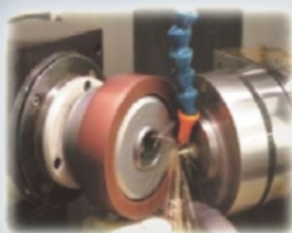


НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

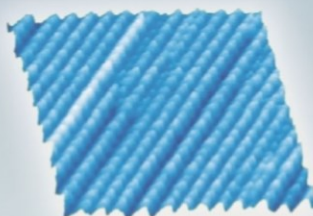
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

8(158)
2024

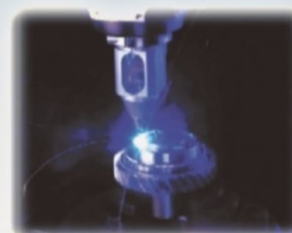
**ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
И КОМБИНИРОВАННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



**НАНОТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**



**ЛАЗЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



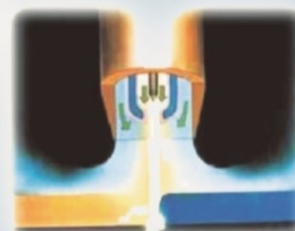
**ТЕХНОЛОГИИ
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**



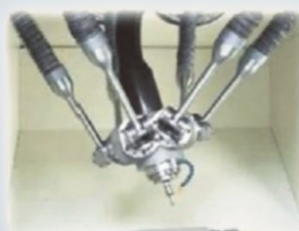
**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В СВАРОЧНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



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



НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 8 (158)

2024

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

Главный редактор

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

Зам. главного редактора

д.т.н., доц. ШАЛЫГИН М.Г. (г. Брянск)

Председатель редакционного совета

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

Зам. председателя редакционного совета

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

Редакционный совет:

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

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

д.н., доктор инженер ВАЛЬДЕНМАЙЕР Т.

(г. Штутгарт, Германия)

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

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

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

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

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

д.т.н., проф. ЛАРИН С.Н. (г. Тула)

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

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

д.т.н., проф. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)

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

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

(г. Гомель, Беларусь)

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

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

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

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

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

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

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

DOI:10.30987/issn.2223-4608

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

Подписной индекс: **Э79195**.

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

E-mail: editntm@yandex.ru

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

Журнал зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и
массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
26 апреля 2019 года

рег. номер ПИ № **ФС77-75524**

СОДЕРЖАНИЕ

КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ, КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ, ТРЕНИЕ И ИЗНОС ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Колесников В.И., Колесников И.В., Мантуров Д.С., Воропаев А.И.

Инновационные технологии повышения износостойкости
тяжелонагруженных трибосистем путем формирования структуры
и свойств их поверхностного слоя 3

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Шевцов С.Н., Снежина Н.Г., Камчатный А.Д. Разработка и
использование формообразующей оснастки из полимерных
композиционных материалов в производстве авиационных
композитных конструкций 12

ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Киселёв Е.С., Жирухин К.С. Использование новых видов
технологической оснастки при изготовлении нежестких
плоскостных алюминиевых деталей методом волновых технологий 22

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ РЕМОНТЕ, ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ И НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ

Кудряков О.В., Варавка В.Н. Технология получения вакуумных
ионно-плазменных износостойких покрытий. 31

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПОДГОТОВКА И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Ингеманссон А.Р. Технологические составляющие цифровизации
производственного процесса на машиностроительном предприятии 41

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

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

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 8 (158)

2024

Publishes from July 2011

MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

Comes out with assistance of Engineering Technologists Association

Editor-in-chief

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

Deputy chief editor

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

Chairman of Editorial Committee

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

Chairman Assistant

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

Editorial Committee:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

DOI:10.30987/issn.2223-4608

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

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

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

CONTENTS

SURFACE LAYER QUALITY, CONTACT INTERACTION, FRICTION AND WEAR OF MACHINE PARTS

Kolesnikov V.I., Kolesnikov I.V., Manturov D.S., Voropaev A.I. Innovation
technologies for wear resistance increase in heavy loaded tribosystems by
forming their surface layer structure and properties 3

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF NONMETALLIC PARTS PRODUCTION

Shevtsov S.N., Snezhina N.G., Kamchatny A.D. Development and exploitation
of shape-generating molding tools made of polymer composite materials in the
production of aircraft composite structures 12

TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

Kiselyov E.S., Zhirukhin K.S. The use of new types of technological equipment
in non-rigid plane aluminum parts production using wave techniques 22

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN COATING, PARTS REPAIR AND RECOVERY

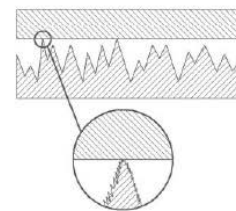
Kudryakov O.V., Varavka V.N. A pathway to vacuum ion-plasma wear-resistant
coatings 31

TECHNOLOGICAL PROCESSES AUTOMATED CONTROL

Ingemansson A.R. Technological components of the production process
digitalization at a machine-building enterprise 41

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

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



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 8 (158). С. 3-11.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 8 (158). P. 3-11.

Научная статья

УДК 531.43

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

Инновационные технологии повышения износостойкости тяжелонагруженных трибосистем путем формирования структуры и свойств их поверхностного слоя

Владимир Иванович Колесников¹, акад. РАН, д.т.н.

Игорь Владимирович Колесников², чл.-корр. РАН, д.т.н.

Дмитрий Сергеевич Мантуров³, к.т.н.

Александр Иванович Воропаев⁴, инженер

^{1, 2, 3, 4} Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

¹ kvi@rgups.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4323-9268>

² oooedt@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3265-0871>

³ manturovds@rgups.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9977-6997>

⁴ vai_nano@rgups.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7564-8803>

Аннотация. В статье рассмотрены принципиально различные научные подходы по исследованию и управлению процессами на трибоконтакте для металлополимерных узлов трения и отдельно – для металлических. В статье представлены разработанные критерии по выбору наполнителей в композит: для антифрикционных сопряжений – это установление механизма образования вторичных структур (пленки фрикционного переноса); для фрикционных сопряжений – это введение в полимерный композит упрочняющих элементов, которые в результате трения проникают в металлическое контртело и упрочняют его. При этом оценка прочностных характеристик осуществлялась квантово-химическим расчетом и экспериментальным подтверждением данными рентгеноэлектронной и оже-электронной спектроскопии. Что касается повышения износостойкости трибосистем «металл – металл» путем традиционных методов – электродуговая металлизация, газопламенное нанесение покрытия, детонационно-газовое, плазменное и др., они не обеспечивают должным образом устойчивую работу трибосистем. В настоящее время наиболее перспективными методами модификации и упрочнения поверхности являются вакуумные ионно-плазменные технологии. Идеи нанесения тонкопленочных покрытий основываются на технологиях, основанных как на физических процессах (Physical Vapor Deposition – PVD), так и на химических принципах (Chemical Vapor Deposition – CVD). PVD-метод предусматривает перевод материала покрытия в парообразное состояние с последующей доставкой его к образцу и осаждение пара на нем. При реализации CVD-методов покрытия на образец осуществляется из карбонитов, металлоорганики и др. В работе представлены результаты исследований по установлению зависимостей физико-механических и трибологических свойств покрытий – PVD, DLC, высокоэнтропийных и комбинированных от технологических параметров нанесения.

Ключевые слова: метало-полимерные узлы трения, вторичные структуры, диффузия, сегрегация, квантово-химические методы, PVD, DLC (алмазоподобные покрытия) и высокоэнтропийные

Благодарности: исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30007) в Ростовском государственном университете путей сообщения.

Для цитирования: Колесников В.И., Колесников И.В., Мантуров Д.С., Воропаев А.И. Инновационные технологии повышения износостойкости тяжелонагруженных трибосистем путем формирования структуры и свойств их поверхностного слоя // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 8 (158). С. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-11

Innovation technologies for wear resistance increase in heavy loaded tribosystems by forming their surface layer structure and properties

Vladimir I. Kolesnikov¹, Academician of the RAS, D. Eng.
Igor V. Kolesnikov², corresponding member, RAS, D. Eng.

Dmitry S. Manturov³, PhD Eng.

Alexander I. Voropaev⁴, engineer

^{1, 2, 3, 4} Rostov State University of Railway Engineering, Rostov-on-Don, Russia

¹ kvi@rgups.ru

² oooedt@rambler.ru

³ manturovds@rgups.ru

⁴ vai_nano@rgups.ru

Abstract. The article views fundamentally different scientific approaches to the study and processes control for metallopolymer friction units tribocontacts and, separately, for metal ones. The article presents the developed criteria for the choice of fillers in the composite: for example, in antifriction interfaces, it is a mechanism that forms secondary structures (friction transfer films); in friction interfaces, it is the introduction of reinforcing elements into a polymer composite, that, as a result of friction, can penetrate into the metal counterbody and strengthen it. At the same time, the strength characteristics were evaluated by quantum chemical calculations and experimental confirmation by X-ray electron and Auger electron spectroscopy (AES) data. As for the wear resistance increase in metal-to-metal tribosystems by traditional methods – electric arc metallization, gas-flame coating, detonation-gas, plasma, etc., they do not properly ensure stable operations of tribosystems. Currently, the most promising techniques used for surface modification and hardening are vacuum ion-plasma technologies. The ideas of applying thin-film coatings are based on techniques based on both physical processes (physical vapor deposition with PVD coating) and chemical principles (chemical deposition from the gas phase – CVD process). The PVD- method involves the transfer of the coating material to a vaporous state, followed by its delivery to the sample and vapor deposition on it. When using CVD methods, the coating on the sample is transferred from carbonites, organometallics, etc. The paper presents the results of research for finding the dependence of the physico-mechanical and tribological properties of coatings – PVD, DLC, high-entropy or combined, on the technological parameters of application.

Keywords: metal polymer friction units, secondary structures, diffusion, segregation, quantum chemical methods, PVD, DLC (diamond-like coatings) and high-entropy

Acknowledgements: the research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 21-79-30007) at Rostov State University of Railway Engineering.

For citation: Kolesnikov V.I., Kolesnikov I.V., Manturov D.S., Voropaev A.I. Innovation technologies for wear resistance increase in heavy loaded tribosystems by forming their surface layer structure and properties / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 8 (158). P. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-11

Введение

Широкое применение полимерных композиций в трибосистемах машин и механизмов поставило перед трибологами задачи максимального использования специфических свойств полимеров – их деструкцию и электризацию в разработке технологий образования вторичных структур в поверхностном слое металлполимерного трибоконтакта. Другой задачей, кроме создания пленок переноса на металлполимерном трибоконтакте, было разработать методику синтеза полимерных композиций, армированных наноразмерными добавками, донные добавки должны диффундировать в металлическое контртело при трении, упрочняя его поверхностный слой. Для подбора таких упрочняющих элементов был использован квантово-химический метод анализа. При фрикционном взаимодействии «металл – полимер» изменяются свойства поверхностных слоев. В процессе фрикционного взаимодействия системы «металл – полимер» наблюдается модификация свойств поверхностных слоев, где в полимере это связано с

процессами деструкции, а в металле – с диффузионно-сегрегационными явлениями. Эти процессы приводят к обогащению поверхностного слоя металла примесными и легирующими элементами на границах зерен, вызывая зернограничную сегрегацию. Такая сегрегация в поверхностном слое может стать причиной как укрепления, так и разрушения материала, что обусловлено величиной энергии взаимодействия между атомами металла и атомами примесей. Усиление металлической матрицы происходит, если энергия связи атомов металла с атомами сегрегированных элементов превышает энергию межатомных связей в самом металле.

Что касается трибосопряжений «металл – металл», то опыт и анализ современного состояния в области получения покрытий с использованием методов модификации показывает перспективность применения вакуумной ионно-плазменной технологии для решения широкого спектра трибологических задач. Одной из особенностей вакуумных ионно-плазменных технологий является большое количество параметров, от которых зависит

конечный результат – состав, структура и свойства покрытий. Мультипараметричность процесса является одной из основных проблем при попытках оптимизации режимов нанесения покрытия. В общем виде набор переменных может быть систематизирован на группы: категория входных параметров включает в себя технологические параметры и свойства субстрата; категория выходных параметров – характеристику покрытия. В рамках первой категории, касающейся технологических параметров, например, при использовании метода дугового испарения, отмечается большое количество факторов, таких как количество и характеристика катодов, характеристика дуги (ток и напряжение), рабочее давление в камере, скорость формирования покрытий, напряжение смещения, применение магнитной сепарации и другие. При магнетронном напылении некоторые из параметров изменяются, общее количество влияющих переменных остается существенным.

Среди параметров, связанных с субстратом, необходимо рассматривать состав подложки, её поверхностные качества (шероховатость, химическая чистота, наличие напряжений и т. д.), структурно-фазовое состояние, механические характеристики, температуру и её дрейф в процессе осаждения. Выходные переменные определяются функциональным назначением покрытия и могут включать широкий спектр характеристик, таких как элементный состав, параметру структурно-фазового состояния (количество, дисперсность и морфология фаз, структурный тип покрытия). Основное внимание в исследовании было уделено таким выходным параметрам, как коэффициент трения, износостойкость и тип структуры покрытия. Первая часть статьи посвящена металлополимерным трибосистемам, в то время как вторая часть посвящена металлическим.

Повышение износостойкости металлополимерных трибосистем

Актуальность этой проблемы возрастает с потребностью применения полимеров в авиации, на транспорте, в машинах и механизмах, а также в изучении эволюционных процессов, происходящих на трибоконтакте.

Установление теоретических и экспериментальных закономерностей проводилось на микро-, мезо- и макроуровнях [3].

Для проведения исследования вторичных структур были изготовлены образцы, матрицей которых был фенилона С-2 с наполнителями: фторполимером 4МБ, волокнами ариамида Т и наноразмерными добавками шпинели ($\text{FeAl}_2\text{O}_4 + \text{MnAl}_2\text{O}_4$). Исследование физико-механических свойств – твёрдости H и модуля упругости E проводили на приборе NanoTest

600, а для оценки трибологических характеристик – коэффициента трения – μ и износа – J была разработана методика и проведены испытания на машине трения ИИ-5018 по схеме «вал – втулка», а для исследования вторичных структур была сконструирована машина торцевого трения по схеме «плоский диск – палец».

В результате анализа экспериментальных данных показано, что механизм и кинетика формирования плёнок переноса на металлическое контртело обусловлено следующей последовательностью: при трении сначала продукты деструкции фенилона С-2 удерживаются за счёт адгезионных сил на поверхности металлического контртела и затем продукты износа фторопласта за счёт разнополярности электростатических сил фенилона и фторопласта формируют второй слой, образуя плёнки переноса. Для подтверждения этого нами методами ИК спектроскопии были получены спектры, которые показали наличие фенилона С-О и $\text{C}=\text{O}$ ($1300\ldots 1750\text{ см}^{-1}$) в начальный период трения, а с течением времени появляются полосы, относящиеся ко фтору С- F ($1150\ldots 1200\text{ см}^{-1}$).

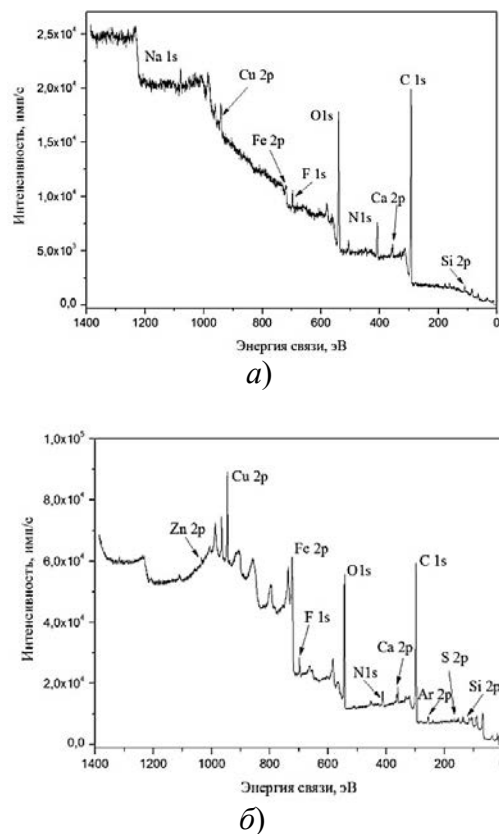


Рис. 1. Элементный состав плёнки переноса:
а – спектр плёнки переноса после трения; б – спектр на глубине плёнки в 3 нм

Fig. 1. Elemental composition of the transfer film:
а – spectrum of the transfer film after friction; б – spectrum at a film depth of 3 nm

Элементный состав пленки переноса определяли с помощью рентгеноэлектронной (РЭС) и рентгенофотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) для полимерного композита из матрицы – фенилон С-2 с добавками – 10 % фторопласта-4МБ; 3 % шпинели; 5 % аримида-Т (рис. 1).

Анализ спектров показывает, что добавление фторопласта 4МБ в матрицу кроме линий натрия Na1s, азота N1s, кальция Ca2p, кремния Si2p, видим также линии F1s с энергией 684,6 эВ, характеризующие связь F-F, а также линии C1s с энергией 285 эВ, характеризующие связь C-F и связь C-C с энергией 288 эВ (см. рис. 1). Характерно и то, что по глубине пленки электронные спектры показывают лишь количественное изменение компонентов, а состав их не меняется.

В результате проведенных исследований определяется роль каждого из компонентов в образовании вторичных структур в металлополимерной трибосистеме: фенилон выступает как связующее, работающее в широком диапазоне нагрузок и скоростей; фторопласт обеспечивает низкий коэффициент трения и достаточно значительную адгезию с фенилоном за счет их разнополярности электростатических сил; ариמיד-Т обеспечивает прочностные характеристики композита, компенсируя низкие механические характеристики и фторопласта – 4МБ; частицы шпинели, имея развитую поверхностную структуру, обладают способностью снижения коэффициента трения композита и повышения износостойкости.

Определив закономерности повышения трибологических характеристик для антифрикционных металлополимерных трибосистем путем образования вторичных структур на поверхности трения, разработаем механизм и технологию повышения физико-механических и трибологических параметров для фрикционных металлополимерных узлов трения. С этой целью проведем исследования по влиянию диффузионно-сегрегационных процессов на прочностные и износостойкие характеристики поликристаллических материалов с помощью квантово-химических расчетов. В процессе трения на границах зерен поликристаллического материала происходит обогащение или обеднение примесными или легирующими элементами – сегрегационный процесс. В результате физико-механические и трибологические характеристики материала могут как увеличиваться, так и снижаться.

Как показали наши исследования все зависит от энергии связи «металл – металл» и «металл – сегрегированный атом» [4, 5]. На рис. 2, а представлен сегрегационный кластер из 30 атомов железа Fe, между которыми

расположены другие атомы X. Этот кластер распадается на две части (рис. 2, б и в): адсорбционный кластер, состоящий из зерен металла Fe и сегрегированных атомов X (внизу, справа) и кластер из чистого металла Fe (вверху, справа).

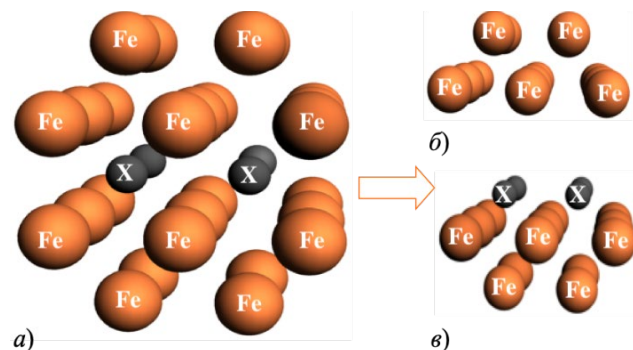


Рис. 2. Схема распада 30-атомного сегрегационного кластера (а) на две части – чистое железо Fe (б) и адсорбционный кластер (в)

Fig. 2. Scheme of decay of a 30-atom segregation cluster (a) into two parts - pure iron Fe (b) and adsorption cluster (c)

С помощью программ ADF [6] проводим расчет энергии связи – E_c сегрегационного кластера (см. рис. 2, а), затем находим энергию адсорбционного – E_a (см. рис. 2, в), а энергия для атомов из чистого железа $E_{ж}$ (см. рис. 2, б) берем из справочных данных. В итоге вычисляем энергию распада – E_p исходного кластера (см. рис. 2, а):

$$E_p = |E_c - E_a - E_{ж}|.$$

Результаты расчетов показали, что для элементов таких как молибден, ванадий, хром, титан, бор, углерод и марганец энергия распада превосходит аналогичный показатель для кластера, состоящего из чистого железа. При размещении этих элементов на границах зерен в железе происходит укрепление межзерновых связей, что ведет к улучшению физико-механических и трибологических свойств железа. Для верификации квантово-химических расчетов были выполнены стендовые испытания в системе «колесо подвижного состава – тормозная колодка» с молибденовой модификацией. Исследования металлических образцов с поверхности катания колеса, эксплуатировавшегося с модифицированной тормозной колодкой, показали повышение твердости на 12 % и снижение износа на 11 %. Дополнительно, анализ методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии показал, что присутствие линий вольфрама W4f (36 эВ) на спектре с дорожки трения металлической поверхности колеса после испытаний, что свидетельствует о миграции вольфрама из колодки на поверхность

катания колеса и усилению границ зерен за счет этого. Таким образом, процесс трения можно интерпретировать не только как деструктивный, но и как созидательный процесс [4].

Инновационные технологии вакуумных ионно-плазменных покрытий для повышения физико-механических и трибологических характеристик поверхностей трения металлических трибосистем

Вакуумные ионно-плазменные покрытия из-за высокой адгезионной и когезионной прочности за счет сильных межатомных связей представляют собой современный технологический процесс. Он объединяет параметры структуры и свойств подложки, а также технологические параметры, в состав которых входят в том числе и факторы стохастической природы, связанные с неустойчивостью неравноммерных процессов в плазме.

Исследовалось два вида покрытия нитридных систем TiAlN и CrAlSiN толщиной 0,8...4,0 мкм, полученных по технологии вакуумного ионно-плазменного напыления:

– TiAlN с подслоем чистого Ti (толщиной 200...300 нм), полученного испарением катодов чистого Ti и чистого Al с азотом в качестве реакционного газа со следующим составом: $(25 \pm 2,5)$ ат. % Ti + $(25 \pm 2,5)$ ат. % Al + $(50 \pm 3,2)$ ат. % N;

– CrAlSiN с подслоем чистого Cr (толщиной 200...250 нм) составом: $(25 \pm 2,5)$ ат. % Cr + $(17 \pm 2,1)$ ат. % Al + $(8 \pm 1,5)$ ат. % Si + $(50 \pm 3,0)$ ат. % N, получено испарением катодов чистого Cr и силумина Al-Si.

Напыление покрытий проводилось на образцы-подложки, изготовленные из промышленных конструкционных сталей с азотированной и цементованной поверхностью, которые широко используются в машиностроении для изготовления узлов тяжело нагруженных трибосопряжений. Образцы имели пластинчатую форму с размерами 50×30×5 мм. Газовая цементация с последующей закалкой и низким отпусканием проводилась для образцов из стали 12X2H4A, которые имели структуру мартенсита в поверхностном слое и структуру бейнита в сердцевине. Газовое азотирование проводилось для образцов из стали 38X2MЮА, которые имели структуру с дисперсным распределением нитридов в поверхностном слое и структуру сорбита в сердцевине.

Значения основных технологических параметров на установке BRV при дуговом двух-катодном испарении были фиксированными: температура и остаточное давление в вакуумной камере соответственно 350...450 °C (с учетом температурного дрейфа) и ~1,3 Па; напряжение смещения на подложке – «минус» 100...150 В; вольт-амперные параметры дуги на каждом катоде подбирались эмпирически в зависимости от состава катода. Время нанесения покрытий с экспериментальными целями варьировали в интервале 30...180 мин, что обеспечивало толщину покрытий в пределах $\delta = 0,4...4,0$ мкм.

Физико-механические свойства покрытий определялись по методу непрерывного индентирования с использованием платформы «NanoTest 600». По результатам испытаний определялись измерялись твердость покрытия H , его модуль упругости E , рассчитывались отношения H/E и H^3/E^2 , характеризующие соответственно сопротивление упругой и пластической деформации [7].

Оценка трибологических свойств покрытий, осуществлялась с использованием трибометра TRB (Anton Paar) [4]. В ходе исследований определялись такие показатели как: коэффициент трения μ ; интенсивность объемного износа образца с покрытием J_C и контртела J_K . Схема испытания была выбрана «штифт–пластина» с реализацией трения скольжения, в качестве штифта использовался шарик диаметром 6,35 мм из WC-Co (кермет). Испытания проводились при движении штифта по круговой траектории (диаметром 6 мм) со скоростью 0,2 м/с и фиксированными дискретными значениями нагрузки трения $F = 1, 5$ и 10 Н. В качестве одной из характеристик износа рассматривался также путь L , пройденный образцом до разрушения покрытия. При этом в сравнительном анализе были использованы значения относительной интенсивности износа образца с покрытием J , полученные делением фактического объемного износа на значения использованной нагрузки трения F и пути трения L , пройденного образцом до разрушения покрытия. Если разрушения покрытия не происходило, то в качестве L использовалось значение пути трения, пройденного образцом на момент окончания испытания. Таким образом, рассматриваемый в работе износ покрытий J имел размерность: $\text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$.

Результаты физико-механических и трибологических характеристик исследуемых покрытий представлен в табл. 1.

1. Физико-механические, трибологические и расчетные параметры H/E и H^3/E^2 исследуемых покрытий

1. Physico-mechanical, tribological and design parameters of H/E and H^3/E^2 coatings under study

Параметры	Покрытие / подложка			
	TiAlN на цементованной стали 12X2H4A	TiAlN на азотированной стали 38X2MЮА	CrAlSiN на цементованной стали 12X2H4A	CrAlSiN на азотированной стали 38X2MЮА
H , 10^9 Па	25,5	24,7	24,1	22,8
E , 10^9 Па	288	314,3	251,3	259,7
H/E	0,0810	0,0802	0,0959	0,0878
H^3/E^2 , 10^9 Па	0,166	0,1935	0,2885	0,2863
J , 10^{-7} мм ³ /Н/м	12,91	16,0	0,792	1,68

Для анализирования полученных результатов табл. 1, приведем в качестве сравнительного эталона физико-механические и трибологические характеристики подложек (без покрытий):

– азотированный слой стали 38X2MЮА:

$H = 12$ ГПа; $E = 241$ ГПа; $H/E = 0,0498$; $H^3/E^2 = 0,02975$ ГПа; $J = 4,5 \cdot 10^{-7}$ мм³/Н/м;

– цементованный слой стали 12X2H4A:

$H = 6,42$ ГПа; $E = 200$ ГПа; $H/E = 0,0321$; $H^3/E^2 = 0,0066$ ГПа; $J = 12,3 \cdot 10^{-7}$ мм³/Н/м – объемный износ, отнесенный к прикладываемой на узел трения нагрузке и длине пути, пройденного до разрушения покрытия.

Анализ результатов показывает, что значение физико-механических параметров твердости H и модуля упругости у покрытия CrAlSiN ниже, чем у TiAlN, но износостойкость выше, боле чем на порядок. Это объясняется высоким значением сопротивления смятию у покрытия CrAlSiN. Это означает, что при трибологических испытаниях на трение скольжения циклическое воздействие штифта-индентора на поверхности покрытия приводит к тому, что покрытие в силу значительной величины H^3/E^2 не деформируется и не сминается.

Необходимо обратить внимание на подложку и рассматривать систему в целом «покрытие – подложка». Если рассматривать нанесение на цементованный слой стали 12X2H4A, то после закалки и низкого отпуска (при 200 °С) он будет иметь мартенситную структуру с высокой твердостью. Нанесение вакуумного ионно-плазменного покрытия при $t = 450$ °С приводит к диффузионной фазовой релаксации мартенсита в феррито-цементитную структуру (троостита) с твердостью 30...35 HRC. Это существенно снижает твердость подложки, но повышает ее пластичность и увеличивает продолжительность процесса самоорганизации поверхности трения, что

способствует существенному снижению износа образцов с покрытием CrAlSiN (см. табл. 1). Аналогичный процесс наблюдается в образцах с покрытием CrAlSiN на азотированной подложке, которая представляет собой мелкодисперсные включения нитридов алюминия и хрома в сорбитной матрице нитраллоидной стали 38X2MЮА. Нитриды обеспечивают твердость подложки, а сорбитная матрица (при её достаточной объемной доле) придает ей пластичность, достаточную для протекания стадии ступенчатой фрагментации покрытия. Вследствие этого износ образцов с покрытием CrAlSiN на азотированной подложке также оказывается весьма малым (см. табл. 1).

Далее рассмотрим какие свойства поверхности могут быть достигнуты с помощью нанесения вакуумных высокоэнтروпийных ионно-плазменных покрытий. Выбор высокоэнтропийных сплавов для формирования тонких износостойких пленок обоснован тем, что если сформировать многокомпонентную систему в виде однофазного твердого раствора замещения, то энтропия такой системы будет на порядок выше остальных составляющих. На основе классических термодинамических представлений энергия Гиббса такой системы становится минимальной и придает системе высокую термодинамическую устойчивость [8, 9]. Причём, чем больше число компонентов n удаётся замещать в такой твердый раствор, тем устойчивость системы становится выше (минимальным набором считается $n = 4...5$). Нанесение экспериментальных высоковакуумных покрытий осуществлялись с помощью вакуумной установки BRV600. Покрытия осаждались на подложку из стали 40XH2МА. Физико-механические характеристики образцов-подложек из стали 40XH2МА после закалки и высокого отпуска с сорбитной структурой составляют: $H = 2,5$ ГПа; $E = 200$ ГПа; $H/E = 0,0125$; $H^3/E^2 = 0,00039$ ГПа. Образцы после закалки и низкого отпуска со структурой

мартенсита имеют: $H = 5,2$ ГПа; $E = 200$ ГПа; $H/E = 0,026$; $H^3/E^2 = 0,00352$.

Исследование физико-механических и трибологических характеристик осуществлялось для двух покрытий: покрытие системы Cr-Ti-Zr-Nb-Hf выполнено при катодно-дуговом испарении, а покрытие системы Cu-Cr-Mn-Fe-Co-Ni выполнено методом магнетронного распыления на установке BRV600. Для исследования физико-механических свойств образцов применялась измерительная платформа «Nanotest 600», а трибологические испытания проводились на машине трения TRB (Anton Paar Tritec) по схеме «штифт-пластина»

В качестве сравнительного эталона (точки отсчета) приняты свойства подложек из стали 40XH2MA. В дальнейшем ввиду того, что катодно-дуговое напыление покрытий ВЭС проводилось при температуре ~ 450

°С, которая приводит к отпуску закаленной и низко отпущенной стали 40XH2MA, будем полагать, что все образцы с покрытиями TiCrZrHfNb имели уровень физико-механических свойств, соответствующий сорбитной структуре, стали. Магнетронное напыление покрытий CuCrMnFeCoNi проводилось при низкой температуре (~ 250 °С), которая совпадает с температурой отпуска закаленной стали 40XH2MA.

Сравнительная характеристика твердости H и модуля упругости E представлена в табл. 2. В целом по физико-механическим характеристикам уровень прочностных свойств ВЭС покрытий – TiCrZrHfNb и CuCrMnFeCoNi находится на уровне закаленной стали 40XH2MA с более высоким сопротивлением как упругой, так и пластической деформации.

2. Результаты физико-механических характеристик высокоэнтропийных покрытий (ВЭС) при напряжении смещения $U_s = 100$ В

2. Results of the physical and mechanical characteristics of high-entropy coatings (HEC) at a bias voltage of $U_s = 100$ V

Тип покрытия	H , ГПа	E , ГПа	H/E	H^3/E^2 , ГПа
Покрытие ВЭС системы TiCrZrHfNb (катод)	$75 \pm 1,56$	$141 \pm 22,3$	0,0532	0,0212
Покрытие ВЭС системы CuCrMnFe-CoNi (магнетрон)	5,44 5,23	197,05 136,65	0,0280 0,0393	0,00407 0,00990

Что касается трибологических результатов исследуемых ВЭС покрытий, то при заданных условиях испытаний ($v = 1$ мм/с; $L = 1,8$ м; $N = 5$ Н) износостойкость оказалась весьма высокой с низким значением коэффициента трения $\mu = 0,1 \dots 0,15$. Следует отметить, что покрытие, образец-подложка и подслоя составляют единую систему, определяющую такое важнейшее свойство покрытия, как адгезия. Так, например, использование в качестве подложки более пластичной аустенитной стали 316L ведет к повышению износа образцов по сравнению с подложкой из стали 40XH2MA. Нанесение подслоя из Ti или Cr показало, что результаты изменения коэффициента трения μ в процессе испытаний образцов с покрытием CuCrMnFeCoNi имели достаточно низкие значения $\mu = 0,1 \dots 0,15$ и высокую износостойкость.

В настоящее время внимание ученых обращено к углеродным материалам. В вакууме перегретый углеродный пар лазерным нагревом в струе инертного газа осаждается на образец в качестве покрытия [10, 11]. Чаще всего в качестве инертного газа

используется ацетилен C_2H_2 или метан C_2H_4 . Однако, вследствие взрывоопасности, в наших исследованиях в качестве инертного газа применяется азот для стабилизации покрытий DLC. Высокие значения физико-механических характеристик алмазоподобных (DLC) покрытий обусловлены тем, что углерод образует прочные межатомные связи [12, 13].

Получение износостойких характеристик и низкого коэффициента трения обусловлено тем, что DLC состоит из sp^2 - и sp^3 -углеродных структур. При этом структура с sp^3 -связями увеличивает твердость покрытия, приближая DLC к алмазу, а гибридизация sp^2 -углеродных структур представляет аморфные образования из графитоподобных кластеров с sp^2 -связей [14, 15].

Разработанное и использованное оборудование BRV-600 позволяет получение углеродной плазмы путем облучения графитового катода лазерной установкой (рис. 3).

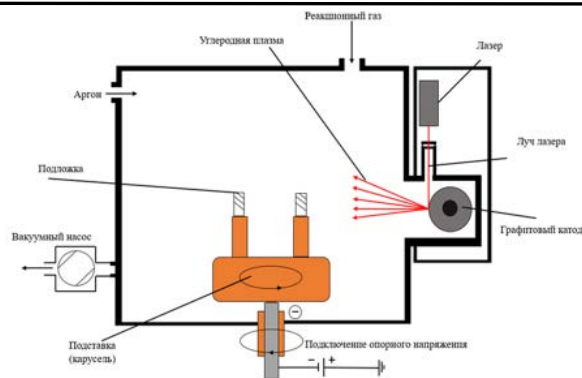


Рис. 3 Схема формирования алмазоподобного покрытия

Fig. 3. Diagram of a diamond-like coating formation

Результаты экспериментальных исследований DLC-покрытий показали, что наиболее существенными параметрами, влияющими на физико-механические и трибологические характеристики алмазоподобных покрытий являются – величина процентного содержания азота $N\%$ и величина тока индукционных катушек λ . Полученные зависимости твердости H и модуля упругости E от процентного содержания азота показывают, что оптимальное значение этого параметра лежит в пределах $N = 5 \dots 8\%$, а что касается тока катушек соленоида, то здесь в интервале $\lambda = 3,0 \dots 3,8$ А.

Экспериментальные зависимости коэффициента трения μ от технологических параметров $N\%$ и λ показывают, что с увеличением $N\%$ и λ коэффициент трения снижается. В отношении износостойкости определяем четко выраженный максимум при токе соленоида в пределах $\lambda = 1,8 \dots 2,5$ А. В результате, делаем вывод, что значения коэффициента трения μ синтезированных покрытий DLC, стабилизированных азотом, незначительно уступают коэффициенту трения алмаза, составляют $\mu = 0,1 \dots 0,15$ и могут быть рекомендованы для прикладного использования в узлах трения.

Заключение

1. В рамках исследования металлополимерных трибосистем с антифрикционными и фрикционными функциями повышение износостойкости и долговечности достигается следующим образом:

– для антифрикционных систем – через процесс формирования вторичных структур на поверхности трения. Был изучен механизм их образования в ходе трения между металлом и полимером, что послужило основой для разработки методики модификации полимеров, ввода в их состав наполнителей и наноразмерных добавок;

– для фрикционных систем – определение кинетики и механизмов воздействия, основанных на диффузионном и сегрегационном влиянии, на физико-механические и трибологические свойства сопрягаемых элементов. Исследование включало установление состава упрочняющих элементов с последующим определением методов и условий их интеграции в поверхностные слои металлического контробразца. Выявление упрочняющих элементов было осуществлено с применением квантово-химических расчетов и инструментальных методов анализа, как рентгеноэлектронная и оже-электронная спектроскопии, для оценки энергии связей атомов;

2. Повышение износостойкости металлических трибосистем путем нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий.

При нанесении вакуумных ионно-плазменных покрытий TiAlN и CrAlSiN видна корреляция между величиной износа и параметром H^3/E^2 – сопротивление покрытия пластической деформации. Резкое снижение износа J покрытия CrAlSiN является следствием высокой стойкости покрытия к смятию H^3/E^2 и относительно высокой пластичности подложки.

Для высокоэнтропийных покрытий (ВЭС) в целом по физико-механическим характеристикам стоит отметить, что уровень его прочностных свойств находится примерно на уровне закаленной стали 40ХН2МА с более высоким сопротивлением как упругой (в 1,5 раза), так и пластической деформации (в 2,5 раза). Результаты изменения коэффициента трения μ в процессе испытаний образцов с высокоэнтропийными покрытиями показали, что покрытия на стадии устойчивого трения имели достаточно низкие значения $\mu = 0,1 \dots 0,15$.

Углеродные DLC-покрытия, полученные на подложке из стали 40ХН2МА по оптимальным режимам нанесения при значениях технологических параметров $N\% = 5,5 \pm 0,5\%$ и $\lambda = 2,0 \pm 0,2$ А имеют низкий коэффициент трения $\mu = 0,1 \dots 0,15$ и могут быть рекомендованы для прикладного использования в условиях трения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Poate J.M. Surface modification and alloying by laser, ion, and electron beams / J.M. Poate, G. Foti, D.C. Jacobson. New York: Plenum Press, 1983. 243 p.
2. Сыркин В.Г. CVD-метод – химическое парофазное осаждение / В.Г. Сыркин. Москва: Наука, 2000. 47 с.
3. Повышение износостойкости металлических и металлополимерных трибосистем путём формирования структуры и свойств их поверхностного слоя / И.В. Колесников, П.Д. Мотренко, В.И. Колесников, Д.С. Мантуров. М.: ВИНТИ РАН, 2021. 168 с.
4. Теоретико-экспериментальные исследования закономерностей изменения структурно-фрикционных

свойств поверхностных слоев металлополимерных трибосистем. Разработка методов повышения износостойкости / И.В. Колесников, П.Д. Мотренко, В.И. Колесников, Е.С. Новиков. М. : ВИНТИ РАН, 2022. 136 с.

5. Колесников И.В. Системный анализ и синтез процессов, происходящих в металлополимерных узлах трения фрикционного и антифрикционного назначения / И.В. Колесников. М. : ВИНТИ РАН. 2017. 384 с.

6. Колесников В.И., Мигаль Ю.Ф., Доронькин В.Н., Новиков Е.С., Колесников И.В. Взаимодействие атомов примесных и легирующих элементов с поверхностью зерен в стали // Вестник Южного научного центра РАН. 2012. Т. 8, № 4. С. 27–33.

7. Nanoindentation / Fischer-Cripps A.C. (Ed.). New York: Springer-Verlag. 2004; <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5943-3>.

8. Yeh J.W. Alloy Design Strategies and Future Trends in High-Entropy Alloys. JOM. – 2013. Vol. 65. P. 1759–1771. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0761-6>

9. Многокомпонентные и высокоэнтропийные сплавы и нитридные покрытия на их основе / А.Д. Погребняк. Ф.Ф. Комаров, В.М. Береснев, С.В. Константинов, Г.А. Салищев. М.: ЛЕНАНД, 2021. 336 с.

10. Нерушев О.А., Сухинин Г.И. Кинетика образования фуллеренов при электродуговом испарении графита // ЖТФ. 1997. Т. 67, № 2. С. 41–49.

11. Komarov F.F. Carbon Nanotubes: Present and Future / F.F. Komarov, A.M. Mironov // Physics and Chemistry of Solids. 2004. Vol. 5, No. 3. P. 411–429.

12. Miyake S. Evaluation of protuberance and groove formation in extremely thin DLC films on Si substrates due to diamond tip sliding by atomic force microscopy / Shojiro Miyake, Shohei Yamazaki // Wear. 2014. Vol. 318. P. 135–144.

13. Тополянский П.А. Плазменные технологии упрочнения // РИТМ Машиностроения. 2016. № 3. С. 28–32.

14. Senthilkumar R. Experimental investigation on carbon nano tubes coated brass rectangular extended surface / Rajendran Senthilkumar, Sethuramalingam Prabhu, Marimuthu Cheralathan // Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 50. P. 1361–1368.

15. Ion-beam-deposited polycrystalline diamond-like films / E.G. Spencer, P.H. Schmidt, D.C. Joy, F.J. Sansalone // Appl. Phys. Lett. 1976. Vol. 29. P. 118–120.

REFERENCES

1. Poate J.M. Surface modification and alloying by laser, ion, and electron beams / J.M. Poate, G. Foti, D.C. Jacobson. New York: Plenum Press, 1983. 243 p.

2. Syrkin V.G. CVD-method – chemical vapor phase deposition / V.G. Syrkin. Moscow: Nauka, 2000, 47 p.

3. Wear resistance increase in metal and metal polymer tribosystems by forming the structure and properties of their surface layer / I.V. Kolesnikov, P.D. Motrenko, V.I. Kolesnikov, D.S. Manturov. Moscow: VINITI RAS, 2021, 168 p.

4. Theoretical and experimental studies of the patterns of changes in the structural and frictional properties of the surface layers of metal polymer tribosystems. Development of techniques for wear resistance increase / I.V. Kolesnikov, P.D. Motrenko, V.I. Kolesnikov, E.S. Novikov. Moscow : VINITI RAS, 2022, 136 p.

5. Kolesnikov I.V. System analysis and synthesis of processes occurring in metal polymer friction units of friction and antifriction purposes / I.V. Kolesnikov. Moscow : VINITI RAS, 2017, 384 p.

6. Kolesnikov V.I., Migalich V., Dronkin V.N., Novikov E.S., Kolesnikov I.V. Interaction of atoms of impurity and alloying elements with steel grain surfaces // Bulletin of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2012, vol. II. 8, no. 4, pp. 27–33.

7. Nanoindentation / Fischer-Cripps A.C. (Ed.). New York: Springer-Verlag. 2004; <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5943-3>.

8. Yeh J.W. Alloy Design Strategies and Future Trends in High-Entropy Alloys. JOM. – 2013. Vol. 65. P. 1759–1771. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0761-6>

9. Multicomponent and high-entropy alloys and nitride coatings based on them / A.D. Pogrebnyak. F.F. Komarov, V.M. Beresnev, S.V. Konstantinov, G.A. Salishchev. Moscow: LENAND, 2021, 336 p.

10. Nerushev O.A., Sukhinin G.I. Kinetics of fullerene formation by electric-arc vaporization of graphite // Tech. Phys. journal, 1997. Vol. 67, no. 2, pp. 41–49.

11. Komarov F.F. Carbon Nanotubes: Present and Future / F.F. Komarov, A.M. Mironov // Physics and Chemistry of Solids. 2004. Vol. 5, No. 3. P. 411–429.

12. Miyake S. Evaluation of protuberance and groove formation in extremely thin DLC films on Si substrates due to diamond tip sliding by atomic force microscopy / Shojiro Miyake, Shohei Yamazaki // Wear. 2014. Vol. 318. P. 135–144.

13. Topolyansky P.A. Plasma hardening technologies // RHYTHM Mashinostroenia, 2016, no. 3, pp. 28–32.

14. Senthilkumar R. Experimental investigation on carbon nano tubes coated brass rectangular extended surface / Rajendran Senthilkumar, Sethuramalingam Prabhu, Marimuthu Cheralathan // Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 50. P. 1361–1368.

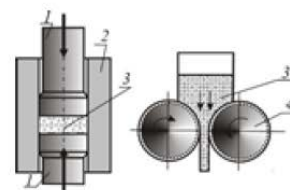
15. Ion-beam-deposited polycrystalline diamond-like films / E.G. Spencer, P.H. Schmidt, D.C. Joy, F.J. Sansalone // Appl. Phys. Lett. 1976. Vol. 29. P. 118–120.

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 08.04.2024; одобрена после рецензирования 19.04.2024; принята к публикации 25.04.2024

The article was submitted 08.04.2024; approved after reviewing 19.04.2024; assepted for publication 25.04.2024



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 8 (158). С. 12-21.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 8 (158). P. 12-21.

Научная статья
УДК 621.763/519.876.5
doi: 10.30987/2223-4608-2024-12-21

Разработка и использование формообразующей оснастки из полимерных композиционных материалов в производстве авиационных композитных конструкций

Сергей Николаевич Шевцов¹, д.т.н.

Наталья Геннадьевна Снежина², к.т.н.

Александр Дмитриевич Камчатный³, нач. НИО

¹ Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия

² Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

³ Ростовский вертолетный производственный комплекс ПАО «Роствертол»,
Ростов-на-Дону, Россия

¹ sergnshevtsov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4275-6984>

² snezhina_nataly@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8089-4504>

³ a.kamchatnyi@rostvert.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Рассмотрена проблема рационального проектирования конструкции, изготовления формообразующей оснастки из полимерных композиционных материалов и ее использования при формовании тонкостенных композитных конструкций методом вакуумной инфузии. С учетом требования минимальных деформаций коробления формуемой композитной конструкции, вызванных остаточными напряжениями в результате полимеризации связующего, обосновывается необходимость создания такой оснастки за два этапа, включающих изготовление мастер-формы на оборудовании с ЧПУ и самой открытой композитной формы, используемой для формования готовых конструкций. На примере тонкостенной авиационной конструкции сложной геометрии показана возможность формирования технологической схемы и управления режимами изготовления композитной формы и детали, формуемой на ней, с помощью разработанного средства компьютерного моделирования, использующего в качестве исходной информации экспериментально определенные характеристики компонентов (армирующих стекло-, углетканей и термореактивных смол) и САД модели формуемой конструкции. Необходимое экспериментальное оборудование, техника эксперимента и обработки данных для получения зависимостей сжимаемости и проницаемости от степени заполнения связующим композитных преформ, от соотношения прикладываемого извне компрессионного и внутреннего давления, рассматриваются на примере 8-слойной преформы из стеклоткани Т-10-14. Для корректного описания вязкости термореактивных смол, эволюционирующей в ходе процесса и зависящей от температуры, степени полимеризации и времени, предложена полупэмпирическая модель, параметры которой определяются экспериментально методами дифференциальной сканирующей калориметрии и реометрии. Использование разработанного средства компьютерного моделирования для максимального повышения уровня и выравнивания удельного объема армирующего компонента в теле формуемой конструкции, сокращения продолжительности вакуумно-инфузионного процесса иллюстрируется на примере трех стратегий управления внешним компрессионным и вакуумным давлениями.

Ключевые слова: тонкостенные композитные конструкции, геометрическая точность конструкций, технология композитов, вакуумно-инфузионное формование, сжимаемость и проницаемость композитных преформ, термокинетика и реология связующих, компьютерное моделирование процессов

Благодарности: материал подготовлен при поддержке Российской академии наук (ГЗ ЮНЦ РАН № ААА-А-А16-116012610052-3, ЦКП РАН №501994 и ПАО «Роствертол» (НИР №13-23-УНИ).

Для цитирования: Шевцов С.Н., Снежина Н.Г., Камчатный А.Д. Разработка и использование формообразующей оснастки из полимерных композиционных материалов в производстве авиационных композитных конструкций // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 8 (158). С. 12–21. doi: 10.30987/2223-4608-2023-12-21

Development and exploitation of shape-generating molding tools made of polymer composite materials in the production of aircraft composite structures

Sergey N. Shevtsov¹, D. Eng.

Natalia G. Snezhina², PhD Eng.

Alexander D. Kamchatny³, Chief of research department

¹ Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia

² Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

³ Rostov Helicopter Production Complex «Rostvertol» PJSC, Rostov-on-Don, Russia

¹ sergnshevtsov@gmail.com

² snezhina_nataly@mail.ru

³ a.kamchatnyi@rostvert.ru

Abstract. The problem of rational design of the structure, manufacturing of shape-generating molding tools made of polymer composite materials and its use in forming thin-walled composite structures by vacuum infusion is viewed. Taking into account the requirement of minimum deformations of warping of the molded composite structure caused by residual stresses as a result of polymerization of the binder, the necessity of creating such equipment in two stages is justified. This implies both: a master mold making on CNC and producing the most open composite mold used for molding finished structures. Using the example of a thin-walled aircraft structure of complex geometry, the possibility of obtaining a process scheme and controlling the modes of manufacturing a composite mold and a part molded on it applying a developed computer modeling tool, that uses experimentally determined characteristics of components (reinforcing glass, carbon fabrics, thermosetting resins) and CAD models of the molded structure as initial information, is shown. The necessary experimental equipment, experimental technique and data processing to obtain the dependences of compressibility and permeability on the degree of binder filling of composite molds, and also on the ratio of externally applied compression and internal pressure, are viewed evidence from an 8-layer fiberglass preform T-10-14. For the consistent description of the viscosity of thermo-reactive resins, which evolves within the process and depends on temperature, degree of polymerization and time, a semi-empirical model is proposed, the parameters of which can be found in an empirical way by methods of differential scanning calorimetry and rheometry. The use of the developed computer modeling tool to maximize the level and equalization of the specific volume of the reinforcing component in the body of the molded structure, reducing the duration of the vacuum infusion process is illustrated by the example of three strategies for controlling external compression and vacuum pressures.

Keywords: thin-walled composite structures, geometric precision of structures, composite technology, vacuum infusion molding, compressibility and permeability of composite molds, thermo-kinetics and rheology of binders, computer modeling of processes

Acknowledgements: the material was prepared with the support of the Russian Academy of Sciences (State Scientific Research Center of the Russian Academy of Sciences No. AAA-A-A16-116012610052-3, Central Research Center of the Russian Academy of Sciences No. 501994 and Rostvertol PJSC (Research Institute No. 13-23-UNI).

For citation: Shevtsov S.N., Snezhina N.G., Kamchatny A.D. Development and exploitation of shape-generating molding tools made of polymer composite materials in the production of aircraft composite structures / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 8 (158). P. 12–21 doi: 10.30987/2223-4608-2023-12-21

ВВЕДЕНИЕ

Непрерывно прогрессирующая в последние два десятилетия тенденция замены металлических авиационных конструкций их композитными аналогами способствовала созданию новых полимерных композиционных материалов (ПКМ), технологий производства новых армирующих компонентов и связующих, конструкций из этих материалов. Основными причинами роста использования ПКМ, особенно в производстве авиационной

техники, являются такие их преимущества, как повышенная удельная прочность, значительно лучшее усталостное поведение, коррозионная стойкость. В многообразии методов производства композитных конструкций все большее внимание практиков привлекают разновидности вакуумно-инфузионных технологий, что обусловлено малозатратностью и значительно меньшей продолжительностью соответствующей подготовки производства. Типичная схема вакуумно-инфузионного процесса представлена на рис. 1.

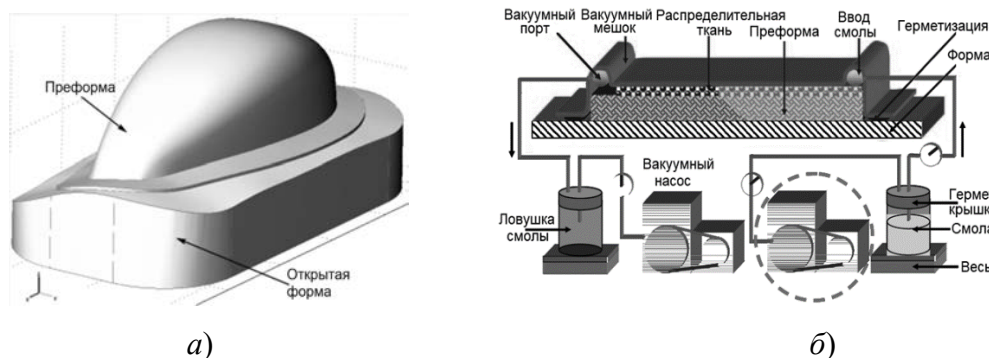


Рис. 1. Выкладка сухой композитной преформы на поверхность открытой формы (а) и схема инфузионного процесса (б)

Fig. 1. Laying out a dry composite pre-form on the surface of an open mold (a) and the scheme of the infusion process (b)

Стандартный вакуумно-инфузионный процесс включает четыре основных этапа: выкладку определенным образом ориентированных слоев сухой ткани, образующих так называемую преформу, на поверхность открытой формы; подключение портов подачи жидкой смолы и вакуума, накрытие преформы гибким вакуумным мешком и его герметизация по всему периметру; включение вакуумного насоса, создающего разрежение в пористой преформе, увлекающее смолу внутрь преформы за счет разности между давлением в содержащем смолу сосуде и вакуумным вплоть до заполнения смолы всего объема преформы; и термообработку заполненной преформы для отвердевания смолы [1].

Как правило, процесс наиболее эффективен при формировании тонкостенных

конструкций. При внешней простоте процесса его реализации свойственны значительные сложности в случае формования композитных деталей сложной геометрии, больших габаритов, имеющих окна, участки различной ширины и толщины, что резко усложняет картину распространения смолы, ухудшая повторяемость, качество, в ряде случаев создавая критические ситуации типа блокировки смолой вакуумного порта при наличии незаполненных участков преформы [2]. Образование таких участков преформы, называемых в технической литературе «сухими островками», может происходить как на периферии, так и внутри преформы (рис. 2), приводя к браку, исправление которого без потери прочности конструкции невозможно.

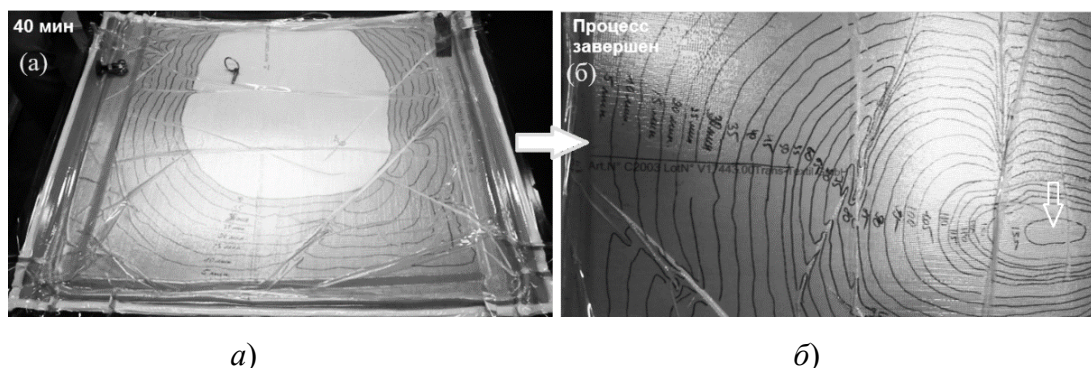


Рис. 2. Распространение фронта связующего с образованием «сухого островка»: а – через 40 мин после начала процесса; б – через 2 ч по окончании

Fig. 2. Propagation of the binder front with the formation of a «dry island»: а – 40 minutes after the start of the process; б – 2 hours after the end

Условия образования, динамика эволюции таких дефектов исследованы экспериментально в работах [3, 4] и численно с использованием специализированных программных средств [5, 6], моделирующих распространение жидкой смолы с изменяющейся во времени вязкостью [7], позволяя изменять схемы расположения портов и температурный режим.

Другим недостатком вакуумно-инфузионных процессов является неравномерность распределения удельного объема армирования V_f , содержания смолы $V_r = 1 - V_f$ и толщины стенок h , что вызвано градиентом порового давления ∇p^m в преформе, который, увлекает смолу в сторону вакуумного порта, но также приводит к ее расширению, так как компрессионное давление p^{comp} , сжимающее преформу и прижимающее ее к открытой форме, равно разности атмосферного p^{atm} и порового p^m давлений. Следствием пространственной вариации величины V_f , оптимальное значение которой обычно находится в пределах 0,65...0,7, но, как правило, убывает по мере приближения к инжекционному порту, является неравномерность толщины стенок формируемой конструкции и ее жесткости [8, 9], так как модуль упругости высокопрочных армирующих волокон примерно на порядок превосходит модуль эпоксидной матрицы. Решение проблемы выравнивания структуры, толщины и механических свойств преформы исследовано экспериментально на образцах [10] и теоретически [11, 12] при реализации различных сценариев управления внешним давлением на преформу и давлением в вакуумной магистрали.

Третьим недостатком обсуждаемого метода, присущим методам формования в открытых металлических формах, является коробление тонкостенных композитных деталей по завершении их полимеризации, что вызвано значительным отличием коэффициентов температурного расширения полимерных композитов и металлических сплавов [13, 14]. Пример такой конструкции и формообразующей оснастки приведен на рис. 3.



Рис. 3. CAD модель тонкостенного обтекателя (а) из ПКМ и открытая металлическая форма (б) для его формования

Fig. 3. CAD model of a thin-walled cowling (a) made of PCM and an open metal mold (b) for its molding

Как один из способов согласования коэффициентов температурного расширения материалов формируемой детали и самой формы многими авиапроизводителями изучается возможность использования формообразующей оснастки из полимерных композитов [15]. Решение этой проблемы осложнено тем, что металлические формы сложной геометрии, обрабатываемые на станках с ЧПУ, должны обладать необходимой жесткостью, т. е. достаточной толщиной стенок. При этом необходимый теплообмен между формой и преформой обеспечивается за счет высокой теплопроводности алюминиевого сплава. Но полимерные композиты, из которых могут изготавливаться открытые формы, обладают очень низкой теплопроводностью. Следовательно, эти формы должны быть тонкостенными, что делает невозможным их изготовление на оборудовании с ЧПУ. В статье рассматривается двухстадийная технология производства формообразующей оснастки из ПКМ, включающая изготовление используемых в серийном производстве тонкостенных открытых форм методом вакуумной инфузии на жесткой полимер-композитной мастер-форме, оснащаемой ребрами жесткости и колодцами для теплообмена.

CAD моделирование формообразующей оснастки

Методика создания всего комплекса CAD моделей формообразующей оснастки отработывалась на тонкостенной ($h = 2,5 \pm 0,1$ мм) детали «обшивка» с габаритными размерами $664 \times 308 \times 140$ мм (рис. 4, а). Первоисточником информации для построения всех моделей является лицевая выпуклая поверхность детали, геометрия которой задана CAD моделью и должна формироваться при изготовлении путем копирования с формообразующей

поверхности открытой формы. Однако, при проектировании оснастки именно лицевая поверхность должна быть скопирована с минимальными отклонениями на формообразующие поверхности обеих форм. Для этого в модели лицевой поверхности детали удаляются отверстия и стыки; далее она расширяется с сохранением непрерывности вплоть до вторых производных по контуру примерно на расстояние ~ 100 мм (рис. 4, б). На этой поверхности выделяются контуры будущих форм: тонкостенной и мастер-формы. Окруженные этими контурами части лицевой поверхности экструдируют на нужную толщину: для тонкостенной формы на 8 мм в сторону вогнутой поверхности, а для мастер-формы –

примерно на 40 мм в сторону выпуклости (см. рис. 4, в и г). Далее, для устойчивого положения обеих форм при выкладке на них преформ нижняя опорная поверхность обеих форм выполняется плоской; для тонкостенной формы путем оснащения пояском шириной 40 мм по периметру из термостойкого пористого материала, мастер-форма – фрезерованием опорной плоскости и выполнение колодцев для улучшения теплообмена с преформой (см. рис. 4, д и е). Представленные на рис. 4 модели используются для изготовления оснастки и контроля ее геометрии лазерным координатографом. Для моделирования вакуумно-инфузионного процесса используются собранные CAD модели (рис. 5).

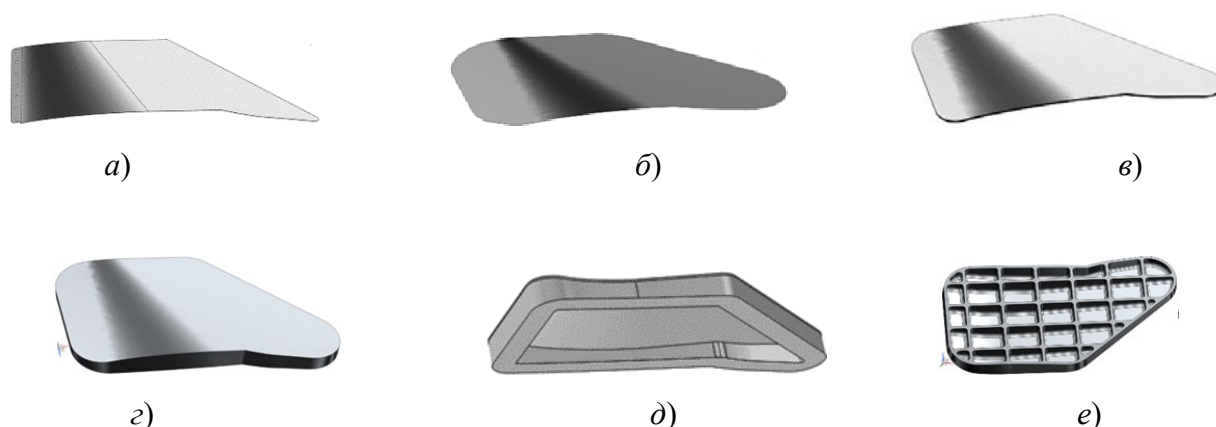


Рис. 4. CAD модели, используемые для проектирования и изготовления формообразующей оснастки:

a – модель готовой детали «обшивка»; *б* – теоретическая лицевая поверхность детали после удаления отверстий, стыков и расширения на 100 мм по всему периметру; *в, г* – модели тонкостенной и мастер-формы после экструзии до нужной толщины; *д, е* – модели обеих форм после оснащения опорными поверхностями

Fig. 4. CAD models used for the design and manufacture of forming equipment:

a – model of the finished part «cladding»; *b* – theoretical front surface of the part after removing holes, joints and expansion by 100 mm around the perimeter; *c, d* – models of thin-walled and master molds after extrusion to the desired thickness; *e, f* – models of both forms after being equipped with support surfaces



Рис. 5. CAD модели сборки:

a – преформы формируемой детали «обшивки» с тонкостенной открытой формой; *б* – преформы тонкостенной формы, выложенной на поверхность мастер-формы

Fig. 5. CAD assembly models:

a – pre-forms of the molded part «skinning» with a thin-walled open shape; *b* – thin-walled pre-forms laid on the surface of the master mold

Экспериментальное определение свойств компонентов

При вакуумной инфузии жидкого связующего в сухую преформу, как и во всех процессах распространения жидкостей в пористых средах, основными факторами, определяющими динамику движения смол, являются сжимаемость и проницаемость пористого каркаса и вязкость смолы, зависящая от времени, температуры и степени полимеризации. Методики и результаты определения сжимаемости и проницаемости используемых в производстве пористых преформ кратко рассмотрены ниже. Рассмотрение достаточно сложных и трудоемких методик определения характеристик вязкости термореактивных смол выходит за рамки настоящей публикации, в связи с чем, ниже представлена только полуэмпирическая модель вязкости, используемая при моделировании процесса, а также для практического прогноза его продолжительности.

Целью определения сжимаемости является получение зависимости между приложенным сжимающим давлением и таких величин, как удельная доля армирования и пористость, определяемые в эксперименте (рис. 6) по изменению толщины преформы с помощью микрометрического лазерного датчика смещения RF603 с точностью ± 1 мкм.



Рис. 6. Общий вид установки для измерения сжимаемости композитных преформ

Fig. 6. General view of the installation for measuring the compressibility of composite pre-forms

В экспериментальной установке преформа подвергается сжатию за счет разности между атмосферным и регулируемым вакуумным давлением. Измерения лазерным датчиком смещения обрабатываются программой rf60_x, и далее, экспериментальные точки усредняются и аппроксимируются аналитическими зависимостями $V_f(p) = b \cdot \text{acosh}(p/a) + c$, типа представленных на рис. 7 для восьми-слойных сухих и влажных преформ Т-1014, используемыми при моделировании процесса вакуумной инфузии.

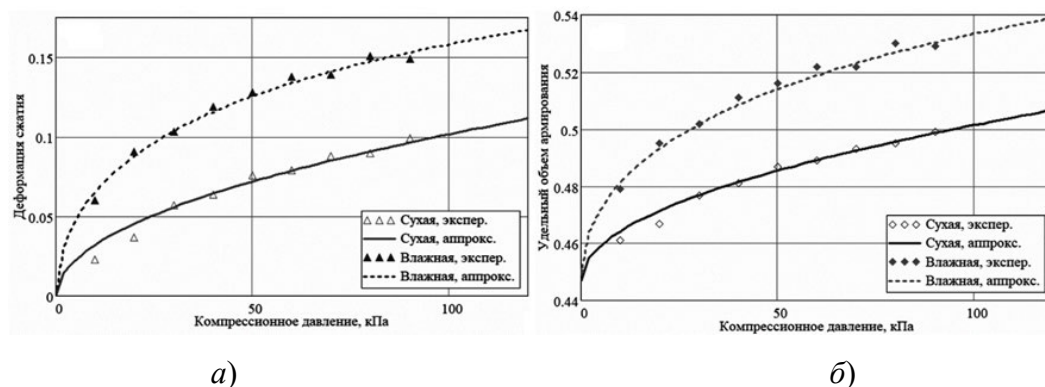


Рис. 7. Совмещенные экспериментальные и аналитические зависимости деформаций (а) и удельного объема армирования (б) преформы от компрессионного давления

Fig. 7. Combined experimental and analytical dependences of deformations (a) and the specific volume of reinforcement (b) of the pre-form on the compression pressure

Согласно закону Дарси [5] связь вектора скорости u жидкости с вязкостью μ под действием градиента давления ∇p в пористой среде описывается зависимостью [5]:

$$u = - [K] \cdot \nabla p / \mu, \quad (1)$$

где $[K]$ – тензор проницаемости пористой среды, зависящий от соотношения удельного объема пор ϕ и армирующих волокон V_f . Для обеспечения трансверсальной изотропии исследуемых схем выкладки восьмислойных преформ тензор проницаемости всегда принимался в диагональном виде, и его равные по

величине тангенциальные компоненты K_t принимались в 4 раза больше нормальной K_n [2, 6, 8]. Учитывая тонкостенность изготавливаемых конструкций, экспериментально определяли продольную проницаемость. Спроектированная и изготовленная установка обеспечивала определение проницаемости, как при стационарном течении смол, так и при перемещении фронта связующего по сухой преформе (см. рис. 8). Ввод смолы и вакуума производился с противоположных сторон образца прямоугольной формы размером 150×200 мм. Покадровый разбор видеозаписи с микровидеокамеры STUOGYUM позволял определять скорость движения фронта смолы во времени. Для определения продольной проницаемости в описываемой ниже системе моделирования

строилась модель эксперимента, и производился подбор значений проницаемости до совпадения скорости движения фронта смолы в модели и в эксперименте.

Третьим важнейшим свойством исследуемой системы является зависимость вязкости, которая на основе экспериментов по определению зависимости степени полимеризации α и вязкости от температуры T была предложена в виде полуэмпирической модели

$$\mu(t, T, \alpha) = \mu(T_0) \cdot \exp(a_\mu(T) + b_\mu(T) \cdot \alpha^2(t)), \quad (2)$$

где a_μ и b_μ – многочлены второй степени от абсолютной температуры, а T_0 начальная (до подогрева) температура смолы, принимаемая во всех экспериментах равной $50 + 273$ °K.

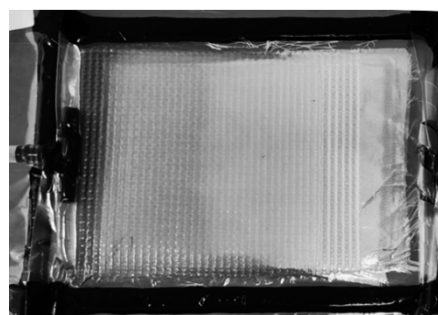
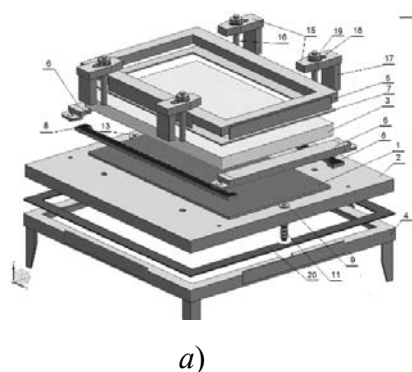


Рис. 8. Схема установки для измерения продольной проницаемости композитных преформ (а) и фото распространения смолы при нестационарном течении (б)

Fig. 8. Installation diagram for measuring the longitudinal permeability of composite preforms (a) and photo propagation of resin under unsteady flow (b)

Моделирование вакуумно-инфузионных процессов

Целью разработки системы компьютерного моделирования вакуумно-инфузионных технологий производства композитных конструкций было создание элемента технологической подготовки производства, обеспечивающего предварительное, до выполнения большей части проектно-конструкторских работ, изготовления оснастки и испытаний процесса выявление возможных критических ситуаций, брака, оценка производительности и примерных показателей достигаемого качества процесса. Для моделирования используется конечноэлементный (КЭ) метод решения прямой задачи моделирования в системе Comsol Multiphysics 6.1 [5]. Модель

обеспечивает точное описание фронта связующего, его полимеризацию и изменение вязкости, конвективное перемещение степени полимеризации, а также объемную деформацию преформы, зависящую от ее заполненности смолой и внешнего компрессионного давления. Управляемыми параметрами процесса являются температура, величины и моменты приложения давлений к внешней поверхности преформы и в вакуумной магистрали. САД модель технологической системы (см. рис. 9), а также свойства используемых преформы и связующего, включая анизотропию механических и тепловых свойств, должны быть введены в систему.

После импорта геометрии задаются схема расположения портов подачи связующего и подключения к вакуумной магистрали;

закон изменения температуры, действующей на открытые поверхности технологической системы, и температура смолы, вводимой в преформу; закон изменения давления в

вакуумной магистрали, а также давления на открытую поверхность преформы, если это давление отличается от атмосферного.

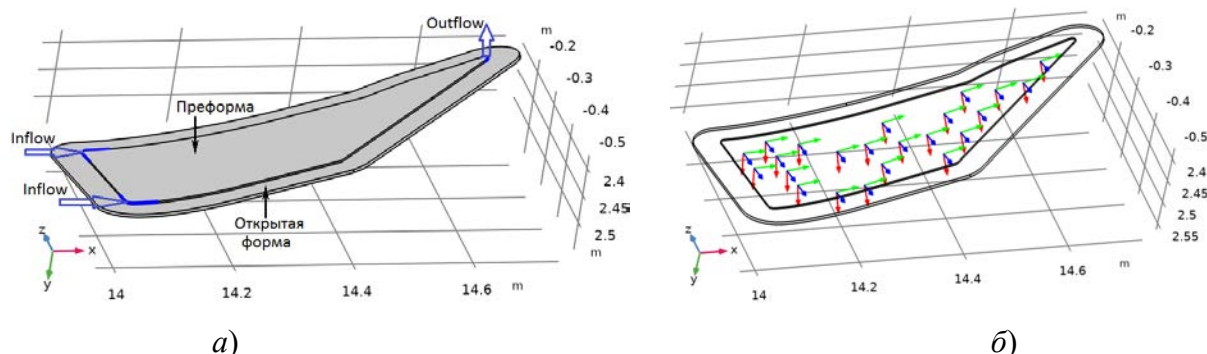


Рис. 9. Геометрия моделируемой области (а) и локальные системы координат, заданные на лицевой поверхности преформы (б) для описания конструкционной анизотропии материала

Fig. 9. Geometry of the simulated area (a) and local coordinate systems set on the front surface of the pre-form (b) to describe the structural anisotropy of the material

После задания всех начальных и граничных условий с учетом температурного режима процесса вводится ожидаемое время моделирования процесса, шаг интегрирования по времени и производится сеточное разбиение, густота которого зависит от толщины и кривизны тела.

Некоторые результаты моделирования трех вариантов управления процессом вакуумной инфузии в системе, изображенной на рис. 9, приведены ниже. Режим 1 соответствует традиционной вакуумной инфузии, при которой внешнее давление на преформу равно

атмосферному, а давление в вакуумной магистрали неизменно и равно 20 кПа. На режиме 2 через 105 мин после начала процесса одновременно повышаются давления: внешнего от 100 до 180 кПа, а вакуумного – от 20 до 100 кПа. На режиме 3 давление в вакуумной магистрали начинает возрастать на 1 ч позже по сравнению с режимом 2 (см. рис. 10). Режимы 2, 3 соответствуют экспериментам, представленным в работе [10], где использовалось управление давлениями для выравнивания распределения V_f .

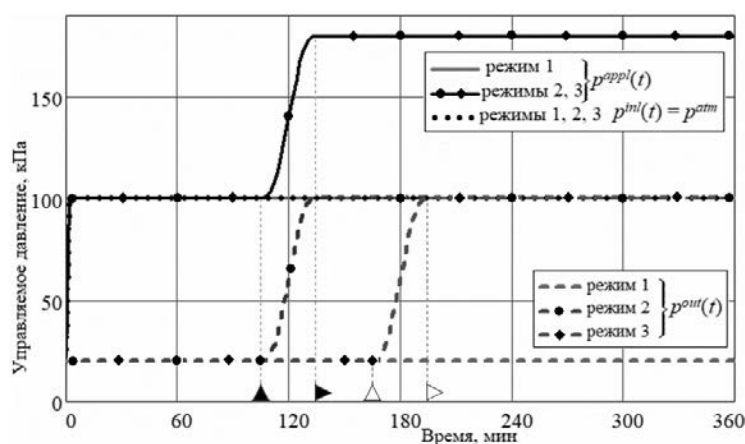


Рис. 10. Временные зависимости управляемых давлений – внешнего приложенного к преформе и в вакуумном порте для трех исследуемых режимов

Fig. 10. Time dependences of controlled pressures – external applied to the pre-form and in the vacuum port for the three studied modes

Графики на рис. 11 показывают, что рациональное управление внешними давлениями позволяет не только увеличить удельный объем армирующего компонента $\langle V_f \rangle$ и более чем в 10 раз снизить его рассеяние $\max(\delta V_f)$,

но и сократить время до стабилизации параметров качества процесса с 6 ч до 3 ч 15 мин, что соответствует экспериментальным данным работы [10].

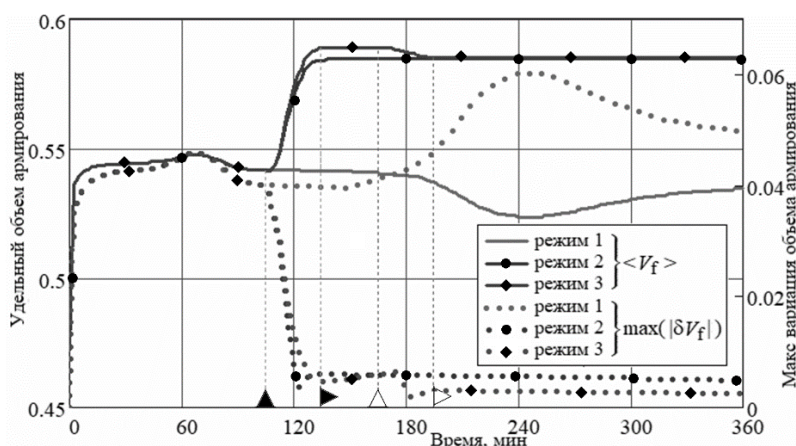


Рис. 11. Временные зависимости усредненных по объему преформы относительных объемов армирующего компонента $\langle V_f \rangle$ и его максимального рассеяния $\max(\delta V_f)$ в теле преформы для трех режимов процесса

Fig. 11. Time dependences of the relative volumes of the reinforcing component $\langle V_f \rangle$ averaged over the volume of the preform and its maximum scattering $\max(\delta V_f)$ in the body of the pre-form for three process modes

Возможности системы моделирования позволяют также с помощью 3D скриншотов и анимаций количественно оценить состояние всех параметров технологической системы в любой момент времени, определить характер и динамику происходящих процессов, выявить их причины и, при необходимости, изменить схему или режимы.

ВЫВОДЫ

Разработанные средства CAD дизайна средств технологического оснащения, конечно-элементного моделирования, методы экспериментального определения свойств компонентов ПКМ, позволяют обоснованно разрабатывать и усовершенствовать вакуумно-инфузионную технологию производства тонкостенных полимер-композитных конструкций с повышенными требованиями к кратковременной, длительной прочности и точности геометрии. Материальные затраты, связанные с оснащением дополнительным технологическим и испытательным оборудованием, компенсируются повышенными производительностью процесса, качеством готовой продукции и сокращением затрат на многократное повторение длительных экспериментов с дорогостоящими компонентами. В

настоящее время представленная технология осваивается в специализированной лаборатории ПАО «Роствертол» совместно с ЮНЦ РАН и ДГТУ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Hsiao K.T., Heider D. Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) in polymer matrix composites // Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs). – Woodhead Publishing, 2012. P. 310–347. DOI: 10.1533/9780857096258.3.310.
2. Matveev M.Y. et al. A numerical study of variability in the manufacturing process of thick composite parts // Composite Structures. 2019. vol. 208. P. 23–32. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.09.092.
3. Mehdikhani M. et al. Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance // Journal of Composite Materials. 2019. vol. 53. № 12. P. 1579–1669. DOI: 10.1177/0021998318772152
4. Hu W., Centea T., Nutt S. Effects of material and process parameters on void evolution in unidirectional prepreg during vacuum bag-only cure // Journal of Composite Materials. 2020. vol. 54. № 5. P. 633–645. DOI: 10.1177/0021998319864420.
5. Shevtsov S. et al. Two-stage numerical approach for reliable recognition of dry spots at the VAP infusion of large composite parts of complex shape // Composite Structures. 2021. vol. 259. P. 113437. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113437.

6. **Chai B.X.** et al. Simulation-based optimisation for injection configuration design of liquid composite moulding processes: A review // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2021. vol. 149. P. 106540. DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106540.

7. **Hwang S.S.** et al. Cure kinetics and viscosity modeling for the optimization of cure cycles in a vacuum-bag-only prepreg process // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. vol. 99. P. 2743–2753. DOI: 10.1007/s00170-018-2467-y.

8. **Martinez P., Jin B., Nutt S.** Thickness variation in contoured composite parts by vacuum infusion // *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*. 2023. vol. 9. № 1. P. 2279604. DOI: 10.1080/20550340.2023.2279604.

9. **Hu Y.** et al. Thickness effect on flexural strengths of laminar carbon fibre composites // *Thin-Walled Structures*. 2023. vol. 186. P. 110690. DOI: 10.1016/j.tws.2023.110690.

10. **Yalcinkaya M.A., Sozer E.M., Altan M.C.** Dynamic pressure control in VARTM: Rapid fabrication of laminates with high fiber volume fraction and improved dimensional uniformity // *Polymer Composites*. 2019. vol. 40. № 6. P. 2482–2494. DOI: 10.1002/pc.25130.

11. **Zhilyaev, I.** et al. Simulation of the composite performs post-infusion leveling of porosity and thickness under action of controlled pressures // *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2022, Vol. 24, No. 4, P. 5–17. DOI: 0.15593/2224/-9877/2022.4.01.

12. **Shevtsov, S.** et al. Modeling of vacuum-infusion molding of thin walled composite structures using post-infusion equalizing pressures // In *Conference proceedings: Simulation. Theory and practice (IMMOD-2023)*, Kazan: AN RT publ., 2023, P. 290–300.

13. **Zhang C.** et al. Review of curing deformation control methods for carbon fiber reinforced resin composites // *Polymer Composites*. 2022. vol. 43. № 6. P. 3350–3370. DOI: 10.1002/pc.26648.

14. **Zhang C.** et al. Effect of mold on curing deformation of resin transfer molding-made textile composites // *Polymer Composites*. 2023. vol. 44. № 11. P. 7599–7610. DOI: 10.1002/pc.27648.

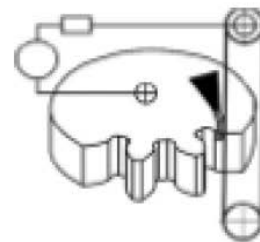
15. **Jing X.** et al. Process optimization for short carbon fiber polyetherimide composite mold // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2023. P. 07316844231194589. DOI: 10.1177/07316844231194589.

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 08.04.2024; одобрена после рецензирования 12.04.2024; принята к публикации 18.04.2024.

The article was submitted 08.04.2024; approved after reviewing 12.04.2024; assepted for publication 18.04.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 8 (158). С. 22-30.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 8 (158). P. 22-30.

Научная статья
УДК 621.7/620.3
doi: 10.30987/2223-4608-2024-22-30

Использование новых видов технологической оснастки при изготовлении нежестких плоскостных алюминиевых деталей методом волновых технологий

Евгений Степанович Киселёв¹, д.т.н.

Кирилл Сергеевич Жирухин², аспирант

^{1, 2} Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

² ООО «ХАЛТЕК-ДоАЛЛ», Ульяновск, Россия

¹ kec.ulstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1745-9016>

² Kirill.Zhirukhin@haltec.ru, <https://orcid.org/0009-0008-4759-0710>

Аннотация. Предложено использование волновых технологий при изготовлении нежестких плоскостных деталей с введением в зону формообразования колебаний ультразвукового диапазона в совокупности с технологической оснасткой – системой нулевого базирования. Традиционная технология, используемая на отечественных предприятиях, сопряжена с большой вероятностью возникновения короблений и деформаций ввиду влияния технологических остаточных напряжений (ТОН) в процессе съема припусков и силовых напряжений в процессе пластической деформации детали при закреплении заготовки. Используя современные универсальные программные комплексы типа SimulaAbaqus, ANSYS и т. п., удалось определить величину деформаций, поводок, вызываемых остаточными напряжениями. Полученные данные были использованы для расчета рациональных схем закрепления некоторых типовых нежестких плоскостных алюминиевых заготовок на технологической оснастке – системе нулевого базирования немецкого производства SCHUNKVERO-SAaviation (VSA). Исследования проводились с целью определения технологичности применения данной оснастки на той или иной типовой нежесткой заготовке из алюминиевых сплавов и определения наиболее оптимальной схемы ее закрепления. Предполагаемые величины ТОН определялись механическим и рентгеновским методами. Расчёты выполнялись на примерах реальных деталей авиационной техники типа «балка» и заготовок из алюминиевого проката. Предложенная методика определения максимальной величины деформации заготовки при механической обработке применима к наиболее оптимальному размещению опорных и зажимных модулей системы нулевого базирования (VSA). В совокупности с определенной стратегией волновой механической обработки она позволяет практически полностью компенсировать деформации и получить годное изделие с первого предъявления без выполнения дополнительной операции правки.

Ключевые слова: система нулевого базирования, остаточные напряжения, базирование, метод конечных элементов, плоскостная заготовка, волновая технология

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту №Н190120-VSA, экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования учебно-технологического центра компании ООО «ХАЛТЕК-ДоАЛЛ».

Для цитирования: Киселёв Е.С., Жирухин К.С. Использование новых видов технологической оснастки при изготовлении нежестких плоскостных алюминиевых деталей методом волновых технологий // Научные технологии в машиностроении. 2024. № 8 (158). С. 22–30. doi: 10.30987/2223-4608-2024-22-30

The use of new types of technological equipment in non-rigid plane aluminum parts production using wave techniques

Evgeny S. Kiselyov¹, D.Eng.
Kirill S. Zhirukhin², PhD student

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

² HALTEK-DoALL LLC, Ulyanovsk, Russia

¹ kec.ulstu@mail.ru

² Kirill.Zhirukhin@haltec.ru

Abstract. It has been suggested that wave technologies in non-rigid plane parts production should be used with the introduction of ultrasonic range vibrations into the shaping zone in combination with technological equipment, i.e. it is a zero-based system. The traditional technique used in domestic enterprises implies a high probability of out-of-flat conditions and deformations due to the influence of technological residual stresses (TRS) in the process of stock removal or force stresses under plastic deformation of the part when fixing blanks. Using modern universal software systems such as Simulia Abaqus, ANSYS, etc., it was possible to determine the magnitude of deformations, alignment errors caused by residual stresses. The data obtained were used to calculate rational ways for fixing some typical non-rigid plane aluminum blanks on a technological equipment - a zero-based system of German production SCHUNKVERO–SAviation (VSA). The research was aimed at determining the manufacturability for the use of such equipment when making a particular non-rigid blank made of aluminum alloys and finding the most optimal way of its fixing. The estimated values of the TRS were determined by mechanical and X-ray methods. The calculations were performed using real parts of aircraft equipment of the "beam" type and blanks made of aluminum rolled products. The proposed method for determining the maximum amount of deformation of the workpiece under machining is applicable to the most optimal placement of the support and clamping modules of the zero-based system (VSA). In combination with a certain strategy of wave mechanical processing, it makes a practically complete compensation for deformations possible and allows obtaining a suitable product from the first presentation without performing an additional correction operation.

Keywords: zero-based system, residual stresses, basing, finite element method, plane blank, wave technique

Acknowledgements: the material was prepared within the framework of scientific research under project No. H190120-VSA, experimental studies were carried out using the equipment of the educational and technological center of the company HALTEK-DoALL LLC.

For citation: Kiselyov E.S., Zhirukhin K.S. The use of new types of technological equipment in non-rigid plane aluminum parts production using wave techniques / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 8 (158). P. 22–30. doi: 10.30987/2223-4608-2024-22-30

Изготовление нежестких плоскостных деталей сопряжено с большой вероятностью короблений и деформаций, из-за возникновения в процессе съема припусков технологических остаточных напряжений (ТОН) и силовых напряжений в процессе пластической деформации детали при закреплении заготовки. Особенно сложно обеспечить требуемую точность взаимного расположения обрабатываемых поверхностей деталей из алюминиевых сплавов, что объясняется их низкой температурой плавления и недостаточной прочностью. Волновая технология изготовления деталей или

технология механической обработки с наложением колебаний (например – ультразвуковых (УЗК)) на элементы технологической системы и смазочно-охлаждающую жидкость, как известно, способствует снижению сил резания, увеличению производительности механической обработки и уменьшению вероятности возникновения нежелательных ТОН и других дефектов поверхностного слоя (ПС) в материале заготовки. В связи с этим волновые технологии ультразвукового диапазона находят широкое применение в современной обрабатывающей промышленности при изготовлении

нежестких деталей, особенно после того как компания DMG MORI начала использовать их в линейке станков ULTRASONIC [1].

Необходимо отметить, что ещё в пятидесятые годы прошлого столетия немецкий физик Л. Бергман в своей работе [2] установил, что при облучении твердых металлов отмечается заметное воздействие ультразвуковых волн на процессы перемагничивания металлов (расшатывание молекулярных магнитов), азотирования сталей, фазовых превращений металла при определённых температурах и условиях, очистки поверхности металла путём удаления оксидной плёнки и др. Отмечается, что путём расшатывания кристаллической структуры металлов ультразвуком, можно уменьшить остаточные напряжения в ПС заготовки. В работах [3, 4] рассмотрен комплекс вопросов, связанных с использованием ультразвуковых колебаний малой мощности как для интенсификации процессов абразивной и лезвийной обработки заготовок, так и релаксации ТОН. Получены новые результаты исследований и промышленной апробации использования энергии маломощного, в том числе модулированного, ультразвукового поля для повышения производительности механической обработки и качества деталей без применения специального или модернизированного металлорежущего оборудования. Установлено, что введение в зону формообразования новых поверхностей энергии маломощного модулированного (по амплитуде частоте, фазе и форме сигнала) ультразвукового поля позволяет существенно снизить теплосиловую напряженность процесса резания (не менее чем на 30 %). В связи с этим, уменьшается вероятность возникновения ТОН, а следовательно – короблений и деформаций.

В продолжение данных изысканий в работе [5] оценивалась эффективность ультразвуковой релаксации технологических остаточных напряжений, возникающих при лезвийной обработке нежестких заготовок. Доказано, что использование метода ультразвуковой релаксации является полноценной заменой

традиционных способов релаксации, таких как, естественное (временное) и искусственное старение (отжиг). Использование энергии ультразвукового поля позволяет многократно (до 100 и более раз) сократить время производственного цикла изготовления детали [6]. По сравнению с термическим снятием остаточных напряжений технология ультразвуковой релаксации отличается меньшей энергоемкостью. Для ее реализации не требуется наличие печей или камер, что особенно важно при изготовлении крупногабаритных деталей. Кроме того, нередко, на поверхности деталей, прошедших термическую обработку, возникает оксидная плёнка, которая при дальнейшей эксплуатации детали может негативно повлиять на технические и эстетические характеристики изделия. Таким образом, экспериментально подтверждено положительное влияние колебаний ультразвуковой частоты на существенное снижение технологических остаточных напряжений, являющихся одним из основных факторов надежности изделий как в авиастроительной отрасли, так и во многих других отраслях промышленности.

Материалы и методы исследования

Определённо, введение энергии ультразвукового поля в зону резания при наложении ультразвуковых колебаний на процесс релаксации технологических остаточных напряжений готовой детали или заготовки вне станка, а также в зону сварных соединений помогает снимать технологические остаточные напряжения. Однако величины компенсации отклонений размеров при данном способе не велики: от 0,1 до 1 мм. На практике величины поводок и деформаций деталей из алюминиевых и труднообрабатываемых сплавов составляют от одного до нескольких десятков мм. Только применение комбинации различных способов релаксации технологических остаточных напряжений позволят добиться практического применения в современном производстве бездефектного изготовления ответственных деталей.

Другим способом компенсации технологических остаточных напряжений является применение подвижной станочной зажимной оснастки или системы прямого закрепления заготовки с компенсирующими поводки точками крепления [2]. Опыт предыдущих десятилетий показывает широкое использование только традиционных систем крепления заготовок на столе станка – прихваты, ложементы, тиски. Однако применение оснастки подобного типа сопряжено с применением подкладок и подложек, устанавливаемых под заготовку в зазоры между поверхностью последней и приспособлением, образующиеся в результате искривления и деформации готовой детали. Следствием использования данного метода является не только недостаточная компенсация для релаксации технологических остаточных напряжений, но и формирование новых силовых напряжений в процессе пластической деформации детали при закреплении заготовки из-за низкой точности используемых «компенсирующих» поводки подкладок и подложек. Данный подход является трудозатратным из-за потерь подготовительно-заключительного времени (ПЗВ) и общих затрат времени на изготовление детали при использовании традиционных механических и термических методов компенсации технологических остаточных напряжений. До недавнего времени альтернатив данному подходу не фиксировалось.

В 2019 г. немецкой компанией-производителем станочной зажимной оснастки различного типа SCHUNK SE & Co. KG была разработана модернизированная из классической системы нулевого базирования – инновационная система нулевого базирования компенсационного типа – SCHUNK VERO-S Aviation, оснастка прямого закрепления заготовок с возможностью компенсировать поводки детали на величину ± 6 мм [1, 5]. Оснастка основана на принципе прямого закрепления заготовки с применением системы нулевого базирования (обеспечивается постоянство баз при снятии и установки заготовки с погрешностью $< 0,005$ мм). Точки

крепления заготовки детали к оснастке имеют способность «дышать», двигаться, когда это необходимо. Тем самым происходит подстраивание оснастки под деформируемые поверхности заготовки детали при снятии напряжений. И, если в данном случае будет использована грамотная стратегия волновой обработки заготовки, с рационально распределёнными по переходам припусками, это позволит выполнять технологические процессы изготовления при существующих поводках в пределах допусков детали, всегда оставаться в массиве металла. Иными словами, основная цель использования данной системы нулевого базирования – разбить припуск таким образом, чтобы величина поводок не превышала допуски готовой детали, а оснастка смогла подстроиться под изменение формы очень быстро и с сохранением баз.

Основными особенностями использования оснастки SCHUNK VERO-S Aviation и технологии являются следующие аспекты:

- до 95 % объема металла удаляется путем резания с минимально возможным количеством установок;
- компенсация температурного удлинения заготовок и ТОН осуществляется без использования подкладок и прихватов;
- в техпроцессе изготовления наблюдается повторяемость позиционирования между черновой и чистовой (предварительной и окончательной) обработкой и контрольными переходами;
- при реализации нового техпроцесса обеспечивается существенное сокращение затрат времени на установку и снятие заготовок.

Технология изготовления нежестких деталей с использованием системы нулевого базирования предполагает непосредственное закрепление заготовки на модулях системы. Для этого в заготовку вворачиваются специальные пальцы, которые и обеспечивают её соединение с приспособлением. Способы крепления пальцев могут быть различными [5] (рис. 1).



Рис. 1. Способы крепления базирующих пальцев системы

Fig. 1. Bonding techniques for basing fingers of the system

Закрепление заготовки детали с использованием данной оснастки осуществляется по принципу базирования по плоскости

(установочная база), цилиндрическому и срезанному пальцу (рис. 2).

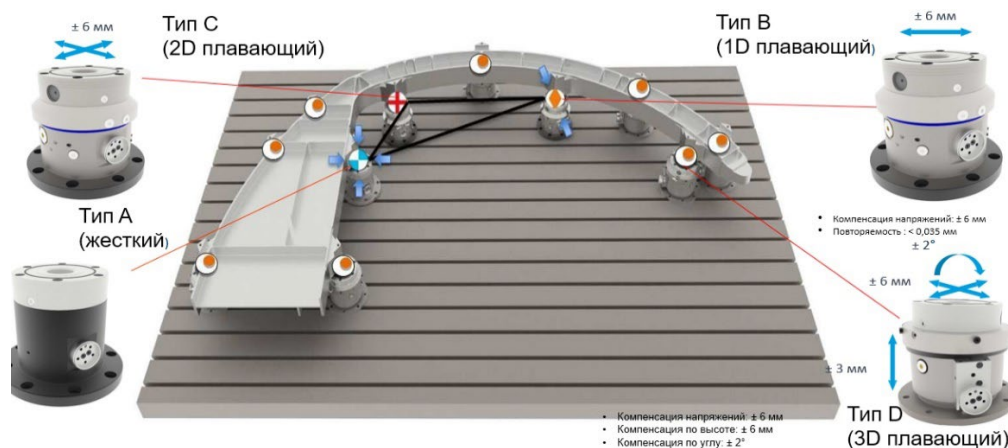


Рис. 2. Способы крепления базирующих пальцев системы

Fig. 2. Bonding techniques for basing fingers of the system

Ключевым моментом применения и внедрения данной системы является определение схемы расстановки точек для закрепления заготовки и оценка величин поводки деформаций, которые будут получены при обработке на данной системе с определённой стратегией обработки. Иными словами, необходима симуляция процесса удаления материала и процесса выхода технологических остаточных и силовых напряжений, возникающих при закреплении заготовки. Данные расчёты осуществлены для типовых схем закрепления нежестких деталей-представителей сложной формы компанией-производителем оснастки SCHUNK VERO-S Aviation методом конечных элементов (FEM) с использованием программного

продукта ANSYS. При этом методика расчетов не передавалась потребителям (вторым лицам).

Аналогами программы ANSYS являются продукты ABAQUS, NASTRAN, SimcenterFEMAP и др. В свободном доступе без ограничений функционала была найдена достаточно применимая для рассматриваемой цели программа ABAQUS. Основная цель проводимого анализа методом конечных элементов – определить величину деформации, вызванную перераспределением ТОН и при определенной стратегии удаления припуска сравнить с возможностями компенсации этих поволодок системой нулевого базирования. Основные этапы расчёта схемы закрепления FEM анализом:

– определить возможные варианты расстановки точек закрепления;

- задать материал и его свойства;
- выбрать схему нагружения на основании реальных или предполагаемых величин ТОН при различной толщине детали;
- используя метод «BirthandDeath» произвести симуляцию деформации после удаления различных по величине припусков материала (на основании выбранной стратегии).

Для моделирования различных стратегий удаления припуска и расстановки точек закрепления оснастки VSA использовали метод конечных элементов. Таким образом, могут быть получены различные варианты поведения и деформации заготовки.

Рассмотрим один из примеров вариантов поведения и деформации заготовки. Результаты данного моделирования предполагается сравнить с экспериментальным поведением заготовки при обработке. В программу SIMULIA ABAQUS 2021 загружали модель заготовки и готовой детали с приведёнными на рис. 3 параметрами.

Ниже приведен пример симуляции остаточных напряжений без привязки к схеме закрепления.

Деталь-балка. Заготовка и вписанная в неё деталь представлены на рис. 3.

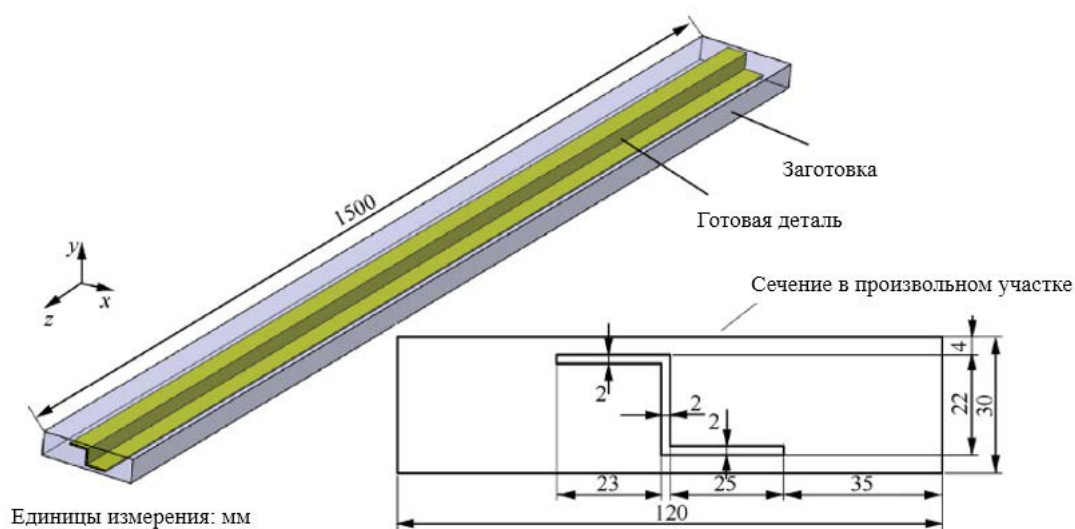


Рис. 3. Эскиз заготовки и готовой детали

Fig. 3. Sketch of the blank and the finished part

Материал – алюминиевый сплав 7050-T7451, его механические свойства: модуль упругости 71,7 ГПа; предел текучести при растяжении 469 МПа; коэффициент Пуассона 0,33; плотность 2,83 кг/м³.

С помощью механического (методом академика Давиденкова) и рентгеновского методами (в условиях действующего авиастроительного предприятия) были определены величины ТОН по толщине заготовки в продольном и поперечном направлениях (рис. 4).

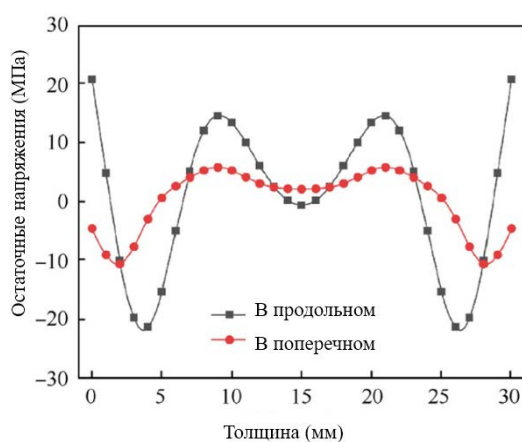


Рис. 4. Распределение ТОН в заготовке

Fig. 4. TRS distribution in the blank

Определена стратегия удаления припуска: 26 проходов по 2 мм по оси Z станка (рис. 5).

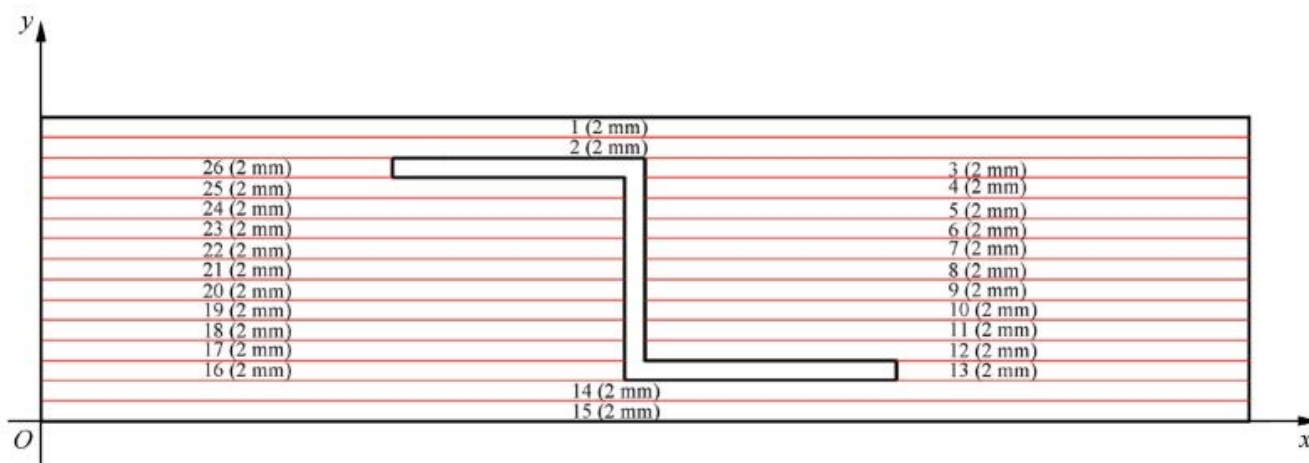


Рис. 5. Последовательность удаления припуска в заготовке

Fig. 5. Sequence of allowance removal in the blank

Величины вычисленных остаточных напряжений (МПа) использованы в качестве задания нагрузки при симуляции методом BIRTHANDDEATH в программе ABAQUS. Произведена симуляция перераспределения внутренних остаточных напряжений и деформации детали после десятого шага обработки.

Заготовка перед обработкой с заданными из графика по рис. 4 остаточными напряжениями, при которых заготовка находится в статическом состоянии и сохраняет свои геометрические параметры, представлена на рис. 6, а. Для имитации деформации при удалении материала в программе SIMULIA ABAQUS 2021 задействован вышеобозначенный метод «BIRTHANDDEATH», в сути которого лежит установка матрицы жёсткости элемента заготовки в «0» для деактивации жёсткости выбранного элемента. В программе материал заготовки задан как изотропный, однородный, в соответствии с физическими свойствами материала. Выбран тип полигональной сетки модели C3D8R, всего 307,498 элементов и 336,672 узлов. Задано ограничение 3-2-1 для исключения свободного перемещения центра тяжести заготовки. Результаты имитации деформации методом FEM после удаления части припуска представлены на рис. 6, б.

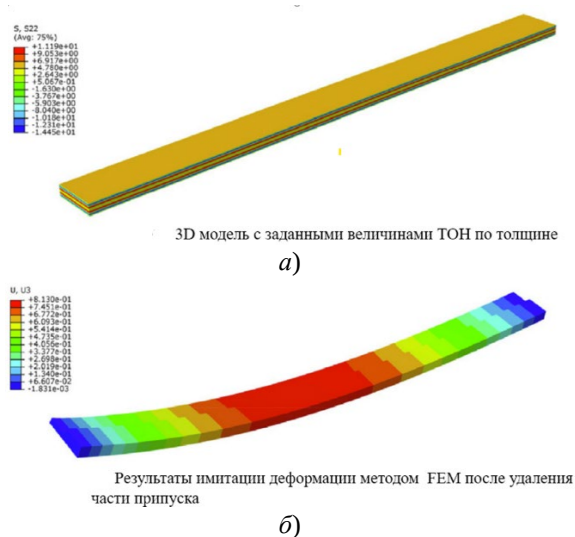


Рис. 6. Состояние заготовки до (а) и после удаления припуска (б)

Fig. 6. Condition of the blank before (a) and after allowance removal (b)

На основании перераспределения напряжений делается вывод о величинах поводов конечной детали.

Подобные методики использовались в работе [6] для проверки, разработанной авторами теории изменения последовательности удаления припуска при механической обработке, оказывающей влияние на величину деформаций детали. Как показали полученные результаты, верификация предложенного метода

весьма близка к действительности. Вопрос симуляции перераспределения внутренних напряжений и деформации заготовок при фрезеровании рассматривался и других научных работах [7–10], однако предлагаемый авторами метод отличается большей надежностью и простотой.

Результаты

После имитации обработки уступа за несколько проходов можно наблюдать деформацию заготовки и новое перераспределение остаточных напряжений. В результате данного эксперимента максимальная деформация заготовки составила 4,6 мм. Это лежит в допуске ± 6 мм и соотносится с возможностями применения системы VSA. Таким образом, данный метод позволяет экспериментировать со стратегией, последовательностью обработки, выбирая наиболее оптимальный вариант, позволяющий сохранять величины поводов в диапазоне ± 6 мм, тем самым давая возможность применять технологическую оснастку VSA и выбирать наиболее оптимальную схему закрепления.

Заключение

Предложенная методика является универсальной при оценке вероятных деформаций заготовки и расчёте технологичности схем закрепления деталей на модулях системы VSA, а также выбора наиболее экономически целесообразного варианта. Программа SIMULIA ABAQUS методом конечных элементов, позволяет выбрать наиболее приемлемый вариант компенсации остаточных напряжений и оценить возможность использования той или иной стратегии удаления припуска. Несмотря на то, что система VSA ориентирована, в основном, на технологию изготовления деталей из алюминиевых сплавов, данные расчёты будут актуальны и при оценке возможности обработки и заготовок деталей из титановых и жаропрочных сплавов. Предлагаемая методика расчетов

актуальна при оценке жёсткости закрепления и отсутствия сдвига модулей, т. к. режимы и силы резания при механической обработке заготовок из труднообрабатываемых материалов намного выше, чем при обработке заготовок из алюминия. Применение расчёта методом конечных элементов при изготовлении детали на технологической оснастке SCHUNK VERO-S Aviation, в совокупности с определенной стратегией волновой механической обработки, позволяет практически полностью компенсировать деформации и получить годную деталь с первого предъявления, исключая необходимость выполнения операции правки.

По данному принципу выполнен расчёт схем закрепления 3-х реальных типовых длиномерных деталей сложной формы пассажирских ЛА, которые были изготовлены в рамках опытно-промышленной партии. На сегодняшний день ведётся работа по внедрению системы VSA в серийный процесс производства деталей самолётов на одном из авиационных предприятий РФ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **DMG Mori**, оборудование серии ULTRASONIC [Электронный ресурс] // URL: <https://en.dmgmori.com/products/machines/ultrasonic>.
2. **Бергман Л.** Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Издательство иностранной литературы, 1957. 728 с.
3. **Киселев Е.С., Назаров М.В.** Особенности технологии изготовления нежестких корпусных деталей: монография. М.: РУСАЙНС, 2022. 218 с.
4. **Киселев Е.С., Благовский О.В.** Управление формированием остаточных напряжений при изготовлении ответственных деталей. С. Петербург: Лань, 2020. 160 с.
5. **Khramov A., Semdyankin I., Kiselev E.** Application of the Modern Stationary Work holding Systems for Increase Capacity and Quality of Non-Rigid Aircraft Parts // Matec web of Conferences 346, 03076 (2021) ICMTMTE 2021, <https://doi.org/10.1051/mateccof/2021/34/603076>
6. **Yinfei YANG, Longxin FAN, Liang LI, Guolong ZHAO, Ning HAN, Xiaoyue LI, Hui TIAN, Ning HE.** Energy principle and material removal sequence optimization method in machining of aircraft monolithic parts // Chinese Journal of Aeronautics. 2020, №33(10). P. 2770–2781.
7. **Robinson JS, Tanner DA, Truman CE, et al.** Measurement and prediction of machining induced redistribution of residual stress in the aluminium alloy 7449 // Exp Mech. 2011; № 51(6). P. 93–981.

8. Masoudi S, Amini S, Saeidi E, et al. Effect of machining induced residual stress on the distortion of thin-walled parts // Int J Adv Manuf Technol. 2015; № 76 (1–4). P. 597–608.

9. Arrazola PJ, Ozel T, Umbrello D, et al. Recent advances in modelling of metal machining processes// CIRP Ann - Manuf Technol 2013; № 62 (2). P. 695–718.

10. Dong HY, Ke YL. Study on machining deformation of aircraft monolithic component by FEM and experiment // Chinese J Aeronaut 2006; №19 (3). P. 54–247.

REFERENCES

1. DMG Mori, ULTRASONIC series equipment [Electronic resource] // URL: <https://en.dmgmori.com/products/machines/ultrasonic>.

2. Bergman L. Ultrasound and its application in science and technology. Moscow: Izdatelstvo inostrannoy literatury, 1957, 728 p.

3. Kiselev E.S., Nazarov M.V. Features of the manufacturing technology of non-rigid body parts: monograph. Moscow: RUSAINS, 2022, 218 p.

4. Kiselev E.S., Blagovsky O.V. Control of the formation of residual stresses in the manufacture of critical parts. St. Petersburg: Lan, 2020, 160 p.

5. Khramov A., Semdyankin I., Kiselev E. Application of the Modern Stationary Work holding Systems for Increase Capacity and Quality of Non-Rigid Aircraft Parts// Matec web of Conferences 346, 03076 (2021)ICMTMTE 2021, <https://doi.org/10.1051/mateccof/202134603076>

6. Yinfei YANG, Longxin FAN, Liang LI, Guolong ZHAO, Ning HAN, Xiaoyue LI, Hui TIAN, Ning HE. Energy principle and material removal sequence optimization method in machining of aircraft monolithic parts// Chinese Journal of Aeronautics. 2020, no.33(10). P. 2770–2781.

7. Robinson JS, Tanner DA, Truman CE, et al. Measurement and prediction of machining induced redistribution of residual stress in the aluminium alloy 7449// Exp Mech. 2011; no. 51(6). P. 93–981.

8. Masoudi S, Amini S, Saeidi E, et al. Effect of machining induced residual stress on the distortion of thin-walled parts // Int J Adv Manuf Technol. 2015; no. 76 (1–4). P. 597–608.

9. Arrazola PJ, Ozel T, Umbrello D, et al. Recent advances in modelling of metal machining processes// CIRP Ann - Manuf Technol 2013; no. 62 (2). P. 695–718.

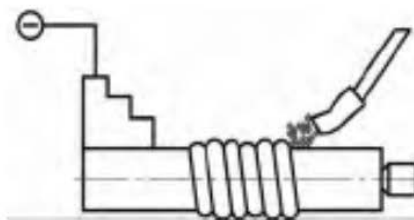
10. Dong HY, Ke YL. Study on machining deformation of aircraft monolithic component by FEM and experiment // Chinese J Aeronaut 2006; no.19 (3). P. 54–247.

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

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

Статья поступила в редакцию 14.02.2024; одобрена после рецензирования 19.04.2024; принята к публикации 25.04.2024.

The article was submitted 14.02.2024; approved after reviewing 19.04.2024; assepted for publication 25.04.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 8 (158). С. 31-40.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 8 (158). P. 31-40.

Научная статья
УДК 621.793.14
doi: 10.30987/2223-4608-2024-7-31-40

Технология получения вакуумных ионно-плазменных износостойких покрытий

Олег Вячеславович Кудряков¹, Д.Т.Н.
Валерий Николаевич Варавка², Д.Т.Н.

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

¹ kudryakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1462-4389>

² varavkavn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4703-7372>

Аннотация. Выполнен обзор технологии вакуумного ионно-плазменного (ВИП) напыления покрытий с позиций наукоёмкости, её критериев и методик оценки. Рассмотрены технологические особенности создания ВИП-покрытий, где подчеркивается, что процесс формирования покрытия на подложке происходит с участием одних из самых мощных сил в природе – сил межатомного взаимодействия. Это приводит к очень высокому уровню когезионной прочности покрытий, следствием которой является износостойкость и коррозионная стойкость. Методы исследования, диагностики и испытаний ВИП-покрытий, в силу особенностей их строения и свойств, включают, как правило, оборудование и методики ведущих мировых производителей в области электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального анализа, дифракционного анализа, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, непрерывного и динамического индентирования, стендовых испытаний уникальных свойств. Из опыта научно-практической деятельности авторов приведены примеры покрытий различной природы (нитридные, углеродные, металлокерамические), разной архитектуры (монослойные – однофазные, многослойные – 2D-композиты, дисперсные – 3D-композиты) и разнообразного назначения (износостойкие, триботехнические, антиэрозионные, термобарьерные). В частности, рассмотрены некоторые виды нитридных покрытий TiN, TiAlN, CrAlSiN, которые отличаются высокой твердостью $H \geq 24$ ГПа и абразивной износостойкостью. Однако в условиях относительно гладкого трения скольжения износостойкость сохраняет только многофазное наноструктурированное покрытие CrAlSiN. В условиях же каплеударной эрозии максимально высокую стойкость демонстрируют нанокмпозиционные многослойные ВИП-покрытия состава TiN/MoN, которые конкурируют с признанным чемпионом в этой области – сварными пластинами стеллита ВЗК. При всем том, что толщина рассматриваемых в работе ВИП-покрытий является пленочной и составляет 1...10 мкм, тогда как пластины стеллита имеют толщину не менее 4 мм. В заключении отмечается, что ВИП-технология продолжает осваивать новые материалы, например, создавать алмазоподобные покрытия или покрытия из высокоэнтропийных сплавов. ВИП-технология соответствует высокому уровню наукоёмкости, а ВИП-покрытия перспективны для использования в машиностроении.

Ключевые слова: вакуумная ионно-плазменная технология, нитридные покрытия, нанокмпозиаты, механические свойства покрытий, трибологические испытания, износостойкость, наукоёмкость

Для цитирования: Кудряков О.В., Варавка В.Н. Технология получения вакуумных ионно-плазменных износостойких покрытий // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 8 (158). С. 31–40.
doi: 10.30987/2223-4608-2024-7-31-40

A pathway to vacuum ion-plasma wear-resistant coatings

Oleg V. Kudryakov¹, D. Eng.
Valery N. Varavka², D. Eng.

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

¹ kudryakov@mail.ru

² varavkavn@gmail.com

Abstract. A review of the technologies of vacuum ion plasma (VIP) coating spraying based on the reasonability of science intensity, its criteria and evaluation methods is carried out. The technological features of producing VIP coatings are viewed with the emphasis on the process of coating formation on a substrate, which occurs under the impact of the most powerful forces in

nature, i.e. these are forces of interatomic interaction. This leads to a very high level of cohesive strength of the coatings, which results in wear resistance and corrosion resistance. This leads to a very high level of cohesive strength of the coatings, succeeding in wear and corrosion resistance. Methods of research, diagnosis and testing of VIP coatings, due to the peculiarities of their structure and properties, include, as a rule, equipment and techniques of leading world manufacturers in the field of electron microscopy, microrentgen spectral analysis, diffraction analysis, X-ray photoelectron spectrometry, continuous and dynamic indentation, bench testing of unique properties. With respect to scientific and practical activities of the authors, examples of coatings of various nature (nitride, carbon, metallo-ceramic), different architectures (monolayer – single-phase, multilayer – 2D composites, dispersed – 3D composites) and various applications (wear-resistant, tribotechnical, antierosion, thermal barrier) are given. In particular, some types of nitride coatings TiN, TiAlN, CrAlSiN, which are characterized by high hardness $H \geq 24$ GPa and abrasive wear resistance, are in the focus. However, in conditions of relatively smooth sliding friction, only the multiphase nanostructured CrAlSiN coating retains wear resistance. In conditions of drop-impact erosion, nanocompositional multilayer VIP coatings of TiN/MoN composition demonstrate the highest resistance, which compete with the recognized champion in this field - welded plates of stellite VZK (WCoCr). Despite the fact that the thickness of the VIP coatings viewed in the paper is a film of 1...10 microns, whereas the stellite plates have a thickness of at least 4 mm. In conclusion, it is noted that VIP technology continues to develop new materials, for example, to create diamond-like coatings or coatings made of high-entropy alloys. VIP technology corresponds to a high level of science intensity, and VIP coatings are promising for putting to use in mechanical engineering.

Keywords: vacuum ion-plasma technology, nitride coatings, nanocomposites, mechanical properties of coatings, tribological tests, wear resistance, science intensity

For citation: Kudryakov O.V., Varavka V.N. A pathway to vacuum ion-plasma wear-resistant coatings / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 8 (158). P. 31–40. doi: 10.30987/2223-4608-2024-7-31-40

Введение

В историческом контексте понятие наукоёмкости является довольно молодым. Тем не менее, к настоящему времени наукоёмкость и инновационность стали титульными характеристиками в оценке экономической составляющей и перспектив использования многих производственных технологий. В большой степени актуальность этой характеристики обусловлена её влиянием на добавленную стоимость продукции и, в конечном итоге, на обеспечение долгосрочной прибыльности и конкурентоспособности производства в целом и конкретной технологии в частности. Ученые, занимающиеся непосредственно совершенствованием самой технологии и улучшением функциональных характеристик её продукции, работают глубоко в недрах этой производственной системы и зачастую не имеют возможности оценить всю систему целиком, рассматривая её «с птичьего полёта».

В связи с этим, целью настоящей работы является обзор технологии вакуумного ионно-плазменного (ВИП) напыления покрытий с позиций наукоёмкости, её критериев и методик оценки. Имея большой опыт работы в области создания функциональных ионно-плазменных покрытий, в настоящее время применяемых в теплоэнергетике, триботехнике, машиностроении [1 – 3], авторы полагают, что их взгляд на хорошо известную им область научных изысканий с новых позиций будет полезен и читателям, и самим авторам.

Критерии оценки наукоёмкости

Понятия, критерии и методики, связанные с наукоёмкостью, к настоящему моменту не стандартизированы и находятся в стадии обсуждения, обоснования гипотез, схематизации процессов, разработок классификаций и т. п. [4]. Так для количественной оценки наукоёмкости предприятий имеется целый ряд методик: отраслевая, кадровая, затратная (стоимостная), структурная, процессная, продуктовая (методика оценки нетрадиционности продукции), методика оценки интенсивности освоения технологий. Каждая из них включает разные по своему содержанию экономические показатели [5]. Их общим недостатком является отсутствие единого комплексного показателя оценки наукоёмкости. В самом общем виде качественный сравнительный анализ производственных отраслей по уровню наукоёмкости проводится по трем категориям:

1) наукоёмкая продукция должна обеспечивать производителю долгосрочные конкурентные преимущества за счет использования передовых достижений науки и техники, которые, в свою очередь, работают на создание добавленной стоимости, размер которой обязан значительно превышать производственные затраты; для количественной оценки этой категории существует несколько расчетных методик, которые экономисты продолжают обсуждать и совершенствовать;

2) уровень производственного процесса (или технологии), который определяется состоянием и возможностями материальной базы (или оборудования), уровнем организации,

включающим управление, логистику, автоматизацию, цифровизацию и т. д.;

3) кадровый потенциал, включающий научный, инженерно-технический и производственный персонал, к которому предъявляются требования высокой квалификации, способности научного и профессионального самосовершенствования и внедрения результатов НИОКР в производство.

Таким образом, рассматривая вопрос о наукоёмкости технологии получения вакуумных ионно-плазменных покрытий следует, на наш взгляд, прежде всего, отмежеваться я от конкретных экономических методик оценки. Так, например, в рамках отраслевой методики мы можем получить принципиально разные значения показателя наукоёмкости технологии в зависимости от того, используется ли сформированное покрытие, к примеру, в аэрокосмической отрасли или в жилищно-коммунальной сфере, поскольку сами отрасли по показателю наукоёмкости, мягко говоря, существенно различаются. Поэтому целесообразно провести обзор ВИП-технологии, ориентируясь на приведенные выше категории:

- производственный процесс: оборудование, суть технологии, реализуемые физико-химические процессы;

- научное обеспечение: кадры; методы исследований, диагностики и испытаний покрытий; методики исследований, привлекаемые из смежных областей науки;

- продукция: ВИП-покрытия, их особенности строения и свойств.

Технология нанесения покрытий

В основе ионного осаждения покрытий из металлической плазмы в вакууме лежит процесс генерации металлической плазмы вакуумной дугой – высокопоточным низковольтным разрядом, горящим в парах материала испаряемого электрода [6]. Для формирования ионно-плазменных покрытий используются вакуумные установки различных производителей. Среди ведущих компаний – Platit, Balzers, Ulvac, Isovac. Самым высоким современным требованиям отвечают вакуумные установки BRV (ГК «БелРосВак», Беларусь). Каждая установка отличается, прежде всего, методом активации (испарения) поверхностных атомов напыляемого материала: термический, дуговой, магнетронный, лазерный и др. Возможно сочетание нескольких методов в одной установке. При любом из них в рабочей камере установки поддерживается вакуум и тлеющий разряд. Эти условия способствуют созданию

металлической плазмы в камере, процесс ионизации в которой поддерживается благодаря напуску небольших содержаний инертного газа (чаще всего – аргона). С одной стороны, давление в камере должно быть низким, чтобы обеспечить чистоту плазмы и напыляемого покрытия. С другой стороны, высокий вакуум способствует затуханию электрической дуги и тлеющего разряда. Поэтому в течение технологического цикла давление в рабочей камере обычно находится в широких пределах $P = 0,01 \dots 5$ Па. Суть процесса в том, что на поверхности какого-либо металла (катода) атомы возбуждаются, ионизируются и испаряются.

Параллельно с этим в вакуумной камере установки создается электромагнитное поле с отрицательным зарядом на осаждаемой поверхности (изделии или образце), называемой подложкой. Отрицательный потенциал на подложке притягивает положительно заряженные ионы металлической плазмы и формирует плазменный поток, направленный к подложке, что и порождает процесс непрерывного осаждения покрытия на поверхности подложки. Таким образом формируются покрытия металлических систем. Если в вакуумной камере содержится какой-либо газ (называемый реакционным газом, в качестве которых используются азот, кислород, углеродсодержащий ацетилен или их смеси под низким давлением), то «по дороге» от катода к подложке ионы металла вступают в химическую реакцию и покрытие формируется в виде нитридных, оксидных, карбидных или смешанных соединений. Это уже покрытия другого класса – керамические или металлокерамические с совсем другими свойствами, чем металлические системы.

Важным здесь является то, что процесс формирования покрытия на подложке происходит с участием одних из самых мощных сил в природе – сил межатомного взаимодействия. Это приводит к очень высокому уровню когезионной прочности покрытий, следствием которой является износостойкость и коррозионная стойкость. Если подложка «правильно» подобрана под напыляемое покрытие и её поверхность качественно очищена (для этого вакуумные ионно-плазменные установки специально оснащаются ионными источниками), то и адгезионная прочность системы «покрытие-подложка» также имеет высокие значения, поскольку формируется на основе межатомных взаимодействий поверхностных атомов подложки и осаждаемых ионов покрытия. Для повышения адгезии покрытий за счет диффузионных процессов предусмотрен дополнительный нагрев подложки: при осаждении

металлических и нитридных покрытий – до 400...500 °С; при осаждении углеродных покрытий, например, алмазоподобных – до 200...250 °С.

Процесс нанесения ВИП-покрытий регулируется большим числом технологических параметров, общее количество которых может достигать двух десятков. К основным из них можно отнести – давление в камере, температуру, отклоняющее напряжение (на подложке), тока дуги, парциальное давление рабочего газа. Все эти параметры существенно изменяются на различных технологических стадиях работы вакуумной установки: откачка, нагрев, дегазация, напуск аргона, очистка подложки, травление поверхности подложки, нанесение покрытия, охлаждение, разгерметизация.

Одной из важных особенностей процесса нанесения ВИП-покрытий являются жесткие требования к качеству поверхности подложки. Так, например, шероховатость поверхности стальной подложки не должна быть ниже

10 класса чистоты ($Ra \leq 0,12$ мкм; $Rz \leq 0,6$ мкм) по ГОСТ 2789. Эти жесткие требования к технологии подготовки образцов диктуются современными мировыми стандартами производства изделий и узлов с ионно-вакуумными покрытиями для обеспечения высокой износостойкости. Несоблюдение этих норм ведет к искажениям решетки растущих кристаллитов покрытия, внутренним напряжениям и локальным деформациям в покрытии. Поскольку покрытие в точности воспроизводит рельеф поверхности подложки и сравнительно медленный рост покрытия осуществляется преимущественно в направлении, перпендикулярном к поверхности, то все неровности рельефа отражаются на структуре и конфигурации внешней поверхности покрытия. При разветвленном рельефе поверхности подложки в покрытии будут формироваться высокие внутренние напряжения, вызывающие растрескивание, расслоение или отслаивание покрытия.

Таким образом, технология вакуумного ионно-плазменного напыления покрытий является весьма затратной в силу:

- использования вакуумных систем;
- больших объемов рабочих камер, обеспечение вакуума в которых требует надежности и устойчивой работы многих систем установки;
- большого количества технологических параметров, значения которых влияют на конечный результат – качество и свойства покрытий;
- высокой энергоемкости почти всех стадий технологического процесса;

– дорогостоящих расходных материалов (изготовления испаряемых катодов из чистых металлов или их сложных композиций);

– необходимости высокой квалификации персонала, особенно на научно-исследовательской стадии отработки режимов получения экспериментальных и новых видов покрытий, когда для сотрудника желателен уровень кандидата наук;

– значительной длительности процесса напыления, поскольку скорость роста покрытия составляет 0,02...0,04 мкм/мин;

– высоких требований к качеству подготовки поверхности напыляемых изделий.

Методы исследований, диагностики и испытаний покрытий

Тонкие пленки и покрытия микрометровой или даже нанометровой толщины представляют собой весьма специфический объект, для исследования которого имеется достаточно ограниченный набор методов.

На приоритетное место уверенно можно поставить методы сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) высокого разрешения, которые дают результаты прямых наблюдений с дополнительными функциями, например, энергодисперсионного детектирования (ЭДА) химического состава. Главным недостатком этого метода является чрезмерная для российских потребителей стоимость оборудования ведущих производителей (JEOL, ZEISS, FEI). Но если такое оборудование в доступе имеется, оно открывает большие возможности благодаря нескольким видам детектируемого излучения: 1) низкоэнергетических вторичных электронов, формирующих основное топографическое изображение; 2) обратно рассеянных (отраженных) электронов, формирующих изображение в фазовом контрасте; 3) непрерывное рентгеновское излучение, дающее возможность детектировать химический состав; 4) характеристическое рентгеновское излучение; 5) вторичная флуоресценция (катодолуминисценция), возникающая за счет обоих видов рентгеновского излучения; 6) излучение оже-электронов, которое пока ещё не научились надежно детектировать в электронных микроскопах. При исследовании ионно-плазменных покрытий и тонких пленок подчас незаменимым инструментом становится двулучевой (электронный + ионный) СЭМ, например, ZEISS CrossBeam340, который позволяет прямо в вакуумной камере электронного микроскопа с помощью ионного пучка делать

кросс-секции произвольного контура на поверхности покрытия и с высокой точностью исследовать их поперечные сечения.

Ещё один современный метод детектирования химического состава покрытий и тонких пленок с расширенными функциями определения химических связей элементов (то есть это уже разновидность фазового анализа) – рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС). Для получения этим методом распределения элементов по глубине покрытия можно послойно стравливать слои толщиной несколько нанометров. РФЭС – это метод очень тонкого исследования с детектированием Оже-электронов в сверхвысоком вакууме, дающий результаты высочайшей точности. Но всё-таки более надежные, чем на основе данных ЭДА или РФЭС, результаты фазового анализа покрытий получают с помощью инструментального исследования образцов на дифрактометрах (Bruker, XRD-Shimadzu, DX-Tescan, ДРОН, POWDIX, TD-Tongda и др.).

Для исследования физико-механических свойств покрытий в нано- и микромасштабе обычно применяется метод непрерывного индентирования, реализуемый в настоящее время целой линейкой нанотвердомеров самых разных производителей. Наиболее известное и почитаемое оборудование в этой области – измерительная платформа NanoTest 600 (производитель MicroMaterials, Ltd.), которая с большой точностью и в широком диапазоне нагрузок определяет модуль упругости E и твердость покрытий H в режиме непрерывного нагружения и разгрузки в соответствии с ГОСТ 8.748-2011. Помимо структурно зависимой твердости H и структурно независимого модуля упругости E , определяемых инструментально, для характеристики покрытий часто используются соотношения H/E и H^3/E^2 . Первое из них определяет сопротивление покрытий упругой деформации, а соотношение H^3/E^2 определяет сопротивление покрытий пластической деформации.

Очень важный показатель работоспособности покрытий, особенно трибологического назначения – адгезия. Это свойство наиболее строго определяется по методикам скрэтч-тестирования (царапания). Современные скрэтч-тестеры – многофункциональные высокоинформативные приборы: в результате одного испытания образца они выдают пять и более значений различных параметров, характеризующих адгезию покрытия: изменение нагрузки, силы и коэффициента трения, изменение глубины проникновения индентора и остаточной глубины (то есть за вычетом

упругого восстановления) царапины. Наиболее высокотехнологичные скрэтч-тестеры оснащены датчиками акустической эмиссии, позволяющими точно определять появление трещин и моменты скалывания покрытия.

Для изучения профиля рельефа поверхности покрытий и тонких пленок используется сканирующий атомно-силовой или туннельный зондовый микроскоп, который представляет результаты измерений в виде профилограмм или 3D-топографии поверхности. В силу высоких требований к качеству напыляемой поверхности, рельеф которой ионно-плазменное покрытие фактически копирует, этот метод анализа для ВИП-покрытий более важен на стадии подготовки поверхности покрываемой детали или образца, чем на стадии готового покрытия.

Для проведения лабораторных исследований трибологических характеристик покрытий на рынке предлагается большое количество трибометров и машин трения. Существуют международные методики DIN 50324-1992, DIN EN 1071-3, ASTM G99-2017 для проведения испытаний на трение, которые позволяют сопоставить результаты, полученные на различном оборудовании. Для антифрикционных и износостойких к трению покрытий трибологические испытания часто являются единственным источником информации об их функциональных и эксплуатационных свойствах. Довольно часто в специализированных лабораториях можно встретить, например, машину трения TRB (производитель Anton Paar Tritec), испытания на которой проводятся по схеме «штифт-пластина» либо при возвратно-поступательном движении пластины (образец с покрытием), либо при движении штифта по круговой траектории. Нормальное усилие на штифте (нагрузка трения F) варьируется в широких пределах, начиная со значения 1 Н. Контртело представляет собой закрепленный в штифте шарик диаметром 6,35 мм, изготовленный либо из электрокорунда Al_2O_3 , либо из кермета (твердого сплава) WC-Co. Основные определяемые трибологические параметры – коэффициент трения μ , интенсивность объемного износа образца J и контртела J_K , а также (при круговом движении штифта) путь L , пройденный штифтом до разрушения покрытия.

В отношении функциональных свойств покрытий, помимо трибологических испытаний, авторы в своей практике работы с ионно-плазменными покрытиями сталкивались с такой ситуацией, когда испытательные стенды существуют, но доступ к ним весьма

ограничен. Например, испытания на каплеударную эрозию возможно в нашей стране провести только на специализированном стенде «Эрозия-М» (научно-производственный центр «Износостойкость» НИУ-МЭИ, Москва), который входит во Всероссийский реестр уникального оборудования. По результатам проведенных испытаний был получен не только комплекс уникальных данных об эрозионной стойкости покрытий, но и развита теория эрозионной стойкости материалов и покрытий различной природы при каплеударном воздействии, которая получила широкий публикационный отклик [7 – 10]. Причем, теория была создана с использованием данных, полученных авторами ранее в смежных областях технических наук – физике металлов, теорий диффузии и коррозионной стойкости [11 – 14]. Исследуемые нанокмпозиционные покрытия, в первую очередь, благодаря результатам стендовых испытаний, получили новое функциональное использование, весьма эффективное и с экономической точки зрения. Однако всё это стало возможным только благодаря финансированию исследований по гранту РФФИ. В контексте наукоёмкости это достаточно распространенная ситуация, когда создаваемые материалы или покрытия с новыми функциональными свойствами для определения сферы своего назначения требуют использования или даже создания испытательных стендов. Затраты на это составляют значительную долю НИОКР, которые являются одной из компонент показателя наукоёмкости.

Таким образом, представленные в настоящем разделе методики исследования состава, строения и свойств ионно-плазменных покрытий демонстрируют, что подобные объекты требуют применения современного высокотехнологичного (а потому и недешевого в использовании) диагностического и испытательного оборудования, полным набором которого обладает далеко не всякий научный центр в нашей стране. Возможно, у экономистов существуют надежные методики количественной оценки вклада этой составляющей в наукоёмкость технологии ВИП-покрытий, а на качественном уровне авторы оценили бы её как довольно высокую.

Особенности строения, свойств и применения ионно-плазменных покрытий

С точки зрения наукоёмкости результаты внедрения ВИП-покрытий должны оправдывать затраты на их создание и исследование, которые, как было показано, требуют

достаточно серьезных вложений в технологическое и научно-исследовательское сопровождение. В этом вопросе прослеживается тесная связь между перспективами применения ВИП-покрытий и наукоёмкостью ВИП-технологии. Для иллюстрации этого тезиса приведем лишь некоторые примеры исследования ВИП-покрытий, завершённые внедрением результатов в производство.

В практике своей научно-прикладной деятельности авторам довелось заниматься исследованием различных типов ВИП-покрытий:

- по составу: металлических, в том числе металло-композиционных и высокоэнтропийных, нитридных, в том числе металлокерамических и композитных, углеродных, в том числе алмазоподобных (DLC) и комбинированных;

- по архитектуре (морфологии): многослойных (2D-композиты) и пространственно гетерофазных (3D-композиты);

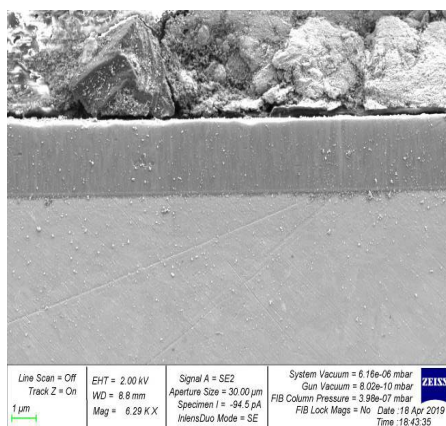
- по назначению: износостойких, триботехнических, антиэрозионных, термобарьерных.

Два вида ВИП-покрытий, принципиально отличных по морфологии и свойствам представлены на рис. 1. Многообразие структур покрытий, обеспечивает широкие возможности по варьированию их свойств, поскольку из приведенных выше физико-механических свойств (H ; E ; H/E и H^3/E^2) только модуль упругости является структурно независимым. Так, например, в процессе исследования эрозионной стойкости материалов и покрытий были получены результаты, которые позволили модернизировать технологию изготовления рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин, заменив дорогостоящие сварные пластины из твердого сплава стеллита ВЗК на композиционные металлокерамические ВИП-покрытия.

Сравнительные данные для стали 20Х13, титановых сплавов ВТ6 и ВТ3-1, стеллита ВЗК и нанокмпозиционных многослойных покрытий приведены на рис. 2, где в качестве антиэрозионного показателя использованы экспериментально определенные значения продолжительности инкубационного периода t_0 материалов и покрытий (до появления первых признаков разрушения), полученные в идентичных условиях стендовых испытаний. Таким образом, несмотря на то, что ВИП-покрытия нитридных систем давно и активно изучаются, для их нанокмпозиционной морфологии удалось найти новую сферу эффективного использования – защита от каплеударной эрозии.



а)



б)

Рис. 1. Морфология ВИП-покрытий на стальной подложке в поперечном сечении, СЭМ:

а – металокерамическое 2D-наноккомпозитное покрытие системы TiN/Ti; б – однослойное нитридное покрытие TiAlN

Fig. 1. Morphology of VIP coatings on a steel substrate in cross section, SEM:

а – metal-ceramic 2D nanocomposite coating of the TiN/Ti system; б – single-layer nitride coating TiAlN

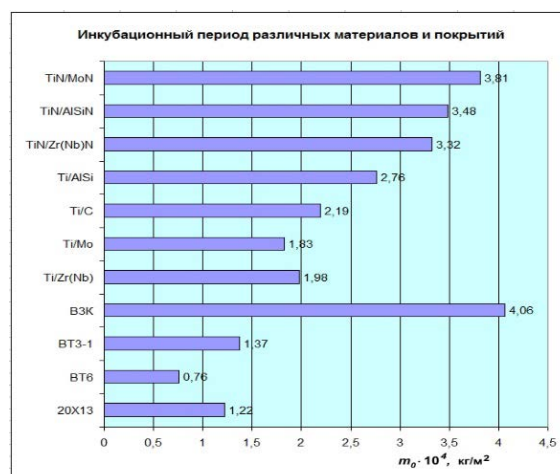


Рис. 2. Сравнительная эрозионная стойкость типичных лопаточных материалов (20X13; BT6; BT3-1; B3K) и наноккомпозитных ВИП-покрытий различных систем по результатам стендовых испытаний на каплеударную эрозию

Fig. 2. Comparative erosion resistance of typical blade materials (20X13; W6; W3-1; In3K) and nanocomposite VIP coatings of various systems based on the results of bench tests for impact erosion

Приведем ещё один пример выполненных полноформатных исследований ВИП-покрытий, предназначенных для повышения трибологических характеристик нагруженных узлов трения (в частности, используемых в трансмиссии вертолетов). В табл. 1 представлены среднестатистические результаты измерения механических и трибологических характеристик исследованных покрытий, в том числе – коэффициента трения μ , относительных значений объемного износа J и J_K в расчете на нагрузку F и путь L трения, полученных при испытаниях на машине трения.

1. Механические и трибологические свойства исследованных покрытий [2]

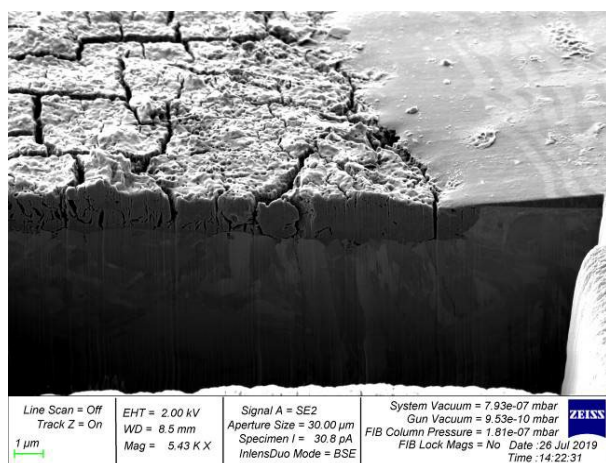
1. Mechanical and tribological properties of the studied coatings [2]

Характеристика образцов	Механические свойства		Трибологические свойства		
	H , ГПа	E , ГПа	μ	J , 10^{-7} мм ³ /Н/м	J_K , 10^{-7} мм ³ /Н/м
Подложка (цементованная сталь 12X2H4A без покрытия)	6,4	206,0	0,902	12,3	4,46
Монослойное покрытие TiAlN	25,5	316,1	0,756	12,91	4,79
Многослойное покрытие TiAlN	25,1	257,7	0,722	10,6	4,64
Наноструктурированное покрытие CrAlSiN	24,1	251,3	0,820	0,792	1,66
Алмазоподобное покрытие (DLC)	32,3	203,8	0,330	3,88	0,91

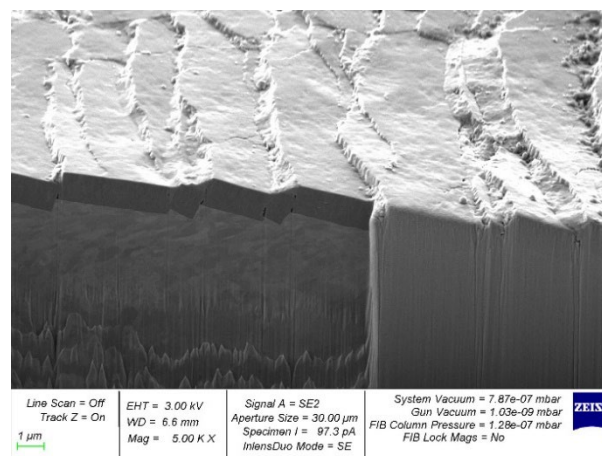
Из приведенных данных (см. табл. 1) следует, что механические свойства не определяют износостойкость ВИП-покрытий при испытаниях на трение скольжения. Поэтому задача оптимизации выбора покрытия потребовала исследования механизма изнашивания покрытий, который у исследованных покрытий оказался существенно различным. Так, покрытия TiAlN в условиях проведенных трибоиспытаний были подвержены окислительно-механическому износу (рис. 3, а), что с учетом их относительно невысокой стойкости к оксидированию и определило их низкую износостойкость.

В процессе изнашивания покрытия системы CrAlSiN окисления не наблюдалось (в связи с его более высокой стойкостью к оксидированию). Разрушение покрытия происходило с образованием трещин в дорожке трения, расположенных поперёк дорожки и нормально к поверхности покрытия. Далее

наблюдалась стадия ступенчатой фрагментации (рис. 3, б) в виде упорядоченного сдвига берегов образовавшихся трещин. Под воздействием движущегося шарика-штифта машины трения деформация фрагментированного покрытия происходит согласованно – фрагменты покрытия поворачиваются относительно подложки на одинаковый, относительно небольшой угол ($5...15^\circ$), образуя ступенчатую конфигурацию покрытия. Причем, в процессе ступенчатой фрагментации сохраняется целостность, как покрытия, так и границы «подложка-покрытие», т. е. покрытие сохраняет свою работоспособность, а период сопротивления покрытия разрушению и выкрашиванию (т.е. износостойкость), благодаря этому, возрастает. Принципиально другой механизм изнашивания обнаружен у углеродных DLC-покрытий, износ которых происходит по принципу истирания подобно высокопрочным резинам.



а)



б)

Рис. 3. Механизмы изнашивания ВИП-покрытий при трибологических испытаниях на трение скольжения, СЭМ, кросс-секции:

а – окислительный износ (разгарные трещины) покрытия TiAlN; б – стадия ступенчатой фрагментации в процессе изнашивания покрытия CrAlSiN

Fig. 3. Mechanisms of wear of VIP coatings subjected to tribological tests for sliding friction, SEM, cross sections: а – oxidative wear (incandescent cracks) of the TiAlN coating; б – the stage of stepwise fragmentation during the wear of the CrAlSiN coating

В целом же следует отметить, что ВИП-технология путем варьирования технологических параметров обеспечивает возможность регулирования свойств покрытий в широком диапазоне, изменяя их элементный состав, фазовое состояние, микроструктуру и морфологию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные примеры завершенных комплексов исследования ВИП-покрытий определенного функционального назначения – лишь небольшая часть возможностей ВИП-технологии. Перспективы технологии

ограничиваются только дальностью и шириной полета фантазии исследователей, поскольку число комбинаций компонентов в составе покрытия практически не ограничено, особенно при магнетронном способе испарения. Так, например, авторы работы [15] апробировали высокоэнтропийный сплав эквиатомного состава с двадцатью компонентами.

Сделанный всесторонний обзор вакуумной ионно-плазменной технологии нанесения покрытий дает основания читателю самому оценить уровень и перспективы наукоёмкости этой технологии. Авторы же полагают, что сам принцип использования покрытий на относительно малой площади поверхности изделия, обеспечивающий длительные преимущества этому изделию по работоспособности над аналогичными изделиями без покрытий, гарантирует актуальность и перспективы применения технологий получения покрытий независимо от методик расчета и значений коэффициента наукоёмкости. Что же касается технологии вакуумного ионно-плазменного напыления, то её высокий уровень наукоёмкости не вызывает сомнений хотя бы потому, что в этом технологическом процессе человек вторгается в область использования одних из самых мощных сил в природе – сил межатомного взаимодействия, на основе которых формируется покрытие с уникальными свойствами. Проникновение же в недра природы, будь то наномир или далекий космос, волей-неволей требует высокого технологического уровня, высококвалифицированных кадров, надежного современного оборудования (технологического, аналитического, испытательного) и, соответственно, немалых капитальных затрат.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кудряков О.В., Варавка В.Н. Мониторинг начальных стадий эрозионного износа ионно-плазменных покрытий при каплеударном воздействии // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 10 (94). С. 40–47.
2. Kolesnikov V.I., Kudryakov O.V., Zabiya I.Yu., Novikov E.S., Manturov D.S. Structural aspects of wear resistance of coatings deposited by physical vapor deposition // Phys. Mesomech. 23(6), 570–583 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1029959920060132>
3. Kolesnikov V.I., Pashkov D.M., Belyak O.A., Guda A.A., Danilchenko S., Manturov D., Novikov E., Kudryakov O.V., Guda S.A., Soldatov A.V.,

Kolesnikov I.V. Design of double layer protective coatings: Finite element modeling and machine learning approximations // ACTA Astronautica, 204, 869–877 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.11.007>

4. Batkovsky A.M., Fomina A.V., Semenova E.G., Khrustalev E.Yu., Khrustalev O.E. Models and Methods for Evaluating Operational and Financial Reliability of High-Tech Enterprises. Journal of Applied Economic Sciences. 2016. V. 11. No 7. P. 1384–1394.

5. Абрашкин М.С. Методика оценки наукоёмкости предприятий ракетно-космического машиностроения // Организатор производства. 2018. Т. 26. № 3. С. 74–84. DOI: 10.25065/1810-4894-2018-26-3-74-84

6. Ильин А.А., Плихунов В.В., Петров Л.М., Спектор В.С. Вакуумная ионно-плазменная обработка. М.: ИНФРА-М, 2014. 160 с.

7. Варавка В.Н., Кудряков О.В. Прочность и механизмы разрушения высокопластичных материалов при воздействии дискретного водно-капельного потока // Вестник ДГТУ. 2011. Т.11. № 8 (59). Вып. 2. С. 1376–1384.

8. Кудряков О.В., Варавка В.Н. Механизмы формирования эрозионного износа металлических материалов при высокоскоростных капельных соударениях: Часть 1 // Материаловедение. 2012. № 5. С. 36–43.

9. Кудряков О.В., Варавка В.Н. Механизмы формирования эрозионного износа металлических материалов при высокоскоростных капельных соударениях: Часть 2 // Материаловедение. 2012. №6. С. 14–19.

10. Варавка В.Н., Кудряков О.В. Особенности разрушения металлических сплавов в условиях устойчивой каплеударной эрозии // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2012. № 3 (167). С. 45–50.

11. Кудряков О.В., Варавка В.Н. Феноменология мартенситного превращения и структуры стали. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2004. 200 с.

12. Сапунов С.Ю., Кудряков О.В., Фартушный Н.И. Строение и свойства никель-цинкового покрытия на стали // Сталь. 2003. № 11. С. 94–96.

13. Кудряков О.В. Дислокационные квазидиполи и их роль в мартенситном превращении стали // Физика металлов и материаловедение. 2002. Т. 94. № 5. С. 3–10.

14. Кудряков О.В., Пустовойт В.Н. Структурный критерий коррозионной стойкости «белых слоев» // Материаловедение. 1998. №7. С. 33–39.

15. Fang C.M., Cantor B. An Equiatomic 20-Element High Entropy Amorphous Alloy: Ab Initio Molecular Dynamics Investigations / Posted Date: 19 February 2024. DOI: 10.20944/preprints202402.1010.v1

REFERENCES

1. Kudryakov O.V., Varavka V.N. Monitoring of initial stages of erosive wear of ion-plasma coatings at droplet-shock impacts // Strengthening technologies and coatings, 2012, no. 10, pp. 40–47.
2. Kolesnikov V.I., Kudryakov O.V., Zabiya I.Yu., Novikov E.S., Manturov D.S. Structural aspects of wear

resistance of coatings deposited by physical vapor deposition // Phys. Mesomech. 23(6), 570–583 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1029959920060132>

3. Kolesnikov V.I., Pashkov D.M., Belyak O.A., Guda A.A., Danilchenko S., Manturov D., Novikov E., Kudryakov O.V., Guda S.A., Soldatov A.V., Kolesnikov I.V. Design of double layer protective coatings: Finite element modeling and machine learning approximations // ACTA Astronautica, 204, 869–877 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.actastro.2022.11.007>

4. Batkovsky A.M., Fomina A.V., Semenova E.G., Khrustalev E.Yu., Khrustalev O.E. Models and Methods for Evaluating Operational and Financial Reliability of High-Tech Enterprises. Journal of Applied Economic Sciences. 2016. V. 11. No 7. P. 1384–1394.

5. Abrashkin M. S. Methodology for assessing the science intensity of rocket and space engineering enterprises. Organizer of Production, 2018, vol. 26, no. 3, pp. 74–84. DOI: 10.25065/1810-4894-2018-26-3-74-84.

6. Ilyin A.A., Plekhanov V.V., Petrov L.M., Spector V.S. Vacuum ion-plasma treatment. Moscow: INFRA-M, 2014. 160 p.

7. Varavka V.N., Kudryakov O.V. Strength and high-plasticity materials fracture mechanisms under discrete water-droplet flow // Bulletin of the DSTU. 2011, vol.11, no. 8 (59). Issue2, pp. 1376–1384.

8. Kudryakov O.V., Varavka V.N. Mechanisms of generation of erosive wear of metallic materials under high-

speed drip collisions: Part 1// Materialovedenie. 2012, no. 5, pp. 36–43.

9. Kudryakov O.V., Varavka V.N. Mechanisms of generation of erosive wear of metallic materials under high-speed drip collisions: Part 2// Materialovedenie. 2012, no. 6, pp. 14–19.

10. Varavka V.N., Kudryakov O.V. Features of destruction of metal alloys in the conditions of steady droplet-shack erosion. University News. North-Caucasian region. Technical Sciences Series, 2012, no. 3, pp. 45–50

11. Kudryakov O.V., Varavka V.N. Phenomenology of martensitic transformation and steel structure. Rostov-on-Don: Publishing Center of DSTU, 2004. 200 p.

12. Sapunov S.Yu., Kudryakov O.V., Fartushny N.I. Structure and properties of nickel-zinc coating on steel // Stal', 2003, no. 11, pp. 94–96.

13. Kudryakov O.V. Dislocation quasi-dipoles and their possible role in martensitic transformations in steel // Physics of metals and metallurgy. 2002, vol. 94, no. 5, pp. 3–10.

14. Kudryakov O.V., Pustovoi V.N. Structural criterion of corrosion resistance of «white layers» // Materialovedenie. 1998, no.7, pp. 33–39.

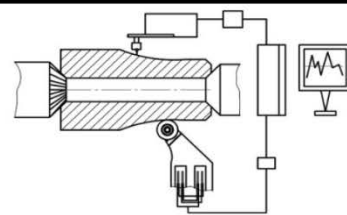
15. Fang C.M., Cantor B. An Equiatomic 20-Element High Entropy Amorphous Alloy: Ab Initio Molecular Dynamics Investigations / Posted Date: 19 February 2024. DOI: 10.20944/preprints202402.1010.v1

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 08.04.2024; одобрена после рецензирования 17.04.2024; принята к публикации 23.04.2024.

The article was submitted 08.04.2024; approved after reviewing 17.04.2024; assepted for publication 23.04.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 8 (158). С. 41-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 8 (158). P. 41-48.

Научная статья
УДК 621.9
doi: 10.30987/2223-4608-2024-41-48

Технологические составляющие цифровизации производственного процесса на машиностроительном предприятии

Александр Рональдович Ингеманссон, д.т.н.
«Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады»,
Волгоград, Россия
aleing@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7963-393X>

Аннотация. Рассмотрены аспекты цифровизации производственного процесса на машиностроительном предприятии, связанные с технологической подготовкой производства и управлением технологическими процессами механической обработки резанием. Приведен обзор направлений повышения эффективности машиностроительного производства за счет внедрения цифровых технологий. Показана связь с целевыми ориентирами государственной промышленной и инновационной политики, а также с программами развития ведущих научных и промышленных корпораций страны. Приведено содержание понятия цифровая производственная система. Подчеркнута значимость наличия массива полной и достоверной технологической информации для автоматизации управления производственным процессом на машиностроительном предприятии. Показана необходимость совершенствования технологической подготовки механообрабатывающих производств при внедрении цифровых производственных систем, а также управления процессом резания с целью обеспечения стабильности и качества. Работа в данном направлении позволяет сформировать условия для организационной, информационной и технической совместимости деятельности по технологической подготовке производства, проводимой различными исполнителями, реализовать оперативную взаимосвязь стадий постановки на производство и изготовления изделий и обеспечить стабильность технологических процессов механической обработки. Сформулированы принципы технологической подготовки производства при внедрении цифровых производственных систем. Показано, что использование цифровых технологий при функционировании технологической системы позволяет обеспечить стабильную работоспособность режущих инструментов, а также качество изготавливаемых деталей в условиях стохастического и нестационарного характера процессов механической обработки, что обеспечивает рост значений комплексных показателей надежности и эффективности использования технологических систем. Указаны проблемы и направления перспективного совершенствования цифровизации производственного процесса на машиностроительном предприятии.

Ключевые слова: производственный процесс, технологическая подготовка, технологический процесс, цифровизация, технологическая система, стабильность, надежность

Для цитирования: Ингеманссон А.Р. Технологические составляющие цифровизации производственного процесса на машиностроительном предприятии // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 8 (158). С. 41–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-41-48

Technological components of the production process digitalization at a machine-building enterprise

Alexander R. Ingemansson, D. Eng.

Federal Research and Production Center «Titan-Barricades», Volgograd, Russia
aleing@yandex.ru

Abstract. Digitalization aspects of the production process at a machine-building enterprise related to production design and control for machining operation in the cutting process, are viewed. The review of ways for machine-building production upgrading through the introduction of digital technologies, is given. The connection with the targets of the state industrial and innovation policy, as well as with the development programs of the country's leading scientific and industrial corporations, is shown. The content of the concept of a digital production system is given. The importance of having an array of complete and reliable technological information for the production process control automation at a machine-building enterprise is emphasized. The necessity of the upgrading in planning for machining industries connected with the introduction of digital production systems, as well as cutting process control for stability and quality is shown. Work in this direction makes it possible to create conditions for organizational, informational and technical compatibility of the activities aimed at the operational analysis, carried out by various performers, to implement interaction of all the stages for launching into manufacture and production work and to ensure the stability of flow processes in the machining operation. The principles of operational analysis in the implementation of digital production systems, are formulated. It is shown that the use of digital technologies in the operation of the technological system delivers stable operation of cutting tools, as well as the quality of manufactured products in conditions of stochastic and non-stationary nature of machining operation, providing an increase in the values of versatility indicators for reliability and technological systems utilization efficiency. The problems and directions of promising digitalization upgrading for the production process at a machine-building enterprise, are specified.

Keywords: production process, operational analysis, flow process, digitalization, industrial process system, stability, reliability

For citation: Ingemansson A.R. Technological components of the production process digitalization at a machine-building enterprise / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 8 (158). P. 41–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-41-48

Актуальность проблемы

Наращивание эффективности производства машиностроительной продукции за счет углубления применения цифровых технологий [1] осуществляется по следующим главным направлениям:

- уменьшение издержек при изготовлении благодаря применению новейших информационных технологий в конструкторско-технологической подготовке производства и управлении предприятием;

- уменьшение периода времени от разработки до завершения постановки изделия на производство;

- рост уровня автоматизации и гибкости производства и формирование условий для успешного применения безлюдной технологии;

- увеличение оперативности формирования и объективности информации, отражающей протекание производственного процесса;

- совершенствование процессов эксплуатации и обслуживания инженерной

инфраструктуры предприятия и средств технологического оснащения путем оперативной оценки данных об их состоянии. Адаптивное управление технологическими процессами;

- совершенствование менеджмента качества на предприятии путем оценки оперативной информации, аккумулируемой на стадиях входного контроля, запуска в производство, изготовления, операционного и приемочного контроля машиностроительной продукции.

Обеспечение конкурентоспособности в этой области находит отражение при реализации государственной промышленной и инновационной политики.

Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» в пункте 20 содержит информацию о том, что в ближайшие 10...15 лет приоритетами научно-технологического развития Российской Федерации следует считать те направления, которые позволят получить

научные и научно-технические результаты и создать технологии, являющиеся основой инновационного развития внутреннего рынка продуктов и услуг, устойчивого положения России на внешнем рынке, и обеспечат в т. ч. переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта [2].

Кроме этого, Указом Президента Российской Федерации от 21.07.2020 г. № 474 цифровая трансформация определена одной из ключевых национальных целей развития на период до 2030 г.

Распоряжением №3142-р от 6 ноября 2021 г. Правительством Российской Федерации утверждено «Стратегическое направление в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности», направленное на повышение эффективности и конкурентоспособности отечественной обрабатывающей промышленности и обеспечение технологической независимости государства, за счет внедрения новых производственных технологий, цифровых инструментов управления конструкторско-технологической подготовкой и производственным процессом на предприятии в целом [3].

Посредством Государственной информационной системы промышленности, Минпромторгом РФ аккумулируются сведения об уровне цифровизации производственных и административных процессов на промышленных предприятиях в виде т. н. «цифровых паспортов».

Проблема внедрения наукоемких производственных и информационно-вычислительных технологий в отечественной промышленности является также предметной областью Плана мероприятий «Технет» Национальной технологической инициативы до 2035 г., утвержденного Председателем Правительства Российской Федерации на заседании Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России от 14 февраля 2017 г. [4]. Работы в данном направлении

определены в программах развития ведущих научных и промышленных корпораций страны: в «Стратегии цифровой трансформации Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» на период до 2025 г. и перспективу до 2030 г.»; в «Программе инновационного развития и технологической модернизации Госкорпорации «Росатом» на период до 2030 г. (в гражданской части)», в «Программе инновационного развития Государственной корпорации «Ростех» на период 2019...2025 гг.»; в «Комплексной концепции цифровой трансформации» Объединенной судостроительной корпорации и др.

Внедрение цифровых производственных процессов является средством повышения эффективности ракетно-космической и других отраслей отечественной промышленности. В «Стратегии цифровой трансформации Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» на период до 2025 г. и перспективу до 2030 г.» выделяются следующие направления: цифровизация жизненного цикла изделия; цифровая модель производственной системы Корпорации и система межзаводской кооперации; автоматизированные системы оперативного планирования производства, диагностики технологического оборудования и управления качеством выпускаемой продукции. Особую актуальность приобретает необходимость изменений, направленных в сторону цифрового производства, за счет разработки цифровых паспортов деталей и сборочных единиц, применения «цифровых двойников», внедрения отечественных программных и аппаратных средств в области конструкторского и технологического проектирования.

Цифровизация производственного процесса

Цифровая производственная система наделена следующими особенностями.

Производственная система – это система, координируемая особой информационной моделью, обеспечивающей поддержку выполнения технологических процессов и управление этими процессами, с использованием потока информации, материалов и энергии на предприятии-изготовителе [5].

Цифровая технология «сквозная» – часть технологического процесса производства товаров, оказания услуг и выполнения работ, представляющая собой совокупность процессов и методов поиска, сбора, хранения, обработки, предоставления и распространения информации, обеспечивающих в ходе хозяйственной деятельности по производству товаров, оказанию услуг и выполнению работ [6]:

- увеличение стабильности, производительности, а также других принципиально важных свойств технологических процессов;

- снижение доли отступлений от технических условий на изготовление продукции, в т. ч. машиностроительной;

- уменьшение материальных затрат при изготовлении продукции, в т. ч. машиностроительной.

Поэтому цифровая производственная система является сочетанием логически связанных и управляемых за счет информационных технологий составляющих производственного процесса. При этом систематизированные мероприятия с использованием информационных технологий по технологической подготовке производства и управлению технологическими процессами формируют основу функционирования цифровой производственной системы для безусловной реализации установленных целей и задач.

На практике при подготовке к внедрению на машиностроительных предприятиях ERP-систем [7], функционирующих в контуре всех производственных процессов организации, и MES-систем, ориентированных на процессы в производственных подразделениях, имеет место следующая актуальная проблема. Генерирование производственных расписаний, определение загрузки мощностей, а также решение других задач с применением программного обеспечения требует наличия сформированных данных по технологическим маршрутам, трудоемкости и материалоемкости работ по изготовлению и ремонту. Оперативность технологического проектирования, степень релевантности проектных решений, глубина внедрения и возможности применяемых САПР ТПП на

машиностроительном предприятии непосредственно влияют на эффективность формирования базы данных, содержащей информацию о пооперационной трудоемкости.

В целом внедрение цифровых технологий является неотъемлемым инструментом реализации PLM-систем и CALS-технологий, объединяющих отдельные участки автоматизации в едином информационном пространстве и реализующие сквозной конструкторский, технологический и коммерческий циклы, от подготовки проекта до утилизации [8]. Целесообразно учитывать положения ГОСТ Р ИСО 9004-2019, согласно которым следует изучать как существующие, так и формирующиеся технологические разработки, которые могут оказывать значительное воздействие на деятельность организации в процессах, связанных с предоставлением продукции и услуг, на маркетинг, конкурентное преимущество, адаптивность и взаимосвязи с заинтересованными сторонами, а организации должны внедрять процессы для выявления технологических разработок и инноваций [9].

Цифровизация технологической подготовки производства и технологических процессов

Противоречие между стремлением повысить эффективность механообрабатывающего производства за счет внедрения цифровых производственных систем, с одной стороны, и недостаток в комплексных знаниях о связях между элементами таких систем, фрагментарное использование их возможностей, в т. ч. для повышения совместимости стадий технологической подготовки производства и изготовления изделий, с другой стороны, порождает проблемную ситуацию, требующую решения. Противоречие усугубляется сохранением стохастического и нестационарного характера процессов механической обработки резанием.

Внедрение принципов по совершенствованию технологической подготовки механообрабатывающих производств при внедрении цифровых производственных систем, а также управления процессом резания с целью обеспечения стабильности и качества является актуальной

научно-практической задачей. Ее решение позволяет сформировать условия для организационной, информационной и технической совместимости работ по технологической подготовке производства, проводимых различными исполнителями, реализовать оперативную взаимосвязь стадий постановки на производство и изготовления изделий и обеспечить стабильность технологических процессов механической обработки.

Современным является подход по совершенствованию технологической подготовки и управления процессом резания на основе использования комплекса цифровой информации о фактических свойствах элементов технологической системы на стадии технологической подготовки производства.

Следует отметить, например, что увеличение коэффициента сохранения требуемой производительности технологической системы может быть достигнуто за счет использования оценки обрабатываемости конкретной заготовки из партии по значению фактической твердости для выдачи уточненных режимов резания или установления рациональных пределов варьирования режимов резания, основываясь на результатах предшествующей вибродиагностики узлов станка.

Для использования при технологическом проектировании и адаптивном управлении процессом резания с целью обеспечения стабильности и качества обработки используются математические зависимости, отражающие закономерности формирования функциональных – сила резания и выходных – геометрическая точность, шероховатость обработанной поверхности – параметров процессов обработки резанием.

Практическую значимость представляет не только адаптивное управление процессом резания на конкретном рабочем месте, но и за счет программных производственно-технологических комплексов для цифровых производственных систем воплощение принципов «цифрового технологического двойника детали» посредством генерации электронного массива технологических и учетных данных, однозначно определяющих конкретную деталь в выборке и

характеризующих технологический процесс ее производства. Подобный подход позволяет реализовать условия для совместимости работ по технологической подготовке производства, проводимых различными исполнителями, а также обеспечить оперативную взаимосвязь стадий постановки на производство и изготовления изделий.

Для операций сборки изделий машиностроения, а также для проведения технического обслуживания и ремонтных работ начинают внедряться интерактивные инструкции. Они позволяют, опираясь на трехмерную модель сборочной единицы, получать доступ к технологической и эксплуатационной документации в электронном виде, что сокращает временные затраты на технологическую подготовку производства и обучение персонала.

Таким образом, требуется отметить, что отличительные черты технологической подготовки производства при использовании цифровых производственных систем, состоят в следующем:

- цифровая обработка комплексной информации о фактических параметрах технологической системы;
- обеспечение совместимости работ, проводимых на стадиях постановки изделий на производство различными исполнителями, на основе использования цифровой технологической информации;
- обеспечение стабильности технологических процессов механической обработки за счет адаптивного управления цифровой технологической системой с учетом возмущающих факторов;
- обеспечение единства, постоянной обновляемости, достоверности и оперативности доступа к цифровой информации, определяющей ход технологического процесса.

Технологическая система как часть производственной системы является совокупностью функционально взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства заданных технологических процессов и операций [ГОСТ 27.004 «Надежность в технике.

Системы технологические. Термины и определения»].

Таким образом, уменьшение управляющих воздействий человека-оператора благодаря внедрению информационных технологий представляет собой принципиальное свойство цифровой технологической системы, которая, в свою очередь, является частью цифровой производственной системы.

Согласно [10] комплексные показатели надежности и эффективности использования технологических систем, следующие: коэффициент сохранения производительности технологической системы; коэффициент использования технологической системы; коэффициент выхода годной продукции для технологической системы; коэффициент расхода каждого вида материальных ресурсов. Необходимо обратить внимание на то, что первые три коэффициента, отражающие надежность и эффективность использования технологических систем, определяют содержание расчетного коэффициента общей эффективности использования оборудования ОЕЕ [11], который находит широкое применение как в отечественной, так и в зарубежной практике.

Увеличение значения коэффициента технического использования технологического оборудования для механической и термической обработки достигается путем внедрения систем мониторинга работы оборудования (MDC-систем). На сегодняшний день аналогичные решения применяются для гальвано-химического, сварочного производств и изготовления кабельной и электропультовой продукции.

Потребность в приведении в соответствие расчетных величин режимов резания с характеристиками конкретной технологической системы возникает на этапе обработки деталей и сборочных единиц. Применение стационарных и переустанавливаемых систем вибродиагностики на примере сверлильно-фрезерно-расточного многоцелевого станка с ЧПУ позволяет следующее: производить оценку состояния шпиндельного узла на холостых оборотах с установленными инструментальными наладками и без них; на основе этого определять частоты вращения, на которых не рекомендуется работа по причине возможного присутствия

нестабильности процесса резания; проводить оценку принятых режимов резания в контексте наличия вибраций и их амплитуды, например, по оси Z , что отражается на стабильности микрогеометрии поверхности, геометрической точности детали, ресурсе службы шпинделя, и, кроме этого, проводить анализ уровня синфазности вибраций по осям X и Y , характеризующей равномерность съема стружки (для фрезы – каждым зубом); устанавливать добавочные промежуточные гармоники, приводящие к расширению общей полосы амплитуды спектра вибраций и негативно отражающиеся на стабильности процесса резания; реализовать повышение эффективности технологического процесса путем обеспечения малой амплитуды и синфазности вибраций по осям X и Y , невысокой амплитуды по оси Z при сохранении заданной производительности благодаря выбору рациональных комбинаций скорости резания, подачи, ширины фрезерования.

За счет применения адаптивного управления удастся обеспечить повышение стабильности работы режущих инструментов, а также качество производимых деталей, принимая во внимание стохастический и нестационарный характер процессов механообрабатывающего производства, что для технологических систем способствует росту величин комплексных показателей надежности и эффективности использования.

Направления перспективного совершенствования процесса

Следует выделить проблемы, сопровождающие цифровизацию производственного процесса. Среди них:

– использование различного программного обеспечения CAD/CAM/CAE-систем и др. между интегрированными промышленными структурами и организациями, входящими в одну интегрированную промышленную структуру;

– сложившиеся особенности технологической подготовки, имеющие место в практике конкретного машиностроительного предприятия, зачастую не учитываются или требуют времени для отражения в составе стандартного набора бизнес-процессов

известных автоматизированных систем технологической подготовки производства;

– необходимость комплексного подхода к управлению данными. На сегодняшний день значительные объемы конструкторско-технологической информации обрабатываются локально, без интеграции с другими программными решениями на предприятии;

– необходимость эффективных механизмов имплементации цифровых решений в операционных процессах предприятия, по-настоящему оправдывающих свое внедрение и повышающих эффективность производственного процесса;

– при недостаточной отлаженности внедряемых автоматизированных систем технологической подготовки производства и автоматизированных систем управления производством в случае срочной производственной ситуации имеет место использование заменяемых, «бумажных», но отлаженных процедур, в качестве исключения, которое затем становится системой. В результате вместо отладки автоматизированных систем проблемы решаются за счет постоянных «исключений»;

– необходимость отраслевых рекомендаций по приоритетам и этапам цифровой трансформации с учетом группирования особенностей машиностроительных предприятий;

– необходимость методических рекомендаций для оценки экономической эффективности от внедрения конкретных цифровых решений, для сравнения и оценки целесообразности их внедрения в производственный процесс.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ингеманссон А.Р. Характеристика, состав, механизмы функционирования и современные аспекты внедрения цифровых производственных систем в машиностроение // Научные технологии в машиностроении. 2018. № 8. С. 25–32.

2. О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации [Электронный ресурс]: Указ Президента Российской Федерации № 642 от 1.12.2016 г. Режим доступа: <https://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201612010007.pdf>.

3. Стратегическое направление в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности [Электронный ресурс]: Распоряжение

Правительства Российской Федерации № 3142-п от 6.11.2021 г. Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/Yu4vXEtPvMyDVAw88UuBGB3dGEr6r8zP.pdf>.

4. План мероприятий («дорожная карта») «Технет» (передовые производственные технологии) Национальной технологической инициативы: прил. №1 к протоколу [Электронный ресурс]: Протокол заседания Совета при Президенте РФ по модернизации экономики и инновационному развитию России от 14.02.2017г. Режим доступа: <https://www.nti2035.ru/documents/doc.html>.

5. Системы промышленной автоматизации и интеграция. Профилирование возможности интероперабельности промышленных программных средств. Часть 1. Структура: ГОСТ Р ИСО 16100-1-2012. Введ. 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2020. 47 с. (Национальный стандарт Российской Федерации).

6. О государственной поддержке программ деятельности лидирующих исследовательских центров, реализуемых российскими организациями в целях обеспечения разработки и реализации дорожных карт развития перспективных «сквозных» цифровых технологий [Электронный ресурс]: Постановление Правительства Российской Федерации № 551 от 3.05.2019 г. Режим доступа: <http://government.ru/docs/all/121708/>.

7. Чигиринский Ю.Л., Ингеманссон А.Р. Технологические аспекты подготовки цифрового машиностроительного производства // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 9 (147). С. 39–48. DOI 10.30987/2223-4608-2023-39-48. EDN CEFJJK.

8. Разработка технологических процессов изготовления деталей общего и специального машиностроения: учеб. пособие для вузов / И. Ф. Звонцов, К. М. Иванов, П. П. Серебренникий. 3-е изд., стер. СПб: Лань, 2022. 696 с.

9. Руководство по достижению устойчивого успеха организации. Менеджмент качества. Качество организации: ГОСТ Р ИСО 9004-2019. Введ. 01.10.2020. М.: Стандартинформ, 2020. 62 с. (Национальный стандарт Российской Федерации).

10. Надежность в технике. Системы технологические. Термины и определения: ГОСТ 27.004-85. Введ. 01.07.86. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. 9 с. (Межгосударственный стандарт).

11. Системы промышленной автоматизации и интеграция. Ключевые технико-экономические показатели (KPIs) для управления производственными операциями. Часть 2. Определения и описания: ГОСТ Р ИСО 22400-2-2019. Введ. 19.09.2019. М.: Стандартинформ, 2019. 67 с. (Национальный стандарт Российской Федерации).

REFERENCES

1. Ingemansson A.R. Characteristics, structure, mechanisms of functioning and modern aspects of digital production system introduction in mechanical engineering // Science-intensive technologies in mechanical engineering.

2018, no. 8, pp. 25–32.

2. On the Strategy of scientific and technological development of the Russian Federation [Electronic resource]: Decree of the President of the Russian Federation No. 642 dated 12/11/2016. Access mode: <https://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201612010007.pdf>.

3. Strategic direction in the field of digital transformation of manufacturing industries [Electronic resource]: Decree of the Government of the Russian Federation No. 3142-r dated 6.11.2021. Access mode: <http://static.government.ru/media/files/Yu4vXEtPvMyDVAw88UuBGB3dG6r8zP.pdf>.

4. Action plan («roadmap») «Technet» (advanced production technologies) of the National Technological Initiative: supplement no.1 to the record sheet [Electronic resource]: Hearings of the Presidential Council for Economic Modernization and Innovative Development of Russia dated 02/14/2017. Access mode: <https://www.nti2035.ru/documents/doc.html>

5. Industrial automation systems and integration. Profiling the interoperability capabilities of industrial software. Part 1. Structure: GOST R ISO 16100-1-2012. Introduction. 01.01.2014. Moscow: Standartinform, 2020. 47 p. (National Standard of the Russian Federation).

6. On state support for the programs of activities of leading research centers implemented by Russian organizations in order to ensure the development and implementation of roadmaps for the development of

promising «end-to-end» digital technologies [Electronic resource]: Decree of the Government of the Russian Federation No. 551 dated 05/3/2019. Access mode: <http://government.ru/docs/all/121708/>.

7. Chigirinsky Yu.L., Ingemansson A.R. Technological aspects of digitalization of machine-building production at the stage of pre-production engineering process (PEP) // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023, no. 9(147), pp. 39–48. DOI 10.30987/2223-4608-2023-39-48. EDN CEFJJK.

8. Development of technological processes for manufacturing parts of general and special engineering: textbook for universities / I. F. Zvontsov, K. M. Ivanov, P. P. Serebrenitsky. 3rd ed., St. Petersburg: Lan, 2022, 696 p.

9. Quality of an organization. Guidance to achieve sustained success. Quality management system. The quality of the organization: GOST R ISO 9004-2019. Introduction. 01.10.2020. Moscow: Standartinform, 2020. 62 p. (National Standard of the Russian Federation).

10. Reliability in technology. Technological systems. Terms and definitions: GOST 27.004-85. Introduction. 01.07.86. Moscow: IPK Publishing House of Standards, 2002, 9 p. (Interstate standard).

11. Industrial automation systems and integration. Key technical and economic indicators (Kpi) for managing production operations. Part 2. Definitions and descriptions: GOST R ISO 22400-2-2019. Introduction. 09/19/2019. Moscow: Standartinform, 2019. 67 p. (National Standard of the Russian Federation).

Статья поступила в редакцию 30.03.2024; одобрена после рецензирования 05.04.2024; принята к публикации 19.04.2024.

The article was submitted 30.03.2024; approved after reviewing 05.04.2024; assepted for publication 19.04.2024.

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

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

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

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

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

Сдано в набор 17.08.2024. Выход в свет 30.08.2024.

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

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

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

12+