

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

9 (171)
2025

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



**НАНОТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**



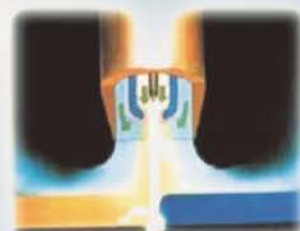
**ЛАЗЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



**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

№ 9 (171)

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. ОВЧИННИКОВ В.В. (г. Москва)

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

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

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

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

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

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

DOI:10.30987/issn.2223-4608

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

Подписной индекс: **Э79195**.

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

E-mail: editntm@yandex.ru

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Ларин С.Н., Пасынков А.А. Горячее деформирование торцевых
элементов корпусных конических заготовок 3

Демин В.А. Современные тренды и перспективы развития обработки
металлов давлением. 10

ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Бабаев А.С., Козлов В.Н., Савченко Н.Л., Овчаренко В.А.,
Бельчиков И.А., Семёнов А.Р. Морфология стружки и механизм износа
рабочих площадок твёрдосплавной концевой фрезы при обработке сплава
инконель 625, полученного по аддитивной технологии ЕВАМ 19

ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Баринов С.В., Федонина С.О. Волновое
деформационное упрочнение в процессе аддитивного синтеза. 31

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

Тихомиров В.П., Измеров М.А. Фрактальная модель контактного
взаимодействия слабонагруженных поверхностей 41

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

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

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 9 (171)

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. SHOHYON A.N. (Kulob,
Tajikistan)

DOI:10.30987/issn.2223-4608

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

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

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

CONTENTS

TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF METAL PROCESSING BY PRESSURE

Larin S.N., Pasyнков A.A. Hot forming of the end walls of cone body parts 3

Demin V.A. Current trends and prospects in metal forming development 10

TECHNOLOGIES OF MECHANICAL PROCESSING OF WORKPIECES

**Babaev A.S., Kozlov V.N., Savchenko N.L., Ovcharenko V.A., Belchikov I.A.,
Semenov A.R.** Chip morphology and wear process of the operating floor
of a carbide end mill in the treatment operation of inconel 625 alloy
obtained through EBAM additive technology. 19

TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

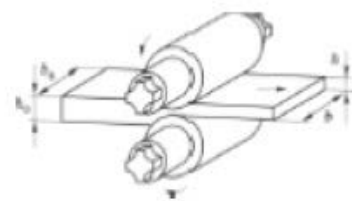
Kirichek A.V., Soloviev D.L., Barinov S.V., Fedonina S.O. Wave strain
hardening in the additive synthetic process. 31

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

Tikhomirov V.P., Izmerov M.A. Fractal model of contact interaction
for underloaded surfaces. 41

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

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



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №9 (171). С. 3-9.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №9 (171). P. 3-9.

Научная статья

УДК 621.983.3.539.376

doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-3-9

Горячее деформирование торцевых элементов корпусных конических заготовок

Сергей Николаевич Ларин¹, Д.Т.Н.

Андрей Александрович Пасынков², К.Т.Н.

^{1, 2} Тульский государственный университет, Тула, Россия

¹ mpf-tula@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9063-1548>

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

Аннотация. Переходники трубопроводных систем являются весьма востребованными деталями в узлах двигателей. В трубопроводных системах, работающих в агрессивных средах данные детали требуют применения специальных цветных сплавов, отличающихся высокой прочностью. Их изготовление весьма затруднительно. Одним из вариантов их получения является горячая штамповка элементов труб в условиях медленного формоизменения. В статье исследована операция формообразования внутреннего утолщения на тонкостенной конической корпусной заготовке. Целью формирования утолщения является подготовка торца переходника для трубопроводных систем, представляющего из себя усеченный тонкостенный под дальнейшую сварку с другими элементами трубопроводных систем. Формирование толщеного края предполагается производить частичной осадкой торца заготовки. Выполнено моделирование данной операции в программном комплексе DEFORM, в ходе которого произведена оценка влияния режимов обработки и геометрии рабочего инструмента на энергосиловые параметры процесса. Предполагается, что материалом заготовки является титановый сплав ВТ6. Применяемый материал предполагает реализацию процесса высадки в горячих условиях в скоростных условиях формообразования, обеспечивающих минимальные силы и оптимальное напряжённое состояние заготовки. При высадке важно учитывать параметры процесса, такие как давление, температура и скорость, чтобы минимизировать или избежать повреждения заготовки. Выполнен ряд опытов, в ходе которых установлено влияние угла конусности, рабочего хода инструмента, скорости деформирования контактного трения. Выявлено, что при рассматриваемой схеме деформирования наибольшее влияние оказывает изменение угла конусности заготовки на силу, что очевидно связано с изменением кинематики течения материала при больших углах конусности.

Ключевые слова: высадка, исследование, конические заготовки, моделирование

Для цитирования: Ларин С.Н., Пасынков А.А. Горячее деформирование торцевых элементов корпусных конических заготовок // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 9 (171). С. 3–9
doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-3-29

Hot forming of the end walls of cone body parts

Sergey N. Larin¹, D. Eng.

Andrey A. Pasyunkov², Ph.D. Eng.

^{1, 2} Tula State University, Tula, Russia

¹ mpf-tula@rambler.ru,

² sulee@mail.ru

Abstract. Pipeline system adapters are highly demanded parts in engine units. In pipeline systems operating in aggressive environments, these parts require the use of special non-ferrous alloys characterized by high strength. Their manufacture is very difficult. One of the options for their production is hot stamping of pipe elements under slow forming conditions. The article investigates the operation of forming an internal thickening on a thin-walled conical body blank. The purpose of forming the thickening is to prepare the end face of the adapter for pipeline systems, which is a truncated thin-walled one for further welding with other elements of pipeline systems. It is assumed that the formation of a thick edge is produced by partial upsetting of the end face of the blank. This operation was simulated in the DEFORM software package, during which an assessment was made of the effect of processing modes and the geometry of the working tool on the energy-power parameters of the process. It is assumed that the material of the blank is titanium alloy VT6. The material used assumes the implementation of the upsetting process in hot conditions under high-speed forming conditions, providing minimum forces and an optimal stress state of the workpiece. During upsetting, it is important to take into account the process parameters, such as pressure, temperature and speed, in order to minimize or avoid damage to the workpiece. A number of experiments were carried out, during which the influence of the cone angle, the working stroke of the tool, and the rate of deformation of contact friction were established. It was found that with the deformation scheme under consideration, the greatest influence is exerted by a change in the cone angle of the workpiece on the force, which is obviously associated with a change in the kinematics of the material flow at large cone angles.

Keywords: upset, research, cone blanks, modeling

For citation: Larin S.N., Pasyukov A.A. Hot forming of the end walls of cone body parts / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 9 (171). P. 3–9. doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-3-9

Формирование внутреннего утолщения на тонкостенной конической корпусной заготовке посредством операций формообразования применяется для создания участков увеличенной контактной площадью на трубных заготовках. Формирование утолщений на корпусных заготовках методом изотермической штамповки представляет собой эффективную технологию, которая позволяет создавать детали с необходимыми механическими свойствами и формой, повышая надежность и долговечность изделий. Этот метод часто применяется в специальном машиностроении и атомной, где требуется высокая прочность при малых весогабаритных характеристиках.

Выполнено моделирование данной операции в программном комплексе DEFORM, в ходе которого произведена оценка влияния режимов обработки и геометрии рабочего инструмента на энергосиловые параметры процесса. Исследование проводилось для сплава ВТ6 с постоянной температурой при деформировании 900 °С. Схема исследуемого процесса представлена на рис. 1. В процессе моделирования предполагалось использование трубных заготовок с наружными диаметрами $D = 150$ мм. Высота недеформируемого участка заготовки принималась равной $H = 12$ мм. Условием остановки расчёта

принималось достижение расстояния от рабочего торца пуансона до поверхности матрицы $h = 5$ мм. В процессе моделирования менялся коэффициент трения между инструментом и заготовкой $\mu = 0,3 \dots 0,7$, скорость перемещения деформирующего пуансона $v = 25 \dots 100$ мм/мин. Угол заготовок варьировался в интервале $\alpha = 2 \dots 7^\circ$.

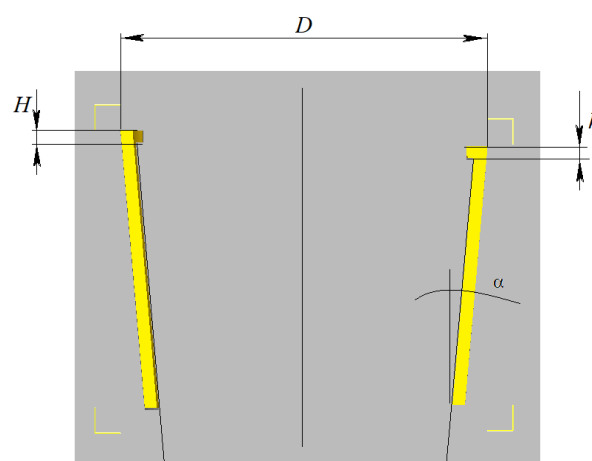


Рис. 1. Схема высадки утолщений на внутренней поверхности конических оболочек

Fig. 1. The scheme of thickening on the inner surface of cone shells

При высадке важно учитывать параметры процесса, такие как давление,

температура и скорость, чтобы минимизировать или избежать повреждения заготовки. Выполнен ряд экспериментов, в ходе которых установлено влияния угла конусности, рабочего хода инструмента, скорости деформирования контактного трения.

Была выполнена оценка изменения интенсивности напряжений для характерных точек в сечении детали в течении времени деформирования. Схемы с иллюстрированием точек для контроля изменения интенсивностей напряжений представлены на рис. 2.

Графики изменения интенсивности напряжений в этих точках в течении процесса высадки для углов конусности заготовки

$\alpha = 2^\circ$ и $\alpha = 5^\circ$ при разных скоростях деформирования представлены на рис. 3 и 4.

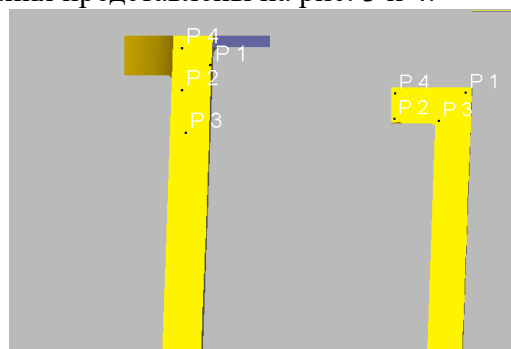


Рис. 2. Эскиз заготовки с указанием точек для контроля

Fig. 2. Sketch of the blank with the indication of the control points

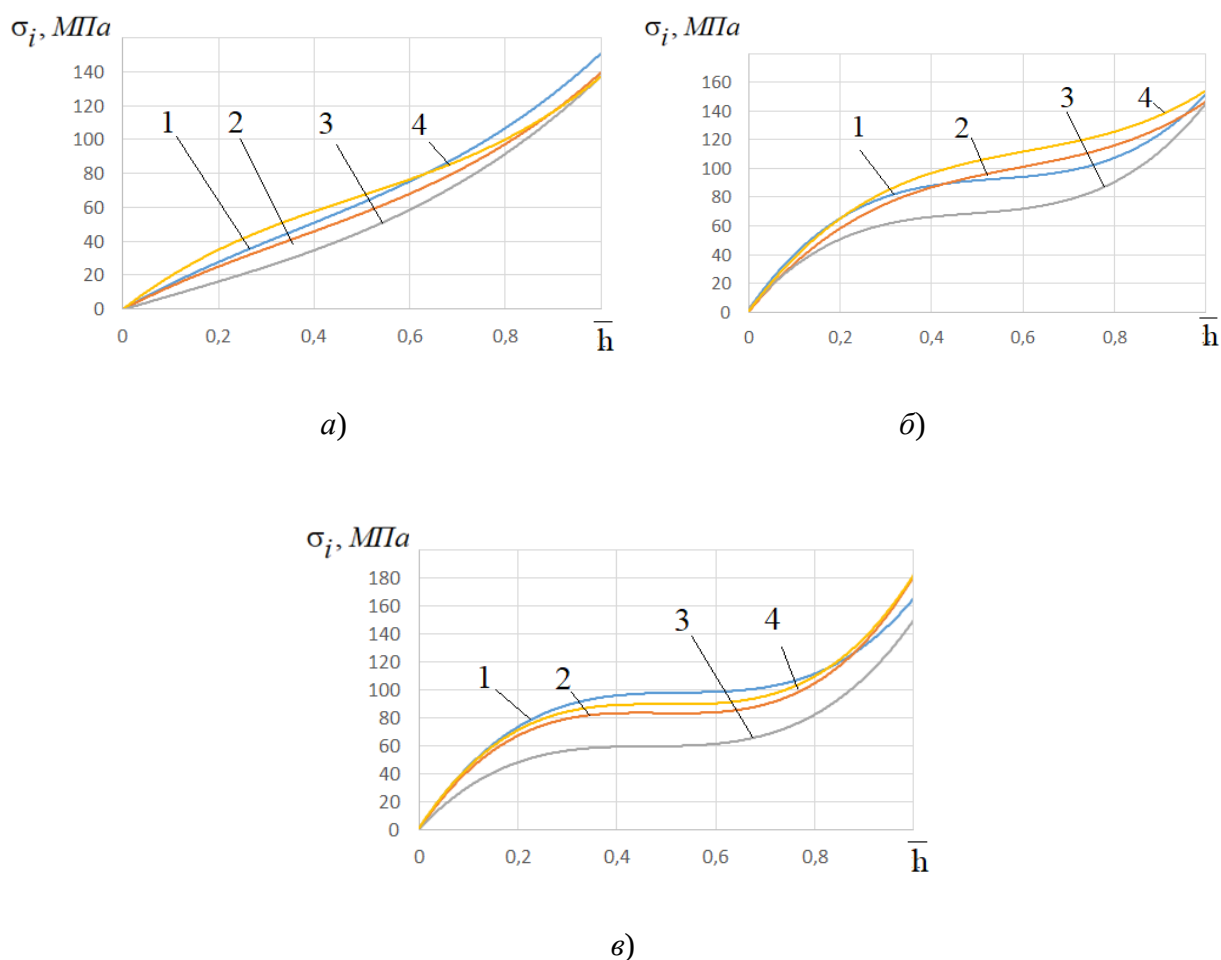


Рис. 3. График зависимости интенсивности напряжений для контрольных точек ($\alpha = 2^\circ$):
а – $v_0 = 25$ мм/мин; б – $v_0 = 50$ мм/мин; в – $v_0 = 100$ мм/мин

Fig. 3. Graph of stress intensity dependence for control points ($\alpha = 2^\circ$):
а – $v_0 = 25$ mm/min; б – $v_0 = 50$ mm/min; в – $v_0 = 100$ mm/min

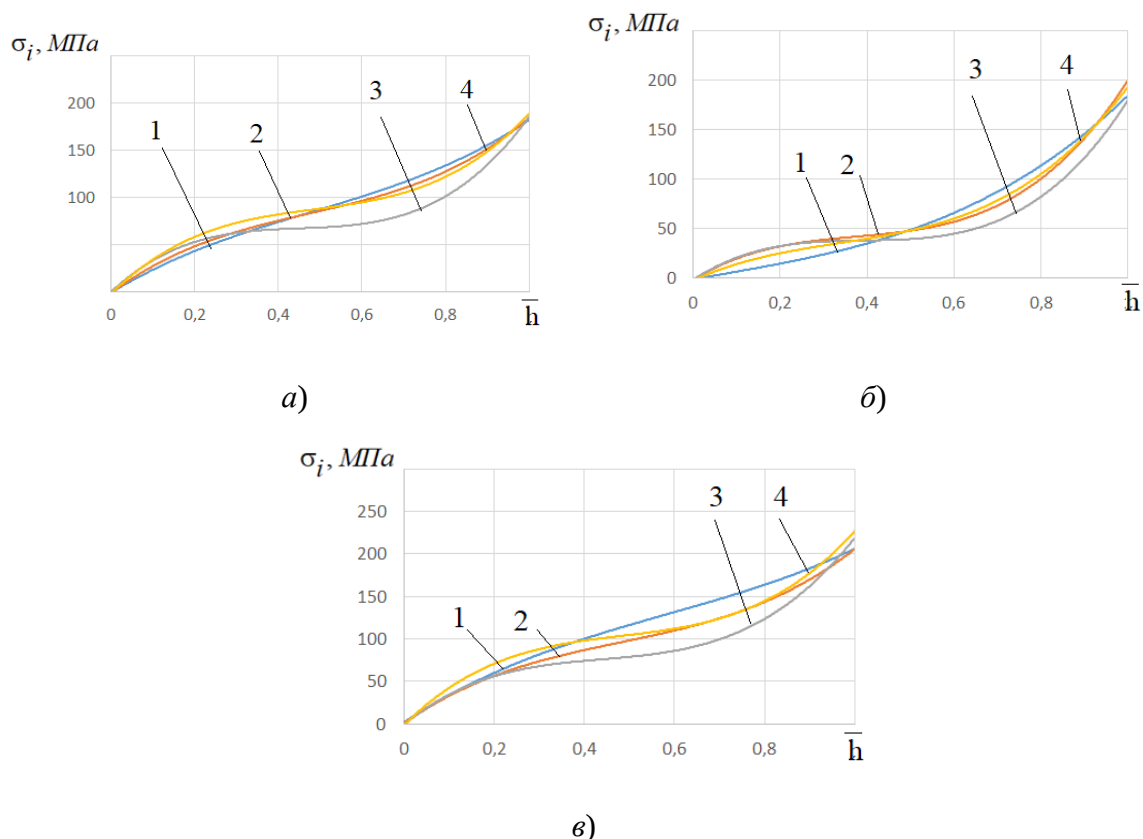


Рис. 4. График зависимости интенсивности напряжений для контрольных точек ($\alpha = 5^\circ$):
а – $v_0 = 25$ мм/мин; б – $v_0 = 50$ мм/мин; в – $v_0 = 100$ мм/мин

Fig. 4. Graph of stress intensity dependence for control points ($\alpha = 5^\circ$):
 $v_0 = 25$ mm/min; б – $v_0 = 50$ mm/min; в – $v_0 = 100$ mm/min

Как видно из графиков величины интенсивностей напряжений достигают максимума в конечный этап деформирования, и для всех 4 контрольных точек в этот момент времени деформирования их значения выравниваются. В течении всего времени деформирования значения интенсивностей напряжений в контрольных точках отличаются в зависимости от условий формоизменения на 10...40 %. В целом можно сказать, что уменьшение скорости деформирования позволяет добиться снижения неравномерности напряженного состояния в заготовке. Большим углом конусности заготовки соответствуют большие значения интенсивностей напряжений.

График зависимости максимальных величин интенсивности напряжений от угла конусности для разных скоростей деформирования на нестационарной стадии процесса представлен на рис. 5.

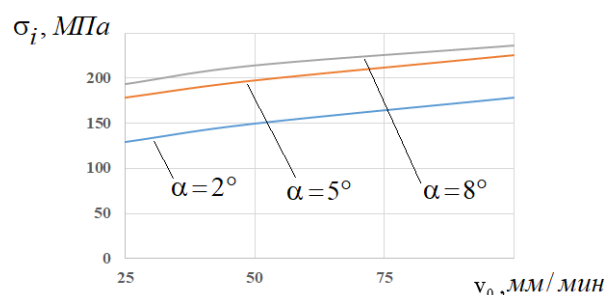


Рис. 5. График зависимости интенсивности напряжений от скорости деформирования

Fig. 5. Graph of stress intensity dependence on deformation rate

Установлено, что на нестационарной стадии процесса рост угла конусности ведет к росту интенсивности напряжений на 40 %. Увеличение скорости деформирования приводит к росту интенсивности напряжений при высадке на 28 %.

Выполнена оценка влияния скоростей деформирования, углов конусности и контактного трения на силу высадки и удельное давление.

График зависимости давления от угла конусности для разных скоростей деформирования представлен на рис. 6.

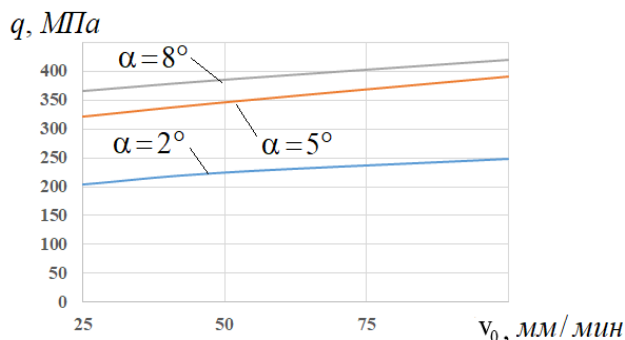


Рис. 6. График зависимости давления от скорости деформирования

Fig. 6. Graph of pressure dependence on deformation rate

Выявлено, что максимальное влияние на давление оказывает изменение скоростных режимов деформирования. Рост угла конусности ведет к росту давления на контактных границах на 20 %. Увеличение скорости деформирования приводит к росту силы при высадке на 55 %.

График зависимости силы от угла конусности для разных скоростей деформирования представлен на рис. 7.

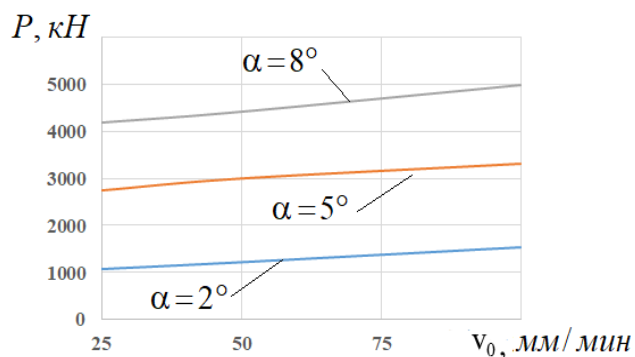


Рис. 7. График зависимости силы от скорости деформирования

Fig. 7. Graph of force dependence on deformation rate

Выявлено, что при рассматриваемой схеме деформирования наблюдается заметное влияние угла конусности заготовки на силу, что очевидно связано с интенсификацией процесса бокового выдавливания стенки, связанного с изменением характера течения материала при больших углах конусности. Установлено, что увеличение угла конусности ведет к росту силы в 4 раза, что связано с изменением схемы деформаций при росте α . Увеличение скорости деформирования приводит к росту силы при высадке на 40 %.

График зависимости силы от контактного трения для разных скоростей деформирования представлен на рис. 8. В среднем выявлено, что увеличение коэффициента трения приводит к росту силовой нагрузки на инструмент на 12...15 %.

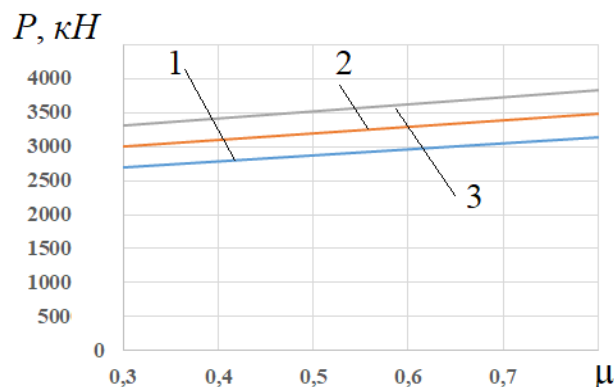


Рис. 8. График зависимости силы от коэффициента контактного трения

Fig. 8. Graph of the force dependence on the coefficient of contact friction

Полученные результаты позволяют выполнить регрессионное моделирование силовых режимов высадки конической заготовки. В качестве основных варьируемых параметров принимались скорость деформирования v_0 , мм/мин; угол конусности заготовки α и коэффициент трения μ .

Сформирована таблица факторного пространства для оценки сил (табл. 1) [12]. В табл. 2 дана матрица планирования [12].

1. Факторное пространство оценки силы

1. The factor space of force assessment

Факторы			Уровни варьирования факторов		
Наименование фактора	Натуральное значение фактора	Кодированное обозначение фактора	$X_{i \min}$	$X_{i 0}$	$X_{i \max}$
Угол конусности заготовки	α	X_1	2	4	6
Скорость деформирования	v_0	X_2	25	62,5	100
Коэффициент трения	μ	X_3	0,3	0,5	0,7

2. Матрица планирования эксперимента

2. The design experiment matrix

№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	
1	+	—	—	—	1050
2	+	+	—	—	2400
3	+	—	+	—	1400
4	+	+	+	—	2900
5	+	—	—	+	1312,5
6	+	+	—	+	3000
7	+	—	+	+	1750
8	+	+	+	+	3625

Однородность оценивается с помощью критерия Кохрана (0,29). Проверка адекватности полученных моделей выполнялось с помощью критерия Фишера (0,55). По результатам

статистического моделирования было получено уравнение регрессии в кодированных и натуральных значениях факторов соответственно:

$$Y = 2179 + 801X_1 + 239X_2 + 242X_3 + 89X_1 \cdot X_3; \quad (1)$$

$$P = 180\alpha \cdot \mu + 302,6\alpha + 256\mu - 23,41 + 7,35v. \quad (2)$$

Выполнено моделирование высадки конической заготовки, в ходе которых установлено влияние угла конусности, рабочего хода инструмента, скорости деформирования контактного трения. Выявлено, что при рассматриваемой схеме деформирования наибольшее влияние оказывает изменение угла конусности заготовки на силу, что очевидно связано с изменением кинематики течения материала при

больших углах конусности. Применение заготовок с углом конусности более 3° приводит к кратному росту сил деформирования и может потребовать более мощного оборудования. Установлено, что реализация процесса деформирования при более низких скоростях позволяет снизить силовые нагрузки на инструмент и неравномерность напряжённого состояния в заготовке.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Ковка и штамповка:** справочник: Горячая объемная штамповка / под ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. 720 с.
2. **Малинин, Н. Н.** Ползучесть в обработке металлов: учебное пособие для вузов. М.: Юрайт, 2022. 221 с.
3. **Яковлев С.П., Чудин В.Н. и др.** Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных материалов. М.: Машиностроение, 2003. 427с.
4. **Гун Г.Я.** Теоретические основы обработки металлов давлением. М.: Metallurgiya. 1980. 456 с.
5. **Колмогоров В.Л.** Механика обработки металлов давлением М.: Metallurgiya, 1986. 688 с.
6. **Теория обработки металлов давлением** / под ред. Голенкова В.А., Яковлева С.П. и др. / М. Машиностроение. 2009. 442 с.
7. **Ларин С.Н., Чудин В.Н., Пасынков А.А.** Высадка краевого утолщения на корпусах при нестационарном вязкопластическом деформировании // Цветные металлы. 2020. 7. С. 88–78.
8. **Черняев А.В., Чудин В.Н., Гладков В.А.** Изотермическое выдавливание утолщений и фланцев на осесимметричных заготовках // Заготовительные производства в машиностроении. 2021. № 4. С. 164–167.
9. **Чудин В.Н.** Горячее выдавливание внутренних ступеней на корпусах // Научные технологии в машиностроении. 2018. № 1. С. 10–13.
10. **Романов К.И.** Механика горячего формоизменения металлов. М.: Машиностроение, 1993, 240 с.
11. **Пасынков А.А., Ларин С.Н., Исаева А.Н.** Теоретическое обоснование схемы обратного изотермического выдавливания трубной заготовки с активным трением и вытяжкой ее краевой части // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. № 10. С. 462–465
12. **Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Лазарев А.А.** Активный статистический анализ систем с теоретическими моделями проведением машинного эксперимента // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2014. Вып. 5. С. 98–112.

REFERENCES

1. Forging and stamping: a reference book: In 4 volumes. Vol. 2. Hot forging / edited by E.I. Semenov. Moscow: Mashinostroenie, 2010, 720 p.
2. Malinin N.N. Creep in metalworking: a textbook for universities. Moscow: Yurait, 2022, 221 p.
3. Yakovlev S.P., Chudin V.N., et al. Isothermal deformation of high-strength anisotropic materials. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 427 p.
4. Gun G.Ya. Theoretical foundations of metal forming. Moscow: Metallurgiya, 1980, 456 p.
5. Kolmogorov V.L. Mechanics of metal forming. Moscow: Metallurgiya, 1986, 688 p.
6. Theory of metal forming / ed. et al. Golenkova V.A., Yakovleva S.P. and others / M. Mashinostroenie, 2009, 442 p.
7. Larin S.N., Chudin V.N., Pasinkov A.A. Upsetting of edge thickening on housings under non-stationary viscoplastic deformation. Non-ferrous metals, vol. 7, pp. 88–78.
8. Chernyaev A.V., Chudin V.N., Gladkov V.A. Isothermal extrusion of thicknesses and flanges on axisymmetrical workpieces. Procurement production in mechanical engineering. 2021, No. 4, pp. 164–167.
9. Chudin V.N. Hot extrusion of inner stages in housings. Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2018, No. 1. pp. 10–13.
10. Romanov K.I. Mechanics of hot forming of metals. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 240 p.
11. Pasyнков A.A., Larin S.N., Isaeva A.N. Theoretical substantiation of reverse isothermal extrusion scheme of pipe billet with active friction and drawing of its edge part // Procurement in mechanical engineering. 2020, No. 10, pp. 462–465
12. Panfilov G.V., Nedoshivin S.V., Lazarev A.A. Active statistical analysis of systems with theoretical models for the conduct of machine experiment // Izvestiya TulSU. Run: Technical sciences. Tula: Izdatelstvo TulSU, 2014, Issue 5, pp. 98–112.

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

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

Статья поступила в редакцию 04.03.2025; одобрена после рецензирования 25.03.2025; принята к публикации 16.04.2025.

The article was submitted 04.03.2025; approved after reviewing 25.03.2025; assepted for publication 16.04.2025.

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №9 (171). С.10-18.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №9 (171). P. 10-18.

Научная статья

УДК 621.7.011

doi: 10.30987/2223-4608-2025-8-10-18

Современные тренды и перспективы развития обработки металлов давлением

Виктор Алексеевич Дёмин, д.т.н.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия

va_demin@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Переходники трубопроводных систем являются весьма востребованными деталями в узлах двигателей. В трубопроводных системах, работающих в агрессивных средах данные, детали требуют применения специальных цветных сплавов, отличающихся высокой прочностью. Их изготовление весьма затруднительно. Одним из вариантов их получения является горячая штамповка элементов труб в условиях медленного формоизменения. В статье исследована операция формообразования внутреннего утолщения на тонкостенной конической корпусной заготовке. Целью формирования утолщения является подготовка торца переходника для трубопроводных систем, представляющего из себя усеченный тонкостенный под дальнейшую сварку с другими элементами трубопроводных систем. Формирование толщеного края предполагается производить частичной осадкой торца заготовки. Выполнено моделирование данной операции в программном комплексе DEFORM, в ходе которого произведена оценка влияния режимов обработки и геометрии рабочего инструмента на энергосиловые параметры процесса. Предполагается, что материалом заготовки является титановый сплав ВТ6. Применяемый материал предполагает реализацию процесса высадки в горячих условиях в скоростных условиях формообразования, обеспечивающих минимальные силы и оптимальное напряжённое состояние заготовки. При высадке важно учитывать параметры процесса, такие как давление, температура и скорость, чтобы минимизировать или избежать повреждения заготовки. Выполнен ряд опытов, в ходе которых установлено влияние угла конусности, рабочего хода инструмента, скорости деформирования контактного трения. Выявлено, что при рассматриваемой схеме деформирования наибольшее влияние оказывает изменение угла конусности заготовки на силу, что очевидно связано с изменением кинематики течения материала при больших углах конусности. Представлены результаты моделирования процессов обработки металлов давлением. Среди рассмотренных задач: изотермическая осадка кольцевой заготовки, горячая объемная штамповка корпусных заготовок из сплава ВТ6, прошивка листового металла вращающимся пуансоном, трехвалковая винтовая прокатка с углами подачи 12 и 20 °, горячая толстолистовая вытяжка сферической крышки. Показано, что использование метода конечных элементов в решение задач обработки металлов давлением позволяет учесть большее количество факторов, влияющих на процесс обработки, то есть получить более точное решение, но его можно использовать для конкретной заготовки и оснастки. Особую ценность имеют решения новых технологических задач, по которым нет ни экспериментальных, ни теоретических данных. Большое внимание уделено возможности применения гипотезы Кирхгофа-Лява к операциям листовой штамповки. Основное внимание в статье уделено горячей толстолистовой вытяжке сферических деталей. Решена задача горячей вытяжки сферической крышки контейнера из стали 10, толщиной 8 мм. Температура нагрева заготовки 1000 °. Моделирование проводили в 2D и 3D, также рассмотрены варианты с тетраэдрической и гексаэдрической сеткой. Сделан вывод, что максимальная точность расчетов получена для моделирования в 3D с тетраэдрической сеткой. Проведено моделирование отклонения формы поковки от заданной чертежом детали. Показано, для получения максимальной точности необходимо штамповать с минимально допустимой температурой в зоне фланца заготовки.

Ключевые слова: обработка металлов давлением, моделирование, QForm, горячая листовая штамповка

Для цитирования: Ларин С.Н., Пасынков А.А. Горячее деформирование торцевых элементов корпусных конических заготовок // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 9 (171). С. 10–18
doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-10-18

Current trends and prospects in metal forming development

Viktor A. Demin, D. Eng.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
va_demin@bk.ru

Abstract. Metal forming simulation data are presented. Among the tasks being viewed are the following: isothermal yield of a ring blank, drop die forging of body parts made of VT6 alloy, sheet metal piercing with a rotating plug, three-roll screw rolling with feed angles of 12 and 20 degrees, hot thick-gauge stretching of a spheroidal lid. It is shown that the use of the finite element method in solving metal forming problems makes it possible to take into account a greater number of factors affecting metal treatment, that is, to obtain a more accurate solution, which can be used for specific blanks and fitting-outs. Solutions to new process tasks, which did not have any experimental or theoretical data of particular value before, are given. Much attention is paid to the possibility of applying the Kirchhoff-Lyav hypothesis to sheet-metal forming operations. The main focus of the article is on hot thick-sheet stretching of spherical parts. The problem of hot stretch of a spheroidal container lid made of steel 10, 8 mm thick has been solved. The heating temperature of the material blank is 1000 °. The simulation was carried out in 2D and 3D, and metal treatment with tetrahedral and hexahedral grids were also viewed. It is concluded that the maximum accuracy of calculations is obtained for 3D modeling with a tetrahedral grid. The deviation of the forging shape from the detailed drawing is optimized. It is shown that maximum accuracy requires stamping with the minimum allowable temperature in the flange area of the blank.

Keywords: metal forming, simulation, QForm, hot sheet stamping

For citation: Demin V.A. Current trends and prospects in metal forming development / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 9 (171). P. 10–18. doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-10-18

Одним из основных направлений развития обработки металлов давлением является широкое применение математического методов моделирования процессов штамповки. Это позволяет существенно сократить сроки проектирования новых технологических процессов и избежать длительных сроков на доработку технологии и оснастки для получения требуемого качества заготовки.

В настоящее время, в основном, применяют два подхода для решения поставленной

задачи. Это решение поставленной задачи аналитически или численными методами.

В качестве применения аналитического метода решения поставленной задачи можно привести работу [1], в которой рассмотрен расчет изотермической осадки кольцевой заготовки. Решение выполнено с использованием энергетического метода. Схема осадки представлена на рис. 1. Оценку повреждаемости материала заготовки осуществляли по энергетическому и деформационному уравнению.

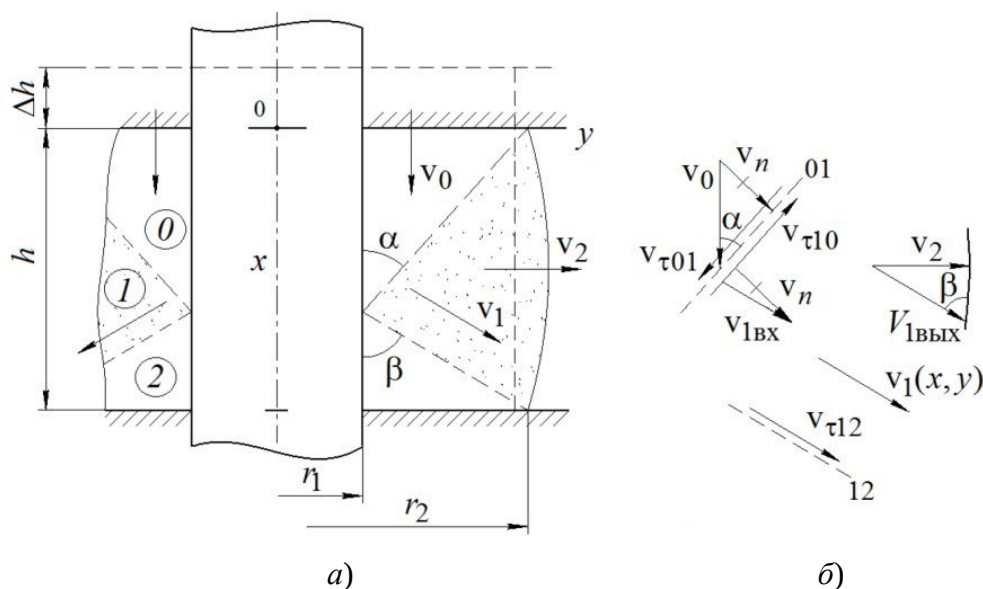


Рис. 1. Схема осадки:

a – поле; b – план скоростей перемещений материала заготовки

Fig. 1. Stretching scheme:

a – field; b – plan of the speeds of movement of the material blank

В результате решения поставленной задачи определили, что для горячей осадки при малых скоростях деформирования происходит снижение давления, и повреждаемость деформируемого материала может зависеть от скорости операции или только от степени формоизменения

Выполненное решение работает в достаточно широком диапазоне переменных параметров процесса штамповки, но при существенном упрощении поставленной задачи.

В работе [2] приведены примеры решения различных задач листовой штамповки с использованием программ QFORM, ANSYS/LS-DYNA, AutoForm. Использование численных методов позволяет получать более точное решение, но для конкретного технологического процесса с фиксированными размерами и механическими характеристиками.

В статье [3], с использованием программы Deform, проведено исследование горячей объемной штамповки корпусных заготовок из сплава ВТ6 в изотермических условиях. Решение пригодно для поковок, которые деформируются по схеме, представленной на рис. 2. Следует отметить и в этом случае решение пригодно для конкретной операции и заготовки, из сплава ВТ6.

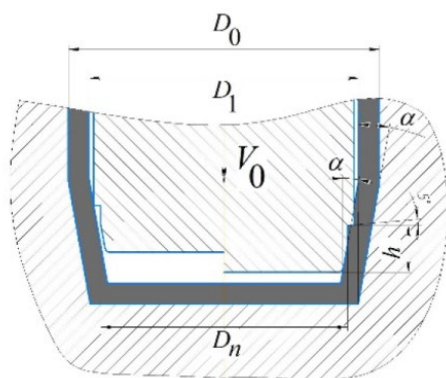


Рис. 2. Схема операции

Fig. 2. Operation diagram

Особенностью данной работы является то, что с использованием методов планирования эксперимента, проводится математический эксперимент. Это позволяет провести «эксперимент» не в трех точках каждой позиции плана, как рекомендовано в [4], а существенно увеличить количество параллельных

опытов, в каждой точке плана эксперимента. В результате получено уравнение регрессии, учитывающее возможное изменение коэффициента трения, высоты формообразующего участка и скорость перемещения пуансона.

На сегодняшний день наиболее актуально создание и эксплуатация российских программ, например, таких как QForm. Программа позволяет моделировать базовые процессы обработки металлов давлением:

- Ковка. Горячая объемная штамповка. Холодная объемная штамповка.
- Листовая штамповка – дополнение к базовому модулю.
- Прессование профилей.
- Раскатка колец.
- Термообработка – моделирование процессов изменения микроструктуры в процессе термомеханической обработки сталей, никелевых, титановых, алюминиевых и других сплавов.
- Винтовая прокатка – дополнение к базовому модулю.
- Продольная и реверсивная прокатка – дополнение к базовому модулю.

Наиболее полно программный комплекс QForm представлен в работе [4]. Основное внимание уделено особенностям конечно-элементного моделирования процессов горячей объемной штамповки иковки. Подробно рассматривается механизм пластической деформации металлов, основные положения метода конечных элементов, механика пластической деформации и температурные эффекты сопровождающие процесс штамповки. Освещены особенности применения метода конечных элементов в программе QForm.

Наиболее эффективно применение математического моделирования для изучения новых процессов обработки металлов давлением. В качестве примера можно привести работу [5], в которой рассмотрен процесс получения отверстий вращающимся пуансоном. При вращении пуансона, за счет трения, происходит нагрев заготовки и происходит горячая объемная штамповка.

Этим способом получены отверстия в заготовках из сплава ХН62ВМЮТ-ВД, который не поддается обычному сверлению. В результате математического моделирования были найдены оптимальные частоты вращения

пуансона, около 15000 об/мин, которые позволяют получить в очаге деформации температуру близкую к 1600 °С.

На рис. 1 показано изменение температурного поля в процессе прошивки. На рис. 1,

представлено начало процесса (температура 1420 °С), на рис. 1, б – середина процесса (температура 1579 °С), на рис. 1, в – конец процесса (температура 1488 °С).

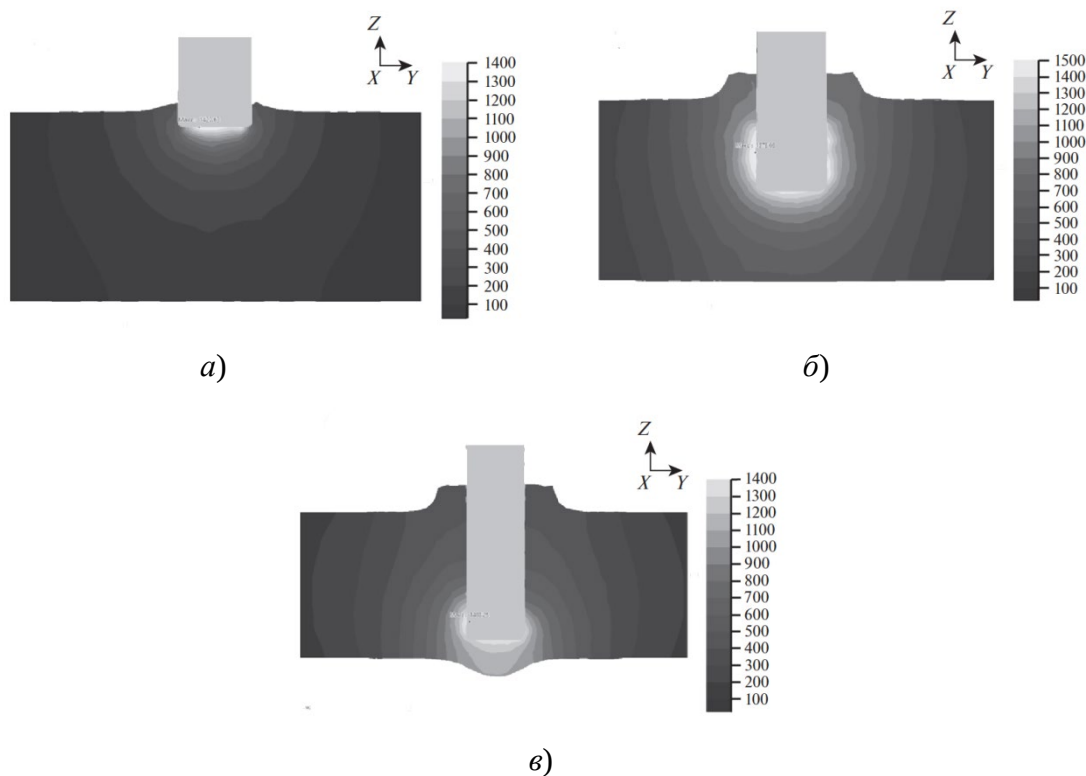


Рис. 3. Изменение температурного поля в процессе прошивки

Fig. 3. Temperature field change during the mold punching

В работе [6] приведено исследование трехвалковой винтовой прокатки с применением QForm для моделирования процессов обработки металлов давлением. Моделирование позволило провести оценку деформированного, кинематического и теплового состояния заготовки.

Моделирование провели для конкретного стана МИСИС-100 и углах подачи валков 12 и 20 °. В качестве заготовки был заложен пруток из стали 45. Скорость вращения валков 90 об/мин. Трение задано по Зибелю, фактор трения не варьировался и равнялся трем. В результате получено поле накопленной деформации по объему поковки (рис. 4). Изменение накопленной деформации по длине заготовки для различных углов подачи валов в 12 и 20 °, приведено на рис. 5.

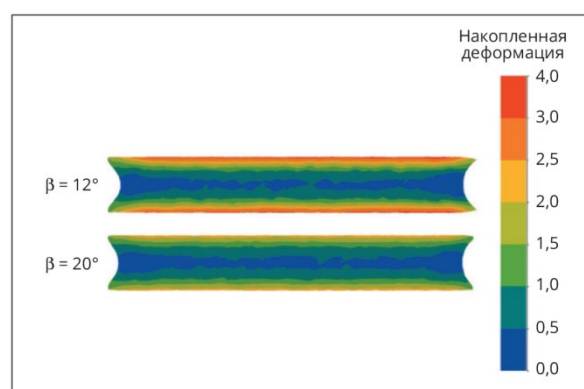


Рис. 4. Поле распределения накопленной деформации в заготовке после прокатки при углах подачи валков $\beta = 12^\circ$ и $\beta = 20^\circ$

Fig. 4. The distribution field of accumulated deformation in the blank after rolling at the angles of a roller feed $\beta = 12^\circ$ и $\beta = 20^\circ$

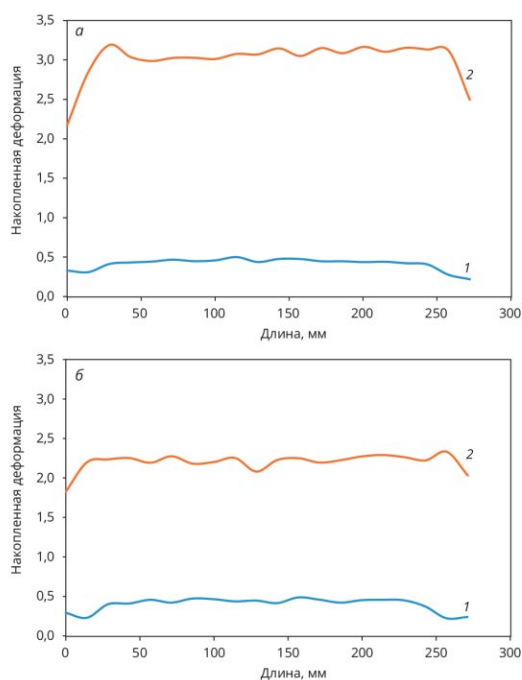


Рис. 5. Изменение накопленной деформации по длине заготовки в центре (1) и на поверхности (2) при прокатке с углом подачи валков 12° (а) и 20° (б)

Fig. 5. Change of accumulated deformation along the length of the blank in the center (1) and on the surface (2) during rolling with a roll feed angle of 12° (a) and 20° (b)

Компьютерное моделирование трехвалковой винтовой прокатки позволило получить снижение на 33 % среднеквадратического отклонения накопленной деформации и получить поковки с более однородной структурой. Изменение угла подачи валков уменьшает диапазон изменения температуры в объеме заготовки. Это особенно актуально для материалов с небольшим диапазоном ковочных температур. Однако следует отметить, что полученные результаты актуальны для стали 45, и углов подачи валков с 12 до 20° .

В последнее время российская компания ООО «КванторФорм», разработчик программы QForm, приступила к разработке программного модуля «Толстолистовая штамповка».

На сегодняшний день существуют и другие программы, например AutoForm, RAM-Stamp, для моделирования листовой штамповки. Все они моделируют процесс без учета нагрева заготовки и базируются на гипотезах Кирхгофа-Лява, которые являются

обобщением гипотезы плоских сечений теории балок в сопротивлении материалов. В учебном пособии [7] указано, что основные уравнения для анализа процессов листовой штамповки выведены с использованием технической теории оболочек, которая тоже основана на гипотезах Кирхгофа-Лява и радиусы кривизны срединной поверхности R значительно больше толщины заготовки s . В книге [8], сказано «закон плоских сечений не соблюдается, полученные на основе выводы оказываются весьма точными (если, конечно, $h/l \ll 1$), где h – максимальный размер поперечного сечения; l – длина стержня.

В соответствии с ограничениями на исходные размеры заготовки принимается в качестве заготовки поверхность нулевой толщины. Когда при построении модели штамповки в пакетах AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks происходит преобразование в лист, фактически заменяют лист на поверхность с нулевой толщиной.

Для листовой штамповки в последние годы принято, что гипотезы Кирхгофа-Лява выполняются при соотношении $R/s > 5$. Поэтому лучше использовать программу QForm для задач, когда $R/s < 5$, так как в этой программе мы можем увеличить количество элементов по толщине. При этом необходимо учитывать, что для решения поставленной задачи этой программой необходимо использовать минимум пять элементов по толщине, что, соответственно, приводит к существенному увеличению конечных элементов и времени счета.

В работе [9] рассмотрены возможности интенсификации горячей листовой штамповки днищ. Сделан вывод о том, что создание градиента температур по поверхности заготовки позволяет получить более равномерное распределение относительной деформации по толщине. Это позволяет снизить вес заготовки, обеспечить стабильность конструктивной прочности изделия. Сегодня из-за утонения заготовки в процессе штамповки, при выборе толщины заготовки к заданной толщине детали,

добавляется 15 %. Поэтому получение детали с минимальной относительной деформацией по толщине является актуальной задачей.

На рис. 6 представлено моделирование горячей листовой штамповки для сферической крышки контейнера.

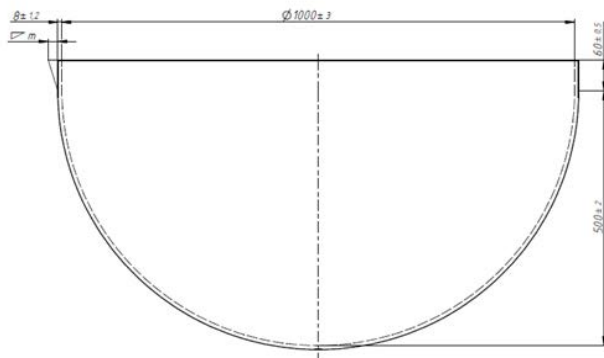


Рис. 6. Крышка контейнера

Fig. 6. Container lid

Крышка изготавливается из стали 10, толщиной 8 мм. Заготовка имеет диаметр 1500 мм. Нагрев заготовки проводился до температуры 1000 С°. Расчетный коэффициент вытяжки 1,5. Количество элементов по толщине 8.

Было проведено моделирование в 2D и 3D, промоделированы варианты с тетраэдрической и гексаэдрической сеткой, а также с нагревом всей заготовки и только поверхности, находящейся под прижимом.

Рассмотрим вытяжку при полном нагреве заготовки. Нагрев заготовки моделировали для газовой печи. Моделирование распределения температуры по детали показало, что под прижимом температура снижалась с 1000 до 600 С°. Это потребовало использование кривых упрочнения для достаточно широкого диапазона температур. С учетом того, что в дальнейшем будем нагревать только фланец, использовали кривые упрочнения в диапазоне от 30 до 1000 С°.

В результате получили следующее изменение относительной деформации по толщине (рис. 7).

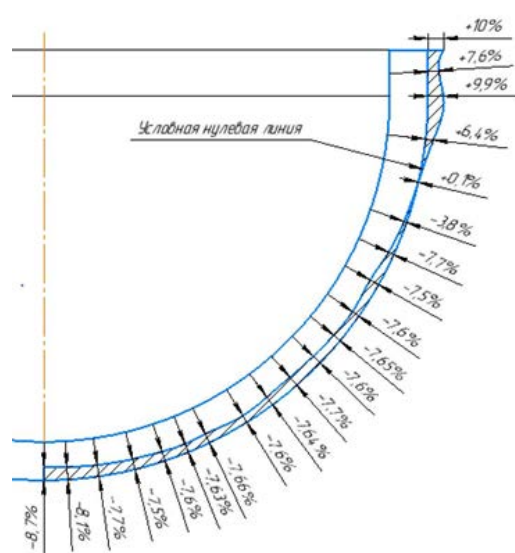


Рис. 7. Моделирование 2D при нагреве всей заготовки

Fig. 7. 2D modeling during heating of the entire blank

Результаты моделирования показывают, что максимальное утонение заготовки происходит в центре сферы и равняется 8,7 %, что не соответствует результатам замеров подобных оболочек на производстве (рис. 8).

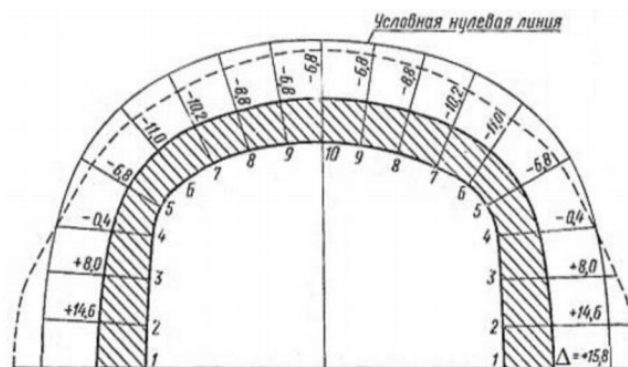


Рис. 8. Характерное относительное изменение толщины стенки днищ при горячей листовой штамповке

Fig. 8. Characteristic relative change in the wall thickness of the bottoms during hot sheet stamping

Приведем пример моделирования в 3D с тетраэдрической и гексаэдрической сеткой. В результате моделирования в 3D с гексаэдрической сеткой получили результат, показанный на рис. 9.

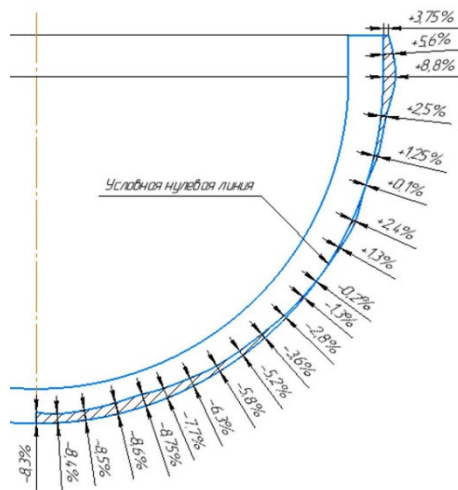


Рис. 9. Моделирование 3D с тетраэдрической сеткой при нагреве всей заготовки

Fig. 9. 3D modeling with a tetrahedral grid when the blank is heated entirely

В данном случае минимальная относительная деформация по толщине получена не по центру сферы, что лучше соответствует результатам, полученным на производстве. Однако смущает минимальное увеличение толщины на краю фланца. Здесь должно быть максимальное увеличение толщины заготовки.

Результаты моделирования 3D относительной деформации по толщине с гексаэдрической сеткой при нагреве всей заготовки показаны на рис. 10.

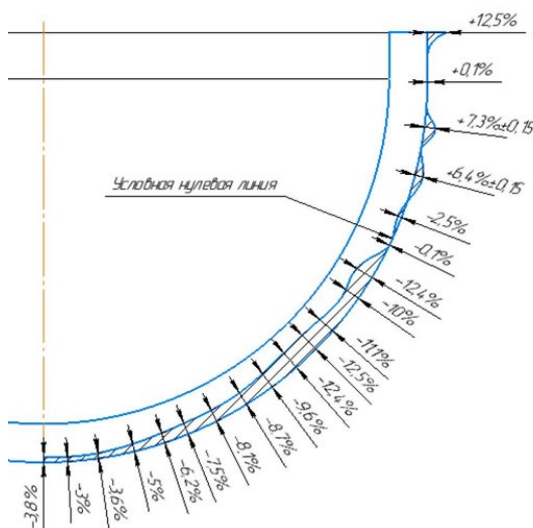


Рис. 10. Моделирование 3D с гексаэдрической сеткой при нагреве всей заготовки

Fig. 10. 3D modeling with a hexahedral grid when the blank is heated entirely

Анализ результатов моделирования показывает, что в данном случае максимальное утонение заготовки существенно сместилось от центра сферы и нет увеличения толщины на фланце. Поэтому можно сделать вывод, что лучшие результаты получены для моделирования 3D с тетраэдрической сеткой.

Рассмотрим вытяжку с нагревом только части заготовки, которая при штамповке находится под прижимом. Снова будем моделироваться в 2D и 3D варианты с тетраэдрической и гексаэдрической сеткой.

Представим два варианта местного нагрева: индукционный нагрев и газовой горелкой. Индукционный нагрев позволяет уменьшить время нагрева, что приведет к повышению производительности и уменьшению потерь на окалину. Но при нагреве происходит коробление заготовки, увеличивается зазор между заготовкой и индуктором, что приводит к существенному снижению КПД. Поэтому расчет проведен при нагреве кольцевой газовой горелкой. При этом учитывалось, что в QForm есть модуль нагрева и охлаждения спрейерами, моделирующими горелки.

Результаты моделирования вытяжки сферической детали в 2D с нагревом только фланца заготовки показаны на рис. 11.

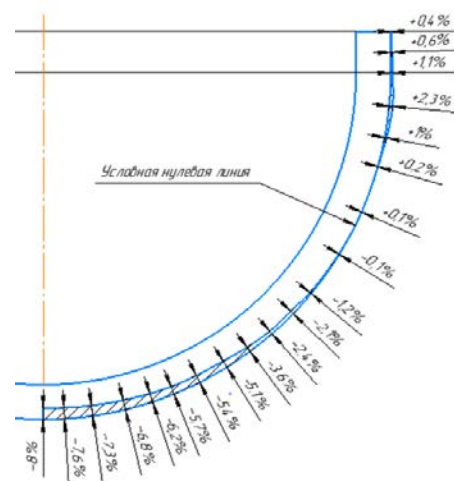


Рис. 11. Моделирование 2D при нагреве фланца заготовки

Fig. 11. 2D modeling during heating of the blank flange

В данном случае, как и при нагреве всей заготовки, максимальное утонение находится в центре сферы, что не соответствует физике процесса.

Моделирование горячей вытяжки сферической детали в 3D. Так как в QForm есть модуль моделирования нагрева спрейерами, то было проведено моделирование нагрева на участке от 1280 до 1500 мм. Была создана группа спрейеров по круговому массиву в количестве 60 шт. Получено распределение температуры в заготовке и после штамповки.

Для моделирования 3D с тетраэдрической сеткой при нагреве только фланца заготовки, получено следующее распределение относительной деформации по толщине. Результат расчета показан на рис. 12.

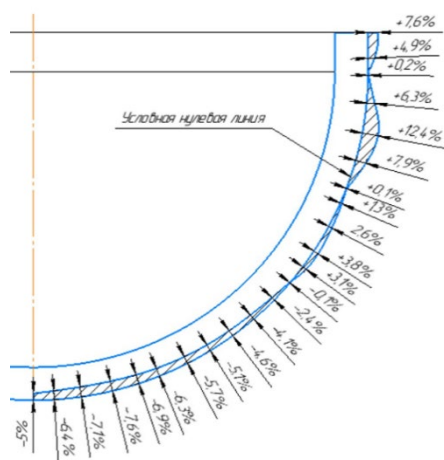


Рис. 12. Моделирование 3D с тетраэдрической сеткой при нагреве фланца заготовки

Fig. 12. 3D modeling with a tetrahedral grid during heating of the blank flange

Для гексаэдрической сетки результаты расчета показаны на рис. 13.

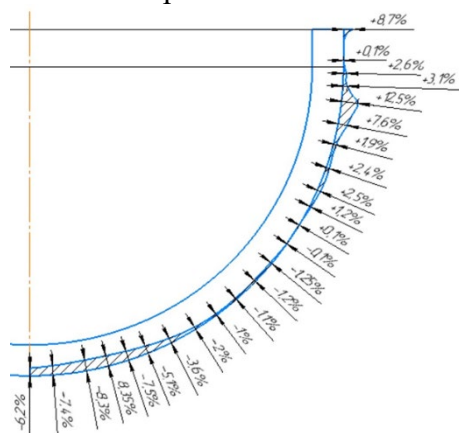


Рис. 13 Моделирование 3D с гексаэдрической сеткой при нагреве фланца заготовки

Fig. 13 3D modeling with a hexahedral grid during heating of the blank flange

Снова можно увидеть, что моделирование 3D с тетраэдрической сеткой дает результаты, которые лучше коррелируются с данными, полученными на производстве.

Одним из основных требований к поковкам подобного рода – это допуск на размеры, определяющие форму поковки. В данном случае максимальное допустимое отклонение формы 6 мм. Поэтому было проведено исследование для определения области нагрева и температуры, для обеспечения минимального отклонения формы поковки от заданной геометрии. Моделирование проводили для нагрева кольца с радиусами от 620 до 750 мм и температурах от 1000 до 500 °.

Получен результат: отклонение от формы уменьшается при снижении температуры нагрева, при температурах от 350...360 °, но составляет 8 мм, что недопустимо по техническим условиям на поковку.

В ходе последующего моделирования установлено, что при росте участка нагрева от 1180 до 1500 мм отклонение формы идёт в худшую сторону, а при нагреве до диаметра 1220 мм точность формы становится ближе к искомой. Поэтому при окончательном моделировании была уменьшена температура и варьировалась область нагрева на расстоянии около 1200 мм, что позволило получить качественную поковку.

Анализ полученных решений показывает, существенное влияние принятых при моделировании допущений на результат. Поэтому необходимо очень осторожно обращаться с параметрами технологического процесса, применяемыми в моделировании, помня выражение, что «если заложить в мельницу лебеду, мука не получится».

При применении существующих программ для моделирования процессов обработки металлов давлением необходимо учитывать достаточно большую их стоимость, которая может достигать десятков миллионов рублей. Кроме этого, на предприятии должны быть высококвалифицированные кадры, умеющие правильно применить этот очень дорогой и сложный инструмент.

В связи с этим, в развитых странах существует практика покупки «временной» лицензии, которая позволяет при появлении новой

детали провести моделирование и сэкономить существенные средства.

Другим направлением применения компьютерного моделирования может быть создание малых предприятий, которые выполняли заказы по проектированию новых технологических процессов. Основной проблемой в этом случае, с точки зрения автора, это фактическое отсутствие ответственности за предложенное решение.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Черняев А.В., Чудин В.Н. Верхнеграницный расчет изотермической осадки кольцевой заготовки // Научно-технические технологии в машиностроении. 2025. № 2 (164). С. 23–29.
2. Демин В.А. Научно-технические технологии обработки давлением в машиностроении, авиации и транспорте // Научно-технические технологии в машиностроении. 2024. № 6 (156). С. 13–20.
3. Ларин С.Н., Бессмертная Ю.В. Горячее деформирование корпусных заготовок в изотермических условиях // Научно-технические технологии в машиностроении. 2024. № 6 (156). С. 21–28.
4. Хертман К., Лецкий Э., Шефер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М.: Изд-во Мир. 1977. 552 с.
5. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки: учебное пособие / [А.В. Власов и др.]: под ред. А.В. Власова. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 383 с.
6. Бурлаков И.А., Гордин Д.Э., Мангасарян Г.А., Гладков Ю.А. Исследование влияния технологических режимов термосверления отверстий в изделиях из труднодеформируемых материалов на износ инструмента. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 1. С. 83–90.
7. Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Воронников В.А., Скрипаленко М.Н., Юсупов В.С., Андреев В.А., Рогачев С.О., Куприков М.П., Гартвиг А.А., Гладков Ю.А. Оценка деформированного, кинематического и теплового состояния стальных заготовок при трехвалковой винтовой прокатке // Сталь. 2024. № 6. С. 11–15.
8. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки: Учебное пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1977. 278 с.

9. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.

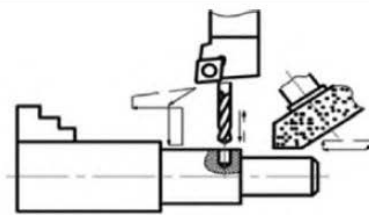
10. Демин В.А. Интенсификация горячей листовой штамповки днищ // Научно-технические технологии в машиностроении. 2023. № 12 (150). С. 9–14. 10.30987/2223-4608-2023-9-14

REFERENCES

1. Chernyaev A.V., Chudin V.N. Upper boundary calculation of isothermal yield of a ring blank // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2025, № 2 (164), pp. 23–29.
2. Demin V.A. Pressing hi-techs in mechanical engineering, aviation and transport // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2024, № 6 (156), pp. 13–20.
3. Larin S.N., Bessmertnaya Yu.V. Hot forming of box-shaped material blanks under isothermal conditions // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2024, № 6 (156), pp. 21–28.
4. Hertman K., Letsky E., Schafer V. Planning an experiment in the study of technological processes. M.: Mir. 1977, 552 p.
5. Finite element modeling of technological processes of forging and die forging: a textbook / [A.V. Vlasov et al.]: edited by A.V. Vlasov. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2019, 383 p.
6. Burlakov I.A., Gordin D.E., Mangasaryan G.A., Gladkov Yu.A. Effect of thermal drilling modes for making holes in barely deformable materials exerted on tool wear. Problems of mechanical engineering and machine reliability. 2020, № 1, pp. 83–90.
7. Romantsev B.A., Skripalenko M.M., Vorotnikov V.A., Skripalenko M.N., Yusupov V.S., Andreev V.A., Rogachev S.O., Kuprikov M.P., Hartwig A.A., Gladkov Yu.A. Evaluation of deformed, thermal and kinematic states of steel billets during three-high screw rolling // Steel. 2024, № 6, pp. 11–15.
8. Popov E.A. Fundamentals of sheet stamping theory. A textbook for universities. M.: Mechanical Engineering, 1977, 278 p.
9. Rabochnov Yu.N. Mechanics of a deformable body. M.: Nauka, 1979, 744 p.
10. Demin V.A. Hot sheet stamping of bottoms // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2023, № 12 (150). pp. 9–14. 10.30987/2223-4608-2023-9-14

Статья поступила в редакцию 20.03.2025; одобрена после рецензирования 10.06.2025; принята к публикации 19.06.2025.

The article was submitted 20.03.2025; approved after reviewing 10.06.2025; assepted for publication 19.06.2025.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №9 (171). С.19-30.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №9 (171). P.19-30.

Научная статья

УДК 621.9

doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-19-30

Морфология стружки и механизм износа рабочих площадок твёрдосплавной концевой фрезы при обработке сплава инконель 625, полученного по аддитивной технологии EBAM

Артём Сергеевич Бабаев¹, К.Т.Н.

Виктор Николаевич Козлов², К.Т.Н.

Николай Леонидович Савченко³, Д.Т.Н.

Валерия Алексеевна Овчаренко⁴, М.Н.С.

Иван Алексеевич Бельчиков⁵, М.Н.С.

Артём Романович Семёнов⁶, М.Н.С.

^{1, 2, 4, 5, 6} Томский государственный университет, Томск, Россия

³ Институт физики прочности и материаловедения
Сибирского отделения РАН, Томск, Россия

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

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

³ savnick@ispms.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8254-5853>

⁴ vy.gornova@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-4797-5604>

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

⁶ artems2102@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8663-4877>

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных исследований морфологии стружки и механизма износа, возникающих при фрезеровании сплава инконель 625, полученного по аддитивной технологии Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM). Образец был получен из проволоки на экспериментальной установке с применением отработанных технологических режимов. С использованием аттестованного аналитического оборудования произведено изучение микроструктуры и физико-механических характеристик образца из инконель 625. В качестве режущего инструмента были использованы твёрдосплавные концевые фрезы, обработка велась без смазочно-охлаждающей жидкости по схеме встречного фрезерования поперёк направления синтеза при аддитивном производстве. В ходе экспериментов отбирали стружку, которую затем исследовали с применением сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) и оборудования для рентгеноструктурного анализа (РСА). Наблюдением и анализом внешнего вида стружки при различных увеличениях отмечено изменение её формы и увеличение степени пластической деформации в зависимости от интенсификации режимов резания. Подробное исследование на СЭМ прирезовкой стороны стружки показало, что с повышением режимов резания наблюдается усиленный перенос зёрен инструментального материала WC на поверхность стружки, что является показателем ускоренного износа и преждевременного выхода из строя режущих кромок за счёт разупрочнения кобальтовой связки. Также при изучении режущих кромок фрезы методом РСА были обнаружены сложный карбид Cr₂₃C₆ и интерметаллид NiW, которые приводят к интенсификации износа рабочих площадок фрезы. Изучение особенностей износа рабочих площадок режущих инструментов и формируемой в процессе обработки стружки позволяет выработать рекомендации по повышению износостойкости и определению рациональных режимов эксплуатации.

Ключевые слова: EBAM, фрезерование, инконель 625, стружка

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., Савченко Н.Л., Овчаренко В.А., Бельчиков И.А., Семёнов А.Р. Морфология стружки и механизм износа рабочих площадок при фрезеровании сплава инконель 625, полученного по аддитивной технологии EBAM // Научно-технические технологии в машиностроении. 2025. № 9 (171). С. 19–30. doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-19-30

Chip morphology and wear process of the operating floor of a carbide end mill in the treatment operation of inconel 625 alloy obtained through EBAM additive technology

Artyom S. Babaev¹, PhD Eng.
Viktor N. Kozlov², PhD Eng.
Nikolai L. Savchenko³, PhD Eng.
Valeria A. Ovcharenko⁴, JRF
Ivan A. Belchikov⁵, JRF
Artem R. Semenov⁶, JRF

^{1, 2, 4, 5, 6} Tomsk State University, Tomsk, Russia;

³ Institute of Strength Physics and Materials Science Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

¹ a.s.babaev@mail.tsu.ru

² kozlov-viktor@bk.ru

³ savnick@ispms.ru

⁴ vy.gornova@yandex.ru

⁵ ivan70422@gmail.com

⁶ artems2102@yandex.ru

Abstract. The paper presents the results obtained in experimental studies of chip morphology and wear process that occur during milling of inconel 625 alloy obtained through additive technology Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM). The sample was obtained from a wire in a pilot installation using proven technological modes. The microstructure and physical and mechanical characteristics of the inconel 625 sample were studied using certified analytical equipment. Carbide end mills were used as a cutting tool, machining was carried out with no coolant according to the counter milling operation across the synthesis direction in additive manufacturing. During the experiments, chipping was selected, which was examined after that using a scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction analysis (XRD) equipment. Observation and analysis of chipping at various magnifications showed a change in its shape and an increase in the degree of yield strain depending on the intensification of cutting modes. A detailed study with the help of SEM for the cutting side of the facing showed that with increasing cutting modes, increased grain transfer of WC tool material to the facing surface is observed. This is an indicator of accelerated wear and premature failure of the cutting edges due to softening of the cobalt binding agent. Also, when studying cutting edges of the milling cutter using the XRD method, complex Cr₂₃C₆ carbide and NiW intermetallic compound were found. They contribute to increased wear on the milling cutter operating floors. The study of the wear characteristics of the operating floors of cutting tools and facing formed within machining operation allows making recommendations for improving wear resistance and determining rational operating modes.

Keywords: EBAM, milling, inconel 625, chipping/facing

Acknowledgments: 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., Savchenko N.L., Ovcharenko V.A., Belchikov I.A., Semenov A.R. Chip morphology and wear process of the operating floor of a carbide end mill in the treatment operation of inconel 625 alloy obtained through EBAM additive technology / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 9 (171). P. 19–30. doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-19-30

Введение

Технология аддитивного электро-лучевого производства заготовок (Electron beam additive manufacturing, далее – EBAM) из проволоки имеет широкое распространение среди класса методов прямого подвода энергии и материала из-за технологической простоты реализации процесса [1]. Основной принцип работы заключается в выращивании образцов, например, из проволоки, где в качестве

источника нагрева используется электронный пучок. Высокая стабильность интенсивности мощности пучка позволяет расплавлять проволоку, подаваемую в зону нагрева [2, 3]. Технология EBAM широко применяется в различных отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая, двигателе- и автомобилестроение [4]. Однако сложные явления, возникающие из-за колебаний полей температуры и, как следствие, меняющиеся условия течения

расплава, сказываются на нерегулярности микроструктуры, формирующейся при дальнейшей кристаллизации [5]. Это приводит к неизбежному формированию анизотропии характеристик. Высокая твердость, низкая теплопроводность и неоднородные физико-механические характеристики, получаемые в процессе ЕВАМ, представляют значительные проблемы для дальнейшей обработки заготовок с использованием субтрактивных методов лезвийной обработки, таких как точение, сверление, фрезерование [6, 7].

Суперсплавы на основе никеля обладают хорошей термостойкостью и, следовательно, сохраняют высокую прочность, твердость, вязкость и коррозионную стойкость при повышенных температурах [8, 9]. В процессе обработки низкая теплопроводность приводит к тому, что температура резания передней поверхности достигает 1200 °С и более [10]. Более того, химическое сродство материалов и высокая твердость карбидов, входящих в состав никелевых сплавов, усиливают износ инструмента и влияют на качество заготовки [11, 12]. Суперсплавы на основе никеля обычно обрабатываются при скоростях резания не более 50...100 м/мин с использованием инструментов из твердого сплава без покрытия [12]. Например, авторы работы [13] провели экспериментальное исследование высокоскоростного сухого точения Inconel 718 твердосплавным инструментом (K20) и обнаружили, что износ инструмента в основном был обусловлен абразивным износом и пластической деформацией при увеличении скорости резания с 40 до 50 м/мин. Сцепляющийся слой, образованный на поверхности инструмента, предотвращал абразивный износ, но усиливал износ, вызванный диффузией элементов.

Целью работы является описание особенностей формирования морфологии стружки и наблюдений износа режущих кромок твердосплавных (система WC-Co) концевых фрез, возникающего при фрезеровании сплава инконель 625, полученного методом проволоочной электронно-лучевой аддитивной технологии.

Материалы и методы

Образец для проведения исследований был получен по аддитивной технологии ЕВАМ на лабораторной установке. В качестве исходного материала использовали проволоку диаметром 1,2 мм марки OKAutrodNiCrMo-3

фирмы ESAB (Швеция). Образец получали на листе толщиной 5 мм из стали марки 12X18H10T, служащим в качестве подложки. Режимы синтеза были подобраны экспериментальным путём с учётом ранее проведённых исследований [14]. В данном случае ускоряющее напряжение составляло 30 кВ, а ток электронного луча 60 мА. Сфокусированный луч перемещался по круговой развертке диаметром 6 мм, а скорость печати (перемещение стола с подложкой) составляла 300 мм/мин. Таким образом, был получен образец-заготовка, из которого путём электроэрозионной проволоочной резки получали образец 50×50×16 мм (рис. 1).

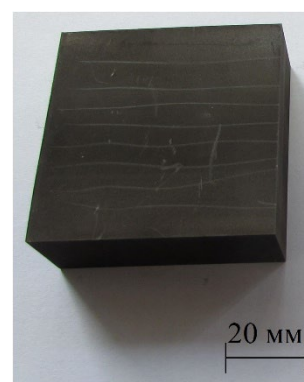


Рис. 1. Образец после электроэрозионной резки

Fig. 1. Sample after electroerosion cutting

В процессе проведения работ по фрезерованию на различных режимах отбирали стружку, изношенные фрезы и их осколки, которые затем исследовали с применением методов рентгеноструктурного анализа (РСА) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Идентификация фаз заготовки и фрез в исходном состоянии, а также на поверхности стружки и отработанных режущих кромок фрез выполнялась на рентгеновском дифрактометре модели ДРОН-8Н фирмы НПП «Буревестник» (г. Санкт-Петербург) с использованием излучения $\text{CuK}\alpha$ с шагом $0,05^\circ$ и временем выдержки 20 с на шаг. Получение снимков с высоким контрастом и разрешением проводили на растровом электронном микроскопе модели MIRA 3 LMU фирмы Tescan (Чехия), оснащённым приставкой для энергодисперсионного микроанализа (EDX) с безазотным детектором мод. Ultim MAX 40. Для определения микроструктуры, химического состава и свойств

исходного образца использовали стандартизованные методики пробоподготовки, а также аналитическое оборудование: металлографический микроскоп моели. AxioObserver A1.m фирмы Carl Zeiss (Германия); портативный рентгено-флуоресцентный анализатор S1 TITANSPX фирмы Bruker (США); стационарный микротвердомер Durascan-10 и универсальную испытательную машину 50ST фирмы Tinius Olsen (США).

В качестве режущего инструмента использовались твёрдосплавные концевые фрезы У608 12-18-74-1, производства компании ООО «ПК МИОН» (г. Томск). Инструменты были

изготовленные из твёрдого сплава марки Н10F ($\approx 89,4$ % масс. WC, до 0,6 % масс. смешанных карбидов и около 10,0 % масс. Со в качестве связки; размер зерна карбидной фазы 0,5...0,6 мкм, предел прочности при изгибе ≈ 3200 МПа, а твёрдость HRA 92 без покрытия).

Работы по фрезерованию проводили на фрезерном станке мод. DMU 50 фирмы DMG MORI (Япония) без подачи смазочно-охлаждающей жидкости. Фрезерование выполняли поперёк направления подачи, заданной при получении образца по аддитивной технологии. Использовали схему встречного фрезерования (рис. 2).

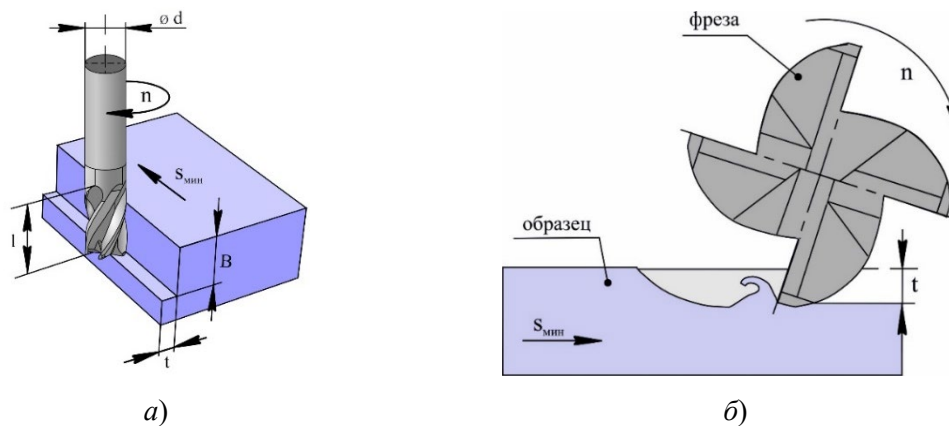


Рис. 2. Схематическое изображение параметров фрезерования:

а – аксонометрическая проекция; б – вид сверху

Fig. 2. Diagramming of milling parameters:

а – axonometric projection; б – top view

Принятые в настоящей работе режимы фрезерования, указанные в таблице 1, были получены опытным путём в ходе проведения предварительных работ. Ограничением в

выборе режимов являлась преждевременная поломка зубьев или самих фрез при работе в течение первых 10 с.

1. Режимы фрезерования инконель 625

1. Inconel 625 milling modes

№ опыта	Частота вращения фрезы n , об/мин	Скорость резания v , м/мин	Минутная подача $S_{\min}$, мм/мин	Глубина резания t , мм	Ширина резания B , мм	Объём срезанной стружки Q , мм ³ /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

Отбор стружки в зависимости от режимов фрезерования осуществляли после наступления установившегося резания, т.е. вхождения всех зубьев фрезы в образец. Отбор изношенных фрез или осколков их рабочих элементов осуществляли в случае смены режима обработки, а также при поломке в ходе испытаний на режимах, близких к критическим.

Результаты и обсуждение

Фазовый состав образца, полученного по аддитивной технологии ЕВАМ, представлен на рис. 3. Пики дифракции, наблюдаемые при $43,5^\circ$, $50,5^\circ$, $74,5^\circ$ и $90,5^\circ$ на рентгенограмме образца инконель 625 в состоянии до фрезерования соответствуют кристаллографическим плоскостям (111), (200), (220) и (311) твердого раствора γ -Ni. Таким образом, γ -Ni является базовой фазой образца.

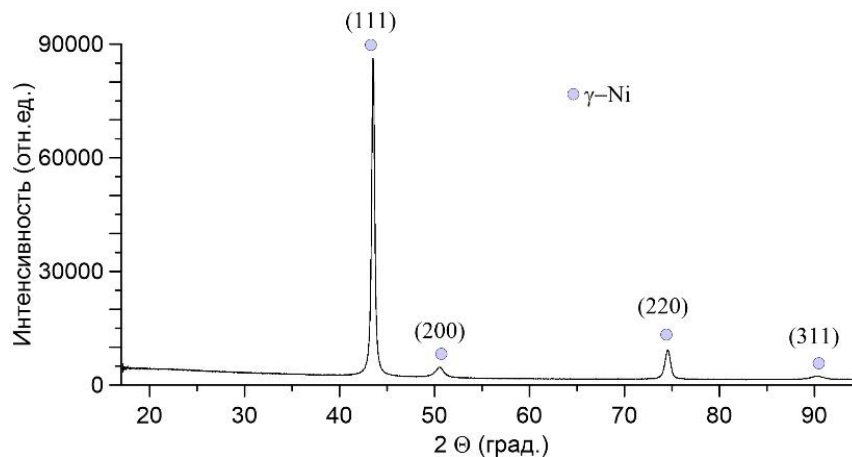


Рис. 3. Рентгенограмма образца инконель 625 в состоянии до фрезерования

Fig. 3. X-ray image of the inconel 625 sample in the pre-milling state

Фазовый состав режущих кромок новой фрезы представлен двумя фазами: WC и Co (рис. 4).

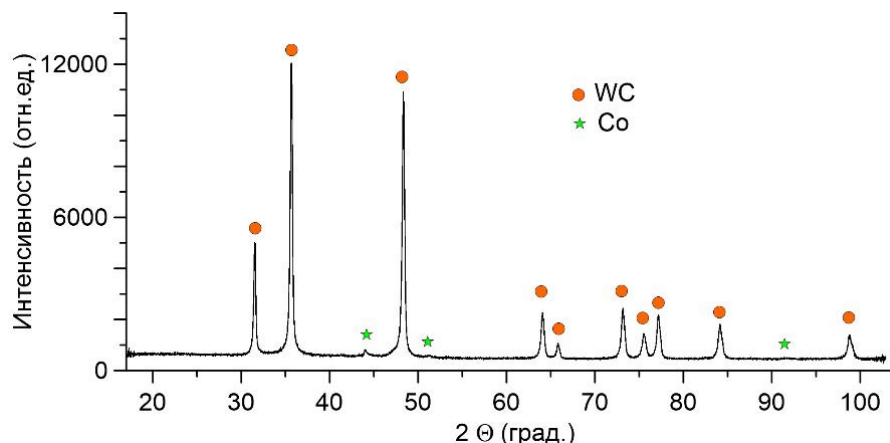


Рис. 4. Рентгенограмма поверхности режущих кромок фрезы до фрезерования

Fig. 4. X-ray of the surface of the milling cutter edges before milling

Фрагмент микроструктуры и карты распределения химических элементов в образце из инконель 625 в исходном состоянии показан на

рис. 5. Темные области на рис. 5 а, б являются границами дендритов γ -Ni, появившиеся после химического травления.

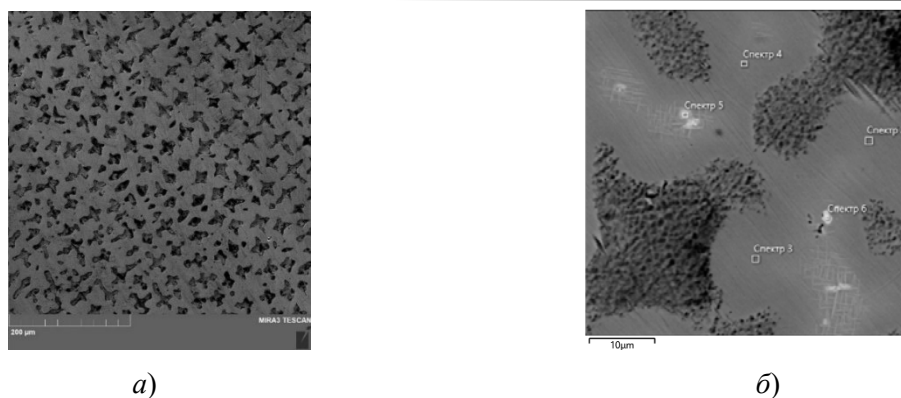


Рис. 5. Фрагмент микроструктуры образца инконель 625:
а – 500×500 мкм; б – 50×50 мкм

Fig. 5. Microstructure fragment of inconel 625 sample:
a – 500×500 microns; b – 50×50 microns

Результаты химического анализа подтверждают соответствие синтезированного образца сплаву марки ХН75МБТЮ (аналог инконель 625) по требованиям, предъявляемым ГОСТ 5632-2014 «Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки».

Механические свойства заготовки инконель 625 после испытаний на растяжение образцов, вырезанных перпендикулярно направлению аддитивного послойного выращивания, приведены в табл. 2.

2. Некоторые механические свойства образца из инконель 625

2. Some mechanical properties of a sample made of Inconel 625

Предел выносливости σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Твёрдость HV, МПа
640 ± 20	144 ± 14	56 ± 3	200...246

Рассмотрим подробнее микрофотографии и морфологию характерных стружек

(рис. 6), полученных при фрезеровании на режимах из табл. 1.

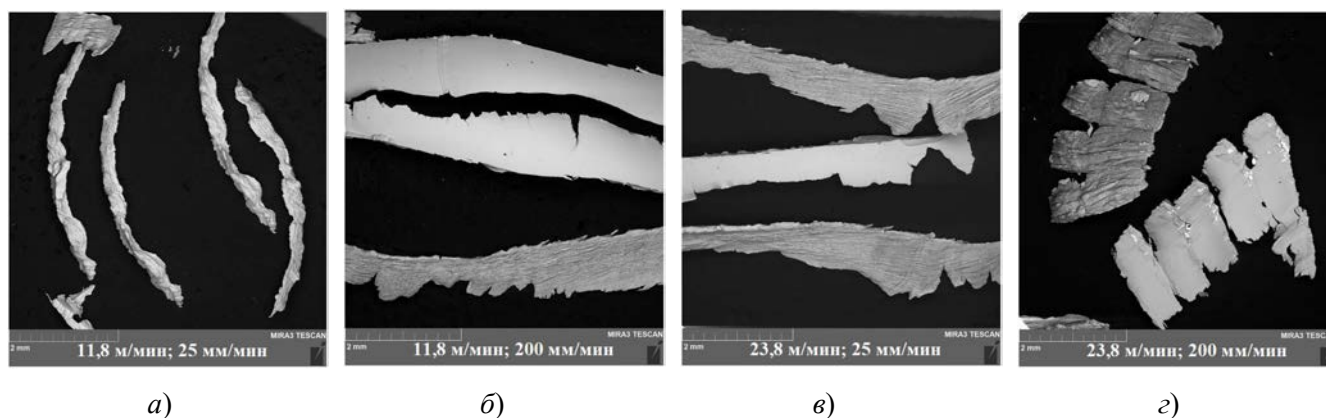


Рис. 6. Микрофотографии стружек, полученных на различных режимах фрезерования

Fig. 6. Micrographs of facing obtained in various milling modes

При малой скорости резания 11,8 м/мин ($n = 315$ об/мин) при минутной подаче 25 мм/мин (подача на зуб $S_z = 0,02$ мм/зуб) происходит образование стружки длиной $l_{\text{стр}} \approx 0,3$ мм, измеряемой в поперечном направлении перпендикулярно к главной режущей кромке зуба фрезы (рис. 6, а). По ширине стружка делится на достаточно длинные части ($b_{\text{стр}} \approx 4,5$ мм), но которые меньше ширины фрезерования $B = 7$ мм и длины контакта зуба фрезы с вертикальной поверхностью ($l_{\text{конт.полн}} = \frac{B}{\sin \omega} = 10,9$ мм). Эта ширина стружки определяется длиной контакта главной режущей кромки с вертикальной поверхностью заготовки углом наклона винтовой канавки фрезы $\omega = 40^\circ$, величиной подачи на зуб S_z при небольшой глубине фрезерования $t = 1$ мм, что приводит к уменьшению ширины контакта с одним зубом с шириной фрезерования B до $b_{\text{стр}}$ (рис. 7).

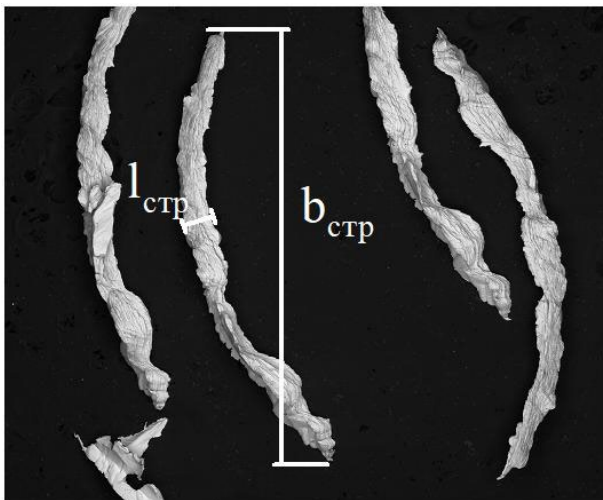


Рис. 7. Схемы для определения основных параметров стружки

Fig. 7. Diagrams for determining the main parameters of facing

При увеличении минутной подачи до 200 мм/мин (подача на зуб $S_z = 0,159$ мм/зуб) происходит образование более длинной стружки $l_{\text{стр}} \approx 1$ мм, а ширина увеличивается до $b_{\text{стр}} \approx 10$ мм (рис. 6, б). По ширине стружка не делится на части, но на некоторых стружках появляются глухие трещины,

предшествующие разделению стружки на части по ширине.

При увеличении скорости резания до 23,8 м/мин ($n = 630$ об/мин) при малой минутной подаче 25 мм/мин (подача на зуб при этом уменьшается до $S_z = 0,01$ мм/зуб) происходит образование стружки длиной $l_{\text{стр}} \approx 0,55$ мм (рис. 6, в), что в 1,8 раза больше, чем при той же подаче, но с меньшей скоростью резания 11,8 м/мин (рис. 6, а). Это явление увеличения длины стружки при уменьшении подачи на зуб может быть объяснено увеличением пластичности обрабатываемого материала инконель 625 в зоне резания вследствие увеличения температуры, вызванного увеличением скорости резания в 2 раза. Если при меньшей скорости резания стружка сворачивается в трубочку (что затрудняет измерение её истинной длины, но облегчает её удаление из зоны резания), то с увеличением скорости резания этого уже не происходит. По ширине стружка имеет глубокие глухие трещины, но деление её на отдельные части ещё не наблюдается.

При увеличении минутной подачи до 200 мм/мин при скорости резания 23,8 м/мин (подача на зуб $S_z = 0,08$ мм/зуб) происходит образование более длинной стружки $l_{\text{стр}} \approx 1,55$ мм, а по ширине стружка делится на отдельные почти одинаковые части длиной 0,6 мм, слабо связанные между собой (рис. 6, г). Такое явление может вызывать уменьшение силового взаимодействия с передней поверхностью зуба фрезы. Но увеличение стружки по длине и исчезновение явления её скручивания вызывает ухудшение размещения стружки в стружечной канавке, что при дальнейшем увеличении скорости резания или подачи приводит к пакетированию стружки в стружечной канавке, привариванию её к передней поверхности и выходу инструмента из строя [15].

Сторона стружки, обратная прирезцовой, представляет собой типичную складчатую картину, формирующуюся при значительной пластической деформации (рис. 8). Наблюдается тенденция к увеличению складчатости с ростом скорости резания и подачи.

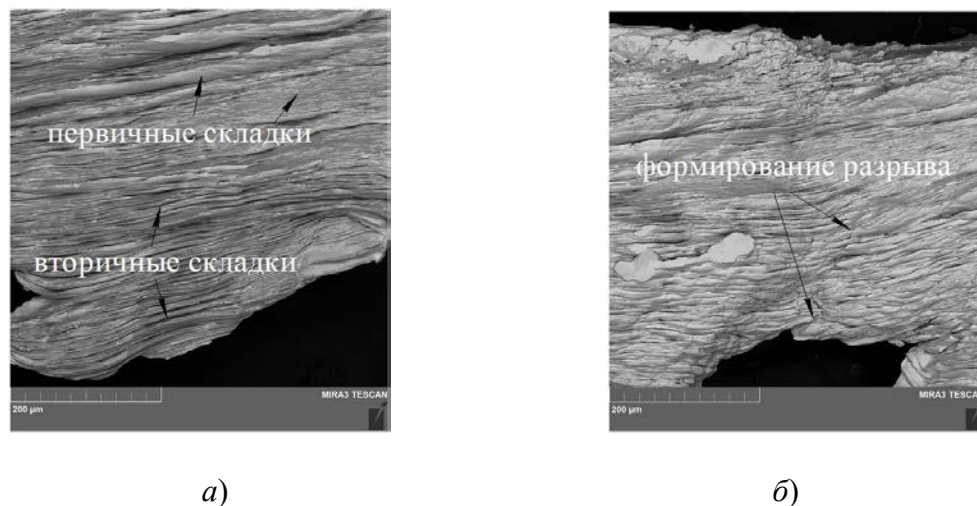


Рис. 8. Микрофотографии СЭМ стружки:

a – образование складчатых структур; *б* – формирование и развитие магистральной трещины

Fig. 8. Micrographs of SEM facing:

a – formation of folded structures; *b* – formation and development of the main crack

При рассмотрении поверхностей стружек на СЭМ с применением EDX при больших увеличениях на прирезцовой стороне были обнаружены участки с содержанием зерен WC, внедрённых в поверхность (рис. 9). С увеличением режимов фрезерования на поверхности стружек обнаруживаются достаточно крупные

включения (до 120 мкм и более) частиц инструментального материала. Это косвенно указывает на адгезионно-усталостный износ, при котором высокие температуры и напряжения приводят к разупрочнению кобальтовой связки и переносу зёрен WC.

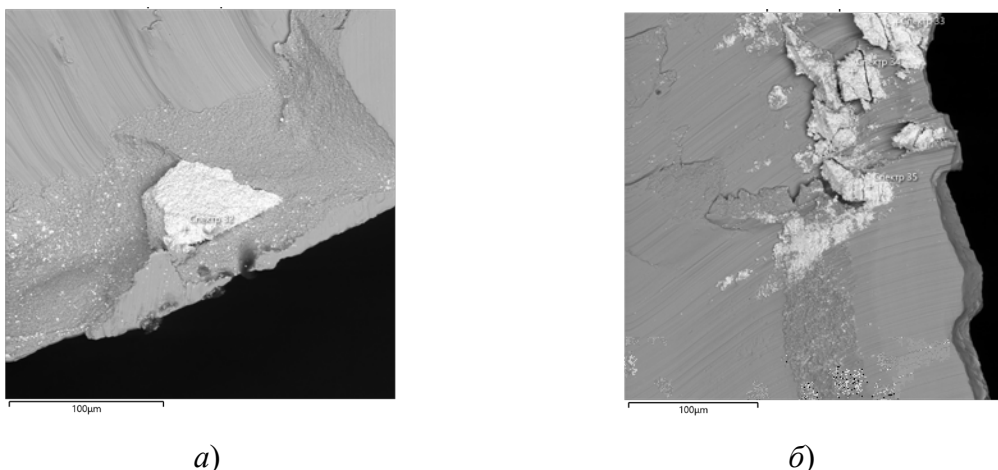


Рис. 9. Микрофотографии СЭМ и EDX прирезцовой поверхности стружки при скорости резания 23,8 м/мин и подаче 80 мм/мин (а) и 200 мм/мин и подаче 200 мм/мин (б)

Fig. 9. SEM and EDX micrographs of the chip cutting surface at a cutting speed of 23,8 m/min and a feed of 80 mm/min (a) and 200 mm/min and a feed of 200 mm/min (b)

РСА режущих кромок фрезы после фрезерования показал, что кроме исходных фаз WC и Co они содержат фазы, формирующиеся в результате термомеханического взаимодействия химических элементов фрезы с

элементами заготовки инконеля 625. Эти фазы включают в себя сложный карбид Cr_{23}C_6 и интерметаллид NiW (рис. 10, а), а также большое скопление налипшей стружки на рабочие площадки фрезы (рис. 10, б, в).

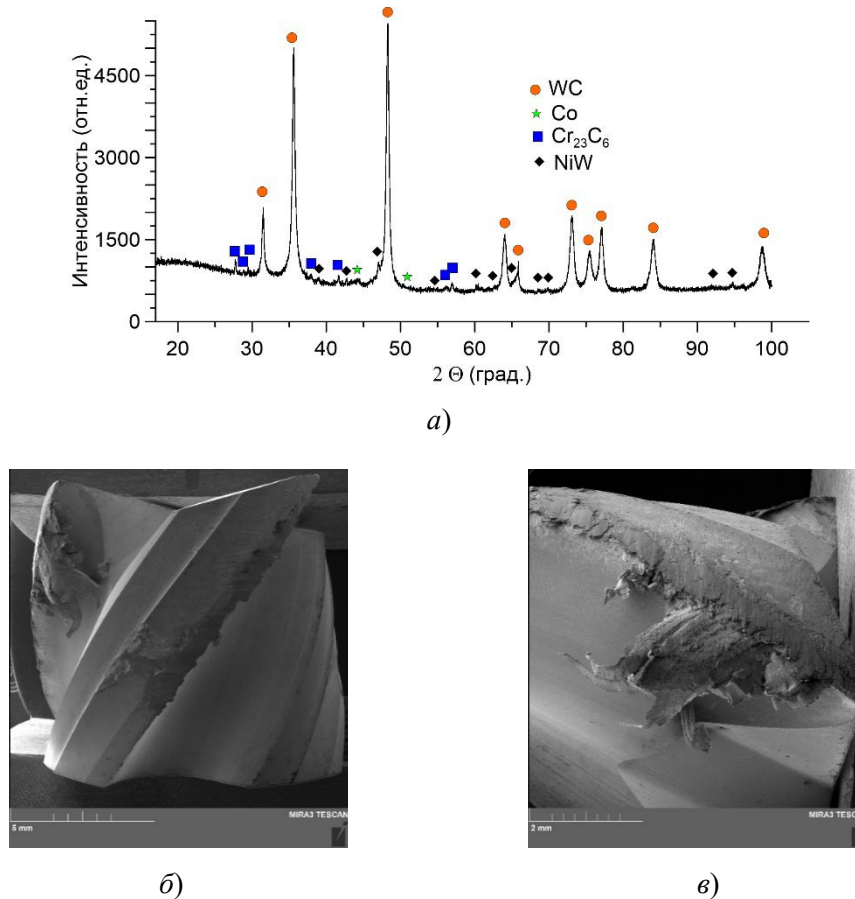


Рис. 10. Рентгенограмма (а) и микрофотографии СЭМ (б, в) режущих кромок фрезы после фрезерования

Fig. 10. X-ray (a) and SEM micrographs (b, c) of the cutting edges of the milling cutter after milling

Для исследований возможных структурно-фазовых превращений обрабатываемого материала при высоких температурах и деформациях проводили РСА стружки, полученной

при различных скоростях резания и подачах, а также обработанной поверхности образца (рис. 11).

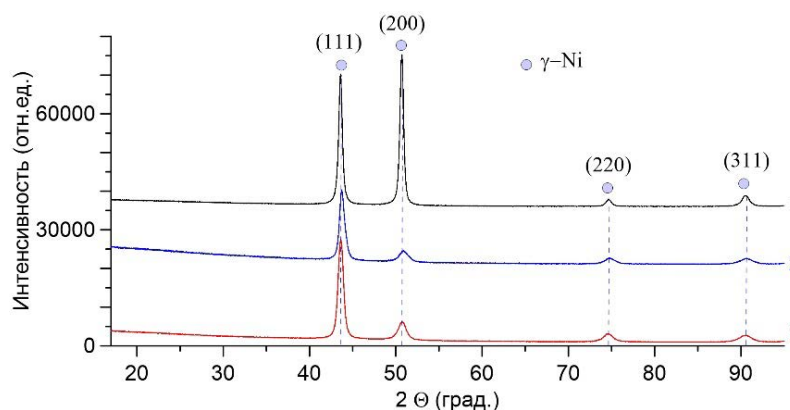


Рис. 11. Рентгенограммы:

1 – инконель 625 после фрезерования, 23,8 м/мин, 200 мм/мин; 2 – стружка, полученная при 11,8 м/мин, 200 мм/мин; 3 – стружка, полученная при 11,8 м/мин, 25 мм/мин

11. X-ray images:

1 – inconel 625 after milling, 23,8 m/min, 200 mm/min; 2 – chipping obtained at 11,8 m/min, 200 mm/min; 3 – chipping obtained at 11,8 m/min, 25 mm/min

На поверхности заготовки после фрезерования и в стружках, полученных при режимах 2 и 3 (рис. 11) методом РСА не было обнаружено формирования новых фаз по сравнению с исходным состоянием перед фрезерованием (рис. 3). Обращал на себя внимание тот факт, что рентгенографическая текстура, обусловленная текстурой вследствие роста дендритов, наблюдаемая в состоянии до фрезерования (рис. 3) и характерная для аддитивно выращенных никелевых сплавов [16], выражающаяся в предпочтительной ориентации плоскостей (111) γ -Ni, на обработанных фрезерованием поверхности и в стружке заметно уменьшается (рис. 11).

Традиционно, механизмы износа инструмента из твердого сплава без покрытия при обработке никелевых сплавов обсуждают в терминах трех видов износа: абразивного, адгезионного и окислительного [17].

При низкоскоростном резании абразивный износ является основным механизмом изнашивания инструмента, поскольку температура резания при ней относительно низкая и другие механизмы износа не возникают или являются незначительными. Канавки, параллельные направлению потока стружки на передней и боковой поверхности режущего инструмента, определяют морфологию механизма абразивного износа [18]. Ранее сообщалось, что механизм абразивного износа часто наблюдается при обработке суперсплавов на основе никеля [19]. Этот износ вызывается твердыми частицами (карбидами и оксидами) в Inconel 625, создавая ряд канавок (царапин) на поверхности инструмента. Подобно механизму износа передней поверхности, абразивный износ задней поверхности вызывается сильным трением между твердыми частицами с обработанной поверхности. Одновременно с этим, высокотемпературный окислительный износ может снижать производительность материала инструмента и усугублять абразивный износ инструмента.

Адгезионный износ имеет место, когда высокое давление и повышенная температура на границе раздела инструмент-стружка на передней поверхности вызывают пластическую деформацию и формируют новые поверхности. Атомы двух поверхностей адсорбируются и

объединяются друг с другом, образуя точку сцепления. Точка сцепления на двух поверхностях трения нарушается относительным движением инструмента и заготовки. Зерно или группа зерен сдвигается или вытягивается другой стороной и приводит к износу из-за сцепления. По словам Астахова, пластическая деформация режущего инструмента происходит из-за деформации ползучести при высокой температуре [20], и эта пластическая деформация больше в кобальтовой связке, поскольку она не выдерживает высокие температуры ползучести [21]. Размягчение кобальтовой связки вызывает отрыв зерен карбида вольфрама из твердосплавного инструмента. Наличие элементов W, Co, Ni и Cr в прирезцовой поверхности стружки (рис. 9), появление новых фаз в виде $Cr_{23}C_6$ и NiW на режущих кромках фрезы WC-Co после фрезерования (рис. 10) показывает, что процесс резания сопровождается адгезионным взаимодействием между элементами материала заготовки инконеля 625 и структурными элементами материала режущего инструмента. Зерно или группа зерен режущего инструмента перемещается под действием силы сцепления, что значительно влияет на прочность режущей кромки и приводит к ее поломке. Таким образом, параметры резания следует выбирать тщательно, чтобы снизить адгезионный износ.

Окислительный износ возникает обычно в том случае, когда в процессе резания зона контакта имеет сильное трение (высокий коэффициент трения) и генерирует большое количество тепла. Низкая теплопроводность Inconel 625 приводит к высокой температуре в паре «инструмент – стружка». Co и WC в твердосплавном инструменте реагируют с O_2 в воздухе, образуя оксиды (такие как CoO, WO_3 и Co_3O_4), которые снижают производительность инструмента и вызывают его износ [22]. Анализ энергетического спектра EDX не обнаружил наличия кислорода (рис. 9), а РСА не обнаружил кислородсодержащих фаз на режущих кромках фрезы после фрезерования (рис. 10), что свидетельствует о незначительной роли окислительного механизма износа материала режущего инструмента в настоящем исследовании.

Закключение

В процессе изучения морфологии стружки и износа рабочих площадок твёрдосплавной концевой фрезы были определены доминирующий механизм адгезионно-усталостного износа, а также новые фазы, образующиеся в процессе резания в виде наливов на поверхность инструмента. Методом рентгеноструктурного анализа показано, что однозначное появление новых фаз (Cr_{23}C_6 и NiW) в ходе фрезерования характерно только для режущих кромок фрезы WC-Co. На фрезерованной поверхности и в стружках обрабатываемого материала инконеля 625 рентгеноструктурный анализ фиксирует только структурные изменения (без появления новых фаз), такие как уменьшение рентгенографической текстуры, уширение пиков, характерные для процессов сильной пластической деформации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Khanna N., Raval P., Patel D. et al. Assessment of additive and subtractive sustainable manufacturing of Inconel 625 // Tribology International. 2023. Vol. 186. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108655>.
2. Filippov A., Shamarin N., Moskvichev E., Savchenko N., Kolubaev E., Khoroshko E., Tarasov S. Heat input effect on microstructure and mechanical properties of electron beam additive manufactured (EBAM) Cu-7,5 wt. % Al bronze // Materials. 2021. Vol. 14. No 22. P. 6948. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14226948>.
3. Klimenov V.A., Kolubaev E.A., Han Z, Chumaevskii A.V., Dvilis E.S., Strelkova I.L., Drobyaz E.A., Yaremenko O.B., Kuranov A.E. Elastic modulus and hardness of Ti alloy obtained by wire-feed electron-beam additive manufacturing. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) Metal Working and Material Science, 2023. vol. 25. no. 4. pp. 180–201. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-180-201.
4. Filippov A.V., Khoroshko E.S., Shamarin N.N., Kolubaev E.A., Tarasov S.Yu. Use of impact treatment for structural modification and improvement of mechanical properties of CuAl7 bronze obtained by electron beam additive manufacturing (EBAM) // Russian Physics Journal. 2023. Vol. 65. No. 11. P. 2016–2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11182-023-02864-w>.
5. Yu M., Zhu L.D., Yang Z.C., et al. A novel data-driven framework for enhancing the consistency of deposition contours and mechanical properties in metal additive manufacturing // Computers in Industry. 2024. Vol. 163. P. 104154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combind.2024.104154>.
6. Jia T., Zou B., Liu W., et al. Effect of process parameters on mechanical properties of Inconel718 superalloy fabricated by directional energy deposition // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2023. Vol. 128. No. 7–8. P. 2863–2883. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10854-y>.
7. Khanna N., Patel D., Raval P. et al. Comparison of sustainable cooling/lubrication strategies for drilling of wire arc additively manufactured Inconel 625 // Tribology International. 2024. V. 200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110068>.
8. Yao J., Zhao G., Niu X., Zhang R., Zhang J. Wear mechanism and underground structure of Inconel 625 nickel-based alloy sliding against WC-Co in seawater // Wear. 2024. Vol. 546–547. P. 205365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205365>.
9. Pervaiz S., Rashid A., Deiab I., Nicolescu M. Influence of tool materials on machinability of titanium- and nickel-based alloys: a review // Materials and Manufacturing Processes. 2014. Vol.29. P. 219–52. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.880460>.
10. Kitagawa T., Kubo A., Maekawa K. Temperature and wear of cutting tools in highspeed machining of Inconel 718 and Ti-6Al-6V-2Sn // Wear. 1997. Vol. 202. P. 142–148. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07255-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07255-9).
11. Dudzinski D., Devillez A., Moufki A., Larrouquere D., Zerrouki V., Vigneau J. A review of developments towards dry and highspeed machining of Inconel 718 alloy // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2004. Vol. 44. P. 439–456. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00159-7](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00159-7).
12. Upadhyay C., Singh Rajput S., Sateesh Kumar C., Gangopadhyay S., Kumar Sahoo S. Performance evaluation of WC, SiAlON and SiCw + Al_2O_3 tools in dry machining of Inconel 617 // Journal of Manufacturing Processes. 2024. Vol. 109. P. 235–249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.12.006>.
13. Thakur D.G., Ramamoorthy B., Vijayaraghavan L. Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning // Materials & Design. 2009. Vol. 30. P. 1718–1725. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.07.011>.
14. Kalashnikov K., Kalashnikova T. Development of a multimaterial structure based on CuAl9MN2 bronze and Inconel 625 alloy by double-wire-feed additive manufacturing // Metals. 2022. Vol. 12. No. 12. P. 2048. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12122048>.
15. Rahman M. A., Rahman M., Woon K.S. Episodes of chip formation in micro-to-nanoscale cutting of Inconel 625 // International Journal of Mechanical Sciences. 2021. Vol. 199. No.2. P. 106407. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106407>.
16. Kocaman E., Gürol U., Günen A., Çam G. Effect of post-deposition heat treatments on high-temperature wear and corrosion behavior of Inconel 625 // Materials Today Communications. 2025. Vol. 42. P. 111101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.111101>.
17. Liu E., An W., Xu Z., Zhang H. Experimental study of cutting-parameter and tool life reliability

optimization in inconel 625 machining based on wear map approach // Journal of Manufacturing Processes. 2020. Vol. 53. P. 34–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.02.006>.

18. **Yıldırım Ç., Sarıkaya M., Kıvak T., Şirin Ş.** The effect of addition of hBN nanoparticles to nanofluid-MQL on tool wear patterns, tool life, roughness and temperature in turning of Ni-based Inconel 625 // Tribology International. 2019. Vol. 134. P. 443–456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.027>.

19. **Akhtar W., Sun J., Sun P., Chen W., Saleem Z.** Tool wear mechanisms in the machining of Nickel based super-alloys: a review // Frontiers in Mechanical Engineering. 2014. Vol. 9. P. 106–119. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11465-014-0301-2>

20. **Astakhov V.P.** The assessment of cutting tool wear // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2004. Vol. 44. P. 637–647. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2003.11.006>

21. **Ayed Y., Germain G., Ammar A., Furet B.** Degradation modes and tool wear mechanisms in finish and rough machining of Ti17 Titanium alloy under high-pressure water jet assistance // Wear. 2013. Vol. 305. P. 228–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.06.018>

22. **Liu E.L., Liu X., Zhao L.G., Han J.D., Wang T.D., Liu X.L.** Oxidation resistance of tool material used for cutting Inconel 625 // Rare Metal Materials and Engineering. 2018. Vol. 47. P. 2192–2197.

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

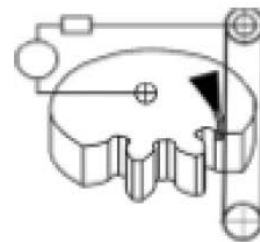
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: A. S. Babaev, V.N. Kozlov – the idea; A.P.Semenov, V.N. Kozlov, I.A. Belchikov – collection of material; A.S. Babaev; V.N. Kozlov, V.A. Ovcharenko, A.R. Semenov, I.A. Belchikov – setting up the experiment; A.S. Babaev, V.N. Kozlov, N.L. Savchenko, V.A. Ovcharenko – analysis of the results; A.S. Babaev, N.L. Savchenko – writing the article; A.S. Babaev, N.L. Savchenko – scientific editing.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.03.2025; одобрена после рецензирования 30.06.2025; принята к публикации 07.07.2025.

The article was submitted 20.03.2025; approved after reviewing 30.06.2025; assepted for publication 07.07.2025.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 9 (171). С. 31-40.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 9 (171). P. 31-40.

Научная статья
УДК 621.787.6.004
doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-31-40

Волновое деформационное упрочнение в процессе аддитивного синтеза

Андрей Викторович Киричек¹, д.т.н.
Дмитрий Львович Соловьев², д.т.н.
Сергей Владимирович Баринов³, к.т.н.
Светлана Олеговна Федонина⁴, к.т.н.

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

^{2, 3} Владимирский государственный университет, Владимир, Россия

¹ avk.57@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3823-0501>

² murstin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4475-319X>

³ box64@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1341-446X>

⁴ fedonina.sv2015@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0472-4845>

Аннотация. В статье рассматривается гибридная технология, объединяющая аддитивное производство металлических изделий с использованием метода WAAM и волнового деформационного упрочнения, направленная на улучшение механических характеристик создаваемых деталей. WAAM-технология, представляет собой метод аддитивного производства, который использует электрическую дугу для плавления металлической проволоки, позволяя создавать объемные металлические изделия путем наложения слоев. Эта технология сочетает в себе принципы традиционного сварочного производства и аддитивных методов, позволяя эффективно изготавливать детали сложной формы. Ключевыми преимуществами WAAM-технологии являются скорость производства, снижающая затраты, а также возможность создания больших и сложных деталей, которые трудно или невозможно изготовить традиционными методами. Однако при синтезировании изделий обычно сталкиваются с проблемами неоднородности микроструктуры, пористости и крупнозернистости, снижающими их прочность. Для преодоления этих проблем предлагается использование волнового деформационного упрочнения, которое обеспечивает значительное увеличение глубины упрочнения, создает сжимающие остаточные напряжения и способствует тонкому измельчению зернистой структуры. Разработана конечно-элементная модель в ANSYS, для анализа температурных полей и механических нагрузок в гибридном процессе. Моделирование позволило оптимизировать режимы синтеза и волнового деформационного упрочнения, учитывая термдеформационные эффекты. Экспериментальные исследования на сплаве ЭИ868 подтвердили эффективность подхода: применение волнового деформационного упрочнения привело к измельчению структуры (до 10 раз), повышению твердости в 2,5 раза, предела прочности в 1,5 раза и предела текучести в 2 раза при сохранении ударной вязкости. Результаты демонстрируют потенциал гибридной технологии WAAM и волнового деформационного упрочнения для создания крупногабаритных деталей с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: аддитивные технологии, сварочная дуга, волна деформации, деформационное упрочнение, микроструктура, твердость, прочность

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 термдеформационного упрочнения синтезируемых деталей машин».

Для цитирования: Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Баринов С.В., Федонина С.О. Волновое деформационное упрочнение в процессе аддитивного синтеза // Научные технологии в машиностроении. 2025. № 9 (171). С. 31–40. doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-31-40

Wave strain hardening in the additive synthetic process

Andrey V. Kirichek¹, D. Eng.

Dmitry L. Soloviev², D. Eng.

Sergey V. Barinov³, PhD. Eng.

Svetlana O. Fedonina⁴, PhD. Eng.

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

^{2,3} Vladimir State University, Vladimir, Russia

¹ avk.57@yandex.ru

² murstin@yandex.ru

³ box64@rambler.ru

⁴ fedonina.sv2015@gmail.com

Abstract. The article discusses a hybrid technology that combines additive manufacturing of metal products using the WAAM technique and wave strain hardening aimed at improving the mechanical characteristics of the parts being created. WAAM technology is an additive manufacturing technique that through an electric arc melts metal wire, making three D metal products by layering. This technology combines the principles of traditional welding production and additive methods, making efficient parts production of complex shapes possible. Key advantages of WAAM technology are the following: speed of production, which reduces costs, as well as the ability to manufacture large and complex parts that are difficult or impossible to make using traditional techniques. However, when synthesizing products, the most popular problems are heterogeneity of microstructure, porosity and coarse-grain zones, which result in strength loss. To overcome these problems, it is recommended to use wave strain hardening, which provides a significant increase in the depth of hardening, creates compressive residual stresses and promotes fine grinding of the granular structure. A finite element model has been developed in ANSYS for the analysis of temperature fields and mechanical loads in a hybrid process. The simulation made it possible to optimize the modes of synthesis and wave strain hardening, taking into account thermal deformation effects. Experimental studies on the ES868 alloy have confirmed the effectiveness of the approach: the use of wave strain hardening resulted in structure refinement (up to 10 times), hardness increase by 2.5 times, tensile strength by 1.5 times and yield strength by 2 times at one and the same toughness. The results prove the potential of hybrid WAAM technology and wave strain hardening for large-sized parts manufacturing with improved performance characteristics.

Keywords: additive technologies, welding arc, deformation wave, strain hardening, microstructure, hardness, strength

Acknowledgments: 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 for the project No. FZWR-2024-0003 (No. 075-00150-24-03) "Development of a technological strategy and theoretical and experimental study of key elements of the technology of additive synthesis from metal wire parts by the 3DMP method and wave thermal deformation hardening of synthesized machine parts."

For citation: Kirichek A.V., Soloviev D.L., Barinov S.V., Fedonina S.O. Wave strain hardening in the additive synthetic process / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 9 (171). P. 31–40. doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-31-40

В настоящее время аддитивные технологии (АТ) в области металлических материалов представляют собой важное направление современного машиностроительного производства. АТ характеризуются возможностью создания объектов с помощью послойного выращивания материала, что значительно отличает их от традиционных методов производства. Аддитивные технологии для металлов, становятся все более популярными в различных отраслях, включая авиацию, энергетику, автомобильную промышленность и

медицинскую технику. Преимуществом использования АТ является возможность создания компонентов со сложными формами, которые могут быть недостижимы при использовании традиционных методов производства, проектировать ажурные и тонкостенные детали с оптимизированной геометрией и весом. Традиционные методы получения деталей обычно приводят к значительным отходам, в то время как АТ минимизируют количество материала и не требуют создания сложных инструментов, что сокращает затраты на производство и

воздействие на окружающую среду. Кроме того, АТ отличается быстрой реакцией на изменения в геометрии деталей, что значительно увеличивает гибкость производства.

Аддитивная технология WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), представляет собой одну из современных технологий послойного синтеза, используемую для создания металлических изделий. Она сочетает преимущества дуговой сварки и 3D-печати и характеризуется использованием электрической дуги как источника энергии для плавления проволоки, которая служит сырьем для формирования изделий. Основной принцип WAAM-технологии заключается в том, что ровный слой металла формируется путем наплавления проволоки, подаваемой в зону электрической дуги, где она плавится и сразу же осаждается на предварительно подготовленную подложку или предыдущие слои [1].

Преимуществами использования WAAM-технологии является более высокая производительность и экономическая эффективность по сравнению с порошковыми аддитивными технологиями. Использование дуговой сварки позволяет быстро наплавливать металл, что значительно ускоряет процесс, а использование проволоки вместо металлических порошков, а также менее дорогостоящего оборудования, по сравнению с лазерными или электронно-лучевыми системами, значительно снижают затраты. Таким образом, WAAM-технология позволяет получать крупные и сложные по форме детали, которые зачастую невозможно произвести другими методами, такими как литье или механическая обработка [2 – 4].

Однако WAAM-технология имеет недостатки, которые сдерживают ее широкое применение.

Вопрос прочности изделий, созданных с помощью АТ, является одним из наиболее острых в современном машиностроении. Эти проблемы часто возникают из-за уникальности процесса, который не всегда может гарантировать однородные механические свойства. При синтезе по WAAM-технологии в результате газовыделения, конденсации или неправильных температурных режимов создаются внутренние поры, которые становятся местами концентрации напряжений, что может приводить к

преждевременному разрушению изделия [5]. Пористость оказывает негативное влияние на эксплуатационные свойства изделия, особенно в условиях действия высоких нагрузок или агрессивной среды.

Размер зерна – еще один важный фактор, непосредственно влияющий на свойства синтезированного материала [6]. При аддитивном производстве по WAAM-технологии завышенный или недостаточно контролируемый размер зерна может привести к снижению прочности, увеличению хрупкости и ухудшению устойчивости к усталости. Слишком крупные зерна способствуют образованию слабых участков в металле, в то время как более мелкие зерна обеспечивают лучшие механические свойства благодаря эффективному барьерному действию на перемещение дислокаций.

Для повышения механических свойств металлических материалов применяются упрочняющие технологии. Современные упрочняющие технологии, как правило, включают термическое или деформационное воздействие на материал, а также нанесение покрытий на рабочие изделия. Однако, нанесением покрытий невозможно исправить объемную структуру синтезированного материала.

Известно, что термическая обработка позволяет изменить микроструктуру и улучшить механические свойства материалов, влияет на прочность, твердость, пластичность, эксплуатационные свойства изделия в целом. Например, после поверхностной закалки увеличение твердости может достигать до 200 %, а глубина упрочнения составлять до 4...5 мм, при этом в подповерхностном слое формируются как растягивающие, так и сжимающие напряжения. Однако, возможна термообработка только полностью синтезированной детали, причем ее применение целесообразно с целью снятия внутренних напряжений и проблематично с целью упрочнения вследствие сопутствующего коробления, отклонения пространственной формы изделия от заданной.

Для улучшения механических свойств материалов, созданных с помощью аддитивного производства, нашло применение горячее изостатическое прессование (ГИП),

при котором в целях упрочнения на материал воздействуют одновременно высокой температурой и давлением [7]. Высокое давление (до 200 МПа и более) инертного газа (обычно аргона), при высокой температуре (до 2000 °С) равномерно воздействует на заготовку со всех сторон. Применение ГИП помогает устранить или уменьшить дефекты, такие как поры, микротрещины и другие внутренние неоднородности, которые возникают в процессе аддитивного производства. Кроме того, ГИП позволяет улучшить механические свойства, оптимизировать микроструктуру, изменяя размеры и распределение зерен, обеспечивая лучшее сочетание прочности и пластичности. Однако, широкое применение ГИП сдерживается высокой стоимостью оборудования и большой длительностью технологического процесса.

Одним из наименее энерго- и трудоемких способов, обеспечивающих повышение твердости и мелкодисперсную структуру упрочненного слоя, является поверхностное пластическое деформирование (ППД). ППД создает сжимающие остаточные напряжения, что важно для увеличения долговечности деталей работающих в условиях действия усталостных нагрузок. Применение ППД для упрочнения полностью синтезированной детали может быть затруднено из-за сложной геометрии и, как правило, небольшой глубины упрочнения. Кроме того, малая толщина стенок синтезированного изделия ограничивает применение значительных сил деформирования. Характерная для подавляющего большинства способов ППД небольшая глубина упрочненного слоя накладывает серьезные ограничения на применимость технологии, как в процессе аддитивного синтеза, так и после него.

Созданию гибридных технологий, сочетающих WAAM-технологии с процессами ППД, длительное время препятствовало убеждение, что термическое воздействие при синтезе детали полностью устранил эффект наклепа, лишая деформационное упрочнение всякого смысла. Успешное применение ППД перед термической и химико-термической обработкой [8], положительные результаты

высокотемпературной и низкотемпературной термомеханической обработки, а также опыт электромеханической обработки, свидетельствуют о проявлении общего закона технологического наследования при формировании микроструктуры комбинированно упрочненного материала, подтверждая эффективность совмещенного деформационного и термического воздействия.

Идея послойного деформационного упрочнения синтезируемого изделия была запатентована еще в 2007 г. (патент US 20070122560 A1), предлагалось для упрочнения использовать процессы ППД – накатывание и чеканку. Так, при применении межпроходной холодной прокатки с нагрузкой 50 кН мартенситностареющей стали синтезируемой WAAM-технологией ее предел прочности был увеличен с 1410 до 1750 МПа, что соответствует стандарту для кованой стали (1760 МПа) [9]. Для упрочнения чеканкой при синтезе наплавкой образцов из сплава АМг5 использовался пневматический молот с энергией ударов 7,1 Дж. Время деформационного упрочнения составляло 60 с, 3200 ударов в минуту. Это позволило увеличить предел прочности на 20 %, предел текучести на 15 %, относительное удлинение на 20 % по сравнению с выращенным аналогичным образом неупрочненным образцом [10].

Представленные данные подтверждают, что послойное пластическое деформирование наплавляемого металла в процессе 3DMP-синтеза способствует уменьшению внутренних дефектов, выравниванию слоев, а также улучшению механических свойств синтезированных изделий. Однако обработка перечисленными способами позволяет получить небольшую глубину упрочнения, при этом эффективная глубина упрочнения с наиболее высокими параметрами качества поверхностного слоя, как правило, составляет не более 1/3 от общей глубины упрочнения, что явно недостаточно.

Наиболее широкие возможности управления параметрами качества поверхностного слоя имеет волновое деформационное упрочнение (ВДУ) в процессе статико-импульсной обработки

поверхностным пластическим деформированием (СИО ППД) [11]. При ВДУ нагружение упрочняемой поверхности осуществляется генератором импульсов, основными элементами которого является ударная система боек-волновод. При ударе бойком, волновод передает волну деформации в пятно контакта инструмента и нагружаемой поверхности, часть ее проходит в упрочняемый материал, а другая отражается от пятна контакта, проходит через ударную систему, и вновь возвращается к пятну контакта. Такой процесс происходит многократно до полного затухания ударной волны, а прямая и отраженные волны деформации будут генерировать в пятне контакта пролонгированный ударный импульс. Основным условием передачи энергии всех волн деформации, сформированных после удара в ударной системе, является жесткий контакт всех элементов системы (бойк – волновод – инструмент – упрочняемая поверхность) в течение времени, превышающем действие ударного импульса в пятне контакта. Жесткий контакт обеспечивается статическим поджатием генератора импульсов к упрочняемой поверхности. В результате, в очаге деформации – области контакта деформирующей поверхности инструмента и упрочняемой поверхности изделия генерируется пролонгированный ударный импульс, состоящий из головной и хвостовой части, передающий упрочняемому материалу максимальную долю энергии удара.

Преимуществом ВДУ является возможность адаптировать форму ударных импульсов под свойства материала, повышая КПД процесса и расширяя технологические возможности упрочнения. Результирующее воздействие на единичную область материала складывается путем интерференции прямых и отраженных волн деформации. Многократно возникающие сложные напряженно-деформированные состояния сопровождаются изменением структуры на большой глубине подповерхностного слоя. Применение ВДУ позволяет достичь глубины упрочнения до 6...10 мм при максимальной твердости до 6500 МПа. Регулирование энергии при ВДУ позволяет локально воздействовать на участки

поверхности размером от 1...2 мм до 50 мм, что обеспечивает гибкость обработки для решения различных задач. Применение ВДУ наиболее перспективно для послойного или периодического упрочнения синтезируемых деталей.

Технологический процесс гибридной WAAM-технологии с периодическим ВДУ заключается в чередовании технологических переходов аддитивного синтеза и упрочнения наплавленного слоя, осуществляется следующим образом.

Один или несколько слоев материала наплавляются на подложку, изготовленную из материала, близкого по химическому составу к материалу синтезируемой детали. Синтезированная поверхность изделия выглаживается или обкатывается деформирующим инструментом. Воздействие на синтезированный материал осуществляется деформирующей поверхностью инструмента, например, сферической или специально спрофилированной поверхностью индентора, или периферийной поверхностью цилиндрического ролика. Смонтированный на торце цилиндрического волновода инструмент поджимается к обрабатываемой поверхности с некоторым статическим усилием. Торцом бойка, как правило, цилиндрического, с заданной частотой, скоростью и энергией наносятся удары по противоположному свободному торцу волновода. Обрабатываемое изделие и деформирующий инструмент посредством движения подачи перемещаются относительно друг друга. Затем на упрочненную поверхность наплавляется следующий слой синтезируемого изделия.

Деформации подвергается еще не полностью остывший синтезированный материал, который обладает более высокими пластическими свойствами по сравнению с его же состоянием при нормальной температуре. Формирование той или иной микроструктуры материала зависит как от давления в очаге деформации и свойств материала при температуре процесса ВДУ, так и от скорости охлаждения элементарного объема, скорости нагрева, величины и времени действия температурных всплеск при синтезе последующих слоев изделия. Закономерности упрочнения приобретают термодиформаци-

онный характер. Проектирование гибридной WAAM-технологии с периодическим ВДУ требует тщательного анализа тепловых процессов, расчета температурных полей, исследования особенностей нагрева и охлаждения каждого синтезируемого слоя и готового изделия в целом.

Вследствие сложности гибридного процесса, большого количества управляемых технологических факторов как на этапе синтеза, так и на этапе упрочнения, как расчет температурных полей, так и поиск диапазонов допустимых значений параметров гибридного процесса затруднен. Оперативное решение задачи назначения рациональных технологических параметров требует создания единой модели гибридной WAAM-технологии с периодическим ВДУ.

Моделирование любого технологического процесса является достаточно сложной задачей. Построение модели гибридного процесса синтеза и ВДУ предполагает, что программные модули должны постоянно (послойно или периодически) обмениваться информацией. Проблема передачи информации об изделии при переходе от процесса синтеза к процессу упрочнения и обратно является нетривиальной задачей. Для моделирования технологических процессов предлагаются специальные программные продукты и на этапе информационного обмена между ними потеря части информации неизбежна. Проблема стоит особенно остро для передачи информации о технологических процессах, отличающихся по физическому характеру воздействия на материал исходной заготовки.

Так как процесс WAAM имеет много общего с многопроходным способом сварки, к его моделированию могут быть применены общие подходы. Анализ существующих математических моделей электродуговой сварки условно можно разделить на три группы: модель дуги; модель переноса металла при сварке и общие модели, к которым относятся модели, одновременно рассматривающие как процессы первых двух групп, так и иные модели, учитывающие другие воздействия на сварочную область после её формирования.

Анализ общих моделей показал отсутствие единых подходов к созданию комбинированных моделей наплавки и постобработки. Большинство моделей созданы в специализированном ПО, не имеющим возможности моделирования других отличающихся по физическому воздействию процессов. В основном моделирование процессов сварки и WAAM-синтеза осуществляется с применением метода конечных элементов [12, 13], программных продуктов (CAE-систем), позволяющих исследовать нелинейные быстропротекающие динамические процессы, происходящие в неупругих средах (ANSYS, COMSOL, ABAQUS и др.).

Для создания модели гибридного процесса WAAM-синтеза и ВДУ целесообразно воспользоваться пакетом ANSYS, который имеет независимые модули, один из которых позволяет создать модель процесса WAAM-синтеза, а другой – процесса ВДУ. Для создания модели в ANSYS использовались модули Transient Thermal и Transient. ANSYS позволяет осуществлять обмен данными между модулями без потери информации, что делает систему в целом пригодной для разработки единой модели гибридного процесса.

Для исследования и эффективного управления градиентом температур в пакете ANSYS построена конечно-элементная модель гибридного процесса WAAM-синтеза с периодическим ВДУ, которая позволяет установить параметры, определяющие закономерности перераспределения тепловых потоков в зависимости от условий и режимов синтеза, условий и интенсивности естественного или принудительного охлаждения, температуры окружающей среды, формы и размеров изделия.

Необходимым компонентом построения общей модели гибридного процесса WAAM-синтеза с периодическим ВДУ является создание модели материала изделия, пластические и прочностные свойства которого меняются в зависимости от температуры технологического воздействия.

Пример визуализации распределения динамических температурных полей в процессе синтеза цилиндрической оболочки из

18 наплавляемых слоев представлен на рис. 1. В процессе моделирования варьировались значения силы тока, напряжения, коэффициента теплопроводности α , температур плавления, скорости перемещения сварочной ванны, объема элементарной ячейки, время охлаждения слоя перед нанесением последующего и др. [14]. По результатам моделирования определялась глубина слоя материала, прогревающегося до температуры рекристаллизации, и оптимальное время выдержки элементарных

объемов синтезированного металла при этой температуре. Результаты моделирования позволили выполнить расчет температурных полей, формирующихся в процессе синтеза образца и установить температурный режим при последующем ВДУ. На основании этого была проведена корректировка режимов ВДУ (энергии и частоты ударов, скорости подачи инструмента относительно синтезируемой заготовки) для последующих экспериментальных исследований.

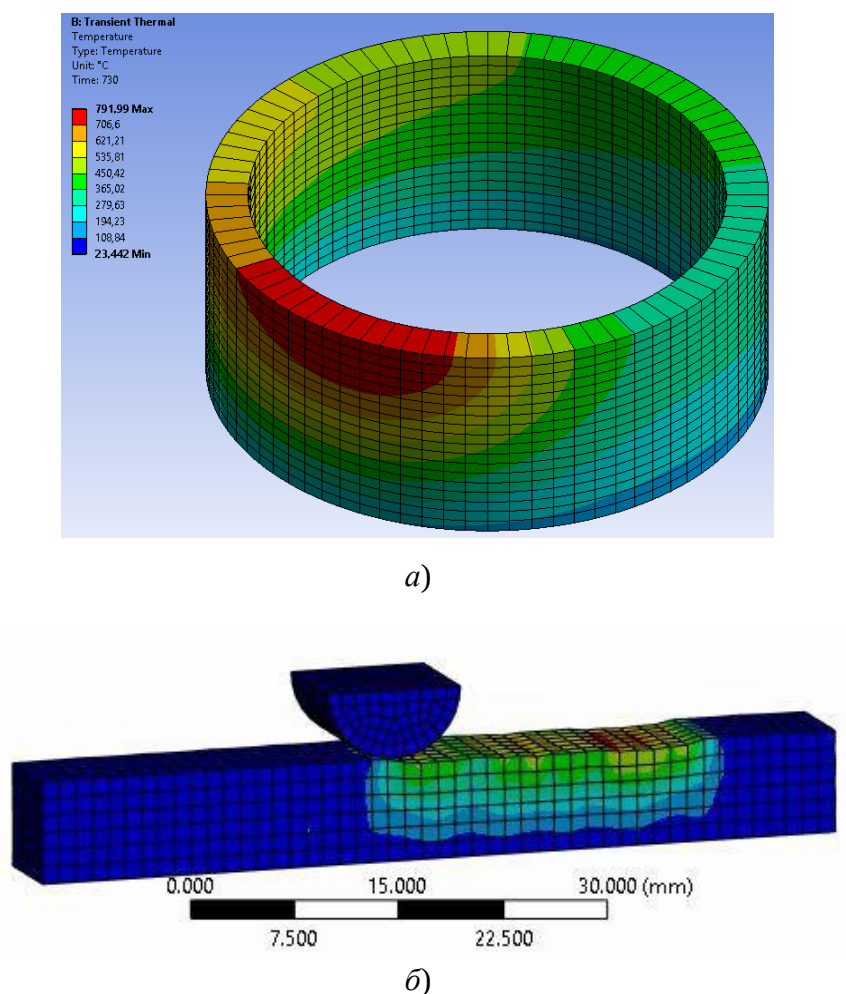


Рис. 1 Моделирование гибридного процесса WAAM-синтеза и ВДУ:

a – распределение температур при синтезе «оболочки» из 18 слоев после 10 секунд охлаждения; *б* – процесс ВДУ нескольких синтезированных слоев при температуре + 300 °C

Fig. 1. Modeling of the hybrid process of WAAM synthesis and WSH (wave strain hardening):

a – the temperature distribution during the synthesis of a "shell" of 18 layers after 10 seconds of cooling (the color scale shows the temperature in °C); *b* – the process of WSH of several synthesized layers at a temperature of + 300 °C

Новизна разрабатываемой модели гибридного процесса WAAM-синтеза и ВДУ заключается в применении согласованных

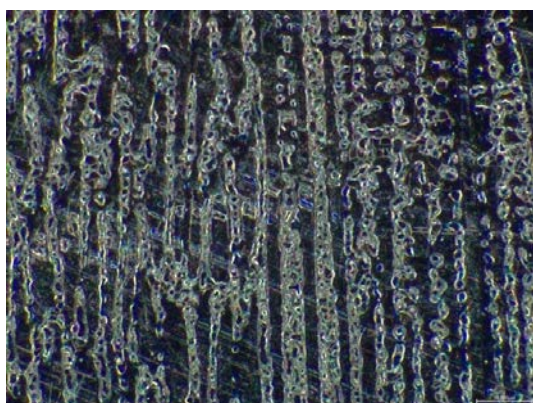
подходов при решении тепловой и механической задач в трехмерной постановке, с учетом естественно движущихся тепловых

потоков во всех моделируемых изделиях. Предлагаемый подход к моделированию процессов синтеза из проволоки с периодическим упрочнением широкой номенклатуры изделий из различных материалов может быть распространен на весь класс процессов аддитивного синтеза с периодической или постобработкой.

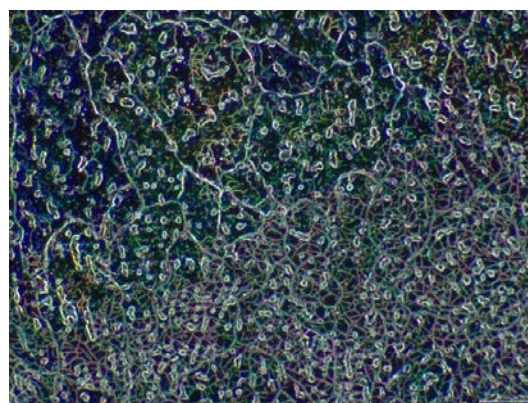
Экспериментальные исследования технологии ВДУ проводились на образцах, синтезируемых из жаропрочного сплава ЭИ868, который применяется для изготовления листовых деталей двигателей и турбин, работающих при температурах до + 1000 °С; сварочной проволоки, применяемой для наплавки деталей и сварки металлоконструкций в энергетическом машиностроении. На установке для реализации гибридной технологии синтеза по WAAM-технологии и ВДУ были изготовлены

образцы в форме цилиндрической оболочки, полученные с ВДУ и без него [15].

В результате металлографического анализа полученных образцов установлено, что микроструктура поперечного сечения, перпендикулярного оси вращения неупрочненного образца из сплава ЭИ868, имеет дендритное строение (рис. 2). Дендриты отличаются значительной длиной (свыше 800 мкм) и слабо развитыми осями второго порядка, распределенными по материалу матрицы. После ВДУ дендриты были измельчены – их размер сократился более чем в 10 раз, а мелкодисперсные частицы длиной 8...25 мкм равномерно распределены по матрице материала. Также в результате упрочнения формируется гетерогенная микроструктура, состоящая из твердых фракций, включенных в более мягкую и пластичную матрицу, более эффективная в эксплуатационных условиях.



а)



б)

Рис. 2. Микроструктура (×1500) синтезированного образца (сплав ЭИ868):
а – без упрочнения; б – с ВДУ

Fig. 2. Microstructure (×1500) of the synthesized sample (alloy ES868):
а – no hardening; б – WSH

Для исследований влияния ВДУ на механические свойства синтезированного материала наплавлялись образцы из сплава ЭИ868, из которых на электроэрозионном станке вырезались образцы для испытаний на разрыв согласно ГОСТ 1497-84 и на ударную вязкость по ГОСТ 9454-78. Измерение твердости для синтезированных образцов проводилось по методу Роквелла. В результате

установлено, что применение ВДУ, по сравнению с синтезированными неупрочненными образцами позволило повысить механические свойства: твердость в 2,5 раза, предел прочности в 1,5 раза, предел текучести в 2 раза, при уменьшении относительного удлинения в 3 раза и сохранении ударной вязкости на достаточно высоком уровне (рис. 3).

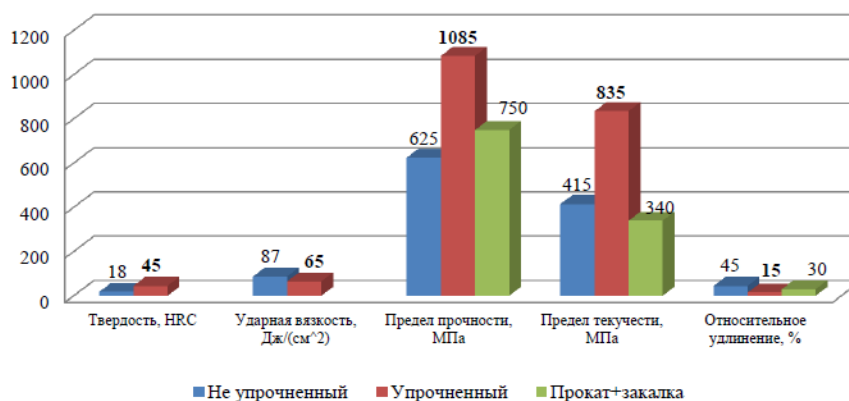


Рис. 3. Влияние ВДУ на механические свойства синтезированного образца (ЭИ868)

Fig. 3. The effect of WSH on the mechanical properties of the synthesized sample (ES868)

Выводы

Установлено, что перспективным направлением развития WAAM-технологии является использование ВДУ, позволяющей достичь высокой твердости и значительной глубины упрочнения.

Разработана конечно-элементная модель для эффективного прогнозирования результатов реализации гибридных WAAM-технологий с ВДУ, которая позволяет в режиме реального времени оценить динамику температурных полей, формирующихся в процессе синтеза изделия, и обоснованно назначать режимы ВДУ для обеспечения требуемых параметров качества поверхностного слоя.

В результате проведенных экспериментальных исследований WAAM-технологии с использованием ВДУ установлено значительное измельчение структуры синтезированного сплава, повышение ее твердости в 2,5 раза, предела прочности в 1,5 раза и предела текучести в 2 раза, при уменьшении относительного удлинения в 3 раза и сохранении ударной вязкости на достаточно высоком уровне.

Проведенные исследования позволяют считать, что дальнейшее развитие и внедрение предлагаемой и подобных технологий, будет способствовать созданию более эффективных и высококачественных изделий на всех этапах их жизненного цикла.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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. art. no. 103739. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.103739

2. Трубащевский Д.С. Аддитивные зарисовки, или решения для тех, кто не хочет продолжать терять деньги / Воронеж: Умное Производство, 2021. 203 с.

3. 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. art. no. 100330. DOI: 10.1016/j.rineng.2021.100330.

4. 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. art. no. 126988. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126988.

5. Kou S. Welding Metallurgy – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, 2002. 461 p. DOI: 10.1002/0471434027

6. Langelandsvik G., Akselsen O.M., Furu T., Roven H.J. Review of aluminum alloy development for wire arc additive manufacturing // Materials, 2021. vol. 14 (18). p. 5370. DOI: 10.3390/ma14185370.

7. Береснев А.Г. Разумовский И.М. Горячее изостатическое прессование для аддитивного производства // Аддитивные технологии. № 4 (2017). С. 50–54

8. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Федонина С.О. Проявление технологической наследственности при исследовании твердости деформационно-термически упрочненных сталей // Научные технологии в машиностроении. 2019. № 8 (98). С. 25–28. DOI: 10.30987/article_5d2635cb4d7804.69744207

9. Xu X., Ganguly S., Ding J., Dirisu P., Martina F., Liu X., Williams S. W. Improving mechanical properties of wire plus arc additively manufactured maraging steel through plastic deformation enhanced aging response, Materials Science and Engineering: A, Volume 747, 2019, P. 111–118, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.12.114>.

10. Карташев М.Ф., Пермяков Г.Л., Трушников Д.Н., Миндибаев М.Р. Исследование влияния деформационного упрочнения на механические свойства образцов сплава АМг5, полученных способом многослойной наплавки // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2019. Т. 17. № 3. С. 38–45

11. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г.

Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2004. 288 с.

12. 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.

13. Suvrانشu 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.

14. Киричек А.В., Баринov 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.

15. Федонина С.О. Повышение качества синтезированных из проволоки деталей волновым термомодеформационным упрочнением / Брянск. 2021. 154 с.

REFERENCES

1. Tomar Buntу, 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. art. no. 103739. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.103739

2. Trubashevsky D. S. Additivnye zaskrytki, ili resheniya dlya teh, kto ne hochet prodolyat' dengi [Additive sketches, or solutions for those who do not want to continue to lose money]. Voronezh: Smart Production, 2021. 203 p.

3. 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. art. no. 100330. DOI: 10.1016/j.rineng.2021.100330.

4. 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. art. no. 126988. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126988.

5. Kou S. Welding Metallurgy, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, 2002. 461 p. DOI:

10.1002/0471434027

6. Langelandsvik G., Akselsen O.M., Furu T., Roven H.J. Review of aluminum alloy development for wire arc additive manufacturing // Materials, 2021. vol. 14 (18). p. 5370. DOI: 10.3390/ma14185370.

7. Beresnev, A.G., Razumovsky I.M. Hot isostatic pressing for additive production. №4(2017). pp. 50–54

8. Kirichek A.V., Soloviev D.L., Fedonina S.O. Manifestation of technological heredity in the study of hardness of deformation-thermally strengthened steels. 2019. № 8 (98). Pp. 25–28. DOI: 10.30987/article_5d2635cb4d7804.69744207

9. Xiangfang Xu, Supriyo Ganguly, Jialuo Ding, Philip Dirisu, Filomeno Martina, Xianwei Liu, Stewart W. Williams, Improving mechanical properties of wire plus arc additively manufactured maraging steel through plastic deformation enhanced aging response, Materials Science and Engineering: A, Volume 747, 2019, P. 111–118, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.12.114>.

10. Study of the effect of deformation hardening on the mechanical properties of samples of AMg5 alloy obtained by multilayer cladding // M.F. Kartashev, G.L. Permyakov, D.N. Trushnikov, M.R. Mindibaev. Bulletin of the Nosov Moscow State Technical University. 2019. T. 17. № 3. pp. 38–45

11. Kirichek A.V., Soloviev D.L., Lazutkin A.G. Technology and equipment for static-pulse processing of surface plastic deformation. Library technologist. M.: Mashinostroenie, 2004. p. 288.

12. 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.

13. Suvrانشu 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.

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

15. Fedonina, S.O. Improving the Quality of Parts Synthesized from Wire by Wave Thermal Deformation Strengthening / Fedonina Svetlana Olegovna. Bryansk, 2021. 154 p.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

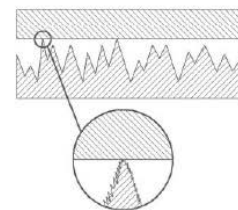
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 09.05.2025; одобрена после рецензирования 25.05.2025; принята к публикации 24.06.2025.

The article was submitted 09.05.2025; approved after reviewing 25.05.2025; assepted for publication 24.06.2025.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 9 (171). С. 41-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 9 (171). P. 41-48.

Научная статья
УДК 621.2.082.18
doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-41-48

Фрактальная модель контактного взаимодействия слабонагруженных поверхностей

Виктор Петрович Тихомиров¹, Д.Т.Н.
Михаил Александрович Измеров², Д.Т.Н.

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

¹ dm-bgtu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7269-8175>

² m.izmerov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4170-6184>

Аннотация. Адекватная оценка контактного взаимодействия шероховатых поверхностей при малых номинальных контактных давлениях (до 2 МПа) невозможна без учёта микрогеометрии сопряжённых поверхностей, а сложная картина образования фактических пятен контакта требует применение имитационного моделирования контактного взаимодействия реальных 3D карт инженерных поверхностей или их моделей, которыми являются фрактальные поверхности. Описание фрактальной поверхности требует знания фрактальной размерности профиля D (поверхности $DS = D + 1$) и параметра фрактальной шероховатости G . Эти фрактальные параметры определяют такие структурные особенности модели поверхности, как радиус кривизны верхней части выступа и критерий перехода от пластической деформации выступа к упругой. Контактное взаимодействие фрактальной поверхности с гладкой жёсткой плоской поверхностью предполагает, что вследствие наличия субшероховатости на наноуровне вначале происходит пластическая деформация субмикронеровностей, а затем по мере увеличения нормальной нагрузки происходит формирование упругого пятна контакта. В статье рассматривается случай, когда описание модели поверхности потребовало использование ещё одного параметра – размерности DXU пятен контакта, которое включает число неровностей, находящихся в контакте с площадью, больше выбранной. Известные фрактальные модели Маджумдара-Бхушана и др. предполагают, что размерность поверхности и DXU численно совпадают друг с другом, что не является истиной. В статье дано сравнение результатов моделирования для случаев, когда рассматриваемые фрактальные размерности имеют разные и одинаковые значения, и показана величина ошибки при оценке нагрузочной способности контакта сопряжённых поверхностей.

Ключевые слова: фрактальная размерность, распределение площадей среза неровностей, фактическая площадь контакта, дискретный контакт шероховатых поверхностей

Для цитирования: Тихомиров В.П., Измеров М.А. Фрактальная модель контактного взаимодействия слабонагруженных поверхностей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 9 (171). С. 41-48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-41-48

Fractal model of contact interaction for underloaded surfaces

Viktor P. Tikhomirov¹, D. Eng.
Mikhail A. Izmerov², D. Eng.

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

¹ dm-bgtu@yandex.ru

² m.izmerov@yandex.ru

Abstract. An adequate assessment of the contact interaction of rough surfaces at low nominal contact pressures (up to 2 MPa) is impossible without taking into account the microgeometry of the mating surfaces, and the complex pattern of formation of actual contact spots requires the use of simulated modeling of the contact interaction of real 3D maps of engineering surfaces or their models, which are fractal surfaces. The description of a fractal surface requires knowledge of the fractal dimension of the profile D (surface $DS = D + 1$) and the fractal roughness parameter G . These fractal parameters determine such structural features of the surface model as the radius of curvature of the upper part of the protrusion and the criterion for the transition from plastic deformation

of the protrusion to elastic. The contact interaction of a fractal surface with a smooth, rigid, flat surface suggests that due to the presence of sub-roughness at the nanoscale, plastic deformation of the submicron surfaces occurs first, and then, as the normal load increases, an elastic contact spot forms. The article considers the case when the description of the surface model required the use of another parameter – the dimension DXY of the contact spots, which includes the number of irregularities in contact with an area greater than the selected one. The well-known fractal models of Majumdar-Bhushan (M-B) and others assume that the dimension of the surface and DXY numerically coincide with each other, which is not true. The article provides a comparison of the simulation results for cases when the fractal dimensions under consideration have different and identical values, and shows the magnitude of the error in estimating the load capacity of the contact of the conjugate surfaces.

Keywords: fractal dimension, distribution of roughness shear sections, actual contact area, discrete contact of rough surfaces

For citation: Tikhomirov V.P., Izmerov M.A. Fractal model of contact interaction for underloaded surfaces / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 9 (171). P. 41–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-41-48

Введение

Известные фрактальные модели [3 – 5] основаны на допущении о том, что для геометрического описания поверхности достаточно знать её фрактальную размерность D и параметр фрактальной шероховатости G . При этом фрактальная размерность является фактором, от которого зависит соотношение между нагрузкой и площадью среза выступа. Для оценки параметров множественного контакта используют размерное распределение площадей среза. Модели [8 – 10] учитывают, что соотношение площади среза и несущей способности пятна контакта зависит от того, в каком состоянии находится деформируемая неровность. Размерное распределение площадей пятен контакта (среза при рассмотрении контакта деформируемой фрактальной поверхности с гладкой твердой поверхностью) связывают с той же фрактальной размерностью, что и для поверхности.

В данной работе рассматривается случай, когда фрактальная размерность D как поверхности, так и фрактальная размерность, входящая в размерное распределение площадей среза D_{XY} , имеют разные значения. Приведена методика определения фрактальной размерности D_{XY} .

Определение фрактальной размерности D_{XY}

Полагаем, что число неровностей, площадь которых больше a , определяется как:

$$N(A > a) = c (a_L/a)^{\frac{D}{2}}, \quad (1)$$

где a_L – наибольшая площадь среза выступа; D – фрактальная размерность (обозначим ее через D_{XY} в случае, когда она отличается от фрактальной размерности профиля).

Распределение площадей среза неровностей фрактальной шероховатой поверхности представлено на рис. 1.

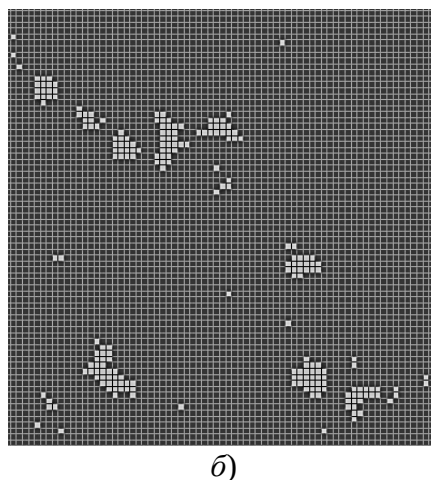
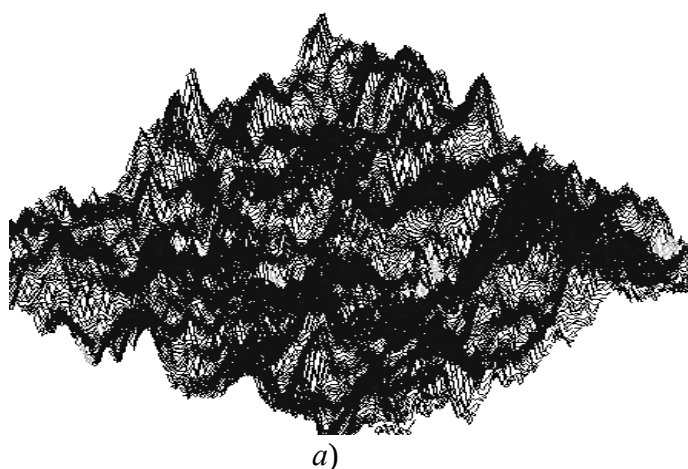


Рис. 1. Фрактальная поверхность и площади среза выступов:
 a – фрактальная поверхность; b – площади среза выступов

Fig. 1. Fractal surface and shear section of asperities:
 a – fractal surface; b – shear section of asperities

Распределение площадей среза шероховатой поверхности плоскостью, параллельной средней плоскости, зависит от структурных особенностей рассматриваемой поверхности. Процедура определения закона распределения площадей среза поверхности потребовала разработать соответствующее программное обеспечение [7] (рис. 2). Анализ площадей среза неровностей на некотором

расстоянии от линии выступов позволяет найти количество площадок, их размеры и количество площадей, превышающих заданное значение $N_i (A > a'_i)$. Разработанное программное обеспечение дает [9] оценку размеров площадей среза (в условных единицах) (рис. 2).

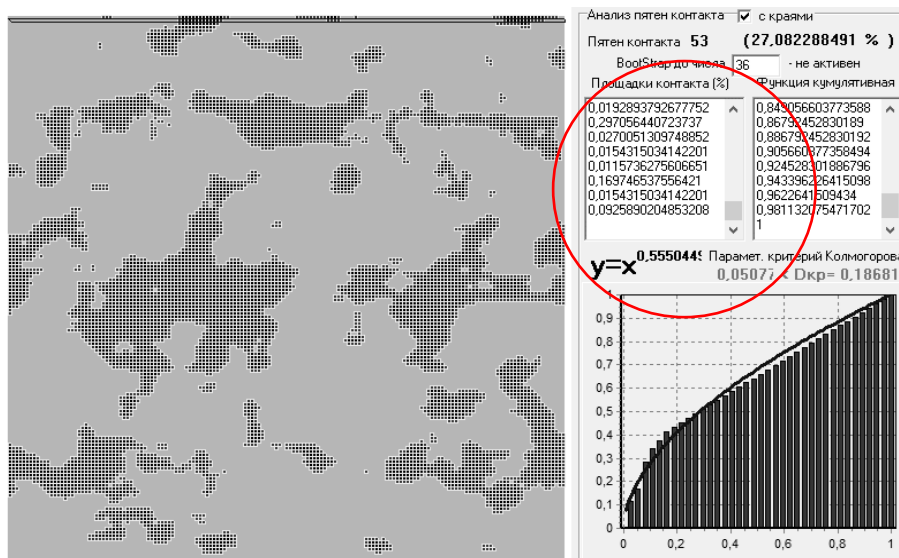


Рис. 2. Распределение площадей среза поверхности

Fig. 2. Distribution of surface shear section

Найденные значения площадей среза неровностей ранжируем в списке Excel по убыванию $\{1,080205; 0,478377; 0,478377; 0,451371; \dots\}^T$. Затем определяем число площадей среза, превышающих заданное значение $N_i (A > a'_i)$. Этому значению соответствует отношение a'_L/a'_i , где a'_L – максимальная площадь среза из рассматриваемого списка ($a'_L = 1,080205$ у. е.). В качестве примера полученные площади среза подвергнем сортировке по убыванию (выделена выборка из 57 данных):

$$N (A > a') = \{3; 5; 10; 15; \dots\}^T; \quad (2)$$

$$\frac{a'_L}{a'} = \{2,3; 2,7; 5,0; 9,3; \dots\}^T. \quad (3)$$

Обозначив через y число площадей среза, а через x – отношение a'_L/a' , выразим их связь в виде графика (рис. 3).

Зависимость числа неровностей

$N (A > a) = f (a_L/a)$ характеризуется степенной зависимостью

$$N (A > a') = 1,9453(a'_L/a')^{0,8705}. \quad (4)$$

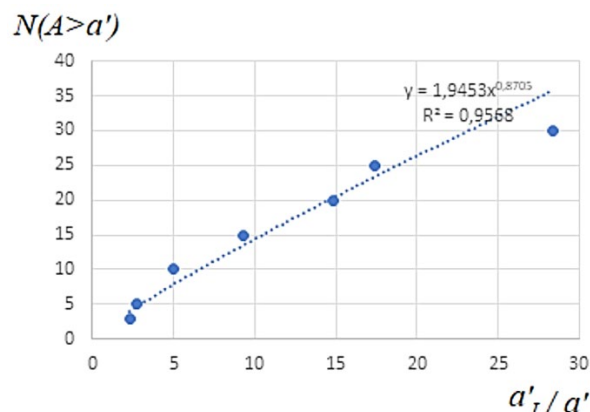


Рис. 3. Зависимость числа площадей среза от отношения максимальной площади среза к рассматриваемой

Fig. 3. Dependence of the number of shear sections on the ratio the maximum shear section to the one under consideration

Тогда $D_{XY} = 2 \cdot 0,8705 = 1,741$.
Следует сказать, что фрактальная размерность профиля (поверхности) для рассматриваемой поверхности равна $D = 1,2868$ ($D_S = D + 1 = 2,2868$).

Профиль фрактальной поверхности описывается функцией Вейерштрасса-Мандельброта:

$$z(x) = G^{D-1} \sum_{n=n_1}^{\infty} \frac{\cos(2\pi\gamma^n x)}{\gamma^{(2-D)n}}; 1 < D < 2; \gamma = 1,5, \quad (5)$$

где D – фрактальная размерность профиля;
 G – параметр фрактальной шероховатости.

В соответствии с рис. 4, и, учитывая уравнение профиля выступа, запишем:

$$\delta = G^{D-1} (a')^{\frac{(2-D)}{2}}, \quad (6)$$

где $a' = \pi(r')^2$.

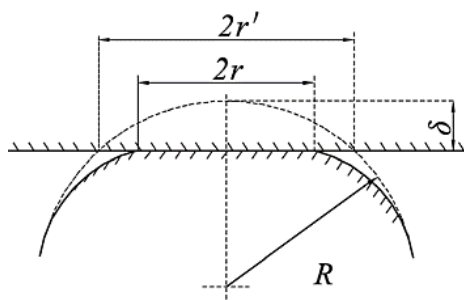


Рис. 4. Контактное взаимодействие сферического выступа с жесткой плоской поверхностью

Fig. 4. Contact interaction of a spheroid asperity with a rigid flat surface

Радиус закругления верхней части выступа равен [9]:

$$R = \frac{(a')^{\frac{D}{2}}}{2\pi G^{D-1}}. \quad (7)$$

Критическая площадь

В качестве критерия перехода от пластического состояния выступа к упругому, согласно [1], примем:

$$\delta_c = \left(\frac{\pi H}{2E}\right)^2 R. \quad (8)$$

С другой стороны:

$$\delta_c = \frac{a'_c}{2\pi R}.$$

Учитывая значение радиуса, найдем:

Зависимость нормальной нагрузки от площади среза в условиях упругой деформации в соответствии с теорией Герца, имеет вид [9]:

$$F_e(a') = \frac{4}{3\sqrt{2}\pi} E G^{D-1} (a')^{\frac{(3-D)}{2}}, \quad (10)$$

где $E = \left[\frac{(1-\mu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\mu_2^2)}{E_2}\right]^{-1}$, E_1, E_2, μ_1, μ_2 – модули упругости и коэффициенты Пуассона сопряженных поверхностей.

Для пластической деформации выступа соотношение между нагрузкой и площадью среза запишем так:

$$F_p(a') = H a', \quad (11)$$

где H – твердость материала выступа.

В случае упругой деформации связь между площадями среза и пятна контакта определяется соотношением $a' = 2a$. Критерий перехода от пластической деформации выступа к упругой представим соотношением $a'_c = 2a_c$.

В соответствии с [1], запишем:

$$a_c = \left(\frac{2E}{H}\right)^{\frac{2}{D-1}} G^2. \quad (12)$$

Множественный контакт

Контактное взаимодействие определяется следующим соотношением:

$$F = \int_0^{a'_c} H a' n(a') da' + \int_{a'_c}^{a'_L} \frac{4}{3\sqrt{2\pi}} E G^{D-1} (a')^{\frac{(3-D)}{2}} n(a') da'. \quad (13)$$

Размерное распределение площадей среза определяется выражением

$$\frac{dN(A > a')}{da'} = n(a') = c \frac{D_{XY}}{2} (a'_L)^{\frac{D_{XY}}{2}} \psi^{1-\frac{D_{XY}}{2}} (a')^{-\frac{(2+D_{XY})}{2}}; \quad (14)$$

$$0 < a' \leq a'_L. \quad (15)$$

В данном примере $c = 1,9453$.

Запишем нормальную нагрузку после интегрирования в виде:

$$F = \frac{H D_{XY}}{(2 - D_{XY})} (a'_L)^{\frac{D_{XY}}{2}} \psi^{1-\frac{D_{XY}}{2}} (a'_c)^{\frac{(2-D_{XY})}{2}} + \frac{4c}{3\sqrt{2\pi}} E G^{D-1} \frac{D_{XY}}{(3 - D - D_{XY})} \psi^{1-\frac{D_{XY}}{2}} \left[(a'_L)^{\frac{(3-D-D_{XY})}{2}} - (a'_c)^{\frac{(3-D-D_{XY})}{2}} \right]. \quad (16)$$

При $D + D_{XY} = 3$ нормальная нагрузка определяется выражением [9]:

$$F = 3H \psi^{\frac{1}{4}} a_L^{\frac{3}{4}} a_c^{\frac{1}{4}} + \frac{\sqrt[4]{2}}{\sqrt{\pi}} E \sqrt{G} \psi^{\frac{1}{4}} a_L^{\frac{3}{4}} \ln \frac{a_L}{a_c}. \quad (17)$$

Здесь $a_L = \frac{2-D_{XY}}{D_{XY}} \psi^{-(1-D_{XY}/2)} A_r$; $a_c = a'_c/2$.

Фактическую площадь контакта для фрактальных поверхностей найдём как:

$$A_r = \frac{c D_{XY}}{2 - D_{XY}} \psi^{(1-\frac{D_{XY}}{2})} a'_L. \quad (18)$$

Найдём зависимости фактической площади контакта от нормальной нагрузки и сравним результаты для случаев, когда $D = D_{XY}$ и $D \neq D_{XY}$ при следующих исходных данных: $D = 1,459$; $c = 1$; твердость $H = 3000$ МПа. $R_a = 0,8$ мкм; $R_q = R_a \sqrt{\pi/2} = 1,003$ мкм; $D_{XY} = 1,700$;

Зависимости фактической площади контакта от нормальной нагрузки для разных случаев представлены на рис. 5.

В рассматриваемом диапазоне изменения нагрузки принятия одинаковыми фрактальную размерность поверхности и размерность (показатель степени), определяющую размерное распределение площадей среза неровностей фрактальной поверхности $D = D_{XY}$ описывает зависимость с меньшим угловым коэффициентом по сравнению с зависимостью, когда $D \neq D_{XY}$.

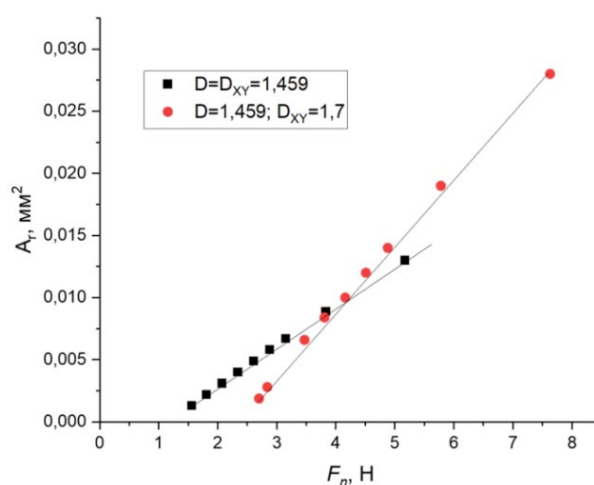


Рис. 5. Зависимости фактической площади контакта от нагрузки для разных случаев

Fig. 5. Dependences of the actual contact area on the load for different cases

Зависимость относительной фактической площади контакта от нормального давления (отношения нагрузки к номинальной площади контакта) представлена на рис. 6. Номинальная площадь контакта определялась [1] как:

$$\frac{A_r}{A_a} = 0,5 \operatorname{erfc}\left(\frac{d}{R_q \sqrt{2}}\right), \quad (19)$$

где $\operatorname{erfc}(\dots)$ – дополнительная функция ошибки; d – зазор между средней линией профиля фрактальной поверхности и положением гладкого жесткого тела (рис. 7).

Зависимости сближения от нагрузки приведены на рис. 8.

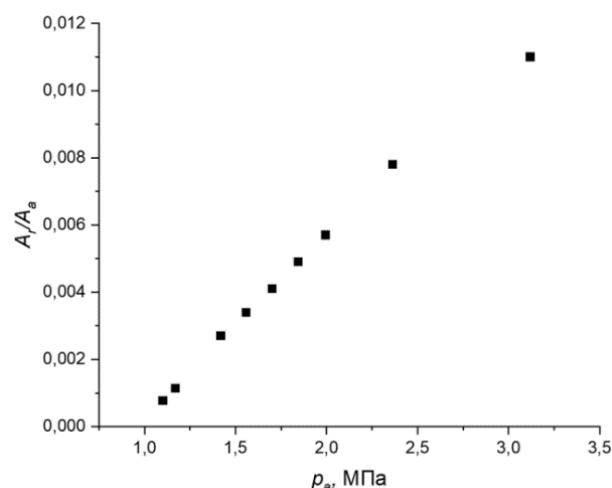


Рис. 6. Зависимость относительной площади контакта от номинального давления

Fig. 6. Dependence of the relative contact area on the nominal pressure

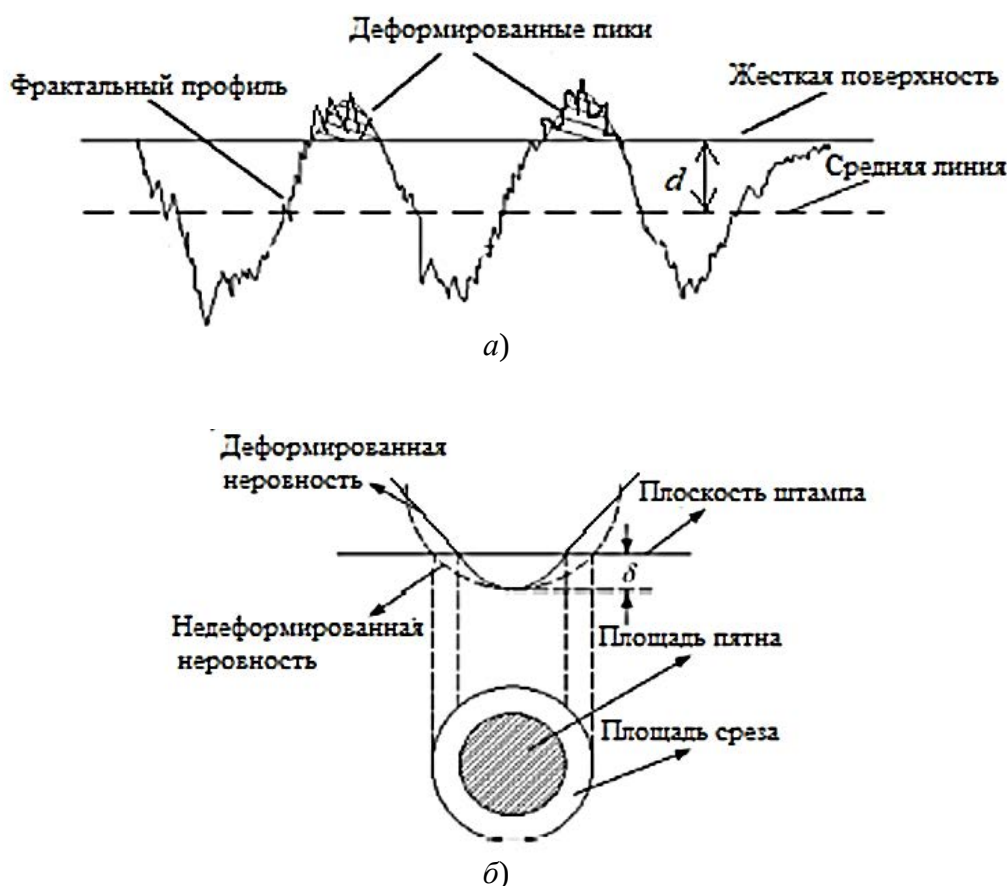


Рис. 7. Деформация неровностей:

a – контакт фрактальной шероховатой поверхности с плоской; b – площади пятна и среза верхней части неровности

Fig. 7. Deformation of irregularities:

a – the contact of a fractal rough surface with a flat one; b – the area of the spot and shearing of the upper part of the rub

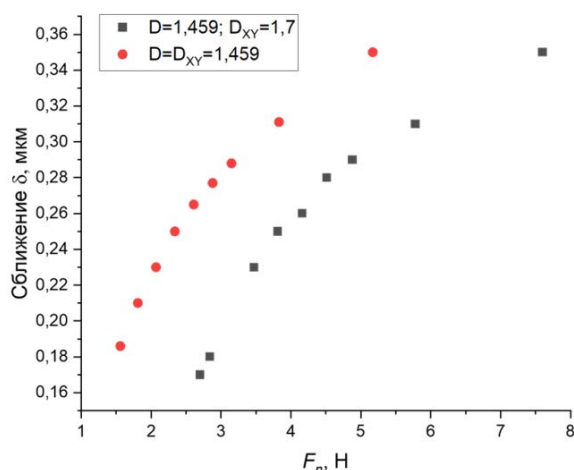


Рис. 8. Зависимости сближения от нормальной нагрузки

Fig. 8. Proximity dependence on normal load

Таким образом можно сделать вывод, что фрактальные модели имеют разное решение контактной задачи для случая одинакового значения фрактальной размерности профиля и распределения пятен контакта, и разного значения.

Обсуждение

Функциональные свойства поверхности определяются ее качеством – физико-механическими свойствами материала и топографическими особенностями. Для оценки эксплуатационных показателей используют те или иные модели исследуемой поверхности и зависимости, характеризующие контактное взаимодействие как единичной неровности, так и множественного контакта. Фрактальные модели отражают слабо нагруженный контакт, когда существенное влияние на параметры контактного взаимодействия оказывают субмикронеровности. Моделирование взаимодействия фрактальных поверхностей дает возможность получить количественные результаты с требуемой точностью. Допущения, принимаемые в модели, должны быть так или иначе обоснованы. Уточненная фрактальная модель, предложенная в статье, отличается от известных фрактальных моделей тем, что размерность D_{xy} (показатель степени в выражении для числа пятен среза на определенном уровне шероховатой поверхности $N(A > a') = c(a_L'/a')^{D_{xy}/2}$) отличается от

фрактальной размерности поверхности. Для обоснования этого допущения было разработано программное обеспечение и представлена методика оценки D_{xy} .

Выводы

1. Рассмотрена модель контактного взаимодействия слабо нагруженного стыка, учитывающая условие, что фрактальная размерность поверхности отличается от показателя степени D_{xy} , определяющей размерное распределение площадей среза неровностей.
2. Предложена методика оценки D_{xy} с использованием разработанного в данной работе программного обеспечения.
3. Уточненная модель потребовала введение размерности (показателя степени) распределения числа площадей среза и нормировочного коэффициента c , аппроксимирующего зависимость $N(A > a) = f(a_L/a)$.
4. Приведено сравнение результатов, полученных с помощью предлагаемой и известной фрактальной модели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Majumdar A., Bhushan B. Role of fractal geometry in roughness characterization and contact mechanics of surfaces // Trans. ASME: J. Tribology. 1990. No.112. P. 205–216.
2. Zhang X., Wang N., Lan G., Wen S., Chen Y. Tangential Damping and its Dissipation Factor Models of Joint Interfaces Based on Fractal Theory with Simulations // Journal of Tribology. 2014. Vol. 136 (011704-1-10)
3. Qiang Z., Xiaoqian C., Yiyong H., Yong C. Fractal modeling of fluidic leakage through metal sealing surfaces // AIP Advances 8. 2018. <https://doi.org/10.1063/1.5023708>
4. Tian H., Zhao C., Zhu D., Qin H. Practical Expressions of Elastoplastic Contact between Rough Surfaces // International Journal of Modeling and Optimization. 2012. Vol. 2. No. 3. P. 179–186.
5. Tikhomirov V.P., Izmerov M.A. Fractal model of contact interaction of nominally flat surfaces // AIP Conference Proceedings. Proceedings international conference "Problems of applied mechanics". 2021. C. 060004.
6. Горохов Д.Б. Контактное взаимодействие фрактальных шероховатых поверхностей деталей машин / Д.Б. Горохов / М.: РГБ, 2005. 148 с.
7. Тихомиров В.П., Горленко О.А., Измеров М.А. Нормальная контактная жёсткость фрактальных поверхностей стыкового соединения // Качество и жизнь. 2018. № 4 (20). С. 429–433.
8. Маджумдар А., Бхушан Б. Фрактальная модель упругопластического контакта шероховатых

поверхностей // Современное машиностроение. Сер. Б. 1991. № 6. С. 11–23.

9. Тихомиров В.П. Фрактальные модели инженерных поверхностей // Вестник Брянского государственного технического университета. 2014. № 3. С. 72–80.

10. Тихомиров В.П., Шалыгин М.Г., Измеров М.А., Крутов А.В. Фрактальная размерность дискретного контакта // Научно-технические технологии в машиностроении. 2024. № 1 (151). С. 41–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-41-48

REFERENCES

1. Majumdar A., Bhushan B. Role of fractal geometry in roughness characterization and contact mechanics of surfaces // Trans. ASME: J. Tribology. 1990. No. 112. P. 205–216.

2. Zhang X., Wang N., Lan G., Wen S., Chen Y. Tangential Damping and its Dissipation Factor Models of Joint Interfaces Based on Fractal Theory with Simulations // Journal of Tribology. 2014. Vol. 136 (011704-1-10)

3. Qiang Z., Xiaoqian C., Yiyong H., Yong C. Fractal modeling of fluidic leakage through metal sealing surfaces // AIP Advances 8. 2018. <https://doi.org/10.1063/1.5023708>

4. Tian H., Zhao C., Zhu D., Qin H. Practical Expressions of Elastoplastic Contact between Rough Surfaces // International Journal of Modeling and Optimization. 2012. Vol. 2. No. 3. P. 179–186.

5. Tikhomirov V.P., Izmerov M.A. Fractal model of contact interaction of nominally flat surfaces // AIP Conference Proceedings. Proceedings international conference "Problems of applied mechanics". 2021. C. 060004.

6. Gorokhov D.B. Contact interaction of fractal rough surfaces of machine parts / D.B. Gorokhov / Dissertation of the Candidate of Technical Sciences on spec. 05.02.04. M., RGB, 2005. 148 p.

7. Tikhomirov V.P., Gorlenko O.A., Izmerov M.A. Normal contact stiffness of fractal surfaces of butt joints // Quality and life. 2018. № 4 (20). Pp. 429–433.

8. Majumdar, A., Bhushan B. Fractal model of elastic-plastic contact of rough surfaces // Modern mechanical engineering. Ser. B. 1991. No. 6. Pp. 11–23.

9. Tikhomirov V.P. Fractal models of engineering surfaces // Bulletin of the Bryansk State Technical University. 2014. No. 3. Pp. 72–80.

10. Tikhomirov V.P., Shalygin M.G., Izmerov M.A., and Krutov A.V. Fractal Dimension of Discrete Contact // Science-Intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2024. No 1 (151). Pp. 41–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-41-48

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

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

Статья поступила в редакцию 14.10.2024; одобрена после рецензирования 02.12.2024; принята к публикации 06.12.2024

The article was submitted 14.10.2024; approved after reviewing 02.12.2024; accepted for publication 06.12.2024

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

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

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

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

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

Сдано в набор 17.09.2025. Выход в свет 30.09.2025.

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

12+