

# НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

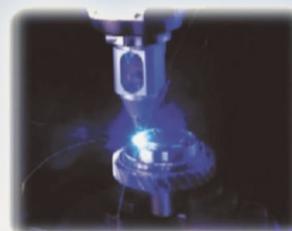
**5 (167)**  
**2025**

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



**НАНОТЕХНОЛОГИИ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

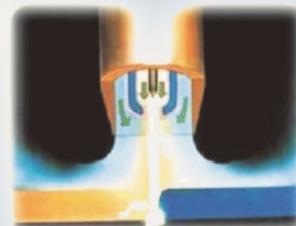
**ЛАЗЕРНЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ**



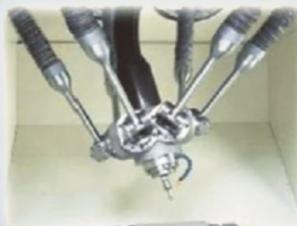
**ТЕХНОЛОГИИ  
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ  
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В СВАРОЧНОМ  
ПРОИЗВОДСТВЕ**



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

# НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

**№ 5 (167)**

**2025**

Издается с июля 2011 г.

**ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ**

**Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей**

## Главный редактор

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

## Зам. главного редактора

д.т.н., доц. ШАЛЫГИН М.Г. (г. Брянск)

## Председатель редакционного совета

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

## Зам. председателя редакционного совета

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

## Редакционный совет:

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

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

д.н., доктор инженер ВАЛЬДЕНМАЙЕР Т.

(г. Штутгарт, Германия)

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

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

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

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

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

д.т.н., проф. ЛАРИН С.Н. (г. Тула)

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

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

д.т.н., проф. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

DOI:10.30987/issn.2223-4608

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

Подписной индекс: **Э79195**.

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

E-mail: editntm@yandex.ru

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА

**Шенбо Ли, Цжишу Линь, Киричек А.В., Нагоркин М.Н.,  
Новиков М.А.** Влияние технологических факторов на процессы  
формирования параметров качества изделий, изготавливаемых  
WAAM-методом на основе дуговой сварки в защитных газах . . . . . 3

**Шупенев А.Е., Григорьянц А.Г.** Развитие процесса импульсного  
лазерного осаждения наноразмерных структур . . . . . 15

**Крючина О.А.** Определение энергетических характеристик  
сопутствующего излучения при лазерных технологических  
процессах обработки нержавеющей стали 12X18H10T . . . . . 22

### ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

**Бабаев А.С., Козлов В.Н., Овчаренко В.А., Семёнов А.Р.,  
Бельчиков И.А.** Исследование обрабатываемости при  
фрезеровании сплава инконель 625, полученного  
по технологии EBAM . . . . . 30

**Погонышев В.А., Мокшин И.А., Погонышева Д.А., Бычкова Т.В.**  
Повышение износостойкости поверхности деталей в прецизионных  
парах трения сельскохозяйственных машин методом ФАБО . . . . . 42

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

# SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

**№ 5 (167)**

**2025**

**Publishes from July 2011**

**MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL**

**Comes out with assistance of Engineering Technologists Association**

## Editor-in-chief

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

## Deputy chief editor

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

## Chairman of Editorial Committee

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

## Chairman Assistant

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

## Editorial Committee:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

DOI:10.30987/issn.2223-4608

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

Subscription index: **379195**.

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

E-mail: editntm@yandex.ru

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

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

## CONTENTS

### ADDITIVE TECHNOLOGIES AND LASER PROCESSING

**Shengbo Li, Zhishu Lin, Kirichek A.V., Nagorkin M.N., Novikov M.A.**

Technology factors effect on the quality parameters of products  
manufactured by the WAAM- technique based  
on GMAW (gas-metal-arc-welding) . . . . . 3

**Shupenev A.E., Grigoryants A.G.** Development of pulsed laser  
deposition process in nanodimensional structures . . . . . 15

**Kryucina O.A.** Characterization of accompanying radiation under  
laser processing of stainless steel 12Cr18Ni10Ti . . . . . 22

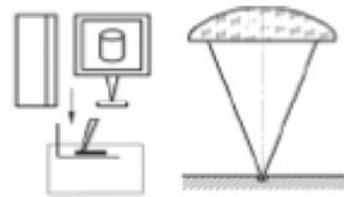
### TECHNOLOGIES OF MECHANICAL PROCESSING OF WORKPIECES

**Babaev A.S., Kozlov V.N., Ovcharenko V.A., Semenov A.R.,  
Belchikov I.A.** Processing characteristics study for the alloy obtained  
through additive technology EBAM (inconel 625) under milling . . . . . 30

**Pogonyshv V.A., Mokshin I.A., Pogonysheva D.A., Bychkova T.V.**  
Surface wear resistance increase for parts in precision friction pairs  
of agricultural machines under final antifriction nonabrasive machining. . . . . 42

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

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



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №5 (167). С.3-14.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №5 (167). P.3-14.

Научная статья  
УДК 621.791/621.9  
doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-3-14

## Влияние технологических факторов на процессы формирования параметров качества изделий, изготавливаемых WAAM-методом на основе дуговой сварки в защитных газах

Шенбо Ли<sup>1</sup>, д.т.н.  
Чжишу Линь<sup>2</sup>, д.т.н.

Андрей Викторович Киричек<sup>3</sup>, д.т.н.  
Максим Николаевич Нагоркин<sup>4</sup>, д.т.н.

Максим Александрович Новиков<sup>5</sup>, аспирант

<sup>1,2</sup> Сямьинский технологический университет, Сямьинь, Китай

<sup>3,4,5</sup> Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

<sup>1</sup> hit4057@xmut.edu.cn, <https://orcid.org/0009-0000-6950-0415>

<sup>2</sup> linzs@xmut.edu.cn, <https://orcid.org/0009-0001-2858-3223>

<sup>3</sup> avkbgtu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3823-0501>

<sup>4</sup> nagorkin\_mn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4536-7522>

<sup>5</sup> novikovmax14@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-7552-312X>

**Аннотация.** Объектом исследования в статье являются технологические процессы аддитивного производства на основе автоматической дуговой сварки проволочным электродом в среде защитного газа – DED-W/WAAM-GMAW. В статье представлена классификация DED-технологий и их сравнительные характеристики. Указаны преимущества WAAM-процессы на основе GMAW. Перечислены управляющие факторы технологий WAAM-GMA, влияющие на формирование параметров качества изготавливаемых изделий, и выходные параметры процесса, по которым оценивают технологические возможности WAAM-GMAW-процесса. Рассмотрены механизмы переноса металла в процессе его осаждения на формируемую заготовку. Представлены сравнительные характеристики режимов переноса, оценивается их влияние на протекание GMAW-процессов. Рассмотрено влияние на параметры качества изделий и процесс наплавки полярности таких факторов, как полярность подключения проволоки-электрода, сила тока и напряжение источника питания сварочной дуги, скорость подачи проволоки, скорость перемещения сварочной головки (сварочной ванны), состав защитного газа. Рассмотрены аспекты моделирования траекторий формообразующих движений сварочной головки в процессах WAAM-GMAW, влияющих на тепловые процессы наплавки, геометрическую точность и форму изготавливаемой заготовки, механические свойства материала заготовки. Рассмотрены недостатки метода, связанные с возможным возникновением дефектов изделий, таких как высокие шероховатость и волнистость поверхности, анизотропия механических свойств материала, переливы металла на боковой поверхности заготовки, остаточные напряжения, пористость, трещины и расслоение. Перечислены причины возникновения дефектов. Представлен анализ подверженности различных материалов различным дефектам. Представлены сведения о степени влияния некоторых управляющих технологических факторов процессов WAAM-GMAW на параметры процесса наплавки и формируемые параметры качества изделий. Предложен ряд решений, позволяющих повысить надёжность формирования параметров качества изделий, получаемых WAAM-GMAW-методами

**Ключевые слова:** DED, WAAM, GMAW, аддитивные технологии, электродуговая сварка в защитном газе, многослойная наплавка, режим переноса металла, технологические факторы, параметры качества

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, работа «Проведение фундаментальных научных исследований» в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки РФ по проекту №FZWR-2024-0003 (№ 075-00150-24-03) «Разработка технологической стратегии и теоретико-экспериментальное исследование ключевых элементов технологии аддитивного синтеза из металлической проволоки деталей 3DMP-методом и волнового термомодеформационного упрочнения синтезируемых деталей машин».

**Для цитирования:** Шенбо Ли, Чжишу Линь, Киричек А.В., Нагоркин М.Н., Новиков М.А. Влияние технологических факторов на процессы формирования параметров качества изделий, изготавливаемых WAAM-методом на основе дуговой сварки в защитных газах // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 5 (167). С. 3–14. doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-3-14

## Technology factors effect on the quality parameters of products manufactured by the WAAM-technique based on GMAW (gas-metal-arc-welding)

Shengbo Li<sup>1</sup>, D. Eng.

Zhishu Lin<sup>2</sup>, D. Eng.

Andrey V. Kirichek<sup>3</sup>, D. Eng.

Maxim N. Nagorkin<sup>4</sup>, D.Eng.

Maxim A. Novikov<sup>5</sup>, postgraduate student

<sup>1, 2</sup> Xiamen University of Technology, Xiamen, China

<sup>3, 4, 5</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> hit4057@xmut.edu.cn

<sup>2</sup> linzs@xmut.edu.cn

<sup>3</sup> avkbgtu@gmail.com

<sup>4</sup> nagorkin\_mn@mail.ru

<sup>5</sup> novikovmax14@yandex.ru

**Abstract.** The object of research in the article is a welding procedure of additive manufacturing based on automatic wire electrode arc welding in a shielding gas environment– DED-W / WAAM-GMAW. The article presents the classification of DED technologies and their comparative characteristics. The advantages of WAAM processes based on GMAW are illustrated. The controlling factors of WAAM-GMA technologies that influence quality parameters of manufactured products and the output parameters of the process are specified for the evaluation of engineering capabilities in WAAM-GMAW. The mechanisms of metal transfer during its deposition onto the formed blank part are viewed. Comparative characteristics of transfer modes are presented, and their effect on the course of GMAW processes is evaluated. The influence of such factors as the polarity of the electrode wire connection, the current strength and voltage of the welding arc power source, the wire feed rate, the speed of movement of the welding blowpipe (welding bath), shielding gas composition on the product quality parameters and WOL is viewed. The aspects of path modeling of the shaping movements of the welding blowpipe in the WAAM-GMAW procedure affecting the thermal processes of WOL, the geometric accuracy and shape of the blank part, and the mechanical properties of the work material are described. The disadvantages of the method related to the possible defects in products, such as high surface roughness and undulation, anisotropy of the mechanical properties of the material, metal overflows on the side surface of the blank, residual stresses, porosity, cracks and delamination, are focused on. The causes of defects are listed. An analysis of the proneness of various materials to various defects is presented. Information is provided on the degree of influence of some of the controlling technology factors of the WAAM-GMAW procedure on the WOL parameters and the generated product quality parameters. A number of solutions have been proposed to improve the reliability of forming the quality parameters for products obtained by WAAM-GMAW methods.

**Keywords:** DED, WAAM, GMAW, additive technologies, electric gas-metal-arc-welding, multilayer WOL, metal transfer mode, technology factors, quality parameters

**Acknowledgements:** the work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the work "Conducting fundamental scientific research" within the framework of the basic part of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under project No. FZWR-2024-0003 (No. 075-00150-24-03) "Development of a technological strategy and theoretical and experimental research of key elements of the additive synthesis technology of metal wire for 3DMP parts produced by the method and wave thermal deformation hardening for synthetically produced machine parts".

**For citation:** Shengbo Li, Zhishu Lin, Kirichek A.V., Nagorkin M.N., Novikov M.A. Technology factors effect on the quality parameters of products manufactured by the WAAM- technique based on GMAW (gas-metal-arc-welding) / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 5 (167). P. 3–14. doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-3-14

## Введение

Аддитивные технологии (АТ) активно внедряются в производственные процессы производства изделий. Методы послойного нанесения металлов, в частности, электродуговой сваркой в среде защитного газа (WAAM), позволяют производить детали среднего и большого размера с высокой производительностью и сравнительно низкой стоимостью процесса. Для широкого внедрения в производство, как и для других методов АТ, необходимо точно знать возможности технологического метода по обеспечению требуемых параметров качества изделия, с целью обоснования экономической эффективности его применения. Необходимо проводить множество исследований по оценке степени влияния технологических факторов WAAM-технологий на процессы, протекающие при изготовлении изделий и формирование показателей качества. В статье представлен обзор некоторых исследований, связанных с оценкой технологических возможностей WAAM-технологий на основе применения электродуговой сваркой в среде защитного газа.

## Классификация аддитивных технологий

Аддитивный технологический процесс – процесс изготовления деталей, основанный на создании физического объекта по электронной геометрической модели путём добавления материала слой за слоем. В соответствии с ГОСТ Р 57558-2017, ГОСТ Р 57589-2017, ГОСТ Р 57588-2021 различают семь категорий процессов, применяемых в аддитивных технологиях и технологическом оборудовании: 1) процесс фотополимеризации в ванне (vat photopolymerization); 2) процесс струйного нанесения материала (MJ – material jetting); 3) процесс струйного нанесения связующего (BJ – binder jetting); 4) процесс синтеза на подложке (PBF – powder bed fusion); 5) процесс экструзии материала (ME – material extrusion); 6) процесс прямого подвода энергии и материала (DED – directed energy deposition); 7) процесс листовой ламинации (SL – sheet lamination).

Для изготовления металлических изделий применяют процессы BJ, PBF, DED, SL.

DED-процессы направленного нанесения (осаждения) металлического материала под воздействием тепловой энергии от внешнего

источника обладают такими преимуществами, как высокая производительность, возможность изготовления изделий сложных геометрических форм (в том числе крупногабаритных) с заданными механическими свойствами, разнообразие применяемых материалов и др. [1 – 4].

В зависимости от вида применяемого сырья различают DED-технологии с использованием металлической проволоки или металлопорошковой композиции (ГОСТ Р 70242-2022). Одним из преимуществ проволочных технологий является возможность применения широкого ассортимента материалов в виде сварочной проволоки: нелегированных, легированных, нержавеющей стали, алюминиевых, титановых, никелевых, медных, медноникелевых, магниевых сплавов, тантала, вольфрама, ниобия, молибдена, циркония, бронзы, инвара и др.

В DED-процессах применяются лучевые и электродуговые источники энергии для плавки (осаждения) материалов. Различают технологии DED-EB – с применением электроннолучевой плавки (EBF3 – electron-beam freeform fabrication); DED-L – с применением лазерной наплавки проволокой (LWC – laser wire cladding); DED-WAAM – на основе электродуговой сварки в среде газа (WAAM – wire arc additive manufacturing); DED-P – с применением быстрой плазменной наплавки (RPD – Rapid Plasma Deposition). Также применяются комбинированные источники энергии, например, плазма и плавящийся электрод [1].

Технологии DED-WAAM считаются наиболее экономичным вариантом среди технологий DED [1 – 3, 6, 7]. Достоинства – высокая энергоэффективность, производительность процесса и коэффициент использования материалов, высокая механическая прочность, плотность и низкая пористость материала изделия, стоимость оборудования и материалов (проволока дешевле порошка в 2 – 10 раз).

Основными задачами, позволяющими обосновать применимость и эффективность WAAM-технологий изготовления изделий из различных материалов проволочных электродов, являются определение факторов, влияющих на производительность процесса и формирование требуемых параметров качества, обеспечение технологической гибкости процесса для управления параметрами качества, определение стратегий управления и контроля WAAM-процессов с целью повышения их

надёжности и воспроизводимости.

Для реализации WAAM-технологий применяют следующие виды сварочных процессов (ГОСТ Р 4063-2010): GMAW (Gas-shielded Metal Arc Welding) – дуговая сварка плавящимся электродом (проволокой) в среде защитного газа (инертный или активный газ, MIG/MAG-сварка (Metal Inert/Active Gas)); GTAW (Gas-shielded Tungsten Arc Welding) – дуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом в среде защитного газа (инертный газ, TIG-сварка (Tungsten Inert Gas)); PAW (Plasma Arc Welding) – дуговая плазменная сварка [2, 3, 6, 7].

Исследования показали, что WAAM-процессы на основе GMAW имеет больше преимуществ, по сравнению с GTAW и PAW. Производительность GMAW в 2 – 3 раза больше производительности GTAW и PAW. В процессах GMAW скорость наплавки составляет 3...4 кг/ч; для GTAW: 1...2 кг/ч; для PAW: 2...3 кг/ч [2, 7, 8]. Энергоэффективность GMAW составляет до 85 %, GTAW – 65 % [7]. GMAW относительно проще в реализации, поскольку не требует отдельной подачи проволоки и специальной установки для переориентации проволоки и направления осаждения металла, так как проволока подаётся соосно со сварочной головкой, траектория движения инструмента становится более простой [2, 3, 6].

### Управляющие технологические факторы WAAM-GMAW-процессов

Обеспечение требуемой точности размеров, геометрических параметров качества и физико-механических свойств материала изделий, формируемых WAAM-методами, основанными на сварочных процессах GMAW, зависит от множества факторов, которые условно можно разделить на три группы [2 – 4, 7, 8]:

1. Свойства материала проволоки (электрода) – химический состав; твердость; прочность; пластичность; постоянство диаметра проволоки и т.п.;

2. Конструкторско-технологические параметры – диаметр проволоки; тип приспособления для подачи проволоки; тип защитного газа; оснастка для управления тепловыми потоками; мощность источника энергии; род тока (постоянный, переменный); тип полярности тока;

3. Технологические параметры – скорость подачи проволоки в зону сварочной дуги (м/мин), скорость перемещения сварочной головки (сварочной ванны) (мм/мин), сила тока источника питания сварочной дуги (А), напряжение источника питания (В), режим переноса металла; расход газа при наплавке (л/мин), угол наклона сварочной головки относительно наплавляемой поверхности; расстояние от мундштука головки до изделия, траектория формирующих движений, величина перекрытия валиков, шаг наплавки (приращения), температура осажденного слоя, температура осажденного слоя перед выполнением следующего прохода; скорость тепловых потоков и др.

Выходными параметрами процесса, по которым оценивают технологические возможности WAAM-метода, являются толщина и ширина наплавляемого слоя, сплошность и монолитность наплавленного слоя, микроструктура наплавленного материала (размер зерна, фазовая структура, однородность, плотность изменения микроструктуры по глубине слоя и т.д.), наличие внутренних дефектов и пористость, величина остаточных напряжений, твердость; прочность; пластичность; производительность процесса и др.

Одним из управляющих факторов технологии WAAM-GMAW, влияющим на скорость осаждения материала, является полярность подключения проволоки-электрода. Предпочтительно использовать постоянный ток обратной полярности – DCRP (электрод подключается к клемме «+» источника питания, а подложка/заготовка подключена к клемме «-»), так как обеспечивается высокая скорость осаждения металла, стабильность сварочной дуги, низкий уровень разбрызгивания металла.

Режим переноса металла в процессе его осаждения влияет на формирование механических свойств и типа микроструктуры материала изделия, получаемого WAAM-методом на основе GMAW. В ГОСТ Р 4063-2010 определены 4 типа переноса: капельный перенос, перенос с коротким замыканием, струйный, импульсный. Также при сварке применяют холодный перенос металла (СМТ – cold metal transfer) – усовершенствованный процесс переноса с коротким замыканием, разработанный компанией Fronius (Австрия) [4, 9].

Капельный режим обеспечивает высокую производительность и скорость осаждения [7], наблюдается при среднем значении силы тока

и высоком значении сварочного напряжения. На конце электрода выделяется большое количество тепла, образуются крупные (размером больше диаметра электрода) неправильной формы капли расплавленного металла, падающие под действием силы тяжести. Направление движения капель не совпадает с осью электрода, поэтому повышается разбрызгивание и испарение и ухудшается качество шва.

Режим переноса металла с коротким замыканием возникает при низком значении силы тока и среднем значении напряжения. При таком режиме поверхностное натяжение в расплаве и электромагнитные силы являются преобладающими, притягивают расплавленные капли в ванну расплава, создавая «мост» в межэлектродном зазоре, что приводит к состоянию короткого замыкания. Частота замыкания превышает 100 Гц. Такой тип переноса металла позволяет получать капли с низким риском деформации (из-за низкой тепловой нагрузки). Требуется контроль управляющих параметров для исключения чрезмерного разбрызгивания и появления дефектов неполного сплавления [4, 7].

Струйный перенос металла наблюдается при повышенных значениях силы тока, по сравнению с режимом переноса коротким замыканием. При этом образуются мелкие капли без разбрызгивания, поверхность изделия формируется с низкой шероховатостью. Высокая теплоотдача (при испарении) позволяет увеличить скорость осаждения. Но при этом повышается интенсивность выделения сварочных аэрозолей (задымление) [4, 7].

Импульсный перенос металла наблюдается при пульсирующем токе в виде импульсов сложной формы. При этом происходит бесконтактный перенос металла с электрода в сварочную ванну. Управление процессом импульсного переноса осуществляется регулированием амплитуды и длительности пикового значения сварочного тока. При осаждении металла образуются мелкие капли, металл практически не разбрызгивается, снижается скорость подачи проволоки, повышается производительность. В этом режиме образуются длинные столбчатые зёрна с дендритной микроструктурой металла, благодаря чему обеспечивается высокая механическая прочность вдоль направления осаждения капель [3, 7].

Холодный перенос металла (СМТ) основан на принципе контролируемой металлизации погружением, при котором осуществляется возвратно-поступательное движение электрода с частотой до 70 Гц и выше – как только происходит короткое замыкание, он отводится назад [4, 9]. Это обеспечивает задержку во времени для охлаждения ранее осажденной капли металла перед осаждением новой. Таким образом, в ванне расплава выделяется меньше тепла, что является преимуществом метода. Перенос капель осуществляется без разбрызгивания, а размер зёрен небольшой, так как в этом процессе электромагнитная сила выше, что создаёт более сильный эффект перемешивания расплава, но растёт пористость материала [4, 7, 9, 10].

Особенности режимов переноса металла представлены в табл. 1 [7].

## 1. Особенности режимов переноса металла в WAAM-технологиях на основе GMAW [7]

### 1. Features of metal transfer modes in GMAW-based WAAM technologies [7]

Тип переноса	Характеристики процесса						
	Сила тока $I$ , А	Напряжение $U$ , В	Тепловой поток	Стабильность дуги	Скорость осаждения	Разбрызгивание	Качество наплавки
Капельный	200...300	20...30	+++	+	+++	+++	+
Коротким замыканием	100...200	15...22	+	++	+	++	++
Струйный	290...450	28...35	+++	+++	+++	+	+++
Импульсный	300...350*	25...35	+	+++	++	++	+++
Холодный	50...150	10...20	+	+++	+++	+	+++

*Примечание.* \* – пиковые значения. Показатель: + – низкий; ++ – средний; +++ – высокий

Для получения качественных изделий WAAM-методами необходимо контролировать силу тока и напряжение источника питания сварочной дуги, скорость подачи проволоки, скорость перемещения сварочной головки (сварочной ванны) и др. Эти параметры напрямую влияют на характеристики качества наплавленного металла и тепловую нагрузку (мощность) процесса наплавки. Чрезмерное количество тепла, затрачиваемого при осаждении металла, приведет к повторному расплавлению ранее нанесенных слоев, что ухудшит макроструктуру и геометрию наплавливаемых валиков. Низкая тепловая нагрузка обеспечивает равномерную поверхность наплавки без перетекания сварочной ванны через край. Снижается пористость структуры осаждаемого металла и степень растворимости газа в расплаве [4, 6].

При снижении тепловых потоков соотношение ширины к высоте наплавливаемого валика снижается, так как расплавленный металл не успевает растечься до затвердевания. При увеличении тепловых потоков вязкость расплавленного металла снижается, и он растекается лучше. Разницу в теплоотдаче между двумя последовательно наплавливаемыми слоями можно снизить за счет выбора способа их охлаждения в процессе осаждения, что позволит обеспечить равномерную геометрию валика [4, 6].

Сила тока влияет на скорость плавления электрода, глубину проплавления, геометрию сварного шва, скорость наплавки, шероховатость наплавливаемой поверхности [2, 3]. Увеличение силы тока позволяет увеличить скорость наплавки, толщину валика (слоя), глубину проплавления, что повышает прочность соединения слоев [5]. Шероховатость поверхности валика (слоя) уменьшается с ростом силы тока.

Напряжение сварочной дуги также влияет на глубину проплавления. При высоком напряжении ширина наплавливаемых слоев увеличивается, а высота уменьшается [2, 3]. Для сохранения формы валика при повышении температуры предварительного нагрева следует уменьшить напряжение [3, 6].

Скорость перемещения сварочной головки (ванны расплава) влияет на качество наплавливаемого слоя. С увеличением скорости перемещения уменьшается глубина проплавления, ширина наплавленного валика, увеличивается шероховатость поверхности. Повышение скорости снижает тепловую нагрузку на

осаждаемые слои на 5...20 % в зависимости от вида материала, что увеличивает скорость затвердевания валика и обеспечивает равномерность наплавки [3 – 5, 8].

Скорости подачи проволоки влияет на высоту наплавливаемого валика – при высокой подаче валики получаются высокими и узкими. Глубина проплавления от подачи не зависит [4, 5, 8].

Высоту и ширину наплавливаемого слоя можно эффективно контролировать, регулируя отношение скорости подачи проволоки к скорости перемещения сварочной головки [2].

Важным управляющим фактором WAAM-процесса на основе GMAW является состав защитного газа, позволяющего защитить сварочную ванну от внешней среды и предотвратить растрескивание осаждаемых слоев, появления пористости, появления нежелательных соединений в виде оксидов, нитридов и др. Используются инертные или активные газы.

В качестве активных газов применяют углекислый газ  $\text{CO}_2$ , азот  $\text{N}_2$ , водород  $\text{H}_2$ .

Углекислый газ используется благодаря низкой стоимости и доступности. Его применение может инициировать образование оксидов, разбрызгивание [8, 12].

При использовании чистого азота  $\text{N}_2$  в качестве защитного газа формируется нестабильная электрическая дуга, образуются чешуйчатые нитриды, которые значительно влияют на пластичность и прочность материала изделия. Предел прочности на разрыв и относительное удлинение детали снижаются, а процент анизотропии одновременно повышается [13].

С применением инертного газа (аргон  $\text{Ar}$  или гелий  $\text{He}$ ) достигается стабильность сварочной дуги, вероятность разбрызгивания, образования оксидов металлов и пор снижается [4, 7, 8, 12, 13].

Траектория формообразующих движений сварочной головки в процессах WAAM-GMAW оказывает значительное влияние на распределение температуры в осаждаемых слоях, геометрическую точность и форму изготавливаемой заготовки, отсутствие сплавления, на формирование механических свойств, остаточных напряжений и др. [14].

Моделирование траектории формообразующих движений сварочной головки осуществляется с использованием растровой, контурной и зигзагообразной стратегий (рис. 1)

[3, 6]. Остальные модели траекторий являются либо вариациями, либо комбинациями базовых моделей. В растровой модели смещение оси инструмента выполняется параллельно заданному направлению наплавки, что нередко требует частого поворота инструмента и приводит к ухудшению качества изготовления заготовки. Зигзагообразная модель, почти не отличается от растровой, она представляет собой один непрерывный технологический переход,

соединяющий параллельные линии наплавки [3]. Обе модели имеют низкую точность формирования внешнего контура заготовки из-за ошибок дискретизации [6]. В контурной модели смещение инструмента выполняется параллельно профилю предыдущего осажденного слоя, наплавка осуществляется от внешнего контура заготовки к внутренней части [3, 6, 8].

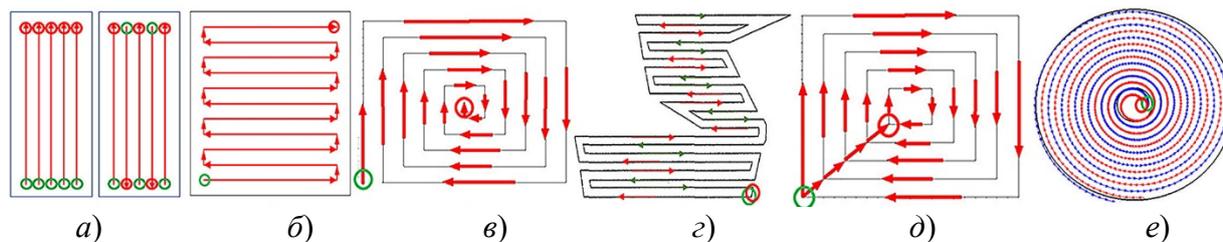


Рис. 1. Модели траектории наплавки в технологии WAAM-GMAW:

*a* – растровая; *б* – зигзагообразная; *в*, *г* – контурная; *д* – контурно-параллельная; *е* – контурно-спиральная

Fig. 1. Model of the surfacing trajectory in WAAM-GMAW technology [3]:

*a* – raster; *b* – zigzag; *c*, *d* – contour; *e* – contour-parallel; *f* – contour-spiral

При проектировании траектории наплавки необходимо учитывать шаг смещения оси сварочной головки для обеспечения перекрытия наплавляемых валиков. Шаг смещения  $S$  различается для разных WAAM-процессов. Он зависит от диаметра проволоки, скорости наплавки и скорости подачи проволоки и может принимать значения от 2 до 12 мм [6]. Уменьшение расстояния  $S$  между валиками снижает производительность наплавки. Расстояние  $S$  можно определить по ширине  $w$  наплавляемого валика. Для зигзагообразных и контурных траекторий движения фидстока оптимальное расстояние перекрытия составляет почти половину ширины  $w$  валика. Анализ различных моделей с перекрывающимися валиками показали, что оптимальное расстояние между осями валиков  $S = 0,667w$  или  $S = 0,738w$  [15].

### Свойства изделий, полученных методами WAAM-GMAW. Дефекты и проблемы

Наряду с достоинствами, связанными с обеспечением высоких производительности и энергоэффективности, механических свойств и плотности материалов заготовок, низкой себестоимостью, WAAM-технологий на основе GMAW имеют и характерные недостатки.

Заметная шероховатость и волнистость поверхности, возможно перетекание металла с боковой поверхности, анизотропия механических свойств, остаточные напряжения, образование пор и трещин, длинные столбчатые зёрна в кристаллической структуре и др. [7 – 11].

Исследования сплавов на основе титана и алюминия показали, что по всей высоте осаждённого материала изделия наблюдаются разные значения предела прочности при растяжении  $\sigma_b$ , предел текучести  $\sigma_t$ , микротвёрдости. Различия в механических свойствах по высоте заготовки связаны с изменением температурного градиента и скоростью охлаждения осаждаемых слоев [4, 8, 16]. На механические свойства и анизотропию металлов влияют размер и строение зёрен. Мелкозернистые микроструктуры обладают более высокими механическими свойствами. Контролировать изменение микроструктуры в WAAM-процессах сложно из-за многократных циклов плавления-затвердевания и температурных градиентов [3].

Подверженность различных материалов различным дефектам представлена в таблице 2 [6]. Например, пористость характерна для алюминиевых сплавов, образование трещин – для никелевых сплавов, для титановых сплавов – окисление и т.п.

2. Взаимосвязь между различными материалами/сплавами и дефектами после изготовления изделий WAAM-методами [6]

2. The relationship between different materials/alloys and defects after WAAM manufacturing [6]

Дефекты	Материал / Сплав				
	Титан	Алюминий	Сталь	Никель	Биметаллический
Трещины	++	+++	+++	++++	++++
Качество поверхности	+	++	+++++	+++	+++
Деформация	+++	++++	++++	++	+++++
Пористость	+	+++++	++	+++	++
Остаточное напряжение	+++	++++	++++	+++	+++++
Расслоение	+	+	+↑	+++	++
Окисление	+++++	+++	+++	+	+++

*Примечание.* + – низкая; ++ – средняя; +++ – умеренная; ++++ – большая; +++++ – очень большая

Остаточные напряжения в основном возникают из-за неравномерного распределения тепла и приводят к деформации заготовок, изменению макроотклонений, расслоению в процессе наплавки, снижению усталостной прочности и сопротивления разрушению [2]. В тонкостенных конструкциях было обнаружено, что наибольшее продольное напряжение возникает у основания. Однако деформация уменьшается с увеличением количества слоев [3]. Остаточное напряжение также зависит от силы сварочного тока. Диапазон значений остаточных напряжений увеличивается при увеличении сварочного тока [4, 8].

Пористость снижает механическую прочность заготовок и ухудшает усталостную прочность нанесённого слоя [17]. В расплавленном металле происходит поглощение водорода, кислорода и азота [2, 8], что при затвердевании приводит к дефекту в виде пор.

Пористость зависит от скорости и плотности потока защитного газа, стабильности процесса осаждения и траектории формообразующих движений, качества исходного сырья – сварочной проволоки и технологических факторов процесса [2]. Проволока обычно имеет на поверхности различные загрязнения, которые при наплавке проникают в расплав и образуют поры после затвердевания. Очистка и обезжиривание проволоки могут помочь также

свести к минимуму загрязнение водородом.

Трещины и расслоение связаны с характеристиками материала, из которого изготовлена заготовка, а также с тепловыми параметрами процесса наплавки. В изделиях, изготовленных методом WAAM, образуются два типа трещин: межкристаллические трещины и трещины, возникающие при затвердевании. Межкристаллические трещины возникают вдоль границ зёрен из-за их разного строения и образования осадков. Трещины, возникающие при затвердевании, в основном возникают из-за чрезмерного образования растворённых в металле веществ, препятствующих затвердеванию расплава или при затруднении отвода тепла от затвердевающего металла [3].

**Влияние технологических факторов на формирование параметров качества изделий**

Регулирование управляющих параметров WAAM-GMAW процессов является единственным способом управления параметрами качества изготовленного изделия. Сведения о степени влияния управляющих технологических факторов WAAM-GMAW на параметры процесса наплавки и формируемые параметры качества изделия представлены в таблице 3 [7].

**3. Влияние технологических факторов WAAM-GMAW-процессов на параметры процесса наплавки и формируемые параметры качества изделия [7]**

**3. The influence of technological factors of WAAM-GMAW on the WOL parameters and the generated product quality parameters [7]**

Параметры	Технологические факторы	Степень влияния
Ширина и высота наплавляемого валика	Сварочный ток $I$ , А	+
	Сварочное напряжение $U$ , В	++
	Скорость подачи проволоки, м/мин	+
	Скорость движения сварочной головки, мм/мин	+++
	Время выдержки перед нанесением слоя, мин	+++
	Температура промежуточного слоя, °С	+
	Тепловая нагрузка (погонная энергия), Дж/мм	++
	Расстояние от мундштука до поверхности, мм	++
	Расход защитного газа, л/мин	++
Скорость осаждения	Сварочный ток $I$ , А	+++
	Сварочное напряжение $U$ , В	++
	Скорость подачи проволоки, м/мин	+++
	Тепловая нагрузка (погонная энергия), Дж/мм	+++
	Диаметр электрода, мм	+++
	Расход защитного газа, л/мин	++
Вытекание расплавленного металла из сварочной ванны	Сварочный ток $I$ , А	+
	Скорость движения сварочной головки, мм/мин	+++
	Тепловая нагрузка (погонная энергия), Дж/мм	++
	Время выдержки перед нанесением слоя, мин	+++
	Температура межслойная, °С	+++
Качество поверхности и пористость	Сварочный ток $I$ , А	+
	Сварочное напряжение $U$ , В	++
	Тепловая нагрузка (погонная энергия), Дж/мм	+
	Время выдержки перед нанесением слоя, мин	+++
	Расход защитного газа, л/мин	+++
Разбрызгивание	Сварочное напряжение $U$ , В	++
	Скорость подачи проволоки, м/мин	+
	Расход защитного газа, л/мин	++
	Расстояние от мундштука до поверхности, мм	++
	Температура межслойная, °С	+
	Диаметр электрода, мм	++
Измельчение зерен и образование различных фаз	Сварочный ток $I$ , А	++
	Сварочное напряжение $U$ , В	+
	Скорость подачи проволоки, м/мин	++
	Скорость движения сварочной головки, мм/мин	+++
	Тепловая нагрузка (погонная энергия), Дж/мм	+
	Время выдержки перед нанесением слоя, мин	++
	Температура межслойная, °С	+
	Расход защитного газа, л/мин	++
Механические характеристики: предел прочности при растяжении, предел текучести, относительное удлинение, микротвердость)	Сварочный ток $I$ , А	++
	Сварочное напряжение $U$ , В	+
	Скорость подачи проволоки, м/мин	++
	Скорость движения сварочной головки, мм/мин	++
	Время выдержки перед нанесением слоя, мин	++
	Расход защитного газа, л/мин	++
	Тепловая нагрузка (погонная энергия), Дж/мм	++

*Примечание.* Степень влияния: + – низкая; ++ – средняя; +++ – высокая

Тепловые потоки и температурный градиент определяют направление роста зерна, который происходит в направлении, противоположном тепловому потоку [7]. Большое значение имеет моделирование тепловых процессов при изготовлении изделий, исследование закономерностей нагрева и охлаждения отдельных синтезируемых слоев и детали в целом. Важной информацией является время выдержки объемов материала выше температуры рекристаллизации. Для управления градиентом изменения температур вначале создается модель материала [18], выявляются факторы, оказывающие доминирующее влияние на распределение тепловых потоков [19].

### Заключение

Несмотря на ряд преимуществ, по сравнению с другими методами аддитивного производства, для технологии WAAM-GMAW характерен ряд недостатков. Одной из проблем является возможность воспроизводимости процесса – незначительное изменение технологических параметров может привести к снижению качества изделий.

Поэтому одной из задач повышения надёжности технологического процесса является обеспечение управления технологическими параметрами, для чего необходимо обеспечить обратную связь с управляющим устройством оборудования, что требует, в свою очередь понимания взаимосвязи управляющих факторов с выходными характеристиками процесса.

Для улучшения механических свойств, качества поверхности, геометрических характеристик и микроструктурных свойств изготавливаемых методами WAAM-GMAW изделий предложены различные подходы – оптимизация траектории формообразующих движений; применение процессов термообработки; применение активного охлаждения или технологии охлаждения погружением в жидкость в процессе наплавки; совмещение GMAW-процессов с методами фрезерования, поверхностного упрочнения (прокатки, ковки,

ультразвуковой обработки); применения пассивной системы технического зрения; двойных электродов и др. [2 – 7, 10, 11].

Оптимизация технологических параметров процессов, мониторинг и контроль процесса в реальном времени, создание гибридных технологий приведут к лучшему пониманию и широкому внедрению технологии WAAM-GMAW.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Трубащевский Д.С. Аддитивные зарисовки, или решения для тех, кто не хочет продолжать терять деньги. Воронеж : Умное Производство, 2021. 203 с.
2. Li Y., Su C., Zhu J. Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects // Results in Engineering. 2022. Vol. 13. 100330. DOI: 10.1016/j.rineng.2021.100330.
3. Srivastava M., Rathee S., Tiwari A., Dongre M. Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behaviour // Materials Chemistry and Physics. 2023. Vol. 294. 126988. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126988.
4. Kesarwani S., Yuvaraj N., Niranjan M. S. CMT-based WAAM: a comprehensive review of process parameters, their effects, challenges, and future scope // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2024. Vol. 46. 699. DOI: 10.1007/s40430-024-05276-0.
5. Singh S.R., Khanna P. Wire arc additive manufacturing (WAAM): a new process to shape engineering materials // Materials Today Proc.. 2021. Vol. 44. Pp. 118–128. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.030.
6. Tomar Bunt, Shiva S., Nath Tamesher. A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances // Materials today communications. 2022. Vol. 31.103739. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.103739.
7. Suvranshu P., Susanta K. S. Gas metal arc welding based additive manufacturing – a review // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2021. Vol. 33. Pp. 398–442. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.04.010.
8. Jafari D., Vaneker T.H.J., Gibson I. Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts // Materials and Design. 2021. Vol. 202. 109471. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109471.
9. Wang C., Ding J., Williams S. Process control methods in cold wire gas metal arc additive manufacturing // Metals. 2023. Vol. 13 (8). 1334. DOI: 10.3390/met13081334

10. **Rajendra Prasad, Yuvaraj N., Vipin** A review on wire arc additive manufacturing based on cold metal transfer // *Materials and manufacturing processes*. 2024. Vol. 39 (10). Pp. 1315–1341. DOI: 10.1080/10426914.2024.2323441

11. **Yildiz A.S., Davut K., Koc B., Yilmaz O.** Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics // *The International journal of advanced manufacturing technology*. 2020. Vol. 108. Pp. 3391–3404. DOI: 10.1007/s00170-020-05482-9.

12. **Juric I., Garasic I., Busic M., Kozuh Z.** Influence of shielding gas composition on structure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Inconel 625 // *JOM*. 2019. Vol. 71 (2). DOI: 10.1007/s11837-018-3151-2.

13. **Li S., Zhang L.J., Ning J., Wang X., Zhang G.F., Zhang J.X., Na S.J., Fatemeh B.** Comparative Study on the microstructures and properties of wire+arc additively manufactured 5356 aluminium alloy with argon and nitrogen as the shielding gas // *Additive manufacturing*. 2020. Vol. 34.101206. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101206.

14. **Киричек А.В., Сергеев А.Г., Федонина С.О., Петрешин Д.И.** Технологическое обеспечение параметров качества синтезируемой WAAM-методом детали управлением траекторией движения фидстока // *Транспортное машиностроение*. 2022. № 4 (44). С. 60–68. DOI: 10.30987/2782-5957-2022-4-60-68.

15. **Nguyen L., Buhl J., Vambach M.** Multi-bead Overlapping Models for Tool Path Generation in Wire-Arc Additive Manufacturing Processes // *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 47. Pp. 1123–1128. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.04.129.

16. **Кузнецов М.А., Данилов В.И., Крампит М.А., Чинахов Д.А., Слободян М.С.** Механические и трибологические свойства металлической стенки, выращенной электродуговым способом в среде защитных газов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2020. Т. 22, № 3. С. 18–32. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-18-32.

17. **Киричек А.В., Федонин О.Н., Федонина С.О., Сергеев А.Г.** Сравнительная оценка влияния технологий аддитивного синтеза на количество и размер пор в изделии // *Научно-технические технологии в машиностроении*. 2022, № 5 (131). С. 20–26. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-5-20-26.

18. **Киричек А.В., Баринов С.В., Яшин А.В., Федонина С.О., Андросов К.Ю.** Разработка и верификация моделей материалов при моделировании процессов волнового деформационного упрочнения и аддитивного синтеза (3DMP) // *Тракторы и сельхозмашины*, 2024. Том 91. № 6. С. 611–618. DOI: 10.17816/0321-4443-637300.

19. **Киричек А.В., Баринов С.В., Греченева А.В.**

Расчет температурных полей на основе конечно-элементной модели процесса аддитивного синтеза изделия // *Прикладная информатика*. 2024. Т. 19. № 6. С. 113–128. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-6-113-128.

## REFERENCES

1. Trubachevsky D. S. Additive sketches, or solutions for those who don't want to keep losing money. *Voronezh: Smart Manufacturing*, 2021, 203 p.

2. Li Y., Su C., Zhu J. Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects // *Results in Engineering*. 2022. Vol. 13.100330. DOI: 10.1016/j.rineng.2021.100330.

3. Srivastava M., Rathee S., Tiwari A., Dongre M. [Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behaviour](#) // *Materials Chemistry and Physics*. 2023. Vol. 294. 126988. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126988.

4. Kesarwani S., Yuvaraj N., Niranjana M. S. CMT-based WAAM: a comprehensive review of process parameters, their effects, challenges, and future scope // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2024. Vol. 46. 699. DOI: 10.1007/s40430-024-05276-0.

5. Singh S.R., Khanna P. Wire arc additive manufacturing (WAAM): a new process to shape engineering materials // *Materials Today Proc.* 2021. Vol. 44. Pp. 118–128. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.030.

6. Tomar Bunty, Shiva S., Nath Tameshwer. A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances // *Materials today communications*. 2022. Vol. 31. 103739. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.103739.

7. Suvranshu P., Susanta K. S. Gas metal arc welding based additive manufacturing – a review // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021. Vol. 33. Pp. 398–442. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.04.010.

8. Jafari D., Vaneker T.H.J., Gibson I. Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts // *Materials and Design*. 2021. Vol. 202. 109471. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109471.

9. Wang C., Ding J., Williams S. Process control methods in cold wire gas metal arc additive manufacturing // *Metals*. 2023. Vol. 13 (8). 1334. DOI: 10.3390/met13081334

10. Rajendra Prasad, Yuvaraj N., Vipin A review on wire arc additive manufacturing based on cold metal transfer // *Materials and manufacturing processes*. 2024. Vol. 39 (10). Pp. 1315–1341. DOI: 10.1080/10426914.2024.2323441

11. Yildiz A.S., Davut K., Koc B., Yilmaz O. Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics // *The International journal of*

advanced manufacturing technology. 2020. Vol. 108. Pp. 3391-3404. DOI: 10.1007/s00170-020-05482-9.

12. Juric I., Garasic I., Busic M., Kozuh Z. Influence of shielding gas composition on structure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Inconel 625 // JOM. 2019. Vol. 71 (2). DOI: [10.1007/s11837-018-3151-2](https://doi.org/10.1007/s11837-018-3151-2).

13. Li S., Zhang L.J., Ning J., Wang X., Zhang G.F., Zhang J.X., Na S.J., Fatemeh B. Comparative Study on the microstructures and properties of wire+arc additively manufactured 5356 aluminium alloy with argon and nitrogen as the shielding gas // Additive manufacturing. 2020. Vol. 34. 101206. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101206.

14. Kirichek A.V., Sergeev A. G., Fedonina S. O., Petreshin D. I. Technological support of the quality parameters of the part using waam-method by controlling the feedstock path. Transport Engineering. 2022, no. 4 (44), pp. 60–68. DOI: 10.30987/2782-5957-2022-4-60-68

15. Nguyen L., Buhl J., Bambach M. Multi-bead Overlapping Models for Tool Path Generation in Wire-Arc Additive Manufacturing Processes // Procedia Manufacturing. 2020. Vol. 47. Pp. 1123–1128. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.04.129.

16. Kuznetsov M.A., Danilov V.I., Krampit M.A., Chikhov D.A., Slobodyan M.S. Mechanical and tribological properties of a metal wall grown by an electric arc method in an atmosphere of shielding gas// Metalworking (technology, equipment, tools). 2020, vol. 22. no. 3. pp. 18–32. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-18-32.

17. Kirichek A.V., Fedonin O. N., Fedonina S. O., Sergeev A. G. Comparative evaluation of the effect of additive synthesis technologies on the number and size of pores in the product // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2022, no. 5 (131). pp. 20–26. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-5-20-26.

18. Kirichek A.V., Barinov S.V., Yashin A.V., Fedonina S.O., Androsov K.Y. Development and verification of material models for modeling wave deformation hardening and additive synthesis (3DMP) processes // Tractors and Agricultural Machinery. 2024. vol. 91. no. 6. pp. 611–618. DOI: 10.17816/0321-4443-637300.

19. Kirichek A.V., Barinov S.V., Grecheneva A.V. Calculation of temperature fields based on a finite element model of the additive synthesis process of a product // Applied Computer Science. 2024. vol. 19. no. 6. pp. 113–128. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-6-113-128.

**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 21.02.2025; одобрена после рецензирования 05.03.2025; принята к публикации 14.03.2025.

The article was submitted 21.02.2025; approved after reviewing 05.03.2025; assepted for publication 14.03.2025.

Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2025. №4 (167). С.15-21.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №5 (167). P.15-21.

Научная статья

УДК 539.234

doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-15-21

## Развитие процесса импульсного лазерного осаждения наноразмерных структур

Александр Евгеньевич Шупенев<sup>1</sup>, к.т.н.

Александр Григорьевич Григорьянц<sup>2</sup>, д.т.н.

<sup>1,2</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,  
Россия, Москва

<sup>1</sup> ash@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0723-7492>

<sup>2</sup> Mt12@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0000>

**Аннотация.** Представлены перспективные направления использования метода PLD: высокотемпературная сверхпроводимость, углеродные наноструктуры, термоэлектрические структуры и топологические изоляторы на основе теллурида висмута. Технологии физического осаждения тонких пленок в вакууме (PVD), такие как метод импульсного лазерного осаждения (PLD), играют важную роль в микроэлектронике и других отраслях промышленности. PLD начал активно развиваться в 1960-х гг., став мощным инструментом для создания наноразмерных пленок и высокотемпературных сверхпроводников. Одним из важнейших достижений PLD стало получение качественной пленки высокотемпературного сверхпроводника  $YBa_2Cu_3O_7$ , что открыло новые возможности в области сверхпроводников. Метод PLD обладает уникальным сочетанием свойств, обуславливающих высокую универсальность и широчайшие возможности для проведения исследований. Ключевой особенностью метода PLD является мощное (более 1 МВт/см<sup>2</sup>) воздействие на мишень короткими (менее 30 нс) импульсами. Метод основан на испарении мишени лазерным лучом и осаждении материала на подложку в вакуумной среде. Особенностью PLD является высокая точность контроля состава и структуры осажденных материалов, что делает его уникальным среди других методов PVD. PLD также широко используется для получения углеродных наноструктур, включая графен и алмазоподобные покрытия (DLC), которые находят применение в различных сферах, от суперконденсаторов до медицинских имплантов. Кроме того, метод PLD успешно применяется для формирования тонкопленочных термоэлектрических материалов на основе теллурида висмута, которые используются в сенсорах и системах стабилизации температуры. Высокая универсальность и эффективность PLD делают его ключевым инструментом в современных исследованиях и разработках новых материалов в микроэлектронике, квантовых технологиях и энергетике.

**Ключевые слова:** импульсное лазерное осаждение, тонкие пленки, алмазоподобные структуры, высокотемпературный сверхпроводник, пленочный термоэлемент, топологический изолятор

**Для цитирования:** Шупенев А.Е., Григорьянц А.Г. Развитие процесса импульсного лазерного осаждения наноразмерных структур // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 5 (167). С. 15–21.  
doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-15-21

## Development of pulsed laser deposition process in nanodimensional structures

Alexander E. Shupenev<sup>1</sup>, PhD. Eng.

Alexander G. Grigoryants<sup>2</sup>, D. Eng.

<sup>1,2</sup> Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Russia, Moscow

<sup>1</sup> ash@bmstu.ru

<sup>2</sup> Mt12@bmstu.ru

**Abstract.** Promising directions of PLD method application are presented: high-temperature superconductivity, carbon nanostructures, thermoelectric structures and topological insulators based on bismuth telluride. Vacuum physical deposition of thin films (PVD) technologies, such as pulsed laser deposition (PLD), play an important part in microelectronics and other industries. PLD has been actively developed since the 1960s, becoming a powerful tool for creating nanoscale films and high-temperature superconductors. One of the most important achievements of PLD was the production of a high-quality film of the high-temperature superconductor  $YBa_2Cu_3O_7$ , opening up new opportunities in the field of superconductors. The PLD method has a unique combination of properties that provide high versatility and broad research potentialities. The key feature

of the PLD method is the powerful (more than 1 MW/cm<sup>2</sup>) impact on the target with short (less than 30 ns) pulses. The method is based on evaporation of a target by a laser beam and deposition of the material on a substrate in a vacuum environment. A special feature of PLD is the high accuracy of control of the composition and structure of deposited materials, which makes it unique among other PVD methods. PLD is also widely used to produce carbon nanostructures, including graphene and diamond-like coatings (DLCs), which find applications in various fields, from supercapacitors to medical implants. In addition, the PLD method has been successfully applied to the formation of thin-film thermoelectric materials based on bismuth telluride, which are used in sensors and temperature stabilization systems. Wide versatility and efficiency of PLD make it a key tool in modern research and development of new materials in microelectronics, quantum technologies and energy.

**Keywords:** pulsed laser deposition, thin films, diamond-like structures, high-temperature superconductor, film thermoelectric element, topological insulator

**For citation:** Shupenev A.E., Grigoryants A.G. Development of pulsed laser deposition process in nanodimensional structures / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 5 (167). P. 15–21. doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-15-21

## История PLD

Технологии физического осаждения тонких пленок в вакууме (PVD) являются фундаментальными для микроэлектроники и востребованы во многих других отраслях промышленности. Интерес к процессам лазерной абляции появился в 1960-х гг. Фундаментальные исследования в данной области выделили лазерно-индуцированную плазму (LIP) в отдельное новое направление исследований. Одной из первых работ по исследованию LIP считается работа 1963 г. советских ученых Г.А. Аскарьяна и Е.М. Мороз из ФИАН им. П.Н. Лебедева [1] по расчету ударного воздействия LIP при абляции твердой мишени. В то же время были и зарубежные работы посвященные исследованию электронно-ионной структуры LIP [2 – 4]. В 1965 г. Смитом и Тёрнером был проведен первый эксперимент по PLD [5], в котором с помощью рубинового лазера были получены наноразмерные пленки из 11 различных материалов. В начале 1980 г. метод PLD пополнил ряды PVD методов получения тонких пленок: в исследованиях, проводимых в МИФИ и ИПФ РАН [6 – 8] с помощью Nd:YAG лазера были получены более 50 различных составов наноразмерных пленок для которых были определены эффективные плотности мощности лазерной обработки и перспективы их использования при изготовлении рентгеновских зеркал. Первым выдающимся результатом, показавшим уникальность возможностей метода PLD считается получение качественной пленки высокотемпературного сверхпроводника  $YBa_2Cu_3O_7$  в 1987 г. [9], что было недостижимо ни одним другим PVD методом. С тех

пор метод PLD получил особое развитие и активно используется в настоящее время в мире для решения самых современных исследовательских задач.

## Устройство и достоинства процесса PLD

Типичная схема метода импульсного лазерного осаждения остается неизменной с 1960-х гг. (рис. 1.): Laser – лазерное излучение; Heater – нагреватель; VAC – вакуумная система; MFC – контроллер напуска технологических газов; PS – датчик давления; RHEED – электронная пушка ДБЭ; CAM – камера.

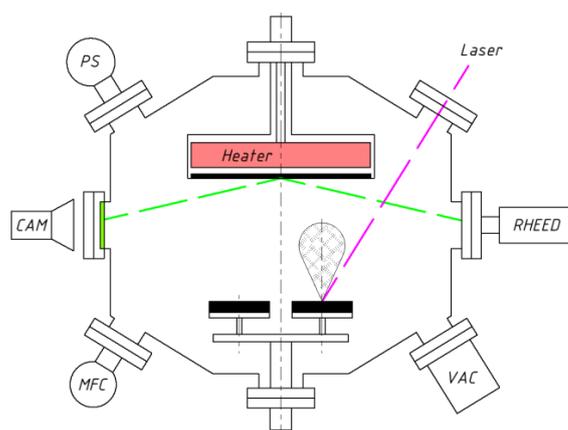


Рис. 1. Типичная схема процесса импульсного лазерного осаждения

Fig. 1. Typical scheme of the pulsed laser deposition process

Лазерный луч испаряет материал мишени, и образованная лазерно-индуцированная плазма осаждается на поверхности подложки, формируя тонкую пленку. Процесс проводится

в вакуумной камере с контролируемой атмосферой. В камере поддерживается давление от атмосферного до высокого вакуума, возможна контролируемая подача реакционных ( $O_2$ ,  $N_2$ ) или инертных ( $N_2$ ,  $Ar$ ) газов. Над подложкой располагается резистивный или ламповый нагреватель для обеспечения требуемой температуры подложки. Для обеспечения однородности процесса имеется ряд кинематических особенностей: вращение подложки и мишеней, вращение карусели мишеней, сканирование лазерного луча по поверхности мишени.

В подавляющем большинстве случаев используется импульсное излучение длительностью порядка десятков наносекунд или менее. Импульсный характер лазерной абляции является одной из основных особенностей, обуславливающих некоторые сильные стороны метода PLD, а именно конгруэнтный перенос материала сложного химического состава. Сложность конгруэнтного переноса многокомпонентного материала традиционными PVD методами заключается в наличии разницы парциальных давлений различных атомарных компонент, что приводит к неравномерному разлету материала (тяжелые атомы испаренного вещества вытесняют более легкие) и неоднородности свойств полученной пленки. В методе PLD испаренный материал за короткий (менее 30 нс) промежуток времени нагревается до температур плазмы порядка 10000 градусов, что нивелирует разницу парциальных давлений и приводит к равномерному распределению атомарных компонент по

сечению облака разлета. Импульсный характер обработки приводит к безынерционному процессу роста пленки (скважность осаждения слоев на порядки превышает характерные времена жизни осажденных атомов на поверхности подложки), высокой точности контроля толщины (статистически, за 1 импульс осаждается порядка 0,01 нм пленки), малому термическому влиянию на мишень.

Оптический характер воздействия на материал мишени предоставляет исключительную гибкость в условиях осаждения – возможность использования как вакуумной, так и реакционной газовой среды, возможность как высокого нагрева подложки, так и проведения холодного процесса, а также возможность добавления других методов воздействия для проведения гибридных процессов.

Стоит отметить особую структуру лазерно-индуцированной плазмы (LIP) в процессе PLD, которая не характерна для любых других PVD методов получения тонких пленок. Информация о структуре LIP в PLD получается с помощью метода зондовой диагностики и является предметом современных исследований. Из работ [10 – 12] следует, что LIP неоднородна и можно выделить 4 характерные области, показанные на рис. 2: электронная оболочка (1), быстрые ионы (2), основная ионизированная часть (3) и макрочастицы (4). Характерные скорости ионных компонент в процессе PLD, полученные из времяпролетных кривых, находятся в диапазоне от 10 до 100 км/с.

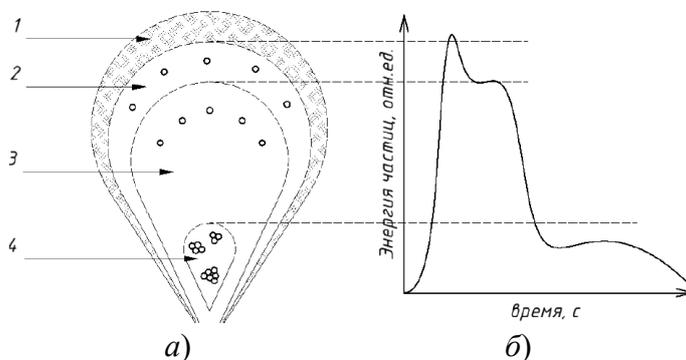


Рис. 2. Структура газо-плазменного облака в методе PLD:  
а – состав газо-плазменного облака; б – времяпролетная характеристика

Fig. 2. The structure of the gas-plasma cloud in the PLD method:  
а – the composition of the gas-plasma cloud; б – TOF characteristics

На кафедре МТ12 «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана метод PLD реализован на основе эксимерного KrF лазерного излучателя длиной волны 248 нм, энергией от 50 до 200 мДж, длительностью импульсов 30 нс, частотой генерации до 20 Гц. Двуступенчатая вакуумная система позволяет обеспечить вакуум не хуже  $10^{-7}$  торр, а также подавать в камеру до 3 видов технологических газов расходом до 150 куб.см/мин. Используются до 6 мишеней размером 25 мм и одна подложка диаметром не более 100 мм. Расстояние между мишенью и подложкой изменяется в пределах от 60 до 130 мм. Температура резистивного нагревателя подложки может устанавливаться до 950 °С в общем случае и до 850 °С в среде O<sub>2</sub>. Очистка подложек может проводиться в модуле плазменно-химической очистки мощностью до 150 Вт при частоте 13,65 МГц в среде N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/Ar.

### Высокотемпературные сверхпроводящие материалы

Как было сказано ранее, получение ВТСП слоев можно считать самым традиционным использованием метода PLD. Высокотемпературными сверхпроводниками называются материалы, проявляющие сверхпроводящие свойства при температурах выше температуры кипения жидкого азота (-196 °С). Ярким представителем ВТСП является сверхпроводник YBCO (оксид иттрия-бария-меди), с критической температурой -180 °С при атмосферном давлении.

Имеется множество перспективных направлений использования ВТСП материалов: сверхчувствительные сенсоры магнитного поля [13], силовые линии электропередачи, быстрые самовосстанавливающиеся токовые ограничители, быстрые электронные схемы на основе эффекта Джозефсона и многие другие.

На кафедре МТ12 проведены исследования по получению высокотемпературных сверхпроводников второго поколения (ВТСП-2). ВТСП-2 представляет собой многослойную ленту, изготовленную на основе R-Ba-Cu-O (RBCO, где R – редкоземельный элемент). Она включает в себя металлическую ленту-подложку, буферные, сверхпроводящий и защитные слои. Буферные слои выполняют

несколько функций: предотвращение диффузию металла от ленты в слой сверхпроводника, согласование кристаллических решеток и коэффициентов теплового расширения, а также создают определенную структуру для эпитаксиального роста ВТСП пленки. В процессе напыления ВТСП слоя необходимо получить определенную структуру пленки и химический состав, в противном случае характеристики такой ленты окажутся на низком уровне. Так, например, при разориентации соседних зерен на величину до 10 градусов, плотность критического тока снижается на порядок величины.

Осаждение слоев ВТСП на кафедре МТ12 осуществлялось на монокристаллическую подложку SrTiO<sub>3</sub> эпитаксиальной полировки с кристаллографической ориентацией <100>, а также на металлическую ленту, с предварительно нанесенными буферными слоями NiW/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/YSZ/CeO<sub>2</sub>. Перед процессом импульсного лазерного осаждения поверхность образцов подготавливалась в модуле плазменно-химической очистки, находящемся в едином вакуумном тракте с модулем PLD. Очистка проводилась в атмосфере 99,9% Ar при давлении  $2 \cdot 10^{-1}$  торр в течение 45...60 минут, при мощности ВЧ генератора 50...75 Вт и частоте 13,65 МГц, после чего подложки без развакуумирования перемещались транспортной системой в модуль импульсного лазерного осаждения. Осаждение пленок проводилось в среде кислорода при давлении  $5 \cdot 10^{-1}$  торр. Температура нагревателя выдерживалась на уровне 850 °С. Плотность энергии лазерного излучения на поверхности мишени составила 2 Дж/см<sup>2</sup>, длина волны лазерного излучения 248 нм, длительность импульса 30 нс, расстояние между мишенью и подложкой равнялось 65 мм.

Элементный анализ мишени и пленки YBCO, полученной на подложке SrTiO<sub>3</sub> эпитаксиальной полировки с кристаллографической ориентацией <100> показал, что сложный химический состав многокомпонентной мишени переносится на подложку в процессе импульсного лазерного осаждения конгруэнтно. Рентгеноструктурный анализ пленки YBCO на металлической ленте, полученных на кафедре МТ12, показал, что пленка YBCO на металлической ленте имеет преимущественно а-ориентацию, а доля с-ориентированных зерен невелика.

### Углеродные структуры

Первые графеновые слои были получены в 1970 году Джоном Грантом и Блэкли, а полноценно изучены в 2004 году Андреем Геймом и Константином Новосёловым, которые получили Нобелевскую премию по физике за 2010 год. Столь высокий интерес к различным структурам углерода обусловлен уникальным разнообразием образуемых структур и множеством необычных свойств, часто уникальных и превосходящих свойства других материалов [14]. На текущий день известно множество различных методов получения структур графена, в том числе массового производства углеродных нанотрубок (например, первой российской «фирмой-единорогом» OCSiAl).

Методом PLD получают графен, углеродные нанотрубки, алмазоподобные структуры. Получаемые методом PLD структуры графена перспективны для суперконденсаторов, фоточувствительных элементов, создания диодов, солнечных элементов.

Отдельный интерес представляет получение алмазоподобных углеродных DLC (diamond-like carbon) покрытий. DLC покрытия получают из обычного пиролитического графита высокой чистоты или высокоориентированного пиролитического HOPG-графита. DLC покрытия представляют собой углеродную матрицу, включающую углеродные  $sp^2$  и алмазные  $sp^3$ -фазы. Наличие алмазных фаз определяет особые свойства DLC покрытий, таких как высокая (до 100 ГПа) твердость, низкие износ и коэффициент трения, высокое удельное сопротивление, химическая инертность и коррозионная стойкость, большой коэффициент теплопроводности, биосовместимость. Низкий коэффициент трения и высокая твердость обусловили использование DLC-пленок в качестве защитных износостойких покрытий для режущего инструмента и оптических поверхностей.

На кафедре МТ-12 «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана методом PLD были получены DLC покрытия с целью упрочнения внешних поверхностей оптических элементов космических летательных аппаратов. Исследования свойств образцов проводились методами рамановской спектроскопии, эллипсометрии и микроиндентирования. Образцы упрочняющих пленок

DLC, полученные нами методом PLD показали возможность значительного (примерно в 2 раза) упрочнения оптической поверхности и превосходство свойств (твердость 26 ГПа, 51 % содержание  $sp^3$ -фазы) над образцами DLC, полученными методом вакуумно-дугового осаждения с сепарацией плазмы (твердость 15 ГПа, 13 % содержание  $sp^3$ -фазы) [15].

### Комплексные структуры на основе висмута

У данного класса материалов наблюдаются одни из наиболее высоких показателей термоэлектрической добротности при комнатном диапазоне температур. Это обуславливает их высокую востребованность на уже существующем рынке термоэлектрических преобразователей от термоэлектрических генераторов до тепловых сенсоров и систем температурной стабилизации. В области термоэлектричества можно выделить две принципиальные технологии изготовления термоэлектрического материала: традиционную объемную и пленочную. Тонкопленочные термоэлементы на основе теллурида висмута используются в радиометрии, микрокалориметрии, в газовых сенсорах, для измерения энергетических характеристик лазерного излучения, тепловых потоков, в MEMS-измерительных микросистемах, в космических аппаратах и др.

Традиционно, термопары пленочных термоэлементов изготавливались из чистых  $n$ -Bi и  $p$ -Sb, коэффициенты Зеебека которых составляют 50...70 мкВ/°C и, как следствие, эффективность которых невысокая. Использование чистых материалов, обладающих невысокой эффективностью термоэлектрического преобразования, обусловлено сложностью получения многокомпонентных тонких пленок PVD методами. На кафедре МТ12 был освоен процесс получения высокоэффективных пленок  $p$ -Bi<sub>0.5</sub>Sb<sub>1.5</sub>Te<sub>3</sub> и  $n$ -Bi<sub>2</sub>Te<sub>2.7</sub>Se<sub>0.3</sub> толщиной от 10 до 1000 нм на подложках Si, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlN и гибких полиимидных подложках методом PLD. Осаждение пленок осуществлялось при температурах подложек 20...400 °C, расстояниях от мишени до подложки 70...130 мм, давлениях  $10^{-7}$ ...1 торр защитного газа (Ar 99,99%) и плотностях энергии лазерного

излучения  $1,0...2,5 \text{ Дж/см}^2$ . На полиимидных подложках полученные нами пленки р- $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  и n- $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$  обладают высокими значениями коэффициента Зеебека 220 и 200 мкВ/К, что говорит об их высоком качестве. Данная технология легла в основу изготовления ряда сенсоров широкодиапазонных (от 350 нм до 10 мкм) измерителей оптического излучения мощностью от 100 мкВт до 15 кВт с характерной обнаружительной способностью наиболее чувствительных образцов порядка  $10^8 \text{ см}\cdot\text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}^{-1}$  [16 – 18].

### Заключение

Метод PLD обладает уникальным сочетанием свойств, обуславливающих высокую универсальность и широчайшие возможности для проведения исследований. Ключевой особенностью метода PLD является мощное (более  $1 \text{ МВт/см}^2$ ) воздействие на мишень короткими (менее 30 нс) импульсами. В МГТУ им. Н.Э. Баумана метод PLD видит свое развитие в следующих направлениях:

1. Развитие в области высокотемпературных сверхпроводников: метод PLD может применяться для создания тонкопленочных высокотемпературных сверхпроводников (HTS), что может ускорить развитие квантовой вычислительной техники и сверхпроводящих силовых линий.

2. PLD перспективен для получения передовых углеродных структур, таких как графен и алмазоподобные покрытия (DLC), что откроет новые горизонты в микроэлектронике, энергетике и медицине.

3. PLD может способствовать разработке высокоэффективных тонкопленочных термоэлектрических материалов, что будет востребовано в системах энергосбережения и температурной стабилизации.

4. В перспективе метод PLD будет использоваться в производстве топологических изоляторов и других инновационных материалов, что откроет новые возможности в области фотодетектирования, сенсорных технологий и квантовой микроэлектроники.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Askar'Yan G.A., Moroz E.M. Pressure on evaporation of matter in a radiation beam // Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics. 1963. Vol. 16. P. 1638.
2. Honig R.E., Woolston J.R. Laser-induced emission of electrons, ions, and neutral atoms from solid surfaces // Appl. Phys. Lett. 1963. Vol. 2, № 7. P. 138–139.
3. Lichtman D., Ready J.F. Laser Beam Induced Electron Emission // Phys. Rev. Lett. American Physical Society, 1963. Vol. 10, № 8. P. 342–345.
4. Ready J.F. Development of plume of material vaporized by giant-pulse laser // Appl. Phys. Lett. American Institute of Physics, 1963. Vol. 3, № 1. P. 11–13.
5. Smith H.M., Turner A.F. Vacuum Deposited Thin Films Using a Ruby Laser // Appl. Opt. 1965. Vol. 4, № 1. P. 147.
6. Аристов В. Фокусирующие свойства профилированных многослойных рентгеновских зеркал // Письма в ЖЭТФ. № 4. 1986. С. 207–209.
7. Гаронов S. et al. Long-wave X-ray radiation mirrors // Optics communications. Elsevier, 1981. Vol. 38, № 1. P. 7–9.
8. Бояков В.М. Напыление пленок химических элементов с помощью лазера на неодимовом стекле // Квантовая электроника. № 7. 1978. С. 1582–1584.
9. Dijkkamp D. Preparation of Y-Ba-Cu oxide superconductor thin films using pulsed laser evaporation from high Tc bulk material // Appl. Phys. Lett. 1987. Vol. 51, № 8. P. 619–621.
10. Хайдуков Е. Зондовые исследования лазерного эрозионного факела при абляции кремния в вакууме // Журнал технической физики. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический..., № 4. 2010. С. 59–63.
11. Irimiciuc S.A. Langmuir Probe Technique for Plasma Characterization during Pulsed Laser Deposition Process // Coatings. 2021. Vol. 11, № 7. P. 762.
12. Hansen T.N., Schou J., Lunney J.G. Langmuir probe study of plasma expansion in pulsed laser ablation // Applied Physics A: Materials Science & Processing. 1999. Vol. 69, № 7. P. S601–S604.
13. Drung D. Highly sensitive and easy-to-use SQUID sensors // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. IEEE, 2007. Vol. 17, № 2. P. 699–704.
14. Шупенев А. et al. Лазерная обработка поверхностей пластин теплообменников DLC-покрытиями // Электрометаллургия. 2021. № 5. С. 23–30.
15. Григорьянц А.Г., Мисюров А.И., Башков В.М., Шупенев А.Е., Миронов Ю.М. Анализ поверхности тонких пленок  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  осажденных методом импульсной лазерной абляции // Наука и образование. 2011. № 10.

17. Shupenev A. Bismuth-Telluride-Based Radiation Thermopiles Prepared by Pulsed Laser Deposition // Semiconductors. 2019. Vol. 53, № 6. P. 747–751.

18. Shupenev A.E., Korshunov I.S., Grigoryants A.G. On the Pulsed-Laser Deposition of Bismuth-Telluride Thin Films on Polyimide Substrates // Semiconductors. 2020. Vol. 54, № 3. P. 378–382.

## REFERENCES

1. Askar'Yan G.A., Moroz E.M. Pressure on evaporation of matter in a radiation beam // Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics. 1963. Vol. 16. P. 1638.

2. Honig R.E., Woolston J.R. Laser-induced emission of electrons, ions, and neutral atoms from solid surfaces // Appl. Phys. Lett. 1963. Vol. 2. № 7. P. 138–139.

3. Lichtman D., Ready J.F. Laser Beam Induced Electron Emission // Phys. Rev. Lett. American Physical Society, 1963. Vol. 10. № 8. P. 342–345.

4. Ready J.F. Development of plume of material vaporized by giant-pulse laser // Appl. Phys. Lett. American Institute of Physics, 1963. Vol. 3. № 1. P. 11–13.

5. Smith H.M., Turner A.F. Vacuum Deposited Thin Films Using a Ruby Laser // Appl. Opt. 1965. Vol. 4. № 1. P. 147.

6. Aristov V. Focusing properties of shaped multi-layer X-ray mirrors // Letters to ZhETF. 1986. Vol. 44. no. 4. pp. 207–209.

7. Gaponov S. et al. Long-wave X-ray radiation mirrors // Optics communications. Elsevier, 1981. Vol. 38. № 1. P. 7–9.

8. Boyakov V.M. Application of polymers using a laser on a neodymium screen // Quantum Electronics. 1978, Vol. 5. no. 7. pp. 1582–1584.

9. Dijkkamp D. Preparation of Y-Ba-Cu oxide superconductor thin films using pulsed laser evaporation from high Tc bulk material // Appl. Phys. Lett. 1987. Vol. 51, № 8. P. 619–621.

10. Khaydukov E. Probe studies of laser erosion plume arising at silicon ablation in vacuum. Technical Physics. Federal State Budgetary Institution of Science of Physico-Technical. 2010, vol. 80. no. 4. pp. 59–63.

11. Irimiciuc S.A. Langmuir Probe Technique for Plasma Characterization during Pulsed Laser Deposition Process // Coatings. 2021. Vol. 11, № 7. P. 762.

12. Hansen T.N., Schou J., Lunney J.G. Langmuir probe study of plasma expansion in pulsed laser ablation // Applied Physics A: Materials Science & Processing. 1999. Vol. 69, № 7. P. S601–S604.

13. Drung D. Highly sensitive and easy-to-use SQUID sensors // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. IEEE, 2007. Vol. 17. № 2. P. 699–704.

14. Shupenev A. et al. Laser surface treatment of heat exchanger plates with DLC coatings // Electrometallurgy. 2021, no. 5, pp. 23–30.

15. Grigoryants A.G., Misyurov A.I., Bashkov V.M., Shupenev A.E., Mironov Yu.M. Surface analysis of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> thin films deposited by pulsed laser ablation // Science and Education. 2011. no. 10.

16. Shupenev A. Bismuth-Telluride-Based Radiation Thermopiles Prepared by Pulsed Laser Deposition // Semiconductors. 2019. Vol. 53, № 6. P. 747–751.

17. Shupenev A.E., Korshunov I.S., Grigoryants A.G. On the Pulsed-Laser Deposition of Bismuth-Telluride Thin Films on Polyimide Substrates // Semiconductors. 2020. Vol. 54, № 3. P. 378–382.

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

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

Статья поступила в редакцию 05.12.2024; одобрена после рецензирования 21.02.2025; принята к публикации 10.03.2025.

The article was submitted 05.12.2024; approved after reviewing 21.02.2025; accepted for publication 10.03.2025.

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №5 (167). С.22-29.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №5 (167). P. 22-29.

Научная статья  
УДК 621.373.826  
doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-22-29

## Определение энергетических характеристик сопутствующего излучения при лазерных технологических процессах обработки нержавеющей стали 12Х18Н10Т

Ольга Алексеевна Крючина<sup>1,2</sup> аспирант  
<sup>1</sup> ООО НТО «ИРЭ-Полюс», РФ, Фрязино, МО

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, РФ, Москва

<sup>1,2</sup> oKryuchina@ntoire-polus.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7592-0790>

**Аннотация.** Приведены результаты исследования сопутствующего излучения, возникающего при лазерных технологических процессах обработки материалов, определены энергетические характеристики в различных диапазонах длин волн. Данный вопрос является актуальным как в технологической сфере, так и в сферах медицины и охраны труда. Теоретическое и экспериментальное определение спектров сопутствующего излучения позволит оценить наличие конкретных длин волн, которые могут дестабилизировать процесс лазерной обработки, в частности, нержавеющей стали 12Х18Н10Т, как одной из наиболее востребованных в промышленном применении. Оценка зависимости спектра сопутствующего излучения от химического состава обрабатываемого материала проводилась с использованием специализированного программного обеспечения. Теоретически было установлено, что спектры эмиссии нержавеющей стали 12Х18Н10Т находятся в УФ-А, фиолетовом и зелёном диапазонах длин волн. В экспериментальной работе для определения спектрального состава сопутствующего излучения использовался автоматизированный монохроматор-спектрограф модели М266 (фирма Solar laser systems). Полученные результаты спектрального анализа подтверждают теоретические данные и дополняют их, что связано с наличием интенсивных тепловых эффектов, которые программное обеспечение для расчётов не учитывает. Результаты исследований свидетельствуют о наличии в составе сопутствующего излучения при обработке нержавеющей стали 12Х18Н10Т по технологии лазерной маркировки линий спектра в УФ-диапазоне длин волн. Сравнение значений, полученных в теоретической и экспериментальной частях исследования, показало необходимость совмещать эти два способа исследования сопутствующего излучения, поскольку именно комбинация теоретических и экспериментальных данных позволяет нивелировать недостатки каждого метода и получить наиболее полную спектральную картину сопутствующего излучения. Зафиксированные результаты исследований, в частности наличие УФ-линий спектра, обуславливают необходимость проведения измерений энергетических характеристик сопутствующего излучения в УФ-диапазоне не только в процессе лазерной маркировки, но и во время других лазерных технологических процессов, для определения конкретных уровней с целью оценки потенциальной опасности для персонала.

**Ключевые слова:** лазерная технологическая обработка, сопутствующее излучение, ультрафиолетовое излучение, конструкционная высоколегированная коррозионноустойчивая сталь 12Х18Н10Т, спектры сопутствующего излучения

**Для цитирования:** Крючина О.А. Определение энергетических характеристик сопутствующего излучения при лазерных технологических процессах обработки нержавеющей стали 12Х18Н10Т // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 5 (167). С. 22–29. doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-22-29

## Characterization of accompanying radiation under laser processing of stainless steel 12Cr18Ni10Ti

Olga A. Kryuchina<sup>1,2</sup> PhD student

<sup>1</sup> IRE-Polyus LLC, Fryazino, Moscow Region, Russian Federation

<sup>2</sup> Moscow State Technical University named after Bauman, Russian Federation, Moscow

<sup>1,2</sup> oKryuchina@ntoire-polus.ru

**Abstract.** Research results of accompanying radiation produced by laser processing of material handling are presented, and energy characteristics in various wavelength ranges are determined. This issue is relevant both in the technological sphere and in the fields of medicine and labor protection. The theoretical and experimental determination of the accompanying radiation spectra will make it possible to assess the presence of specific wavelengths that can destabilize laser processing, in particular, stainless steel 12Cr18Ni10Ti, as one of the most in demand in industrial applications. The dependence of accompanying

radiation spectrum on the chemical composition of the handled material was assessed using specialized software. By theory, it was found that the emission spectra of 12Cr18Ni10Ti stainless steel are in the UV, violet and green wavelength ranges. In the experimental work, an automated monochromator spectrograph model M266 (Solar laser systems) was used to determine the spectral composition of the accompanying radiation. The obtained spectral analysis results confirm the theoretical data and give supplement information, which is due to the presence of intense thermal effects that software does not take into account. The research results indicate the presence of accompanying radiation in the processing of 12Cr18Ni10Ti stainless steel using the technology of laser marking of spectral lines in the UV wavelength range. A comparison of the values obtained in the theoretical and experimental parts of the study showed the need to combine these two methods of studying accompanying radiation, since it is the combination of theoretical and experimental data that allows levelling disadvantages of each method and obtain the most complete spectral picture of accompanying radiation. The recorded research results, in particular the presence of UV spectral lines, necessitate measurements of the energy characteristics of accompanying radiation in the UV range, not only when laser marking, but also under various laser processing, determining specific levels in order for potential hazard rating to personnel.

**Keywords:** laser processing, accompanying radiation, ultraviolet radiation, structural high-alloy corrosion-resistant steel 12Cr18Ni10Ti, accompanying radiation spectra

**For citation:** Kryucina O.A. Characterization of accompanying radiation under laser processing of stainless steel 12Cr18Ni10Ti / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 5 (167). P. 22–29. doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-22-29

## Введение

Технологические процессы лазерной обработки материалов всегда сопровождаются отражённым и рассеянным лазерным излучением, и сопутствующим излучением от пароплазменного факела, раскалённого материала, нагретых вырывающихся частиц и др. Сопутствующее излучение можно охарактеризовать величиной энергетических характеристик, таких как яркость, освещённость и энергетическая освещённость от ультрафиолетового (УФ) и инфракрасного (ИК) излучения, а также линиями спектра, которые в зависимости от химического состава обрабатываемого материала будут отличаться по диапазонам длин волн [1].

Лазерные технологии применяются для решения разнообразных производственных задач для обработки изделий из разных материалов. Одной из самых производимых и используемых в различных отраслях промышленности, в том числе для изготовления деталей машин и аппаратов продовольственного и торгового машиностроения, товаров народного потребления и т.д., является конструкционная высоколегированная коррозионностойкая сталь 12X18H10T. Хорошая сопротивляемость атмосферной и межкристаллитной коррозии в совокупности с жаростойкостью, стабильностью, прочностью, легкостью обработки, возможностью использования в широком диапазоне температур сделали эту марку стали

возможной для применения в конструкциях химического и атомного энергетического машиностроения, сосудов и резервуаров, работающих в агрессивных средах, корпусов и трубной обвязки химических реакторных колонн, и других деталей, к которым предъявляются повышенные требования. Эти факты обуславливают выбор именно этой стали, как наиболее приоритетной, для проведения исследований [2].

Исследование сопутствующего излучения является актуальной задачей как для технологов, с целью определения конкретных факторов, вносящих дестабилизацию в технологический процесс, так для медиков, с целью установления вероятности неблагоприятного воздействия на человека, так и для специалистов по охране труда, с целью определения необходимости предусматривать дополнительные средства защиты для персонала, работающего на лазерном технологическом оборудовании [3].

В настоящей публикации приведены результаты теоретического и экспериментального исследования спектрального состава сопутствующего излучения при обработке выбранной стали 12X18H10T.

## Теоретическая часть

Первым этапом исследования является теоретическое определение спектров нержавеющей стали 12X18H10T для оценки

зависимости спектра сопутствующего излучения от химического состава обрабатываемого материала, с использованием специализированного программного обеспечения (ПО) [4]. В интерфейсе можно указать состав плазмы и приблизительные начальные оценки параметров наблюдения, таких как температура и плотность электронов, диапазон длин волн и спектральное разрешение. Первоначальное моделирование Саха-Больцмана выполняется на стороне сервера, и все соответствующие данные, такие как спектральные линии и данные

об уровнях энергии, передаются на компьютер пользователя, который строит график моделируемого спектра. Интерфейс для спектроскопии лазерно-индуцированного пробоя позволяет строить теоретические спектры практически любой комбинации химических элементов, в зависимости от электронной температуры  $T_e$  (эВ) [5].

Для расчёта в программе выбрана температура испарения железа (Fe), как базового химического элемента стали 12X18H10T (табл. 1) [6].

## 1. Химический состав нержавеющей стали 12X18H10T

### 1. Chemical composition of stainless steel 12Cr18Ni10Ti

Элемент	Fe	Cr	Ni	Mn	Ti	Si	C	P	S
%	~70	17...19	9...11	до 2	5 · e...0,8	до 0,8	до 0,12	до 0,035	до 0,02

Спектр эмиссии нержавеющей стали 12X18H10T при достижении температуры испарения порядка 3135,15 К (2862 °С) или 0,27 эВ показан на рис. 1. Слева от линий спектров указаны химические элементы и уровни излучения, красными рамками

выделены наиболее спектрально значимые элементы, зафиксированные на графике. При температуре испарения наиболее интенсивно испускают излучение атомы Fe I, Mn I, Cr I, Ni I, входящие в хим. состав материала (табл. 1).

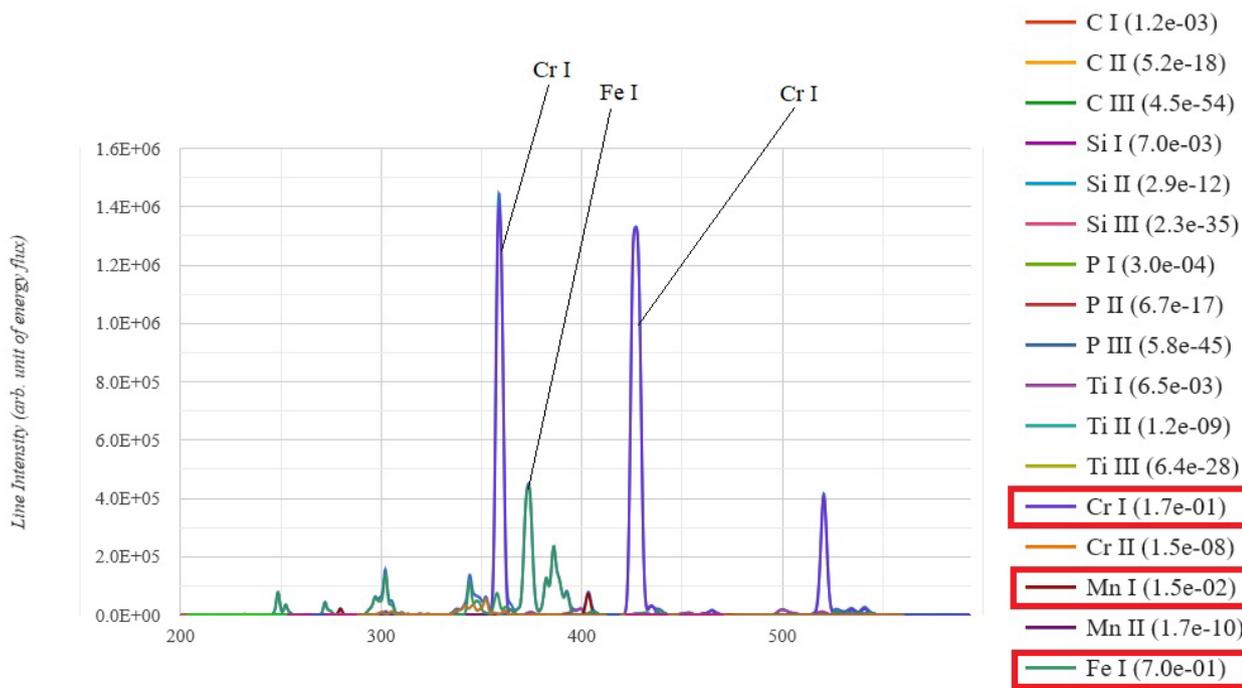


Рис. 1. Спектр эмиссии нержавеющей стали 12X18H10T при достижении температуры испарения

Fig. 1. Emission spectrum of stainless steel 12Cr18Ni10Ti upon reaching the evaporation temperature

Основные значимые спектральные линии излучения Fe I получены на длинах волн 373,3 нм (УФ-А), 386,1 нм (видимый спектр в фиолетовой области) Cr I на 358,3 нм (УФ-А), 426,5 нм (видимый спектр в фиолетовой области), 520,3 нм (видимый спектр в зелёной области).

Полученные теоретические результаты говорят о том, что химический состав исследуемой стали обуславливает появление в составе сопутствующего излучения УФ- линий спектра. Для подтверждения теоретических данных будет проведён практический эксперимент по фиксации спектральной картины в процессе лазерной обработки стали 12X18H10T.

### Экспериментальное исследование

В экспериментальной работе для определения спектрального состава сопутствующего излучения использовался автоматизированный монохроматор-спектрограф модели M266 (фирма Solar laser systems) (рис. 2.) [7]



Рис. 2. Монохроматор/спектрограф M266

Fig. 2. Monochromator/spectrograph M266

Управление M266 полностью автоматизировано. Сканирование спектра по длинам волн, смена дифракционных решёток, смена фильтров разделения порядков, регулировка ширины щелей и выбор выходного порта производится автоматически и управляется с помощью интеллектуального и простого в использовании ПО. Автоматический затвор предназначен для автоматического вычитания фона, а также для защиты детектора от излишней засветки источником излучения.

В качестве оптической схемы в M266 используется оригинальная модифицированная схема Черни-Тернера (рис. 3) с одним

входом и двумя выходами. [8] Оптическая схема монохроматора/спектрографа M266 представлена на рис. 4.

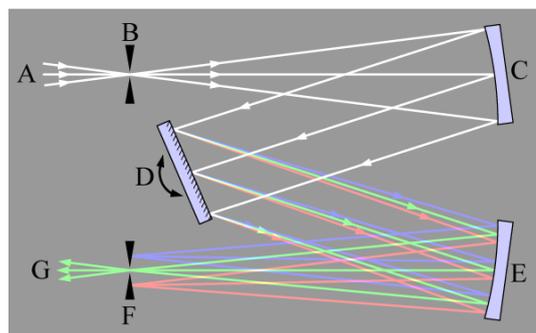


Рис. 3. Схема Черни-Тёрнера

Fig. 3. Cherny-Turner scheme

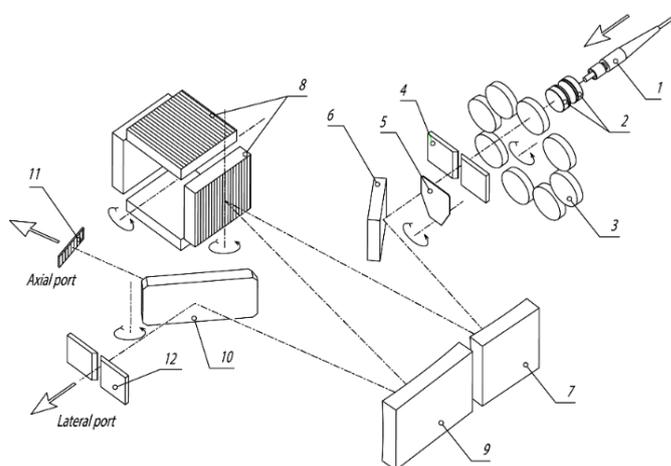


Рис. 4. Оптическая схема монохроматора/спектрографа M266:

1 – оптическое волокно; 2 – конденсор; 3 – турель фильтров; 4 – входная щель; 5 – затвор; 6 – поворотное зеркало; 7 – коллиматорное зеркало; 8 – дифракционные решётки; 9 – камерное зеркало; 10 – поворотное зеркало; 11 – осевой порт; 12 – боковой порт

Fig.4. Optical scheme of the M266 monochromator/spectrograph: 1 – optical fiber; 2 – condenser; 3 – filter turret; 4 – inlet slit; 5 – shutter; 6 – rotary mirror; 7 – collimator mirror; 8 – diffraction gratings; 9 – chamber mirror; 10 – rotary mirror; 11 – axial port; 12 – side port

Входная щель 4, установленная в фокальной плоскости коллиматорного зеркала 7, освещается исследуемым излучением. Излучение, прошедшее входную щель 4 и поворотное зеркало 6, направляется коллиматорным зеркалом 7 на дифракционную решётку 8 в виде параллельных пучков лучей от каждой точки входной щели. Дифракционная

решётка 8 отклоняет лучи на различные углы в зависимости от длины волны излучения, превращая параллельный пучок от каждой точки входной щели в совокупность монохроматических параллельных пучков. Камерное зеркало 9 создаёт на своей фокальной поверхности 11 совокупность монохроматических изображений входной щели, формирующую спектр. [9]

Изменение длины волны осуществляется поворотом дифракционной решётки вокруг вертикальной оси, проходящей через центр решётки. Смена спектральных диапазонов (дифракционных решёток) осуществляется поворотом турели решёток вокруг горизонтальной оси, проходящей через центр турели.

Плоское зеркало 10 поворачивается вокруг вертикальной оси; в нерабочем положении оно обеспечивает беспрепятственное прохождение излучения на осевой выходной порт 11, а в рабочем – направляет спектр на боковой выходной порт 12. Каждый из выходных портов может содержать либо выходную щель, либо детектор.

Монохроматор снабжён турелью фильтров разделения порядков 3, ахроматическим осветителем 2 и оптическим волокном 1. Все перечисленные элементы легко снимаются и вновь устанавливаются в прибор.

Измерения на монохроматоре-спектрографе проводились по схеме, показанной на рис. 5.

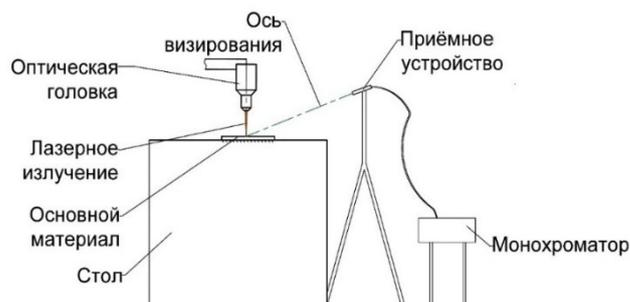
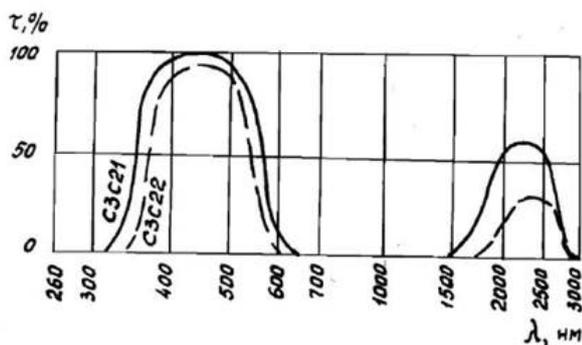


Рис. 5. Схема измерений

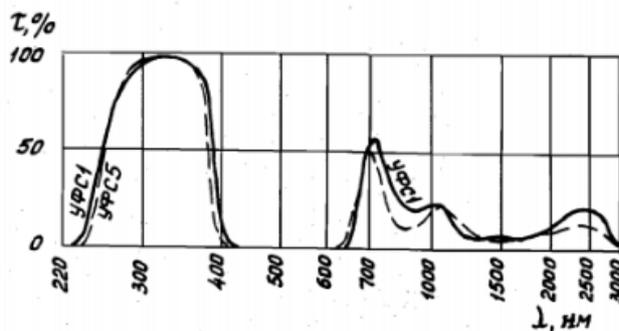
Fig. 5. Measurement scheme

Приёмное устройство монохроматора-спектрографа размещалось на штативе на расстоянии  $\approx 300$  мм от зоны обработки, блок управления прибором размещался на тележке в непосредственной близости от лазерной установки, данные с прибора выводились на персональный компьютер в виде графиков спектров в режиме реального времени. Спектры пропускания снимались в диапазоне 300...900 нм с шагом сканирования 2 нм.

Измерения проводились в два этапа: на первом этапе использовался светофильтр СЗС-22 (рис. 6, а) (в работе выделялись участки спектра в области от 420 до 600 нм), на втором этапе использовался светофильтр УФС-1 (рис.6, б) (выделяет участки спектра в области от 240 до 420 нм и от 600 нм). [10]



а)



б)

Рис. 6. Графики зависимости коэффициентов пропускания светофильтров от длины волны: а – светофильтр СЗС-22; б – светофильтр УФС-1

Fig. 6. Graphs of the dependence of the transmission coefficients of light filters on the wavelength: а – the SZS-22 light filter; б – the UVS1 light filter.

Спектральный анализ проводился непосредственно в процессе обработки излучением волоконного лазера с длиной волны 1070 нм по технологии лазерной маркировки. Обработка проводилась на мощности 150 Вт, что позволяло получить факел необходимого размера и не расплавлять металл до разбрызгивания.

Полученные по результатам исследований спектры сопутствующего излучения при технологическом процессе лазерной маркировки нержавеющей стали 12X18H10T

представлены на рис. 7. По оси ординат указано число отсчетов фотоумножителя, которое пропорционально относительной интенсивности, а по оси абсцисс длина волны излучения. Широта спектральных линий обусловлена шумами. Графики спектров имеют характерный спад интенсивности в областях 400 нм и 600 нм. Это связано с тем, что при измерениях использовались светофильтры, которые имеют переходные зоны именно в этих местах.

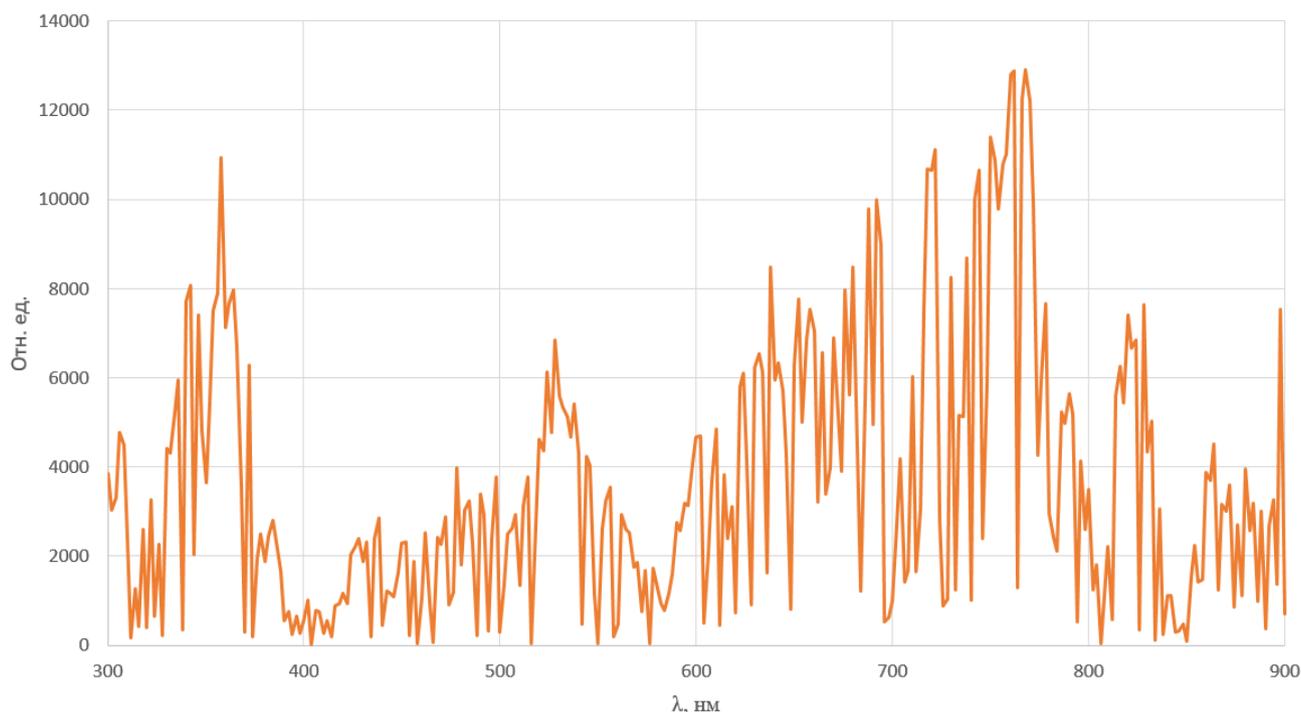


Рис. 7. Линии спектра отражённого излучения при технологическом процессе лазерной маркировки нержавеющей стали 12X18H10T

Fig. 7. Lines of the reflected radiation spectrum during the technological process of laser marking of stainless steel 12Cr18Ni10Ti

На графиках спектра (рис. 7) наблюдается большое количество пиков и широких спектральных линий. Наибольшую интенсивность имеют линии в УФ-А области спектра ( $\approx 342, 358, 363$  нм), в зелёном ( $\approx 528$  нм) и оранжевом диапазонах ( $\approx 621$  нм), и самый активный спектр в красном ( $\approx 633, 640, 694, 724$  нм) и ближнем ИК-диапазоне ( $\approx 744, 750, 762, 768$  нм).

Сравнение пиков спектральных линий, полученных теоретическим и эксперимен-

тальным методами представлено в таблице 2. В диапазонах УФ-А и зелёной области спектра зафиксированы совпадения пиков по длинам волн, точные и в пределах погрешности, что свидетельствует о подтверждении теоретической модели экспериментальными результатами. В области спектра от 380 до 440 нм (фиолетовый) теоретическая модель не подтверждена, что связано с использованием светофильтра.

## 2. Сводная таблица пиковых значений относительной интенсивности спектров

### 2. Summary table of peak values of the relative intensity of the spectra

Диапазон длин волн, нм	300...315	315...380	380...440	440...485	485...500	500...565	565...590	590...625	625...740	740...900
	5	80	40	85	00	65	90	25	40	00
	УФ-В	УФ-А	фиолетовый	синий	голубой	зеленый	желтый	оранжевый	красный	ИК
Теория		358,3, 373,3	386,1 426,5			520,3				
Эксперимент		≈ 342, 358, 363				≈ 528		≈ 621	≈ 633, 639, 694, 724	≈ 744, 750, 762, 768

Измерения проводились не в лаборатории, а в условиях цеха, поэтому на результаты экспериментальных исследований оказывали влияние окружающие световые факторы. Пики, полученные на практике в диапазоне от 590 до 900 нм связаны с наличием интенсивных тепловых эффектов, которые ПО для расчётов не учитывает, соответственно в теоретических данных их нет.

Сравнение значений, полученных в теоретической и экспериментальной частях исследования, показало необходимость совмещать эти два способа исследования сопутствующего излучения, поскольку именно комбинация теоретических и экспериментальных данных позволяет нивелировать недостатки каждого метода и получить наиболее полную спектральную картину сопутствующего излучения.

### Выводы

1. Теоретически установлено, что спектры эмиссии нержавеющей стали 12X18H10T находятся в УФ-А, фиолетовом и зелёном диапазонах длин волн.

2. Полученные результаты спектрального анализа подтверждают теоретические данные и дополняют их, что связано с наличием интенсивных тепловых эффектов, которые ПО для расчётов не учитывает.

3. Результаты исследований свидетельствуют о наличии в составе сопутствующего излучения при обработке

нержавеющей стали 12X18H10T по технологии лазерной маркировки линий спектра в УФ-диапазоне длин волн.

### Заключение

Зафиксированные результаты исследований, в частности наличие УФ-линий спектра, обуславливают необходимость проведения измерений энергетических характеристик сопутствующего излучения в УФ-диапазоне не только в процессе лазерной маркировки, но и во время других лазерных технологических процессов, для определения конкретных уровней с целью оценки потенциальной опасности для персонала.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Научно-практическая** конференция рабочей группы №3 технологической платформы «Фотоника-2023» «Лазерная макрообработка промышленных материалов и аддитивные технологии». Доклад О.А. Крючина «Измерение энергетических характеристик отражённого излучения при лазерных технологических процессах». URL:<https://www.youtube.com/watch?v=nbDFQt3vaTw> (дата обращения 29.09.2024).

2. **Нержавеющая** сталь 12X18H10T. URL:<https://td-mc.ru/material/nerzhaveyushchaya-stal-12h18n10t> (дата обращения 29.09.2024).

3. **Толкачёва А.В., Крючина О.А., Садовников И.Э.** Лазерная безопасность. Решение есть! Новый стандарт. Передовые концепции. // Лазер-Информ. 2024. №4 (763). С. 6–9.

4. **National** Institute of standards and technology. URL: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/LIBS/lib-form.html> (дата обращения 29.09.2024).

5. **LIBS** Input Form. URL: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/Html/libshelp.html> (дата обращения 29.09.2024).

6. **Марочник** стали и сплавов. URL: <https://www.splav-kharkov.com/main.php> (дата обращения 29.09.2024).

7. **Автоматизированный** монохроматор-спектрограф M266. URL: <https://solar-laser.com/devices/automated-monochromator-spectrograph-m266/?ysclid=lwrfrh5lep395822790> (дата обращения 29.09.2024).

8. **M266** монохроматор-спектрограф. Руководство по эксплуатации. Минск: Solar Laser System, 2017. 32 с.

9. **Светофильтры** из цветного стекла. URL: <https://oltech.ru/catalog/svetofiltry-iz-tsvetnogo-stekla/> (дата обращения 29.09.2024).

## REFERENCES

1. Scientific and practical conference of the working group No. 3 of the Photonics-2023 technological platform "Laser macroprocessing of industrial materials and additive technologies". O.A. Kryuchin's report "Measuring the energy characteristics of reflected radiation in laser technological processes". URL: [\[tube.com/watch?v=nbDFQt3vaTw\]\(https://www.youtube.com/watch?v=nbDFQt3vaTw\) \(date of access: 29.09.2024\).](https://www.you-</a></p></div><div data-bbox=)

2. Stainless steel 12Cr18Ni10Ti. URL: <https://tdmc.ru/material/nerzhaveyushchaya-stal-12h18n10t> (date of access: 29.09.2024).

3. A.V. Tolkacheva, O.A. Kryuchina, I.E. Sadovnikov. Laser safety. There is a solution! New standard. Advanced concepts. // Laser-Inform. 2024, no. 4 (763), pp. 6–9.

4. National Institute of Standards and technology. URL: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/LIBS/lib-form.html> (date of access: 29.09.2024).

5. LIBS Input Form. URL: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/Html/libshelp.html> (date of access: 29.09.2024).

6. Grades of steel and alloys. URL: <https://www.splav-kharkov.com/main.php> (date of access: 29.09.2024).

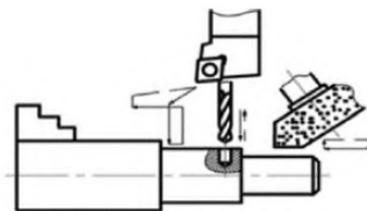
7. Automated monochromator-spectrograph M266. URL: <https://solar-laser.com/devices/automated-monochromator-spectrograph-m266/?ysclid=lwrfrh5lep395822790> (date of access: 29.09.2024).

8. M266 monochromator spectrograph. User manual. Minsk: Solar Laser System, 2017, 32 p.

9. Light filters made of colored glass. URL: <https://oltech.ru/catalog/svetofiltry-iz-tsvetnogo-stekla/> (date of access: 29.09.2024).

Статья поступила в редакцию 24.10.2024; одобрена после рецензирования 21.03.2025; принята к публикации 01.04.2025.

The article was submitted 24.10.2024; approved after reviewing 21.03.2025; accepted for publication 01.04.2025.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №5 (167). С.30-41.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №5 (167). P.30-41.

Научная статья

УДК 621.91.01

doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-30-41

## Исследование обрабатываемости при фрезеровании сплава инконель 625, полученного по аддитивной технологии EBAM

Артём Сергеевич Бабаев<sup>1</sup>, к.т.н.

Виктор Николаевич Козлов<sup>2</sup>, к.т.н.

Валерия Алексеевна Овчаренко<sup>3</sup>, м.н.с.

Артём Романович Семёнов<sup>4</sup>, м.н.с.

Иван Алексеевич Бельчиков<sup>5</sup>, м.н.с.

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>1</sup> a.s.babaev@mail.tsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2334-1679>

<sup>2</sup> kozlov-viktor@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9351-5713>

<sup>3</sup> vy.gornova@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-4797-5604>

<sup>4</sup> artems2102@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8663-4877>

<sup>5</sup> ivan70422@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-5217-9409>

**Аннотация.** Рассмотрены особенности фрезерования труднообрабатываемого жаропрочного сплава инконель 625 (аналог ХН75МБТЮ). Образец был получен по аддитивной технологии EBAM с использованием электронно-лучевой установки. С использованием высокоточного аналитического оборудования проведены исследования микроструктуры и физико-механических свойств на образцах, вырезанных вдоль и поперёк направления подачи при синтезе. Измерения сил резания, возникающих при фрезеровании на различных режимах, выполнено с использованием токарного динамометр Kistler. Даны пояснения по схемам измерения сил резания и их направлению в зависимости от условий контакта фрезы и заготовки. Для фрезерования были использованы твёрдосплавные концевые фрезы диаметром 8 и 12 мм без покрытия. В ходе измерения составляющих сил резания было установлено, что увеличение подачи в диапазоне 25...200 мм/мин при фрезеровании приводит к линейному росту сил резания. При этом наблюдается стабильная тенденция превышения сил резания при фрезеровании вдоль направления подачи при синтезе в сравнении с аналогичными условиями. В случае фрезерования поперёк направления подачи при синтезе образца установлено, что удельная сила резания на лимитирующих режимах достигает значений 428 Н/мм<sup>2</sup>. Анализ результатов исследования позволил разработать технологические рекомендации по назначению параметров режущего инструмента и установлению лимитирующих режимов фрезерования.

**Ключевые слова:** фрезерование, инконель, силы резания, износ

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №23-79-10166, <https://rscf.ru/en/project/23-79-10166>

**Для цитирования:** Бабаев А.С., Козлов В.Н., Овчаренко В.А., Семёнов А.Р., Бельчиков И.А. Исследование обрабатываемости при фрезеровании сплава инконель 625, полученного по аддитивной технологии EBAM // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 5 (167). С. 30–41. doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-30-41

## Processing characteristics study for the alloy obtained through additive technology EBAM (inconel 625) under milling

Artyom S. Babaev<sup>1</sup>, PhD. Eng.

Viktor N. Kozlov<sup>2</sup>, PhD. Eng.

Valeria A. Ovcharenko<sup>3</sup>, JRF.

Artem R. Semenov<sup>4</sup>, JRF.

Ivan A. Belchikov<sup>5</sup>, JRF.

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>1</sup> a.s.babaev@mail.tsu.ru

<sup>2</sup> kozlov-viktor@bk.ru

<sup>3</sup> vy.gornova@yandex.ru

<sup>4</sup> artems2102@yandex.ru

<sup>5</sup> ivan70422@gmail.com

**Abstract.** The features of milling of the difficult-to-process heat-resistant inconel 625 (analog of CrNi75MoNbTiAl) are viewed. The sample was obtained using the EBAM additive technology using an electron beam installation. By means high-precision analytical equipment, microstructure and physico-mechanical properties were studied on samples cut far and wide of feed path under synthesis. Acting cutting forces were measured under milling in various modes using a Kistler dynamometric turning appliance. The schemes for measuring cutting forces and their direction, depending on the contact conditions of the milling cutter and stock material were explained. Carbide end mills uncoated with diameters of 8 and 12 mm were used for milling. When measuring the cutting forces components, it was found that an increase in feed in the range of 25...200 mm/min during milling leads to a linear increase in cutting forces. At the same time, there is a stable tendency to exceed cutting forces when milling along the feed direction under synthesis in comparison with similar conditions. In the case of milling against the feed direction under sample synthesis, it was found that the specific cutting force in the limiting modes reaches values of 428 N/mm<sup>2</sup>. The analysis of the research results made it possible to develop technological recommendations on the assignment of cutting tool parameters and fixing limiting milling modes.

**Keywords:** milling, inconel, cutting forces, wear

**Acknowledgements:** the work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 23-79-10166, <https://rscf.ru/en/project/23-79-10166>

**For citation:** Babaev A.S., Kozlov V.N., Ovcharenko V.A., Semenov A.R., Belchikov I.A. Processing characteristics study for the alloy obtained through additive technology EBAM (inconel 625) under milling / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 5 (167). P. 30–41. doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-30-41

### Введение

Непрерывное развитие инновационных технологий аддитивного производства заготовок из широкой гаммы металлов и сплавов формирует задачи, связанные с получением полнофункциональных и работоспособных изделий. Наиболее востребованы аддитивные технологии при получении заготовок, а также при ремонте изношенных поверхностей из дорогостоящих и труднообрабатываемых материалов, так как стало возможным обеспечить форму близкую к готовому изделию, тем самым снижая трудоёмкость и стоимость готового изделия за счёт минимизации припусков на обработку [1].

К числу труднообрабатываемых конструкционных материалов относится группа никель-хром-молибденовых сплавов, которые применяются в изделиях, испытывающих высокие силовые и химико-термические нагрузки, например, в химической (криогенные сосуды), атомной (элементы реакторов) и судостроительных (гребные винты и оболочки) отраслях. Обеспечить необходимые параметры точности, шероховатость поверхностей и производительность возможно классическим путём – за счёт субтрактивной обработки, т.е. применения лезвийного режущего инструмента. Поэтому в виду особенностей технологий аддитивного производства и формирования микроструктуры, физико-механических и

других свойств изучение вопросов обрабатываемости при резании относится к числу актуальных задач.

Одним из представителей никель-хром-молибденовых сплавов является инконель 625 (российский аналог сплав ХН75МБТЮ). Лезвийная обработка последнего представляется весьма сложной задачей из-за тенденции упрочнения при резании, наличием низкой теплопроводности, а также наличия твёрдых частиц в микроструктуре [2 – 4].

В работах [5, 6] предложены различные механистические модели для прогнозирования величины сил резания при фрезеровании инконель 625, полученного по аддитивной технологии. Авторы показывают влияние режимов резания (скорость, подача) на изменение сил резания. Отмечается весьма непродолжительное время обработки из-за ускоренного износа режущих кромок.

Обоснование и выбор инструментального материала для обработки инконель 625 приведён в [7]. Показано, что используемые современные твёрдые сплавы обеспечивают увеличение стойкости инструмента, но при этом наблюдается доминирующее влияние окислительного износа рабочих поверхностей инструмента.

В работе [8] приведены результаты по использованию минимального количества смазывающей жидкости (метод MQL – minimum

quantity lubrication) для минимизации износа и улучшения шероховатости при фрезеровании. Установлено преимущество MQL перед обработкой без подачи смазочно-охлаждающей жидкости и с обильной подачей в зону резания.

Анализ результатов работы [9] подтвердил гипотезу о влиянии направления подачи при синтезе заготовок из инконель 625 методом LPBF (с англ. – лазерное сплавление порошка непрерывным лучом). Установлено, что при перемещении фрезы против вертикального направления синтеза, были зарегистрированы более низкие пиковые силы с более высокими отклонениями. В свою очередь, при перемещении фрезы вдоль вертикального направления синтеза исследователи наблюдали высокие пиковые значения сил резания с более низкими отклонениями.

### Материалы и методы

Заготовка для проведения исследований была получена на лабораторной установке, реализующей технологию EBAM (с англ. – электронно-лучевое аддитивное производство) (рис. 1). Согласно ГОСТ 57588-2017 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования» данная технология относится к классу прямого подвода энергии и материала.

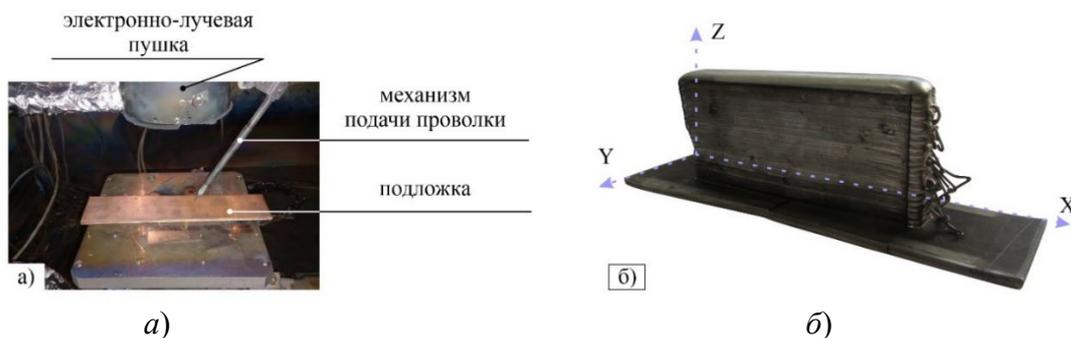


Рис. 1. Рабочая область лабораторной установки (а) и внешний вид (б) образца Inconel 625

Fig. 1. The working area of the laboratory installation (a) and the Inconel 625 sample habitus (b)

Получение заготовки осуществлялась из проволоки диаметром 1,2 мм марки OKAutrodNiCrMo-3 фирмы ESAB (Швеция) при ускоряющем напряжении 30 кВ и токе луча 60 мА. Сфокусированный луч перемещался по круговой развертке диаметром 6 мм, скорость печати составила 300 мм/мин.

Для проведения исследований с полученной заготовки на электро-эрозионном станке срезали дефектный поверхностный слой толщиной 3...4 мм. После этого из основного материала толщиной 12 мм готовили образцы в двух взаимно перпендикулярных плоскостях для механических испытаний и

изучения микроструктуры с учётом возможной анизотропии свойств. Оставшуюся часть разрезали на образцы размером  $50 \times 50 \times 16$  мм для проведения фрезерования с учётом надёжного закрепления в тисках.

Исследование фазового состава и структурных параметров образцов проводилось на дифрактометре XRD-6000 фирмы Shimadzu (Япония) на  $\text{CuK}\alpha$ -излучении. Химический состав определяли с помощью портативного рентгено-флуоресцентного анализатора S1 TITANSPX фирмы Bruker (США). Микроанализ проводили на полированных поверхностях с помощью металлографического микроскопа AxioObserver производства CarlZeiss (Германия) и растрового электронного микроскопа, оснащенного энергодисперсионным спектрометром MIRA 3 LMU фирмы Tescan (Чехия). Измерение твёрдости образцов выполняли методом Виккерса на стационарном микротвердомере Durascan-10 в соответствии с

ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007, с нагрузкой 100 г. Механические испытания проводили на универсальной испытательной машине TiniusOlsen 50ST по ГОСТ 1497-2023.

В качестве режущего инструмента использовали твёрдосплавные концевые фрезы, произведённые компанией МИОН (г. Томск) по специальному заказу (рис. 2). Использовали инструмент двух диаметров  $d_{\text{фр}} = 12$  и 8 мм, без покрытия с универсальной геометрией (задний угол  $\alpha = +10^\circ$ , передний угол  $\gamma = +8^\circ$ ; угол наклона винтовой канавки  $\omega = 40^\circ$ , число зубьев  $z = 4$ ,  $L = 78$  мм,  $l = 22$  мм). Фрезы изготовлены из твёрдого сплава марки Н10F со следующими характеристиками:  $\approx 89,4\%$  массы карбидов вольфрама, до  $0,6\%$  массы смешанных карбидов и около  $10,0\%$  массы кобальта в качестве связки; размер зерна карбидной фазы  $0,5 \dots 0,6$  мкм, предел прочности при изгибе  $\approx 3200$  МПа, а твёрдость 92 HRA.

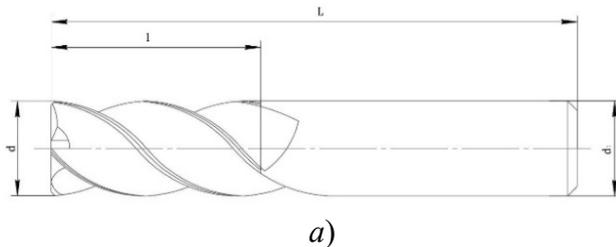


Рис. 2. Схематическое (а) и реальное (б) изображение фрезы с указанием основных геометрических размеров

Fig. 2. Schematic (a) and real (b) images of the milling cutter with indication of the basic geometric dimensions

Диаметр фрезы 12 мм был выбран как рациональный: при увеличении диаметра фрезы её стоимость увеличивается пропорционально квадрату её диаметра, поэтому использование цельной твёрдосплавной фрезы диаметром более 12 мм существенно увеличивает затраты на режущий инструмент, хотя и позволяет использовать большую подачу или ширину фрезерования. Однако надо иметь в виду, что увеличение диаметра может накладывать ограничения при фрезеровании небольших и тонкостенных заготовок при аддитивно-субтрактивной обработке. Фреза диаметром 8 мм и менее имеет существенно меньшую прочность по сравнению с 12 мм, поэтому в наших экспериментах она использовалась ограниченно – только для определения соотношения сил с основным диаметром.

Непосредственно испытания проводили на фрезерном станке мод. DMU 50 фирмы DMG MORI (Япония). Для измерения сил резания использовали динамометр мод. 9257BA фирмы Kistler (Швейцария), который был установлен непосредственно на стол фрезерного станка. Продолжительность цикла снятия данных с момента установившегося резания составляла 5 с, т.е. после входа в заготовку всех зубьев фрезы. Регистрация сил осуществлялась с частотой получения сигнала 10 кГц. Фрезерование заготовок выполняли как вдоль, так и поперёк подачи при синтезе (рис. 1, б).

Для минимизации влияния фактора охлаждения и смазывания зоны резания фрезерование проводили без использования смазочно-охлаждающей жидкости.

При испытаниях применялось фрезерование согласно схемам (рис. 3).

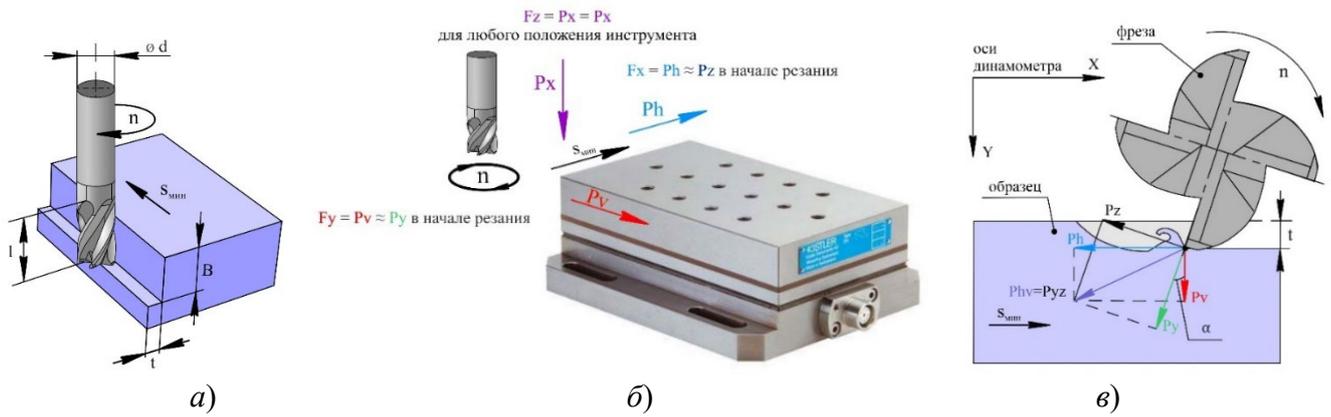


Рис. 3. Схематичное изображение параметров фрезерования (а) и схемы действия сил резания (б, в) на фрезу относительно системы координат динамометра

Fig. 3. Schematic representation of milling parameters (a) and the cutting forces mechanism (b, c) acting upon the milling cutter relative to the coordinate system of the dynamometer

Предварительные исследования, выполненные в рамках описываемой работы, показали, что при попутном фрезеровании по сравнению со встречным фрезерованием при одних и тех же режимах резания ( $n = 315$  об/мин,

$B = 7$  мм,  $t = 1$  мм,  $S_{мин} = 25$  мм/мин) увеличивается величина составляющих сил  $Ph_{max}$  и  $Pv_{max}$  почти в 6 раз (рис. 4). Поэтому все основные эксперименты выполнялись при встречном фрезеровании.

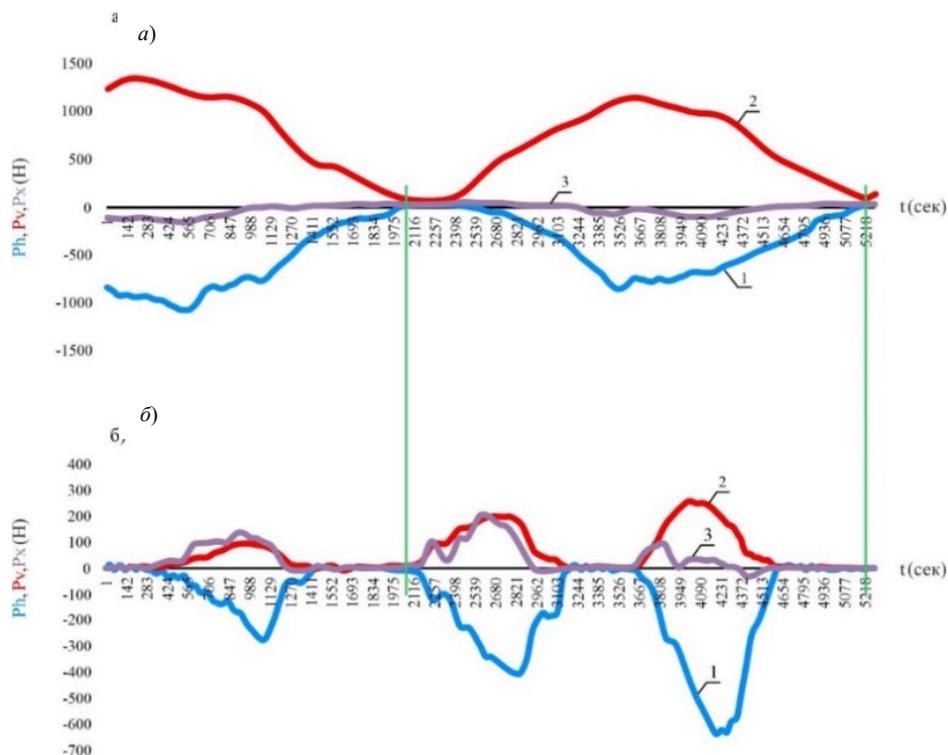


Рис. 4. Сравнение графиков изменения сил при попутном (а) и встречном фрезеровании (б) при одинаковых режимах фрезерования:

1 – сила  $Ph$ ; 2 – сила  $Pv$ ; 3 – сила  $Px$

Fig. 4. Comparison of force change graphs for climb-cut milling (a) and cutting up (b) under similar milling modes: 1 –  $Ph$  force; 2 –  $Pv$  force; 3 –  $Px$  force

При фрезеровании образцов, полученных по аддитивной технологии, измеряли следующие составляющие силы резания:  $P_h$  – сила, направленная вдоль направления подачи (сила подачи);  $P_v$  – сила, направленная перпендикулярно направлению подачи (боковая сила);  $P_x$  – сила, направленная вдоль оси фрезы (осевая сила). Эти силы непрерывно изменяются из-за изменения толщины среза  $a_i = S_z \cdot \sin \psi_i$ , где  $S_z$  – подача на зуб;  $\psi_i$  – центральный угол от начала врезания режущей кромки зуба до её текущего положения [10].

При вращении фрезы происходит поворот тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  (действует вдоль направления скорости резания, или перпендикулярно радиус-вектору от оси вращения до режущей кромки); и радиальной составляющей силы резания  $P_y$  (действует вдоль радиус-вектора от режущей кромки к оси вращения фрезы). Эти составляющие являются исходными, но при фрезеровании их выделить невозможно из-за поворота зуба фрезы. Силы  $P_z$  и  $P_y$  лежат в основе технологических сил  $P_h$  и  $P_v$ , которые можно измерить с использованием нами применяемого токарного динамометра Kistler мод. 9257BA.

В начале врезания сила подачи  $P_h$  совпадает с направлением силы  $P_z$ , но при вращении фрезы и повороте силы  $P_z$  эта составляющая начинает изменяться в пользу увеличения

боковой силы  $P_v$ . В свою очередь, в начале врезания боковая сила  $P_v$  совпадает с направлением силы  $P_y$ , но при повороте последней начинает изменяться в пользу увеличения силы подачи  $P_h$ . Более подробно эти изменения описаны в статье [11]. В связи с вышесказанным анализировалось изменение наибольших сил  $P_h$  и  $P_v$ , т.к. именно наибольшие силы приводят к поломке режущего инструмента.

Осевая сила  $P_x$  постоянно направлена вдоль оси фрезы, но при острой режущей кромке фрезы она может быть направлена от заготовки вверх из-за угла наклона главной режущей кромки  $\omega = 40$ , т.е. фреза пытается поднять заготовку. На мониторе динамометра в этом случае она обозначается с отрицательным знаком (см. рис. 4). После износа зубьев фрезы по уголкам и на торцевой части фрезы эта сила, как правило, положительна, т.е. направлена вниз и прижимает заготовку к столу станка. Отрицательная величина силы  $P_x$  существенно увеличивает риск поднятия заготовки из приспособления, особенно при большой величине ширины фрезерования  $B$ , поэтому в нашем приспособлении, закреплённом на динамометре, была предусмотрена установка дополнительного прижима заготовки сверху.

Фрезерование выполняли на режимах, приведённых в табл. 1.

## 1 Режимы фрезерования инконель 625

### 1. Inconel 625 milling modes

№ опыта	$n$ , об/мин	$v$ , м/мин	$S_{\text{мин}}$ , мм/мин	$t$ , мм	$B$ , мм	$Q$ , мм <sup>3</sup> /мин
1	315	11,9	25	1,0	7,0	175
2			50			350
3			80			560
4			200			1400
5	630	23,8	25			175
6			50			350
7			80			560
8			200			1400

Примечание: попытки увеличения скорости резания и/или подачи выше табличных значений приводили к выходу фрезы из строя в результате поломки.

Ширина фрезерования  $B = 7$  мм принималась в основных сериях экспериментов для получения возможности увеличения подачи до 250 мм/мин, т.е. с резервом прочности при большей подаче. Подачу более 250 мм/мин

применять нецелесообразно, т.к. обработанная горизонтальная поверхность имеет налипания и непригодна для получения окончательного размера заготовки (рис. 5).

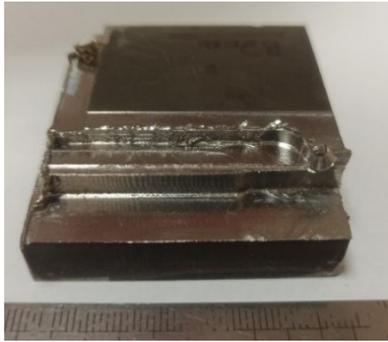


Рис. 5. Внешний вид образца инконель 625 после выполнения серии экспериментов по фрезерованию

Fig. 5. Inconel 625 sample habitus after performing a series of milling experiments

Получаемые в процессе регистрации данные обрабатывались с использованием классических положений математической статистики и планирования эксперимента, а для автоматизации расчётов использовали программное обеспечение Microsoft Excel.

### Результаты

Фазовый состав образца представлен фазой твердого раствора Ni(Cr), а результаты химического анализа приведены в табл. 2

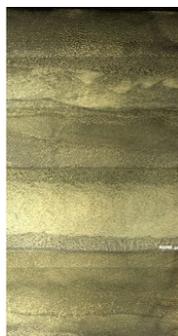
## 2. Химический состав проволоки и исследуемого образца

### 2. Chemical composition of the wire and the test sample

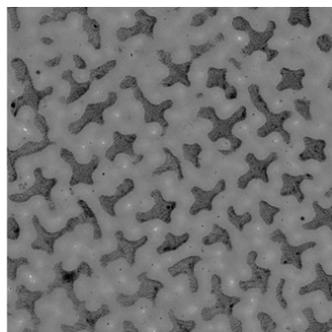
Объект исследования и требования по стандарту	Массовая доля элементов, %										
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Ti	Fe	Nb + Ta
Проволока		<0,5	<0,5	21,5	9,0	>60	<0,4	<0,5	<0,4	<2,0	3,7
Образец Inconel 625	<0,1	0,3	0,3	21,5	9,0	63,5	0,4	-	0,4	0,5	3,7
ГОСТ 5632-2014		<0,5	<0,5	20...23	8...10	>58	<0,4	-	<0,4	<5,0	3,2...4,2

Инконель 625 относится к дисперсионно-твердеющим сплавам [12], после травления структура однородная, видны границы зерен. Полученные образцы имеют тонкую дендритную структуру, обусловленную высокой скоростью охлаждения в процессе наплавки. Чем выше скорость охлаждения, тем меньше

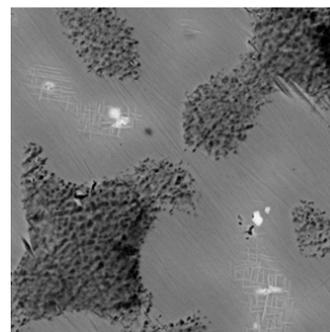
размер образовавшихся дендритов, что соответствует зонам металла сформированных слоев. В переходных зонах, а также в зонах сплавления слоев проволоки, визуализируется столбчатая структура, что объясняется повторным тепловым воздействием на уже закристаллизовавшийся металл (рис. 6, а).



а)



б)



в)

Рис. 6. Панорама микроструктуры (а) образца инконель 625 в продольном сечении (ZOX) и отдельные (б, в) снимки микроструктуры

Fig. 6. Microstructure view (a) of the inconel 625 sample in longitudinal section (ZOX) and particular (b, c) images of the microstructure

Дендритное строение обусловлено неравномерным растворением фаз Ni-Cr друг в друге, с выделением мелкодисперсных включений легированных карбидов (Mo, Nb, Ti), (рис. 6, б, в), преимущественно в областях с

большим содержанием Ni (светло-серые области).

Твёрдость образцов варьируется в диапазоне от 200 до 246 HV. Результаты исследования механических характеристик приведены в табл. 3.

### 3. Механические свойства инконель 625 в зависимости от направления синтеза

#### 3. Mechanical properties of inconel 625 depending on the direction of synthesis

Сечение	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta_5$ , %
ZOY (поперёк)	$640 \pm 20$	$144 \pm 14$	$56 \pm 3$
ZOX (вдоль)	$647 \pm 80$	$171 \pm 5$	$61 \pm 3$

На рис. 7 представлены графики влияния подачи на наибольшую величину составляющих силы резания при направлении фрезерования инконель 625 ( $d_{фр} = 12$  мм,

$n = 315$  об/мин,  $B = 7$  мм,  $t = 1$  мм) вдоль и поперёк направления подачи при синтезе образцов представлены на рисунке 7.

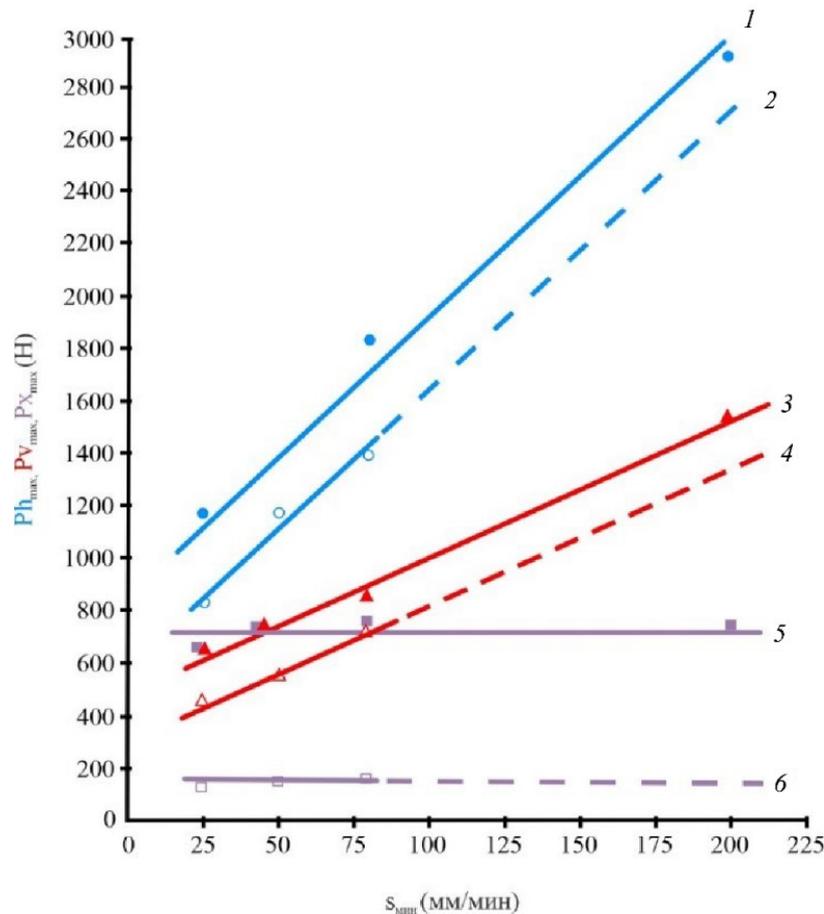
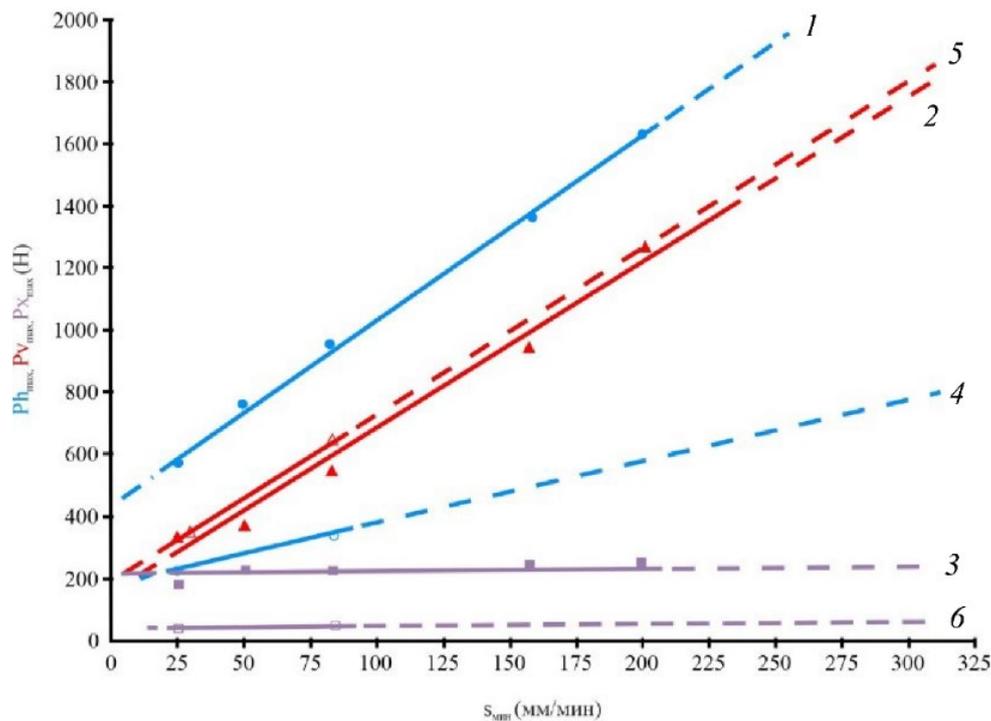


Рис. 7. Влияние минутной подачи  $S_{мин}$  на наибольшие силы при фрезеровании вдоль направления подачи при синтезе: 1 –  $Ph_{max}$ ; 2 –  $Pv_{max}$ ; 3 –  $Px_{max}$ ; поперёк направления подачи при синтезе: 4 –  $Ph_{max}$ ; 5 –  $Pv_{max}$ ; 6 –  $Px_{max}$

Fig. 7. The effect of the minute feed of  $S_{min}$  on the greatest forces under milling along the feed direction under synthesis: 1 –  $Ph_{max}$ ; 2 –  $Pv_{max}$ ; 3 –  $Px_{max}$ ; across the feed direction during synthesis: 4 –  $Ph_{max}$ ; 5 –  $Pv_{max}$ ; 6 –  $Px_{max}$

Влияние режимов обработки и диаметра концевой фрезы на наибольшие силы при фрезеровании инконель 625 вдоль направления

подачи при синтезе ( $n = 630$  об/мин;  $B = 2,6$  мм;  $t = 1$  мм) приведены на рис. 8.



**Рис. 8. Влияние минутной подачи  $S_{\text{мин}}$  и диаметра фрезы  $d_{\text{фр}}$  на наибольшие силы:**  
при  $d_{\text{фр}} = 12$  мм: 1 –  $Ph_{\text{max}}$ ; 2 –  $Pv_{\text{max}}$ ; 3 –  $Px_{\text{max}}$ ;  
при  $d_{\text{фр}} = 8$  мм: 4 –  $Ph_{\text{max}}$ ; 5 –  $Pv_{\text{max}}$ ; 6 –  $Px_{\text{max}}$

**Fig. 8. The effect of the minute feed of  $S_{\text{min}}$  and the diameter of the milling cutter  $d_{\text{mc}}$  on the greatest forces:**  
at  $d_{\text{фр}} = 12$  мм: 1 –  $Ph_{\text{max}}$ ; 2 –  $Pv_{\text{max}}$ ; 3 –  $Px_{\text{max}}$ ;  
at  $d_{\text{фр}} = 8$  мм: 4 –  $Ph_{\text{max}}$ ; 5 –  $Pv_{\text{max}}$ ; 6 –  $Px_{\text{max}}$

### Обсуждение

При выполнении экспериментов ширина фрезерования  $B$ , измеряемая параллельно оси концевой фрезы, в основном принималась равная 7 мм, а глубина фрезерования  $t$ , измеряемая перпендикулярно оси концевой фрезы, в основном принималась равная 1 мм. Это было вызвано необходимостью обеспечить наибольшую производительность при сохранении работоспособности концевой фрезы при приемлемой стоимости фрезы диаметром 12 мм. Ранее выполненные эксперименты показали, что при постоянной площади поперечного сечения среза желательнее увеличивать ширину фрезерования  $B$ , а не глубину фрезерования  $t$ .

При увеличении  $t$  стружка находится в стружечной канавке фрезы более продолжительное время, её объём увеличивается и из-за высокой температуры резания, особенно при увеличении скорости резания  $v$ , стружка начинает привариваться к передней поверхности зуба фрезы. При увеличении минутной подачи  $S_{\text{мин}}$  увеличивается объём удаляемого металла в стружечной канавке, который начинает пакетироваться, препятствуя своему удалению, и этот образовавшийся комок при вращении фрезы начинает интенсивно разогреваться из-за трения с поверхностью резания до красного цвета и ещё больше привариваться к стружечной канавке. Это явление может происходить только в одной из стружечных канавок, но попытки удалить образовавшийся комок

приводят к выкрашиванию режущей кромки твердосплавной фрезы. Практика показала, что для надёжного удаления стружки желательно, чтобы глубина фрезерования была не более 1 мм.

Из рис. 7 видно, что наибольшая величина силы подачи  $Ph_{\max}$  увеличивается более интенсивно по сравнению с боковой силой  $Pv_{\max}$ , но их соответствующие графики вдоль и поперёк практически параллельны. Силы  $Ph_{\max}$  и  $Pv_{\max}$  при фрезеровании вдоль направления синтеза немного превышают соответствующие силы при фрезеровании поперёк, что связано, по нашему мнению, с большей величиной предела текучести вдоль по сравнению с поперечным направлением образца (табл. 3).

Наибольшая величина осевой силы  $Px_{\max}$  не изменяется при увеличении подачи, но при фрезеровании вдоль она существенно больше, чем при фрезеровании поперёк. При фрезеровании поперёк сила  $Px_{\max}$  циклически принимает то положительный, то отрицательный знак. Это явление может приводить к появлению вибрации, а при фрезеровании небольших заготовок отрицательная сила  $Px$  вырывает их из приспособления при закреплении только по боковым поверхностям, т.к. силы закрепления порой недостаточно. Это касается и обработки тонкостенных и нежестких заготовок, когда невозможно использовать большую силу для их закрепления.

При уменьшении диаметра фрезы с 12 до 8 мм происходит ожидаемое уменьшение величины наибольших сил  $Ph_{\max}$  и  $Px_{\max}$  при одинаковой подаче, но боковая сила  $Pv_{\max}$ , наоборот, парадоксально даже немного больше при меньшем диаметре фрезы 8 мм, (рис. 8). По нашему мнению это связано с тем, что доминирующая доля боковой силы  $Pv$  возникает от контакта задней поверхности зуба фрезы и округлённой режущей кромки с поверхностью резания, особенно при малой глубины резания  $t < 0,1d$  и в начале резания, а при обоих диаметрах эти величины примерно одинаковы.

## Заключение

На основании полученных результатов сделаны следующие выводы:

1. При концевом фрезеровании сплава инконель 625, полученного по аддитивной технологии EBAM, предпочтительнее использовать твёрдосплавную фрезу диаметром более 8 мм. Нежелательно увеличивать количество зубьев фрезы, т.к. это может привести к забиванию стружечной канавки из-за недостаточного её объёма, особенно при подаче более 150 мм/мин. Для фрез диаметром менее 12 мм желательно применять фрезы с 4-мя зубьями.

2. При фрезеровании твёрдосплавными концевыми фрезами диаметром 8 мм и менее происходит интенсивный износ по задней поверхности, но даже незначительный износ по задней поверхности приводит к существенному ухудшению качества обработанной поверхности, т.к. металл начинает интенсивно прилипать и к фаске износа, и к режущей кромке на передней поверхности.

3. Необходимо применять только встречное фрезерование, т.к. при попутном фрезеровании происходят рывки стола даже при небольшой подаче  $S_{\min} > 80$  мм/мин, и сила подачи увеличивается в 6 раз по сравнению со встречным фрезерованием. Направление подачи вдоль и поперёк направления подачи при синтезе влияет на величину составляющих сил резания.

4. По возможности использовать небольшую глубину фрезерования  $t \leq 1$  мм и увеличивать производительность обработки за счёт увеличения ширины фрезерования  $B$ , а не за счёт глубины фрезерования. Минутная подача для фрез диаметром 12 мм должна быть не более 120 мм, в противном случае существенно ухудшается качество обработанной поверхности, и в первую очередь вертикальной, образуемой главными режущими кромками на периферии фрезы;

5. При увеличении скорости резания уменьшаются составляющие силы резания, но её увеличение более 50 м/мин может привести к привариванию стружки к стружечной

канавке. Увеличить производительность обработки можно за счёт увеличения скорости резания до 50 м/мин и увеличения при этом минутной подачи до 120...150 мм/мин.

6. Осевая сила иногда принимает отрицательное значение, что может привести к поднятию заготовки из приспособления, поэтому при обработке небольших и маложёстких заготовок необходимо предусмотреть дополнительный надёжный прижим заготовки сверху, т.к. её закрепление только по боковым поверхностям часто оказывается недостаточным.

7. Сила подачи может достигать 3000 Н и более при фрезеровании твердосплавной фрезой диаметром 12 мм при ширине фрезерования 7 мм, глубине фрезерования 1 мм, частоте вращения фрезы 315 об/мин и подаче 200 мм/мин, т.е. удельная сила резания при сечении среза  $B \times t$  равна 428 Н/мм<sup>2</sup>.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шемонаева Е.С., Гончаров А.В., Андреев В.Д. Оценка целесообразности применения аддитивных технологий в изделиях аэрокосмической техники // Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. № 12. С. 1–9. DOI: 10.18698/2308-6033-2021-12-2136

2. Арляпов А.Ю., Волков С.Ю., Прوماхов В.В. Исследование обрабатываемости фрезерованием композита Inconel 625 с добавлением  $NiTi-TiB_2$ , полученного лазерным спеканием // Обработка металлов (технология-оборудование-инструменты). 2021. Том 23. №1. С. 21–32. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-21-32

3. Васильков Д.В., Кочина Т.Б. Силы резания при высокоскоростной обработке сплавов на никелевой основе инструментами из минералокерамики // Металлообработка. 2011. №4. С. 10–13.

4. Качан А.Я., Панасенко В.А., Мозговой С.В. Особенности применения твердосплавного инструмента при токарной обработке дисков авиационных ГТД на станках с ЧПУ // Вестник двигателестроения. 2006. №1. С. 130–135.

5. Krzysztof Jarosz, Kaushalendra V. Patel, Tuğrul Özel Mechanistic force modeling in finish face milling of additively manufactured Inconel 625 nickel-based alloy // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. V. 111. P. 1535–1551. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06222-9>.

6. Andrea Abeni, Dario Loda, Tuğrul Özel, Aldo Attanasio Analytical force modelling for micro milling additively fabricated Inconel 625 // Production Engineering.

2020. V. 14. P. 613–627. <https://doi.org/10.1007/s11740-020-00980-x>

7. Кривоухов В.А., Егоров С.В., Брунштейн Б.Е. Обрабатываемость резанием жаропрочных и титановых сплавов. М.: МАШГИЗ, 1961. 245 с.

8. Pragat Singh, Jagwant Singh, J. S. Durej. Performance Evaluation of Milling of Inconel-625 Under Minimum Quantity Lubrication // Journal for manufacturing science production. 2016. V. 16. Iss. 1. P. 61–68. <https://doi.org/10.1515/jmsp-2015-0019>

9. Kaushalendra Patel, Jixiong Fei, Guoliang Liu, Tuğrul Özel. Milling investigations and yield strength calculations for nickel alloy Inconel 625 manufactured with laser powder bed fusion process // Production Engineering. 2019. V. 13. P. 693–702. <https://doi.org/10.1007/s11740-019-00922-2>.

10. J.G. Choi, M.-Y. Yang In-process prediction of cutting depths in end milling // International Journal of Machine Tools & Manufacture 39 (1999) 705–721. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(98\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00067-4).

11. Бабаев А.С., Козлов В.Н., Семёнов А.Р. Исследование сил резания и обрабатываемости при фрезеровании порошковой коррозионно-стойкой стали, полученной по технологии прямого лазерного выращивания (LMD) // Обработка металлов (технология-оборудование-инструменты). 2024. Том 26. №2. С. 38–56. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-38-56

12. Болтрушевич А.Е., Мартюшев Н.В., Козлов В.Н. Структура заготовок из сплава инконель 625, полученных электродуговой наплавкой и наплавкой с помощью электронного луча // Обработка металлов (технология-оборудование-инструменты). 2024. Том 26. №4. С. 206–217. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-206-217

## REFERENCES

1. Shemonaeva E.S., Goncharov A.V., Andreev V.D. Feasibility evaluation of using additive technologies in aerospace products. // Engineering Journal: Science and Innovation. 2021, №. 12. pp. 1–9. DOI: 10.18698/2308-6033-2021-12-2136

2. Arlyapov A.Yu., Volkov S.Yu., Promakhov V.V. Investigation of the machinability by milling of the laser sintered Inconel 625/NiTi-TiB<sub>2</sub> composite // Metalworking (technology-equipment-tools). 2021. vol. 23. №. 1. pp. 21–32. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-21-32

3. Vasilkov D.V., Kochina T.B. Cutting forces during high-speed treatment of nickel-based alloys with mineral ceramics tools // Metalworking. 2011. №. 4. pp. 10–13.

4. Kachan A.Ya., Panasenkov V.A., Mozgovoy S.V. Features of the use of carbide tools in turning discs of aviation gas turbine engines on CNC machines // Bulletin of Engine Engineering. 2006. №. 1. pp. 130–135.

5. Krzysztof Jarosz, Kaushalendra V. Patel, Tuğrul Özel Mechanistic force modeling in finish face milling of

additively manufactured Inconel 625 nickel-based alloy //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. V. 111. P. 1535–1551. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06222-9>.

6. Andrea Abeni, Dario Loda, Tuğrul Özel, Aldo Attanasio Analytical force modelling for micro milling additively fabricated Inconel 625 //Production Engineering. 2020. V. 14. P. 613–627. <https://doi.org/10.1007/s11740-020-00980-x>

7. Krivoukhov V.A., Egorov S.V., Brunstein B.E. Machinability by cutting heat-resistant and titanium alloys. Moscow: MASHGIZ, 1961. 245 p.

8. Pragat Singh, Jagwant Singh, J. S. Durej. Performance Evaluation of Milling of Inconel-625 Under Minimum Quantity Lubrication // Journal for manufacturing science production. 2016. V. 16. Iss. 1. P. 61–68. <https://doi.org/10.1515/jmsp-2015-0019>

9. Kaushalendra Patel, Jixiong Fei, Guoliang Liu, Tuğrul Özel. Milling investigations and yield strength calculations for nickel alloy Inconel 625 manufactured with

laser powder bed fusion process // Production Engineering. 2019. V. 13. P. 693–702. <https://doi.org/10.1007/s11740-019-00922-2>.

10. J.G. Choi, M.-Y. Yang In-process prediction of cutting depths in end milling // International Journal of Machine Tools & Manufacture 39 (1999) 705–721. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(98\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00067-4).

11. Babaev A.S., Kozlov V.N., Semenov A.R. Investigation of cutting forces and machinability during milling of corrosion-resistant powder steel produced by laser metal deposition (LMD) // Metalworking (technology-equipment-tools). 2024. vol.26. №. 2. pp. 38–56. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-38-56

12. Boltrushevich A.E., Martyushev N.V., Kozlov V.N. The structure of inconel 625 habitus obtained by electric arc welding and surfacing using an electron beam // Metalworking (technology-equipment-tools). 2024, Vol. 26. №. 4. pp. 206–217. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-206-217

**Вклад авторов:** А. Бабаев, В. Козлов – идея; А. Семёнов, В. Овчаренко, И. Бельчиков – сбор материала; А. Бабаев, В. Козлов, А. Семёнов, И. Бельчиков – постановка эксперимента; А. Бабаев, В. Козлов, В. Овчаренко – анализ результатов; А. Бабаев, В. Козлов, В. Овчаренко – написание статьи; А. Бабаев, В. Козлов – научное редактирование.

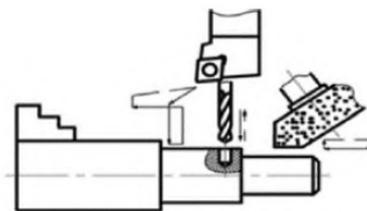
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** A. Babaev, V. Kozlov – idea; A. Semenov, V. Ovcharenko, I. Belchikov – collection; A. Babaev, V. Kozlov, A. Semenov, I. Belchikov – setting up an experiment; A. Babaev, V. Kozlov, V. Ovcharenko – analysis of the results; A. Babaev, V. Kozlov, V. Ovcharenko – copywriting; A. Babaev, V. Kozlov – scientific edition.

The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 04.02.2025; одобрена после рецензирования 21.02.2025; принята к публикации 10.03.2025.

The article was submitted 04.02.2025; approved after reviewing 21.02.2025; assepted for publication 10.03.2025.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №5 (167). С.42-48.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №5 (167). P.42-48.

Научная статья

УДК 621.891

doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-42-48

## Повышение износостойкости поверхности деталей в прецизионных парах трения сельскохозяйственных машин методом финишной антифрикционной безабразивной обработки

Владимир Анатольевич Погonyшев<sup>1</sup>, д.т.н.

Илья Алексеевич Мокшин<sup>2</sup>, магистр

Дина Алексеевна Погonyшева<sup>3</sup>, д.п.н.

Татьяна Викторовна Бычкова<sup>4</sup>, к.п.н.

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Брянский государственный аграрный университет, Брянск, Россия

<sup>1</sup> pog@bgsha.com, <https://orcid.org/0009-0008-8799-5974>

<sup>2</sup> imokshin\_1998@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-3161-8700>

<sup>3</sup> dpogonysheva32@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3149-0976>

<sup>4</sup> tanyabychkova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7457-8783>

**Аннотация.** Представлены результаты исследования, которые направлены на создание защитных адгезионных наноплёночных покрытий из алюминия, которые наносятся на сталь марки 45 с использованием фрикционного метода. Для этого применяется прутковый инструмент, закреплённый в специальном устройстве и находящийся под давлением. В качестве образцов для сравнительных испытаний использовалась сталь 45 по ГОСТ 1050-2013, предварительно обезжиренная бензолом (ГОСТ Р 58415-2019, С6Н6) или спиртом (ГОСТ Р 55878-2013, С2Н5ОН). После этого с поверхности образцов удаляли окисный слой с помощью абразивного материала (ГОСТ 6456-82), а для сохранения ювенильной поверхности сразу наносили слой глицерина (ГОСТ 6824-96, СН<sub>2</sub>(ОН)-СН(ОН)-СН<sub>2</sub>ОН) с последующим покрытием медно-алюминиевой плёнкой. В работе изучено взаимодействие плёнок, нанесённых на поверхность образцов методом финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО). Исследованы защитные свойства алюминия как покрытия. В ходе экспериментов были определены условия, необходимые для формирования сплошного алюминиевого слоя, а также зафиксировано изменение массы стальных образцов до и после нанесения покрытия. Полученное композиционное покрытие демонстрирует повышенную износостойкость, антикоррозионные свойства и снижает коэффициент трения

**Ключевые слова:** коррозия, трение, износ, коэффициент трения, машина трения, биения, триботехнические характеристики

**Для цитирования:** Погonyшев В.А., Мокшин И.А., Погonyшева Д.А., Бычкова Т.В. Повышение износостойкости поверхности деталей в прецизионных парах трения сельскохозяйственных машин методом ФАБО // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 5 (167). С. 42–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-42-48

## Surface wear resistance increase for parts in precision friction pairs of agricultural machines under final antifriction nonabrasive machining

Vladimir A. Pogonyshev<sup>1</sup>, D.Eng.

Ilya A. Mokshin<sup>2</sup>, Mgr.

Dina A. Pogonysheva<sup>3</sup>, EdD

Tatiana V. Bychkova<sup>4</sup>, Cand. Sci. Ed.

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Bryansk State Agrarian University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> pog@bgsha.com

<sup>2</sup> imokshin\_1998@mail.ru

<sup>3</sup> dpogonysheva32@mail.ru

<sup>4</sup> tanyabychkova@mail.ru

**Abstract.** The results of a study aimed at creating protective adhesive thin-film coatings made of aluminum, which are applied to grade 45 steel using the friction method, are presented. For this purpose, a bar tool is used, fixed in a special device and being subjected to pressure. 45 steel according to GOST 1050-2013, previously degreased with benzene (GOST R 58415-2019, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) or alcohol (GOST R 55878-2013, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH), was used as samples for comparative tests. After that, the oxide layer was removed from the surface of the samples using an abrasive material (GOST 6456-82), and a layer of glycerin (GOST 6824-96, CH<sub>2</sub>(OH)-CH(OH)-CH<sub>2</sub>OH) was immediately applied to preserve the juvenile surface, then followed by coating with a copper-aluminum film. The interaction of films deposited on the surface of samples by the final antifriction nonabrasive machining (FANaM) is studied. The protective properties of aluminum as a coating are investigated. During the experiments, the conditions necessary for the formation of a solid aluminum layer were determined, and a change in the mass of steel samples before and after coating was recorded. The resulting composite coating proves increased wear resistance, anti-corrosion properties and reduced friction coefficient.

**Keywords:** corrosion, friction, wear, friction coefficient, friction machine, runout, tribotechnical characteristics

**For citation:** Pogonyshev V.A., Mokshin I.A., Pogonysheva D.A., Bychkova T.V. Surface wear resistance increase for parts in precision friction pairs of agricultural machines under final antifriction nonabrasive machining / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 5 (167). P. 42–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-42-48

### Введение

Основными направлениями экономического и социального развития агропромышленного комплекса (АПК) РФ предусматривается совершенствование ремонтного производства для обеспечения надежной работы техники и оборудования машинно-тракторного парка (МТП) [1].

Работоспособность и срок службы техники в значительной степени зависят от интенсивности износа трущихся деталей. По данным эксплуатационных наблюдений, от 82 до 92 % деталей машин выходят из строя именно из-за износа [2]. Одним из наиболее распространённых видов изнашивания является фреттинг – механическое повреждение соприкасающихся поверхностей, вызванное колебательными микросмещениями. Особое внимание уделяется фреттинг-коррозии – коррозионно-механическому изнашиванию, которое возникает при малых колебательных перемещениях и усугубляется воздействием окружающей среды [3]. Этот процесс сопровождается отделением

микрочастиц материала и образованием оксидов, которые могут действовать как абразивы, усиливая износ и приводя к дальнейшему разрушению поверхностей.

Для предотвращения фреттинг-коррозии и снижения износа важно правильно выбирать материалы для трущихся поверхностей, а также применять защитные покрытия и смазочные материалы. Например, использование композиционных покрытий на основе пластичных металлов, таких как медь и алюминий, позволяет значительно повысить износостойкость и долговечность деталей [4 – 6]. Кроме того, современные методы обработки поверхностей, такие как финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО), способствует снижению коэффициента трения и предотвращению задиоров, что особенно важно для узлов трения, работающих в условиях повышенных нагрузок и агрессивных сред [7 – 9].

Таким образом, изучение процессов фреттинга и фреттинг-коррозии, а также разработка методов защиты от них, являются ключевыми направлениями в повышении надёжности и

долговечности техники. Это особенно актуально для сельскохозяйственных машин, работающих в условиях повышенной запылённости и влажности, где износ деталей происходит особенно интенсивно.

### Методика эксперимента

Для создания наноплёнок толщиной в несколько микрометров (табл. 1) применялся метод фрикционного нанесения – ФАБО. Этот метод обладает экологическими и экономическими преимуществами, особенно в условиях мелкосерийного производства [8 – 10]. В качестве основы использовались стальные пористые покрытия, полученные методом

электродугового напыления (табл. 2 и 3). Поверхности предварительно очищались от оксидов (рис. 1, *а*), после чего на них наносилась медная плёнка (рис. 1, *б* и 1, *в*), выполняющая роль подслоя для алюминиевой плёнки толщиной 0,2...0,5 мкм (рис. 1, *г*).

Комбинация алюминиевого покрытия на медном основании стальной подложки способствует снижению износа на 25...30 %, что, в свою очередь, обеспечивает защиту стальной поверхности от взаимодействия с окислительной средой. Медный подслой улучшает адгезию алюминиевой плёнки и усиливает её защитные свойства, что делает данный метод эффективным для повышения износостойкости и долговечности деталей.

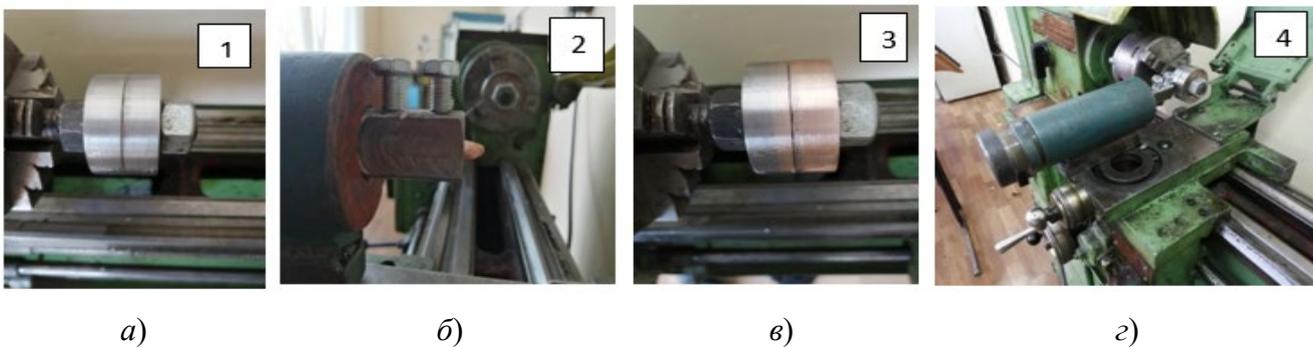


Рис. 1. Нанесение алюминиевых плёнок методом ФАБО:

*а* – подготовка поверхности для ФАБО; *б* – устройство с закреплённым медным прутком; *в* – нанесённый медный подслой; *г* – нанесение алюминия на подслой меди

Fig. 1. Application of aluminum films by the FANaM method: *a* – preparation of the surface for FANaM; *b* – a device with a fixed copper rod; *c* – applied copper sublayer; *d* – application of aluminum to a copper sublayer

Нанесение покрытий осуществлялось на токарном станке ТВ-7 с использованием фрикционно-механического метода. Для этого применялся прутковый инструмент, который с усилием 100 кгс прижимался к вращающимся цилиндрическим поверхностям образца цилиндрической формы. В процессе нанесения

материал покрытия передавался на поверхность образца за счёт трения и давления, что обеспечивало формирование равномерного и адгезионно-прочного слоя. Этот метод позволяет эффективно наносить защитные покрытия на детали, улучшая их износостойкость и долговечность.

## 1. Параметры ФАБО

### 1. FANaM Parameters

Пластичный металл пруткового инструмента	Частота вращения шпинделя $v$ , м/с	Давление $P$ , МПа	Продольная подача, мм/об	Толщина покрытия, мкм
Медь	0,50	24	5,5	0,30...0,40
Алюминий	0,45	22	4,5	0,25...0,35

Для сравнительных испытаний использовались образцы из стали 45 по ГОСТ 1050-2013. Перед нанесением покрытий образцы обезжиривали в бензоле (ГОСТ Р 58415-2019, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) или спирте (ГОСТ Р 55878-2013, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH), после чего удаляли окисную плёнку с помощью абразивного материала (ГОСТ 6456-82). Для сохранения ювенильной поверхности (свободной от оксидов и загрязнений) образцы сразу покрывали слоем глицерина (ГОСТ 6824-96, CH<sub>2</sub>(OH)-CH(OH)-CH<sub>2</sub>OH), а затем наносили медно-алюминиевую плёнку (рис. 1).

Исходные данные эксперимента по фрикционному нанесению плёнок: диаметр стального образца  $50 \cdot 10^{-3}$  м; масса стального образца  $\approx 143$  г; частота оборотов шпинделя станка 300...500 об/мин; давление при обработке 20...60 МПа.

После нанесения защитного алюминиевого покрытия (с использованием алюминиевого прутка диаметром 8 мм, марка АК6 по ГОСТ 21488-97) масса стального образца увеличилась до 143,87 г. Полученное покрытие обладало необходимой сплошностью и равномерностью.

### Результаты эксперимента и их обсуждение

Сталь на воздухе во влажной атмосфере быстро окисляется, покрываясь слоем оксидов, что делает её непригодной для использования в качестве самостоятельного покрытия без

дополнительной обработки. Поэтому было принято решение нанести слой алюминия, который обладает высокими антикоррозийными свойствами.

Исследовались триботехнические характеристики композиционных покрытий, полученных методом натирания. Испытанию подвергались от трех до шести образцов для каждого варианта покрытия с целью подтверждения воспроизводимости результатов [7, 8]. Параметры покрытий: шероховатость  $Ra = 20...40$  мкм; толщина покрытия после обработки 0,25...0,35 мкм.

Основной целью испытаний была оценка триботехнических свойств покрытий (табл. 3) и их способности к схватыванию. Полученные результаты показали, что алюминиевые покрытия эффективно защищают стальные поверхности от коррозии и износа, что делает их перспективными для применения в условиях повышенной влажности и агрессивных сред.

Для борьбы с фреттинг-коррозией нами были применены следующие методы: использование защитных покрытий на основе мягких металлов (медь, алюминий), которые снижают трение и предотвращают окисление, а также были использованы смазки и антифрикционные составы, уменьшающие трение и защищающие поверхности от коррозии, что, в свою очередь, способствовало оптимизации конструкции: уменьшению амплитуды колебательных движений и улучшению геометрии контактирующих поверхностей.

## 2. Физико-механические характеристики вариантов композиционных покрытий

### 2. Physical and mechanical characteristics of composite coating options

Номер образцов	Основные химические элементы (материалы)	Температура масла $T$ , К		Время приработки $t$ , ч	Шероховатость, $Ra$ , мкм		Верхний предел рабочих температур
		1 режим	2 режим		Исходная	После испытаний	
К 27-30	Al, Sn(40%), Sb	310	310	1,10	0,70	0,65	373
К 31-35	Al, Sn(40%), Sb	298	315	0,40	0,65	0,70	410

### 3. Триботехнические характеристики вариантов композиционных покрытий

#### 3. Tribotechnical characteristics of composite coating options

Номер образцов	Основные химические элементы (материалы)	Коэффициент трения				Износ колодки I, мкм	Износ покрытия I, мкм
		1 режим		2 режим			
		Начальный	Установившийся	Начальный	Установившийся		
К 27-30	Al, Sn(40%), Sb	0,037	0,005	0,025	0,002	0,66	3,0
К 31-35	Al, Sn(40%), Sb	0,022	0,003	0,018	0,004	1,22	8,0

#### Выводы

ФАБО является высокоэффективным методом нанесения прирабочного покрытия. На заключительном этапе технологической обработки (после шлифовки) при натирании алюминиевым прутком в среде глицерина с использованием специального устройства поверхность алюминиевого сплава равномерно пластифицируется на обрабатываемой детали, а оксидная плёнка на стали разрыхляется. Частицы алюминиевого сплава переносятся на сталь, образуя прирабочный слой толщиной 2...3 мкм, что оптимизирует процесс приработки контактирующих деталей в прецизионных парах трения.

В ходе эксперимента была подтверждена возможность нанесения алюминиевых покрытий (с использованием алюминиевого прутка диаметром 8 мм марки АК6 по ГОСТ 21488-97) фрикционным способом на стальные поверхности с медным подслоем. Медь обладает высокой адгезией к железу, а алюминий, согласно классификации Мак-Лина [4], хорошо сваривается с медью, что обеспечивает прочное и равномерное покрытие.

Исследования опытных образцов на машине трения показали, что при увеличении нагрузки между алюминиевым диском и стальной колодкой коэффициент трения снижается на 30 % по сравнению со стальными образцами без покрытий. Полученные композиционные покрытия демонстрируют повышенную износостойкость, антикоррозийные свойства и снижение коэффициента трения.

К преимуществам метода ФАБО относятся: низкий расход материала, низкий расход механической энергии, экологическая безопасность, короткая продолжительность нанесения покрытия (от нескольких секунд до минут), стабильное и высокое качество покрытия, защита обрабатываемой поверхности от окислительного воздействия окружающей среды, возможность замены дорогостоящих методов обработки поверхности.

Применение ФАБО в сельскохозяйственной технике имеет ряд преимуществ: позволяет значительно увеличить долговечность и износостойкость деталей в узлах трения, что достигается за счёт исключения задиров на поверхностях трения, снижения механических потерь на трение на 7 – 10 %, уменьшения содержания продуктов износа (железа) в пробах моторного масла почти в 4,23 раза, снижения коэффициента трения и, как следствие, уменьшения расхода топлива двигателями внутреннего сгорания на 3 %.

Таким образом, метод ФАБО является перспективным и экономически выгодным решением для повышения эксплуатационных характеристик деталей в условиях повышенных нагрузок и агрессивных сред.

#### Заключение

Повышение уровня механизации и внедрение инноваций в сельском хозяйстве невозможно без использования достижений триботехники. Изучение процессов трения, износа и обработки материалов позволяет

разрабатывать сельскохозяйственную технику, которая не только отличается высокой производительностью, но и способствует снижению эксплуатационных затрат. Современные методы, такие как ФАБО и применение плёночных покрытий, открывают новые возможности для повышения работоспособности сельскохозяйственной техники. Это особенно важно в условиях обеспечения технологического суверенитета, так как позволяет увеличить долговечность и эффективность оборудования, снизить износ деталей и минимизировать затраты на обслуживание.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Мокшин, И. А.** Технологические проблемы в сельском хозяйстве // Проблемы энергетики, природопользования, безопасности жизнедеятельности и экологии: сборник материалов студенческой научно-практической конференции института энергетики и природопользования, Брянск, 11 марта 2021 года. Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2021. С. 197-202.
2. **Суслов А.Г.** Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / Суслов А.Г., Фёдоров В.П., Горленко О.А., Ильицкий В.Б., Тотай А.В., Хандожко А.В., Горленко А.О., Федонин О.Н., Прокофьев А.Н., Бишутин С.Г., Петрешин Д.И., Говоров И.В., Гуров Р.В., Шалыгин М.Г., Тихомиров В.П., Шец С.П., Нагоркин М.Н., Стешков А.Е., Хохлов В.М., Симкин А.З. и др. Москва, 2022. 552 с.
3. **Погоньшев В.А.** Триботехнические процессы при фреттинг-износе / В. А. Погоньшев, И. А. Мокшин, Д. А. Погоньшева // Наука в центральной России. 2022. № 3(57). С. 84-91. DOI 10.35887/2305-2538-2022-3-84-91. 88 с.
4. **Ващишина А.П., Шалыгин М.Г., Ващишин С.П.** Исследование физико-химических характеристик пластичного смазочного материала различной концентрации/ Трибология - машиностроению. Труды XV Международной научно-технической конференции. Москва, 2024. С. 32–34.
5. **Tribotechnical** characteristics of composite coatings deposited by spraying/ V. A. Pogonyshev, N. M. Belous, V. E. Torikov // Materials Today: Proceedings, Sevastopol, 07–11 сентября 2020 года. Sevastopol, 2021. P. 1849–1851. DOI 10.1016/j.matpr.2020.08.434.
6. **Кузьменко И.В., Будко С.И., Самусенко В.И.** Фрикционное натирание медью как способ восстановления размеров и борьбы с фреттинг-коррозией корпусных деталей подшипниковых сопряжений // Технология металлов. 2022. № 8. С. 53–55.

7. **Тихомиров В.П., Измеров М.А., Шалыгин М.Г.** Проектирование и технология производства поверхности деталей машин с заданными эксплуатационными свойствами / Интеллектуальная трибология в машиностроении: BALT TRIBO 2024. Материалы 1-й Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 136–144.

8. **Шалыгин М.Г., Горленко А.О., Болдырев Д.А.** Повышение износостойкости мартенситной стали изменениями в поверхностном слое // Сталь. 2024. № 12. С. 28–32.

9. **Шалыгин М.Г., Евтух Е.С.** Трение, износ, смазка: специальные области трибологии. Курск, 2024. 123 с.

10. **Шалыгин М.Г., Суслов А.Г.** Модель изнашивания наногеометрии поверхностей трения и технология уменьшения периода приработки фрикционной пары/ Интеллектуальная трибология в машиностроении: BALT TRIBO 2024. Материалы 1-й Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 302–309.

### REFERENCES

1. Mokshin I. A. Technological problems in agriculture // Problems of energy, nature management, life safety and ecology: proceedings of the student scientific and practical conference of the Institute of Energy and Nature Management, Bryansk, March 11, 2021. Bryansk: Bryansk State Agrarian University. 2021. pp. 197–202.
2. Suslov A.G. Fundamental bases ensuring reliability of machine building products / Suslov A.G., Fedorov V.P., Gorlenko O.A., Ilyitsky V.B., Totai A.V., Khandozhko A.V., Gorlenko O.A., Fedonin O.N., Prokofiev A.N., Bishutin S.G., Petreshin D.I., Govorov I.V., Gurov R.V., Shalygin M. G., Tikhomirov V. P., Shets S.P., Nagorkin M.N., Steshkov A.Ye., Khokhlov V.M., Simkin A.S. et al. Moscow, 2022, 552 p.
3. Pogonyshev V. A. Tribotechnical processes during fretting wear / V. A. Pogonyshev, I. A. Mokshin, D. A. Pogonysheva // Science in central Russia. 2022, no. 3(57), pp. 84-91. DOI 10.35887/2305-2538-2022-3-84-91. 88 p.
4. Vashchishina A.P., Shalygin M.G., Vashchishin S.P. Investigation of physico-chemical characteristics of plastic lubricants of various concentrations / Tribologiya - mashinostroenie. Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference. Moscow. 2024. pp. 32–34.
5. Tribotechnical characteristics of composite coatings deposited by spraying / V. A. Pogonyshev, N. M. Belous, V. E. Torikov // Materials Today: Proceedings, Sevastopol. 2021. P. 1849–1851. DOI 10.1016/j.matpr.2020.08.434.
6. Kuzmenko I.V., Budko S.I., Samusenko V.I. Friction rubbing with copper as a method for restoring dimensions and combating fretting corrosion of housing parts of bearing joints. 2022. no. 8. pp. 53–55.

7. Tikhomirov V.P., Izmerov M.A., Shalygin M.G. Design and production technology of the surface of machine parts with specified performance properties/ Intelligent tribology in mechanical engineering: BALT TRIBO 2024. Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference. Saint Petersburg. 2024. pp. 136–144.

9. Shalygin M.G., Gorlenko A.O., Boldyrev D.A. Increasing the wear resistance of martensitic steel by changes in the surface layer // Steel. 2024. no. 12. pp. 28–32.

9. Shalygin M.G., Evtukh E.S. Friction, wear, lubrication: special areas of tribology. Kursk. 2024. 123 p.

10. Shalygin M.G., Suslov A.G. The wear model of the nanogeometry of friction. Surfaces and the technology of reducing the run-in period / Intelligent tribology in mechanical engineering: BALT TRIBO 2024. Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference. Saint Petersburg. 2024. pp. 302–309.

**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 25.02.2025; одобрена после рецензирования 06.03.2025; принята к публикации 27.03.2025.

The article was submitted 25.02.2025; approved after reviewing 06.03.2025; assepted for publication 27.03.2025.

---

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

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

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

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

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

Сдано в набор 17.05.2025. Выход в свет 30.05.2025.

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

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет» 241035,

Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

