоя при визуальном осмотре достигнуто при повышении количества проходов. Первый проход при глубине резания 0,05 мм и скорости подачи стола 5 м/мин позволяет устранить ворсистость крайних слоев заготовки, полученную ранее. Однако ввиду глубины и протяженности трещин в матрице композита, повышение качества

обработанной поверхности требует увеличение количества проходов до полного исключения дефектов. Путем многопроходного движения инструмента достигается точность поверхности IT6-7 (рис. 8)

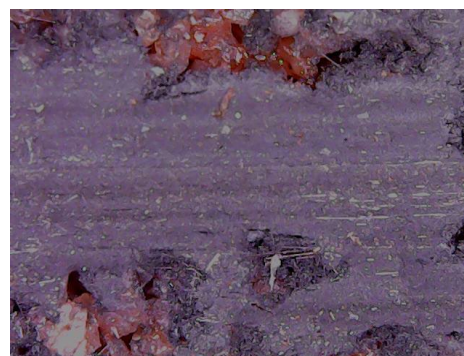


Рис. 7. Засаливание периферии шлифовального круга 25AF46 K7 V35 2250 при глубине резания $t = 0,05$ мм и $S = 5,0$ м/мин

Fig. 7. Loading of the grinding wheel face 25AF46 K7 V35 2250 at cutting depth $t = 0,05$ mm and $S = 5,0$ m/min

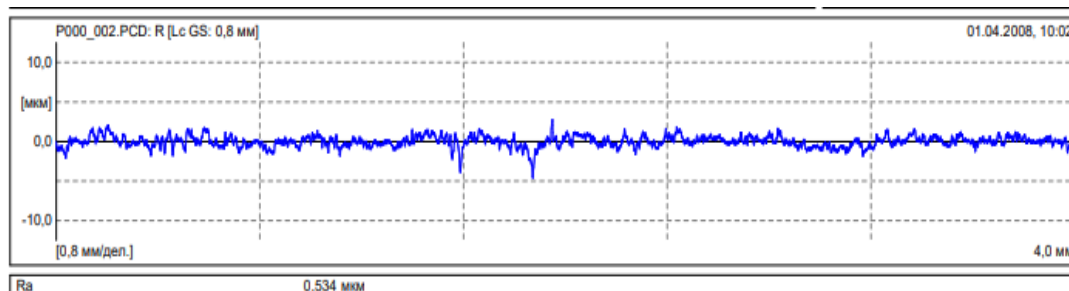


Рис. 8. Профилограмма поверхностного слоя, полученного в результате первого прохода при шлифовании с $S = 5,0$ м/мин и $t = 0,05$ мм

Fig. 8. Profilogram of the surface layer obtained as a result of the first pass during grinding with $S = 5,0$ m/min and $t = 0,05$ mm

Обеспечение хорошего качества поверхностного слоя является следствием высокой пористости и рациональной зернистости шлифовальных кругов. Высокая пористость кругов в совокупности с зернистостью позволяют сохранять режущую способность периферии круга и тем самым обеспечивать способность самозатачиваться в процессе резания (рис. 9).

По результатам экспериментальных исследований, представленным в табл. 4 – 5, а также матрице планирования полного факторного эксперимента разработаны линейные математические модели зависимости шероховатости поверхностного слоя от режимов лезвийной обработки фрезерованием и абразивной обработки плоским шлифованием (табл. 6).



Рис. 9. Общий вид периферии высокопористого шлифовального круга 25A F46 G14 V35 после обработки образцов из ПКМ при $S = 5,0$ м/мин и $t = 0,05$ мм

Рис. 9. General view of the periphery of a highly porous grinding wheel 25A F46 G14 V35 after processing samples from PCM at $S = 5,0$ m/min and $t = 0,05$ mm

6. Математические модели, устанавливающие влияние режимов обработки на шероховатость поверхностного слоя при последовательной лезвийно-абразивной обработке

6. Mathematical models that establish the effect of processing modes on the roughness of the surface layer during sequential edge-cutting abrasion

Инструмент	Линейная математическая модель
Лезвийная обработка фрезерованием специальной твердосплавной прямозубой концевой фрезой	$Ra = 0,2731 + 0,000132n + 0,003835S + 0,0655t - 0,00000202nS - 0,000078nt - 0,00008St + 0,00000086nSt$
Абразивная обработка шлифовальным высокопористым кругом 25AF45G14V 35 2250	$Ra = -0,9095 + 0,0183F + 2,21t + 0,117S - 0,02536Ft - 0,0014Fs - 0,17tS + 0,00235FtS$

Данные математические модели прошли проверку и получили положительную оценку однородности выборочной дисперсии по критерию Кохрена G_p , значимости выборочных коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента t_p и адекватности математической модели по критерию Фишера F_p .

Очень важным этапом экспериментального исследования является сравнительная оценка прочности изделий из ПКМ, обработанных традиционным лезвийным инструментом и изготовленных методом последовательной лезвийно-абразивной обработки с целью установления зависимости влияния дефектов поверхностного слоя при механической обработке на снижения прочности изделий из

ПКМ. Испытания проводились на универсальной разрывной электромеханической машине Instron 5965 путем последовательного нагружения образца на растяжение до 70 Кн и записи линейного удлинения. В качестве заготовок приняты четыре образца, обработанных по новой технологии последовательной лезвийно-абразивной обработки (№ 1 – 4), а также четыре образца, обработанных лучшим среди исследованных лезвийным инструментом (№ 5 – 8) на рациональных режимах резания согласно математической модели. Автоматически проводилась запись нагрузки и величины растяжения образца при его разрыве. Результаты экспериментальных исследований сведены в табл. 7. и представлены на графиках записи испытаний на рис. 10.

7. Сводные результаты прочностных испытаний ПКМ на растяжение и разрыв

7. Summary results of tensile and tensile strength tests

Последовательная лезвийно-абразивная обработка			Лезвийная обработка фрезерованием		
№ образца	Сила растяжения, кН	Перемещение до разрыва, мм	№ образца	Сила растяжения, кН	Перемещение до разрыва, мм
1	64	8,84	5	42	6,65
2	49	7,95	6	36	6,28
3	48	7,92	7	48	7,32
4	50	8,1	8	42	6,61
Среднее значение	52,7	8,2	Среднее значение	42	6,65

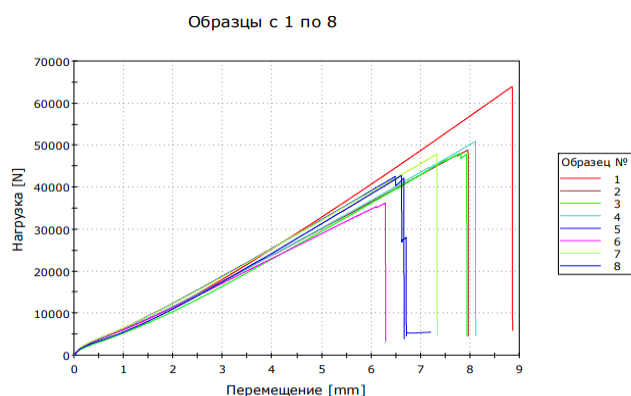


Рис. 10. Графики испытаний на растяжение и разрыв образцов из ПКМ, обработанных по новой технологии последовательной лезвийно-абразивной обработки (№ 1 – 4) и обработанных фрезерованием

Fig. 10. Plots of tensile and rupture tests of samples from PCM treated according to the new technology of sequential blade-abrasive processing (No. 1 – 4) and processed by milling

В результате анализа полученных данных установлено, что применения последовательной комбинированной лезвийно-абразивной обработки приводит к повышению прочности ПКМ на разрыв и разрушение в среднем на 25 % по сравнению с лезвийной обработкой фрезерованием за счет снижения величины дефектов в поверхностном слое в виде трещин, разрывов и деламинации крайних слоев обработанной заготовки. На основании этих результатов можно утверждать, что и сопротивление усталости при знакопеременных нагрузках изделий из ПКМ также существенно повысится, что является весьма важным фактором для повышения надежности и долговечности работы изделий авиационной и ракетно-космической техники.

Выводы

1. На основании проведенных исследований впервые установлено, что применение новой

технологии последовательной лезвийно-абразивной обработки изделий из ПКМ приводит к существенному снижению величины дефектов в поверхностном слое в виде трещин, разрывов и деламинации крайних слоев обработанной заготовки, что обеспечивает гарантированное повышение прочности на разрыв и разрушение изделий на 20...25 % по сравнению применяемой на практике обычной лезвийной обработкой фрезерованием.

2. Новая технология последовательной лезвийно-абразивной обработки изделий из ПКМ может быть реализована при соблюдении следующих требований:

- в качестве предварительного лезвийного режущего инструмента необходимо применение твердосплавной прямозубой фрезы с целью снижения величины деламинации крайних слоев заготовки;

- режимы предварительной лезвийной обработки должны быть определены с учетом требований конструкторской документации и производительности производственного процесса. Рекомендуются следующие режимы резания при фрезеровании: скорость резания 65...70 м/мин, подача $S = 65$ мм/мин и глубина резания 1,0 мм;

- для окончательной операции финишной обработки и устранения ранее образованных дефектов поверхностного слоя в ПКМ рекомендуется применение высокопористых шлифовальных кругов с зернистости не выше F60. Рекомендуется следующая характеристика шлифовального круга 25A F46 G14 V35 2250;

- в зависимости от требований по величине и площади дефектов обработанной поверхности рекомендуется варьирование количества проходов при финишной обработке при соблюдении режимов резания: скорость подачи стола 5,0 м/мин и глубина шлифования $t = 0,05$ мм;

– контроль шероховатости поверхности проводить в совокупности с визуальным осмотром при помощи цифрового микроскопа с целью определения величины и площади дефектов на обработанной поверхности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Макаров В.Ф.** Исследование проблем механической обработки современных высокопрочных композиционных материалов, используемых для производства деталей авиационной и ракетнокосмической техники // Вестник ПНИПУ. 2015. Т. 17. № 2. С. 30–41.
2. **Ярославцев В.М.** Высокоэффективные технологии обработки изделий из композиционных материалов: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.
3. **Ярославцев В.М.** Обработка резанием полимерных композиционных материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 180 с.
4. **Механическая** обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов. Сумы: Изд-во ИТД. «Университетская книга», 2013. 97 с.
5. **Козулько Н.В.** Механизация абразивной обработки деталей из полимерных композиционных материалов // Вестник Донского государственного технического университета. 2018. Т. 18. № 2. С. 179–189.
6. **Дударев А.С.** Конструкции алмазного инструмента для сверления и фрезерования полимерных композиционных материалов. СТИН. 2013. № 6. С. 9–15.
7. **Макаров В.Ф., Волковский А.А., Сабирзянов А.И.** Повышение производительности и качества обработки композиционных материалов на основе выбора и рационального применения абразивного инструмента // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2020. № 9. С. 40–48.
8. **Волковский А.А., Макаров В.Ф.** Оценка качества обработанной поверхности при плоском шлифовании ПКМ // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2023. Т. 25, № 1. С. 73–82.
9. **Волковский А.А., Макаров В.Ф.** Сравнительный анализ качества обработанной поверхности при прерывистом и традиционном шлифовании полимерных композиционных материалов на основе углеволокна // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 2. С. 15–25.

10. **Volkovskiy A.A., Makarov V.F.** The study of grinding polymer composite material // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). ICIE: International Conference on Industrial Engineering. Челябинск, 2022. С. 548–555.

REFERENCES

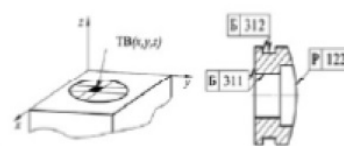
1. Makarov V.F. Investigation of the problems of machining operation of modern high-strength composite materials used for the aircraft engineering and rocket and space equipment production of parts // Bulletin of PNRPU, 2015, vol. 17, No. 2, pp. 30–41.
2. Yaroslavtsev V.M. Highly efficient technologies for machining of products made of composite materials: textbook. Moscow: Moscow: Publ. house of MSTU named after N.E. Bauman, 2012.
3. Yaroslavtsev V.M. Machining of polymer composite materials: textbook. Moscow: Publ. house of MSTU named after N.E. Bauman, 2012. 180 p.
4. Machining of composite materials in the assembly of aircrafts. Sumy: Publishing house ITD «University Book», 2013, 97 p.
5. Kozulko N.V. Abrasive processing mechanization of parts from polymeric composite materials for paste operation. Vestnik of Don State Technical University. 2018;18(2):179–189.
6. .Dudarev A.S. Diamond tool designs for drilling and milling polymer composite materials. STIN, 2013, No. 6, pp. 9–15.
7. Makarov V.F., Volkovsky A.A., Sabirzyanov A.I. Increase of productivity and composite abrasion quality based on choice and abrasive tool rational use // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2020, No. 9, pp. 40–48.
8. Volkovsky A.A., Makarov V.F. Comparative quality analysis for treated surface in flat grinding of polymer composite materials. // Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering. Materials science. 2023, vol. 25, No. 1. pp. 73–82.
9. Volkovsky A.A., Makarov V.F. Comparative quality analysis for treated surface in abrupt and traditional grinding of polymer composite materials based on carbon fiber. / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2023, no. 2 (140), pp. 15–25.
10. Volkovskiy A.A., Makarov V.F. The study of grinding polymer composite material // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). ICIE: International Conference on Industrial Engineering. Chelyabinsk, 2022, pp. 548–555.

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 11.07.2023; одобрена после рецензирования 21.07.2023; принята к публикации 25.07.2023.

The article was submitted 11.07.2023; approved after reviewing 21.07.2023; accepted for publication 25.07.2023.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №9(147). С.39-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №9 (147). P. 39-48.

Научная статья
УДК 621.91.01; 621.9.011
doi: 10.30987/2223-4608-2023-39-48

Технологические аспекты подготовки цифрового машиностроительного производства

Юлий Львович Чигиринский¹, д.т.н.

Александр Рональдович Ингеманссон², д.т.н.

¹ Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

² Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады», Волгоград, Россия

¹ julio-tchigirinsky@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5620-5337>

² aleing@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7963-393X>

Аннотация. Рассмотрены технологические аспекты цифровизации машиностроительного производства на этапе предпроизводственной технологической подготовки (ТПП). Методы исследования: содержательный анализ базовых понятий ТПП, определенных нормативной документацией – национальными стандартами, составляющими основу единой системы технологической документации. Показано, что формальный переход к цифровому производству формирует феномен трансформации базовых понятий – основной акцент делается на технологии моделирования в ущерб технологиям производства. В результате анализа этапов ТПП в соответствии с нормативными документами показаны особенности ТПП для цифрового производства. Результаты исследования: для основных проектных задач технологического содержания показаны проблемы ТПП, сформированные цифровизацией производства: проблемы рационального выбора обрабатывающего оборудования; проблемы рационального выбора методов обработки; рационального назначения технологических условий обработки. Показано, что в условиях производства, насыщенного информационными и аппаратными средствами управления технологическим оборудованием, необходимо совершенствовать системы обратной связи для реализации оперативной диагностики и активного управления элементами технологической системы для гарантированного обеспечения качества продукции. Показано, что процесс, методы и средства ТПП должны быть адаптированы к условиям конкретного производства. Показано, что задачи ТПП, связанные с рациональным выбором и назначением условий обработки, должны быть перенесены непосредственно на стадию обработки. Такой перенос позволяет оперативно учитывать вариативность свойств материалов обрабатываемой заготовки и режущего инструмента. Основные выводы: рациональное применение принципов цифровизации позволит рассматривать комплекс программно-информационных и аппаратных средств технологического проектирования и управления обрабатывающим оборудованием как технологический искусственный интеллект – накопленный опыт и знания специалистов технологических служб, адаптированные к условиям конкретного предприятия.

Ключевые слова: цифровизация производства, технологическая подготовка производства, цифровые двойники, адаптивная система, интеллектуальные технологические системы, технологический искусственный интеллект

Благодарности: при подготовке статьи использованы материалы исследований, выполненных за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00101.

Для цитирования: Чигиринский Ю.Л., Ингеманссон А.Р. Технологические аспекты подготовки цифрового машиностроительного производства // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 9 (147). С. 39–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-39-48

Engineering process aspects of digitalization of machine-building production

Yuli L. Chigirinsky¹, D. Eng.

Alexander R. Ingemansson², D. Eng.

¹ Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

² Federal Research and Production Center «Titan-Barricades», Volgograd, Russia

¹ julio-tchigirinsky@yandex.ru

² aleing@yandex.ru

Abstract. *Technological aspects of digitalization of machine-building production at the stage of pre-production engineering process (PEP) are viewed. Research methods: an exhaustive study of the basic concepts of the PEP defined by standardized documentation - national standards forming the basis of a unified system of technological documentation. It is shown that the formal transition to digital production chains the phenomenon of transformation of basic concepts - the main emphasis is on the modeling technologies at the price of production technologies. As a result of the analysis of EP stages in accordance with standardized documents, the EP digitalization peculiarities are shown. Research results: for the main design tasks of the technological content, the problems of PEP caused by production digitalization are presented: rational choice problems for processing machinery selection; problems of rational choice of processing methods; rational determination of process specification of production work. It is shown that in the conditions of production, equipped with programm support and hardware facilities for technological equipment control, it is necessary to improve feedback systems for the implementation of operational diagnostics and active control of process system elements for guaranteed product quality assurance. It is shown that the process, methods and means of PEP should be adapted to the conditions of a particular production. It is shown that the tasks of PEP related to the rational choice and assignment of processing conditions should be implemented directly at the operating step. It will allow taking into account in a timely manner the material properties variability for the workpiece and the cutting tool being in the intraprocess. Conclusions: the rational application of the principles of digitalization will allow treating the hardware/software complex for technological design and control of processing machinery as technological artificial intelligence – the accumulated experience and knowledge of specialists of technological services adapted to the conditions of a particular enterprise.*

Keywords: digitalization of production, engineering process, digital twins, adaptive system, intelligent technological systems, technological artificial intelligence

Acknowledgements: within the preparation of the article, there were the materials used for the research carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 19-19-00101.

For citation: Chigirinsky Yu.L., Ingemansson A.R. Engineering process aspects of digitalization of machine-building production / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 9 (147). P. 39–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-39-48

Трансформация базовых понятий

С момента начала активного использования понятие «цифровое производство» (digital production, digital manufacturing) содержание этого термина существенно изменилось. Первоначально данным термином определяли активное применение различных средств автоматизации [1] на стадиях предпроизводственной подготовки и собственно производства. Акцент делался на использовании прикладного программного обеспечения для автоматизации отдельных этапов конструкторского (в первую очередь), технологического и организационного проектирования и для эксплуатации

оборудования с программным управлением. В настоящее время речь идет о создании, параллельно с проектированием, т. наз., «цифрового двойника» (цифровой или, корректнее, информационной модели, digital twin, digital similar) – информационной структуры, описывающей основные характеристические свойства собственно изделия (в простейшем случае) или производства [2] этого изделия. Предположительно [1], такая виртуальная копия изделия или процесса изготовления изделия, должна обеспечить возможность «увидеть все сложности, издержки, с которыми придётся столкнуться» [1] в реальном производстве. Формальное толкование понятия «цифровой двойник» установлено

национальным стандартом [ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения: М.: Российский институт стандартизации, 2021. 11 с.]. Стандарт распространяет свое действие на изделия машиностроительных предприятий. В контексте подготовки производства и управления технологическими процессами, исходя из положений нормативного документа, следует отметить, что внедрение технологии цифровых двойников на стадии производства серийных изделий позволит откорректировать и (или) разработать технологическую документацию в зависимости от конкретных производственных условий.

Развитие подхода формирует понимание, что этапы жизненного цикла изделий и производственной системы имеют отличия. Последняя подвержена структурным и функциональным изменениям, в т. ч. за счет выполнения мероприятий по техническому перевооружению, использования резервов повышения эффективности технологических процессов и др. Поэтому приобретает значение тенденция формирования не только цифровых двойников изделий, но и цифровых двойников производственных систем [3, 4].

Возможность моделировать критические производственные ситуации, оценивать вероятные риски и заблаговременно разрабатывать стратегии их преодоления, безусловно, следует считать позитивной стороной цифровизации машиностроительного производства. Вместе с тем, следует отметить, что расширение практического применения цифровых двойников потребовало значительного развития технологий информационных – в ряде случаев, за счет традиционных машиностроительных. В частности, весьма активно формируется следующее представление [1, 5] о базовых технологиях цифрового производства:

– цифровое моделирование – «точная математическая модель предвещает любые реальные процессы и даёт возможность вычислить как издержки, так и эффективность запланированных изменений»;

– трёхмерное моделирование,

позволяющее «экономить на создании моделей за счет высокой точности моделирования и освобождения от долгих предварительных согласований, толстых документов с детальными описаниями будущего изделия»;

– управление жизненным циклом изделия – «жизненный цикл начинается с моделирования и заканчивается утилизацией, – постоянное наблюдение за состоянием изделия (и производственного оборудования) является ключом к бесперебойному производству»;

– технология «интернета вещей» подразумевает, что каждое устройство самостоятельно подключается к интернету и передаёт туда данные: назначение этой технологии заключается в постепенном снижении роли человека-оператора.

Здесь [1, 5] имеет место определенная подмена понятий. Во-первых, «цифровое» (корректнее говорить «математическое») и трёхмерное моделирование, по сути, являются инструментами инженера, но не самостоятельными технологиями. Во-вторых, утверждение о «точных моделях» в большинстве случаев следует рассматривать как некий «рекламный лозунг», поскольку при построении математических моделей разработчики принимают определенные допущения. В частности, при построении моделей машиностроительных изделий, как правило, не принимают во внимание неоднородность физико-механических свойств материалов и вариативность геометрических размеров, в том числе величин зазоров и натягов в сопряжениях. При моделировании процессов обработки в части прогнозирования качества изделия, работоспособности инструмента и другое, как правило, исключают из рассмотрения особенности [6] физико-механических свойств инструментального и конструкционного материалов, определяемые технологией их изготовления, изменение этих свойств с учетом повышенных температур в зоне контакта «инструмент-заготовка».

Представленный выше подход к цифровизации машиностроительного производства постепенно формирует представление о второстепенности собственно машиностроительных технологий, поскольку основное внимание (и существенные

материальные затраты) направлено на развитие технологий именно моделирования.

О технологических задачах технологической подготовки производства

Данный подзаголовок не следует воспринимать как тавтологию, поскольку на этапе технологической подготовки производства (ТПП) решаются задачи не только технологического, но и организационного – что явно определено в нормативных документах, а также конструкторского и метрологического содержания. Авторами произведен анализ содержания работ, составляющих ТПП в соответствии с ГОСТ 14.004-83 – «Технологическая подготовка производства.

Термины и определения основных понятий», ГОСТ Р 50995.0.1-96 – «Технологическое обеспечение создания продукции. Основные положения», ГОСТ Р 50995.3.1-96 – «Технологическое обеспечение создания продукции. Технологическая подготовка производства», ГОСТ Р 15.301-2016 – «Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство».

В рамках данного исследования рассмотрены именно технологические аспекты ТПП применительно к цифровому производству на этапах ТПП единичных и опытных образцов и серийно выпускаемой продукции (рис. 1).

Этапы ТПП		предпроизводственная подготовка						
		опытное и единичное производство				серийное производство		
Исполнители								
Специализированная технологическая организация		1		2	4		6	8
Изготовитель	опытное производство	1	2	3		5	7	
	серийное производство	1		3	4		6	8

Рис. 1. Технологические работы в составе ТПП:

1 – предпроизводственная технологическая подготовка; 2 – ТПП опытных образцов и единичных изделий; 3 – оценка определяющих технологических и организационных решений по производству изделия; 4 – привлечение специализированных технологических организаций к ТПП серийных изделий; 5 – оценка с участием независимых экспертов, технологической готовности производства к изготовлению изделий для приемочных испытаний; 6 – ТПП серийного производства; 7 – передача изготовителю серийных изделий технологической документации, отработанной по результатам изготовления и приемочных испытаний опытных образцов; 8 – завершение ТПП серийного производства; 9 – оценка технологической готовности серийного производства

Fig. 1. Technological works as part of the EP:

1 – preproduction engineering process; 2 – EP of prototypes and single products; 3 – evaluation of the determining technological and organizational solutions for the product manufacturing; 4 – involvement of specialized technological organizations to the EP's series manufacture; 5 – evaluation by independent expertise the technological production availability for manufacturing of products for acceptance check-outs; 6 – EP of series manufacture; 7 – design documentation transfer to the series manufacturer, which is worked out according to the results of manufacturing and acceptance check-outs of prototypes; 8 – completion of EP series manufacture; 9 – assessment of the technological production availability of series manufacture

Ранее [7] мы рассматривали укрупненный перечень проектных процедур,

составляющих содержание ТПП (табл. 1) на каждом из этапов.

1. Возможность формализованного решения задач ТПП

1. The possibility of a formalized solution of EP tasks

Типовая задача технологического проектирования	Решение	Класс ПО
Маршрутное технологическое проектирование:		
типовое	+	CAM / CAPP
групповое	±	CAM / CAPP
модульное	- +	CAM / CAPP
функционально-ориентированное по заданным показателям качества одной поверхности в пределах одного перехода	+	CAM
по заданным показателям качества одной поверхности с учетом технологической наследственности при многопереходной обработке	- +	CAPP
по заданным показателям качества группы поверхностей или изделия	- +	CAPP
Выбор схем базирования, последовательности перемены баз и расчет погрешности обработки:		
выбор технологических баз на основе типовых решений	+	CAM
обоснование выбора технологических баз и расчет погрешностей обработки методами размерно-точного проектирования	- +	CAE
Проектирование специальной технологической оснастки	±	CAD
Техническое нормирование	+	CAM / CAE
Расчет операционных припусков	+	CAM / CAE
Формирование технологической документации	+	CAM / CAPP
Программирование для станков с ЧПУ	+	CAM
Выбор оборудования и инструмента	±	CAM / CAE
Условные обозначения:	+	поддерживается системой
	±	частично поддерживается системой
	- +	перспективная опция, практически не поддерживается

Программное обеспечение класса CAPP (Computer Aided Process Planing) предназначено именно для решения задач планирования производственных и, в частности, технологических процессов. Тем не менее, задачи функционально-ориентированного маршрутного проектирования, также, как и задачи формализованного построения последовательности перемены баз, расчета погрешности обработки, построения рациональных траекторий перемещения инструмента, в настоящее время можно определить, как перспективные. Отечественные CAPP-системы, имеющие «открытую» структуру ПО, предоставляющие возможность наполнения внутренних справочников материалов, оборудования, технологической оснастки, позволяющие формировать комплект документов на технологический процесс согласно ЕСТД и допускающие расширение функциональных возможностей в отношении методов

индивидуального маршрутного проектирования, проектирования комплекта баз и др., представлены программным обеспечением от компаний «АДЕМ» [<https://adem.ru/products>], «АСКОН – Системы проектирования» [<https://ascon.ru/products>] или «СПРУТ-Технология» [<https://sprut.ru/sprut-technology>].

В контексте внедрения на предприятиях ERP-систем, действующих в масштабах всех производственных процессов организации, и MES-систем, оперирующих с процессами в производственных подразделениях, возникает следующая практическая проблема. Формирование производственных расписаний, расчеты загрузки мощностей и др. с использованием программных средств нуждаются в исходных данных по материалоемкости и трудоемкости выпускаемых изделий. Наполнение базы данных массивом информации по операционной трудоемкости напрямую зависит от оперативности технологического

проектирования, достоверности проектных решений, уровня внедрения и функционала используемых САПР ТПП на машиностроительном предприятии.

В основе проектирования маршрутных технологий лежит, как правило, использование типовых технологических процессов (рис. 2).

Частным случаем типового технологического процесса – применительно к одному переходу, – можно считать традиционно используемые таблицы «экономической точности» [8], определяющие технологический допуск метода обработки.

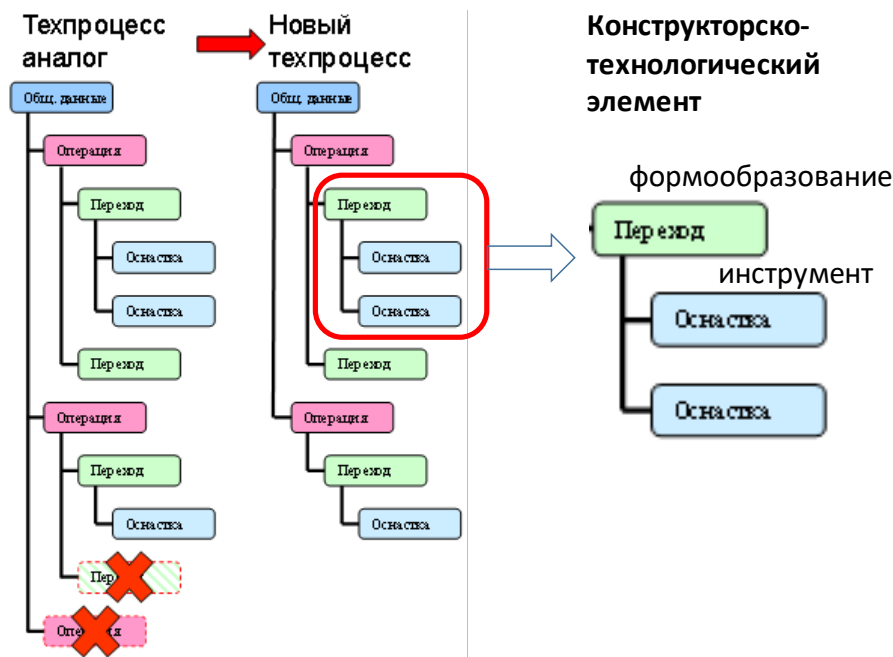


Рис. 2. Схема типового маршрутного проектирования [https://adem.ru/] и конструкторско-технологический элемент [9]

Fig. 2. Scheme of typical route design [https://adem.ru/] and technological element design [9]

Практически во всех применяемых в настоящее время системах в качестве элементарного фрагмента типового технологического процесса рассматривается конструкторско-технологический элемент (КТЭ) [9], содержащий формализованное комплексное описание конструкционного материала, геометрии простейшей поверхности, технологического метода получения поверхности, режимов обработки, оборудования, режущего и вспомогательного инструмента.

Более совершенным, с точки зрения автоматизации технологического проектирования, является конструкторско-технологический модуль [10], включающий формализованное структурированное описание комплекта технологических баз.

Основные проблемы, непосредственно связанные с эффективностью автоматизации

маршрутного технологического проектирования, определяются не только [10] отсутствием в конструкторской документации концентрированной информации об основных поверхностях и неполнотой методик базирования, в частности, методик использования скрытых баз. Здесь следует назвать и недостаточную надежность [7] информации, используемой при формировании и использовании электронных справочников, составляющих информационное обеспечение САПР ТП, в частности: справочников физико-механических характеристик основных и вспомогательных материалов. Существенные сложности при использовании формализованных методов маршрутного проектирования определяются явно выраженной отраслевой направленностью атласов типовых технологий [7].

Проблемы рационального выбора обрабатывающего оборудования и методов обработки в современном цифровом производстве

В качестве негативной тенденции, сформированной цифровизацией машиностроительного производства следует назвать значительное сужение профессионального кругозора специалистов технологических служб. В частности, при выборе оборудования для оснащения новых или модернизации действующих производств, специалисты делают акцент на оборудовании с программным управлением, преимущественно многоцелевое, не обращая внимания на серийность производства и конструктивную сложность продукции. Основная аргументация при этом сводится: к возможности обрабатывать «любые заготовки с одной установки»; к высокой точности – в реальности высокая точность позиционирования (1,0...3,0 мкм) современных станков не гарантирует высокой точности обработки; к высокой производительности – также достаточно спорное утверждение, поскольку многоцелевые станки рассчитаны на одновременную работу одного инструмента, и т. д.

На отдельных машиностроительных предприятиях, ориентированных на серийное производство малогабаритных корпусных деталей, специалисты технологических служб пришли к нетривиальному решению задачи повышения производительности – на рабочем столе сверлильно-фрезерно-расточного станка с ЧПУ размещается многоместное приспособление. Имитация многопозиционного станка производится программно. Управляющая программа работает в непрерывном цикле – после завершения обработки в текущей позиции, выполняется смещение начала системы координат и переход на начало программы.

Свободные позиции приспособления предназначены для снятия обработанного изделия и установки новой заготовки. Очевидно, что применение специализированного оборудования в данном случае является более эффективным. Более распространенной альтернативой такому

способу повышения производительности производства, как правило, является установка нескольких однотипных станков с ЧПУ, что также малоэффективно.

Проблемы рационального назначения технологических условий обработки

Немаловажным этапом ТПП является назначение технологических режимов. В настоящее время условия обработки определяются в соответствии с выбором технологического оборудования, материала, технологии изготовления, геометрических параметров и рекомендациями производителя инструмента. Предлагаемые производителями подгруппы (что уже предполагает некоторое варьирование свойств обрабатываемого материала без учета фактических отклонений химического состава, физико-механических свойств материала даже с учетом требований стандартов).

Рекомендации относительно режимов резания сводятся к определенному диапазону варьирования глубины, подачи и скорости резания, то есть определяют области допустимых значений. И, в данном контексте, параметрическая оптимизация позволяет, исходя из установленных требований, технологических возможностей и целевой функции, выбрать условия достижимой эффективности. Ранее [2, 7] было отмечено, что количественная оценка соответствия условий обработки заданным техническими условиями по показателям качества, проблематична при отсутствии достоверных математических моделей структуры производственной системы, а также отдельных технологических переходов.

Как правило, техническое нормирование выполняется с учетом ряда допущений, совокупное воздействие которых приводит к рассогласованию значений, заданных техническими требованиями (прогнозируемых при расчете режимов) параметров результата обработки и фактического результата. Следует признать, что принимаемые допущения, в большинстве случаев, обоснованы недостаточно. Выше отмечено, что рекомендации производителей в отношении условий рационального использования режущего

инструмента базируются на предположении о стабильности и однородности свойств как конструкционного, так и инструментального материалов. Результаты экспериментальных

исследований, например [11], подтверждают справедливость тезиса о существенной неоднозначности (рис. 3) режущих свойств современных инструментальных материалов.

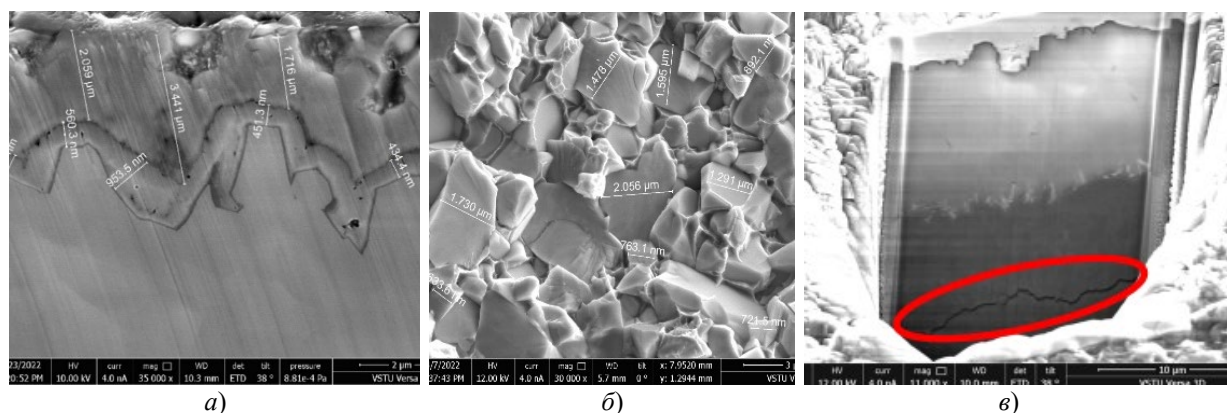


Рис. 3. Неоднородность свойств твердосплавного инструмента с PVD покрытием: а – покрытие; б – матрица инструмента; в – микротрещина в матрице

Fig. 3. Dissimilarity of properties of a carbide tool with PVD coating: а – coating; б – tool matrix; в – microcrack in the matrix

Поэтому на стадии изготовления детали возникает необходимость в адаптации проектных значений режимов резания к состоянию конкретной технологической системы. Например, использование стационарных и портативных систем вибродиагностики позволяет следующее (рассмотрено на примере сверлильно-фрезерно-расточного станка с ЧПУ, оборудованного системой вибродиагностики «Montronix»):

- выполнить анализ работоспособности шпиндельного узла на холостых оборотах без и с установленными вспомогательным и режущим инструментами;

- исходя из этого, выявить частоты вращения, на которых ожидается присутствие нестабильности процесса резания и не рекомендуется работа на данных частотах;

- провести анализ применяемых режимов резания с учетом амплитуды вибраций и наличие вибраций, например, по оси Z, что сказывается на нестабильности качества поверхности, геометрической точности детали, износе шпинделя, а также рассмотреть синфазность вибраций по осям X и Y, что свидетельствует о равномерности съема стружки (каждым зубом – для фрезы); выявить появление дополнительных промежуточных гармоник, расширяющих

общую полосу амплитуды спектра вибраций и снижающих стабильность процесса резания;

- оптимизировать технологию с учетом обеспечения невысокой амплитуды и синфазности вибраций по осям X и Y, малой амплитуды по оси Z с обеспечением требуемой производительности (объема удаляемого материала в единицу времени) за счет подбора сочетаний скорости резания, подачи, ширины фрезерования (для фрезерования).

Как правило, имеет место недостаточная проработка технологических решений в плане адаптации к условиям конкретного производства; рассогласование рекомендаций производителей инструмента, справочно-методических рекомендаций, нормативных указаний технологической службы предприятий, а также отсутствие оперативной информации о состоянии элементов технологической системы.

Заключение

Цифровизация предполагает повышение эффективности машиностроительного производства не только (и не столько) за счет увеличения производительности собственно производства. Основной эффект может быть получен на этапе ТПП как результат тщательной проработки различных аспектов

производственного процесса. Эффективным «цифровым» инструментарием для решения всего комплекса технологических проектных задач должен стать цифровой двойник производства – формализованное и структурированное описание методов и средств гарантированного обеспечения функционального назначения выпускаемой продукции. Такое описание должно учитывать технологические особенности конкретного производства, т. е., представлять собой «оцифрованный» накопленный опыт и знания специалистов технологической службы – знания, реализованные в виде программно-информационного обеспечения компьютеров и оборудования с программным управлением. В таком случае следует говорить о «технологическом искусственном интеллекте» – сущность, не предполагающую [12] копирование образа мышления человека, – только знания, накопленный опыт и способность оценивать достоверность информации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Гайдукова Е.** Что такое цифровое производство? // 20 мая 2020 г. URL : <https://www.comindware.ru/blog/что-такое-цифровое-производство>.
2. **Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В., Фролов Е.М.** Цифровизация машиностроительного производства: технологическая подготовка, производство, прослеживание // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 8 (134). С. 39–48. DOI : 10.30987/2223-4608-2022-8-39-48.
3. **Паршина И.С., Кривоногов С.А., Фролов Е.Б.** Цифровые модели производственной системы в машиностроительных предприятиях ОПК / И.С. Паршина // РИТМ машиностроения. 2021. № 9. С. 27–29.
4. **Соломенцев Ю.М., Соломенцев Ю.М., Фролов Е.Б.** Цифровые двойники изделия и производственной системы // Генеральный директор. Управление промышленным предприятием. 2018. № 8. С. 26–33.
5. **Цифровизация промышленности.** Обзор // TAdvisor. – URL : <https://www.tadviser.ru/index.php/> Статья: Цифровизация промышленности. Обзор_TAdvisor.
6. **Ингеманссон А.Р.** Основные положения методологии технологической подготовки производства и адаптивного управления в цифровых производственных системах для механической обработки // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 1 (248). С. 15–18. DOI : 10.35211/1990-5297-2021-1-248-15-18.
7. **Чигиринский Ю.Л.** Современное состояние и тенденции развития технологической подготовки

машиностроительного производства // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 8 (110). С. 29–35. DOI : 10.30987/2223-4608-2020-8-29-35.

8. **Справочник** технолога / под общ. ред. А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.

9. **Вертикаль.** Система автоматизированного проектирования технологических процессов (2023) URL : <https://ascon.ru/products/vertikal/>

10. **Базров Б.М.** Фундаментальные основы технологической подготовки производства // Научные технологии в машиностроении. 2019. № 7 (97). С. 24–29. DOI : 10.30987/article_5cf7bd2f43.90942178.

11. **Научное обоснование и реализация цифровых технологий низкотемпературного плазменного формирования композитных структур на поверхностях прецизионных геометрически сложных металлических изделий: промежуточный отчет о НИР 19-19-00101, ИМАШ РАН.** 2022.

12. **Рассел С., Норвиг П.** Искусственный интеллект: современный подход = Artificial Intelligence: a Modern Approach / Пер. с англ. и ред. К.А. Птицына. 2-е изд. М.: Вильямс, 2006. 1408 с. ISBN 5-8459-0887-6

REFERENCES

1. Gaidukova E. What is digital production? // May 20, 2020 URL : <https://www.comindware.ru/blog/what-is-digital-production>
2. Chigirinsky Yu.L., Krainev D.V., Frolov E.M. Digitalization of machine-building production: process design, production, tracking // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 8 (134), pp. 39–48, DOI: 10.30987/2223-4608-2022-8-39-48.
3. Parshina I.S., Krivonogov S.A., Frolov E.B. Digital models of the production system in machine-building enterprises of MIC / I.S. Parshina, // RHYTHM of mechanical engineering, 2021, no. 9, pp. 27–29.
4. Solomentsev Yu.M., Solomentsev Yu.M., Frolov E.B. Digital twins of a product and a production system // General Director. Management of an industrial enterprise. 2018, no. 8. pp. 26–33.
5. Digitalization of industry. Overview // TAdviser. – URL : <https://www.tadviser.ru/index.php/> Article: Digitalization_industry_Survey_TAdviser
6. Ingemansson A.R. Basic framework of the engineering process concept and adaptive management in digital production systems for machining operations // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2021, No. 1 (248). pp. 15–18. DOI : 10.35211/1990-5297-2021-1-248-15-18.
7. Chigirinsky Yu.L. Current state and trends in development of technological engineering pre-production // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2020, no. 8 (110), pp. 29–35. DOI: 10.30987/2223-4608-2020-8-29-35.

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

9. Vertical. Automated Process Design System (2023)
URL: <https://ascon.ru/products/vertikal/>

10. Bazrov B.M. Fundamentals of engineering process// Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2019, no. 7 (97). pp. 24–29.
DOI: 10.30987/article_5cf7bd2fbc4f43.90942178

11. Scientific rationale and implementation of digital

technologies for low-temperature plasma formation of composite structures on the surfaces of geometrically complex precision metal products. Russian Science Foundation: update report on RE 19-19-00101, IMASH RAS, 2022.

12. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: a Modern Approach = Artificial Intelligence: a Modern Approach / Translated from English and edited by K.A. Ptitsyna, 2-nd ed. Moscow: Williams, 2006. 1408 p, ISBN 5-8459-0887-6

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 20.06.2023; одобрена после рецензирования 27.06.2023; принята к публикации 11.07.2023.

The article was submitted 20.06.2023; approved after reviewing 27.06.2023; accepted for publication 11.07.2023.

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 17.09.2023. Выход в свет 29.09.2023.

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