

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

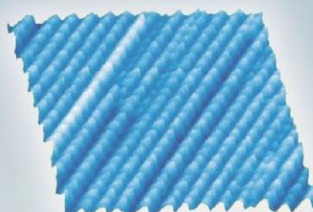
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

10⁽¹⁴⁸⁾
2023

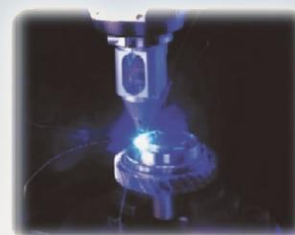
**ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
И КОМБИНИРОВАННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



**НАНОТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**



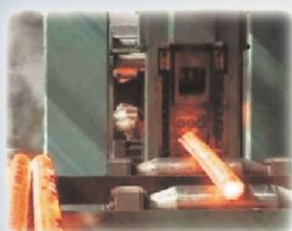
**ЛАЗЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



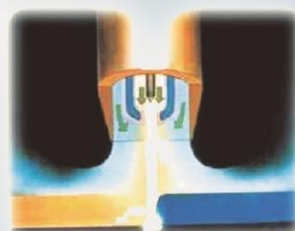
**ТЕХНОЛОГИИ
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В СВАРОЧНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



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



НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 10 (148)

2023

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

Главный редактор

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

Зам. главного редактора

д.т.н., доцент ШАЛЫГИН М.Г. (г. Брянск)

Председатель редакционного совета

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

Зам. председателя редакционного совета

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

Редакционный совет:

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

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

д.н., доктор инженер ВАЛЬДЕНМАЙЕР Т.

(г. Штутгарт, Германия)

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

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

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

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

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

д.т.н., доц. ЛАРИН С.Н. (г. Тула)

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

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

д.т.н., проф. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)

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

д.т.н., проф., акад. НАН Беларуси

МЫШКИН Н.К., (г. Гомель, Беларусь)

д.т.н., проф. 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., Бессмертная Ю.В. Изотермическая высадка титановых
прутковых заготовок пуансоном с криволинейной рабочей поверхностью 3

СВАРКА, РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Овчинников В.В., Резцов Р.Б. Особенности формирования сварных
соединений алюминиевого сплава АК9, полученного селективным
лазерным плавлением 10

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА

Григорьянц А.Г. Моделирование процесса селективного лазерного
плавления в аддитивном производстве 20

ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Братан С.М., Головин В.И., Дымченко И.А., Новоселов Ю.К. Расчет
высокопроизводительных циклов шлифования валков холодной
прокатки на основе оптимизации цикла по радиальному усилию 30

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ СБОРКЕ МАШИН

Вартанов М.В., Линь Н.В. Научно-технические технологии в сборочном
производстве 39

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

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

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 10 (148)

2023

Publishes from July 2011

MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

Comes out with assistance of Engineering Technologists Association

Editor-in-chief

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

Deputy chief editor

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

Chairman of Editorial Committee

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

Chairman Assistant

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

Editorial Committee:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

d.en.s., prof. TCHIGIRINSKY 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., Bessmertnaya Yu.V. Isothermal upset of titanium rod blanks using
a punch with a ruled surface. 3

WELDING, RELATED PROCESSES AND TECHNOLOGIES

Ovchinnikov V.V., Reztsov R.B. Specificities of welds formation with aluminum
alloy AK 9 obtained by selective laser melting. 10

ADDITIVE TECHNOLOGIES AND LASER PROCESSING

Grigoryants A.G. Modeling of the selective laser melting process in additive
manufacturing. 20

TECHNOLOGIES OF MECHANICAL PROCESSING OF WORKPIECES

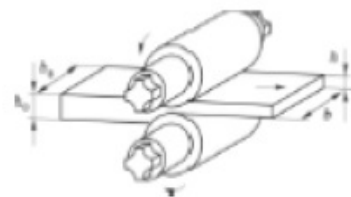
Bratan S.M., Golovin V.I., Dymchenko I.A., Novoselov Yu.K. Calculation
of high-duty cold reduction rollers grinding cycles based on radial force cycle
optimization. 30

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MACHINE ASSEMBLY

Vartanov M.V., Lin N.V. High-tech technologies in assembly production. 39

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

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



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №10 (148). С.3-9.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №10 (148). P. 3-9.

Научная статья
УДК 621.983.3.539.376
doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-9

Изотермическая высадка титановых прутковых заготовок пуансоном с косой рабочей поверхностью

Сергей Николаевич Ларин¹, д.т.н.

Юлия Вячеславовна Бессмертная², к.т.н.

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

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

² bessmertny@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. В статье рассмотрена операция получения цилиндрических изделий с наклонным фланцем из титанового сплава ВТ6. Операция заключается в воздействии на прутковую заготовку из титанового сплава ВТ6 пуансоном со скошенной рабочей кромкой. При получении деталей с наклонным фланцем из труднодеформируемых сплавов необходима формулировка режимов технологии. Требуется уточнение скоростей деформирования и воздействия контактного трения на кинематику течения материала и силы формоизменения для оценки возможностей процесса выполнено САЕ-моделирование. Поэтому выполнено моделирование операции получения цилиндрических изделий с наклонным фланцем из титанового сплава ВТ6 в программе для моделирования DEFORM. Установлено влияние скоростных условий операции на изменение величин интенсивностей напряжений в изделии. Выявлены зависимости влияния углов и скоростей деформирования на силу высадки. Результаты теоретических исследований, полученных в ходе моделирования, были обобщены. Был выполнен регрессионный анализ полученных в ходе моделирования результатов. По результатам моделирования получены выражения для оценки интенсивности напряжений. Результаты регрессионного моделирования хорошо согласуются с результатами компьютерного моделирования. Используя количественные результаты моделирования, проведена регрессионная оценка силы. Получены уравнения регрессии в натуральных значениях для оценки влияния ключевых параметров процесса при высадке, которые могут быть полезны непосредственно при назначении технологических режимов высадки заготовок из титановых сплавов. Результаты могут быть использованы при реализации технологий изготовления деталей с фланцевыми утолщениями, отличающихся наилучшими прочностными характеристиками и обладающих стойкостью к нагрузкам.

Ключевые слова: высадка, исследование, формоизменение, моделирование

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами» научного проекта: «Объемное деформирование с локальным нагревом прутковых и трубных заготовок из высокопрочных цветных сплавов» №23-29-00470.

Для цитирования: Ларин С.Н., Бессмертная Ю.В. Изотермическая высадка титановых прутковых заготовок пуансоном с косой рабочей поверхностью // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 10 (148). С. 3–9. doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-9

Isothermal upset of titanium rod blanks using a punch with a ruled surface

Sergey N. Larin¹, D. Eng.
Yulia V. Bessmertnaya², PhD. Eng.
^{1,2} Tula State University, Tula, Russia
¹ mpf-tula@rambler.ru
² bessmertny@rambler.ru

Abstract. The operation of obtaining cylindrical products with a titling pad made of titanium alloy VT6 is viewed in the article. The operation involves impacting a bar blank made of titanium alloy VT6 with the use of a punch having sloped edge. When obtaining parts having titling pad made of difficult-to-form alloys, it is necessary to formulate the modes of technology. It is required to specify the rates of deformation and the impact of contact friction on the kinematics of the material flow and the force of shape change to assess the capabilities of the process performed by CAE modeling. Therefore, the simulation of obtaining cylindrical products with a titling pad made of titanium alloy VT6 was performed in the DEFORM modeling program. The influence of the speed conditions of the operation on the change in the values of stress intensities in the product was found. The dependences of the influence of the angles and rates of deformation on the landing force are revealed. The results of theoretical studies obtained during the simulation were summarized. A regression analysis of the results obtained during the simulation was performed. Based on the simulation results, expressions for estimating the intensity of stresses are obtained. The results of regression modeling are in good agreement with the results of computer modeling. Using quantitative modeling results, a regression assessment of the force was taken. Regression equations in natural values are obtained for the assessment of the impact of key process parameters during setup, which can be useful directly when assigning technological modes of titanium alloy blanks setup. The results can be used in the implementation of manufacturing technologies for parts with flange seals, characterized by the best strength characteristics and good load resistance.

Keywords: setup, research, change of shape, modeling

Acknowledgements: the work was carried out with the support of a grant from the Russian Scientific Foundation «Conducting fundamental scientific research and exploratory scientific research by small separate scientific groups» of the scientific project: «Volumetric deformation with local heating of rod and tube blanks made of high-strength non-ferrous alloys» No. 23-29-00470.

For citation: Larin S.N., Bessmertnaya Yu.V. Isothermal upset of titanium rod blanks using a punch with a ruled surface / Science intensive technologies in mechanical engineering 2023. № 10 (148). P. 3–9. doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-9

Сплошные цилиндрические детали с фланцем распространены в машиностроении. Технологии их получения достаточно отработаны [1 – 4]. В основном их получают высадкой. Но при получении деталей с наклонным фланцем из труднодеформируемых сплавов необходимо уточнение режимов технологии изготовления [5 – 8]. Требуется уточнение скоростей деформирования и воздействия контактного трения на кинематику течения материала и силы формоизменения [9 – 12]. Весьма удобным инструментом для этого является моделирование данного процесса в САЕ-комплексе [13 – 15]. Поэтому выполнено моделирование операции получения цилиндрических изделий с наклонным фланцем из титанового сплава ВТ6. Выявлено влияние угла скоса пуансона, контактного трения и скоростей формоизменения на силы высадки и кинематику течения материала заготовки.

Исследована осадка прутка диаметром 60 мм. Схема процесса представлена на рис. 1.

При расчетах считаем, что свободная часть заготовки имеет высоту h , равную двум диаметрам $h = 2d$. Влияние скорости деформирования исследовалось в интервале 1,0...200 мм/мин. Материал заготовки – сплав ВТ6. Процесс рассчитывался при температуре деформирования 900 °С. Угол конусности пуансона $\alpha = 0...7,0^\circ$. Ход инструмента рассматривался в интервале $h = 0...0,9 \cdot h_0$.

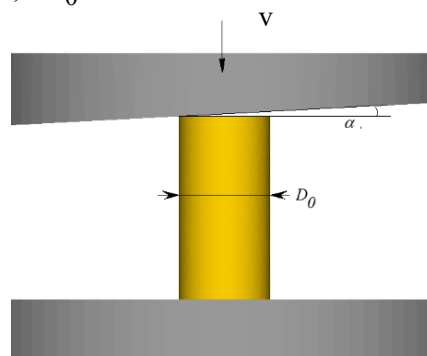


Рис. 1. Эскиз исследуемой операции

Fig. 1. Sketch of the operation under study

Схемы процесса высадки на конечном этапе при наибольшей величине силы для разных значений угла α и с разными скоростями деформирования представлены на рис. 2 – 4.

Данные схемы иллюстрируют изменение интенсивностей напряжений для варьируемых параметров.

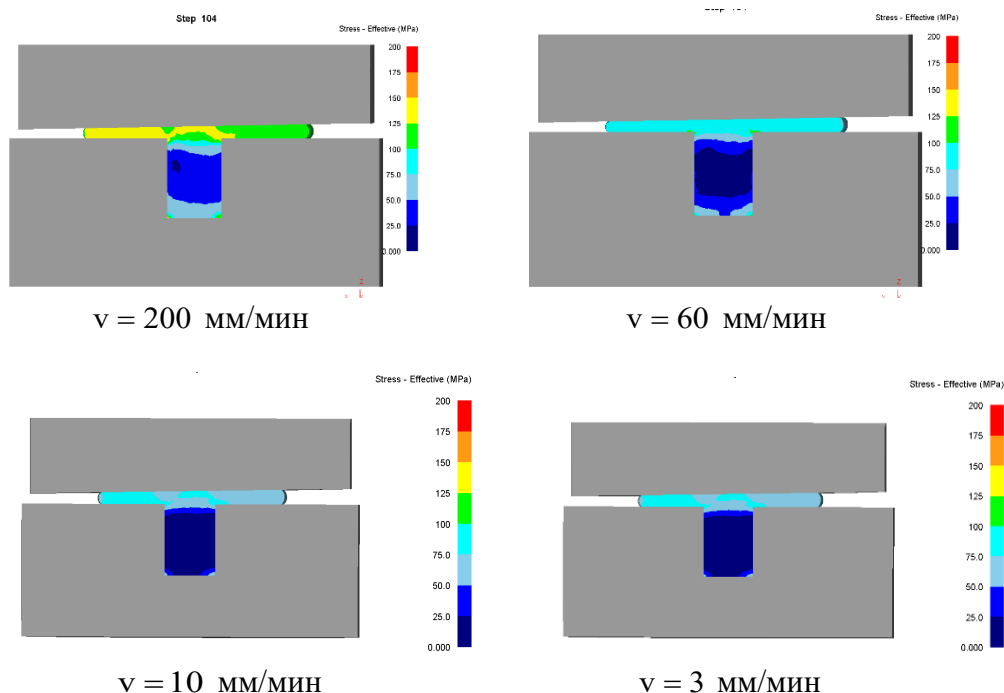


Рис. 2. Схемы процесса высадки скошенным пуансоном с углом скоса $1,0^\circ$

Fig. 2. Schemes of setup process using a titling pad with an obliquity angle $1,0^\circ$

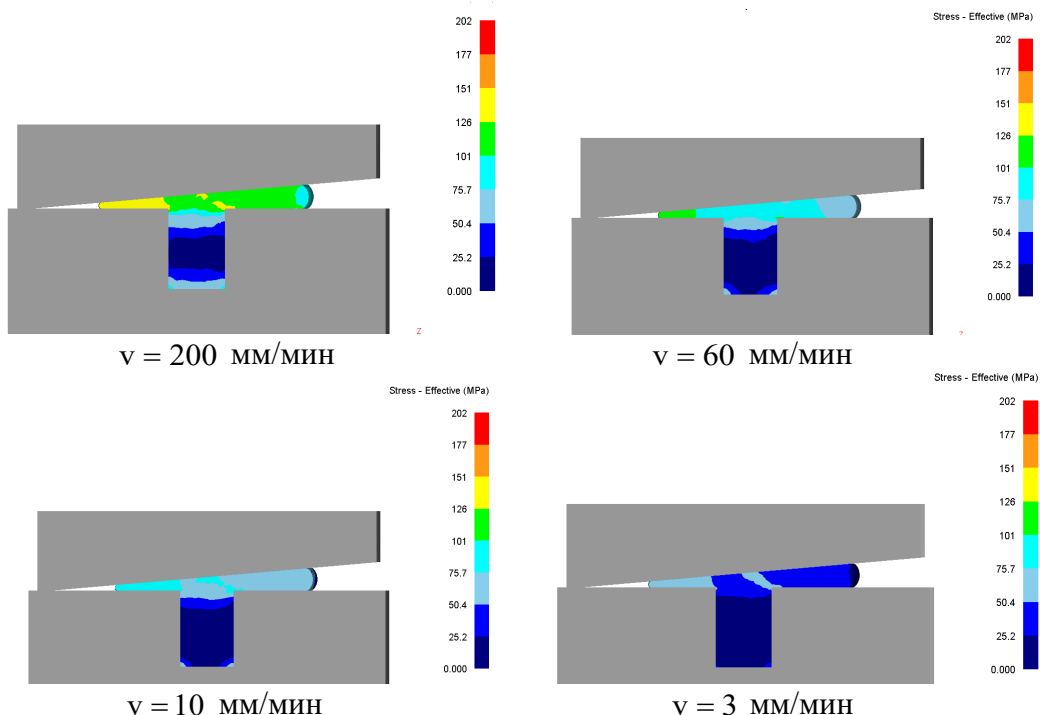


Рис. 3. Схемы процесса высадки скошенным пуансоном с углом скоса $5,0^\circ$

Fig. 3. Schemes of setup process using a titling pad with an obliquity angle $5,0^\circ$

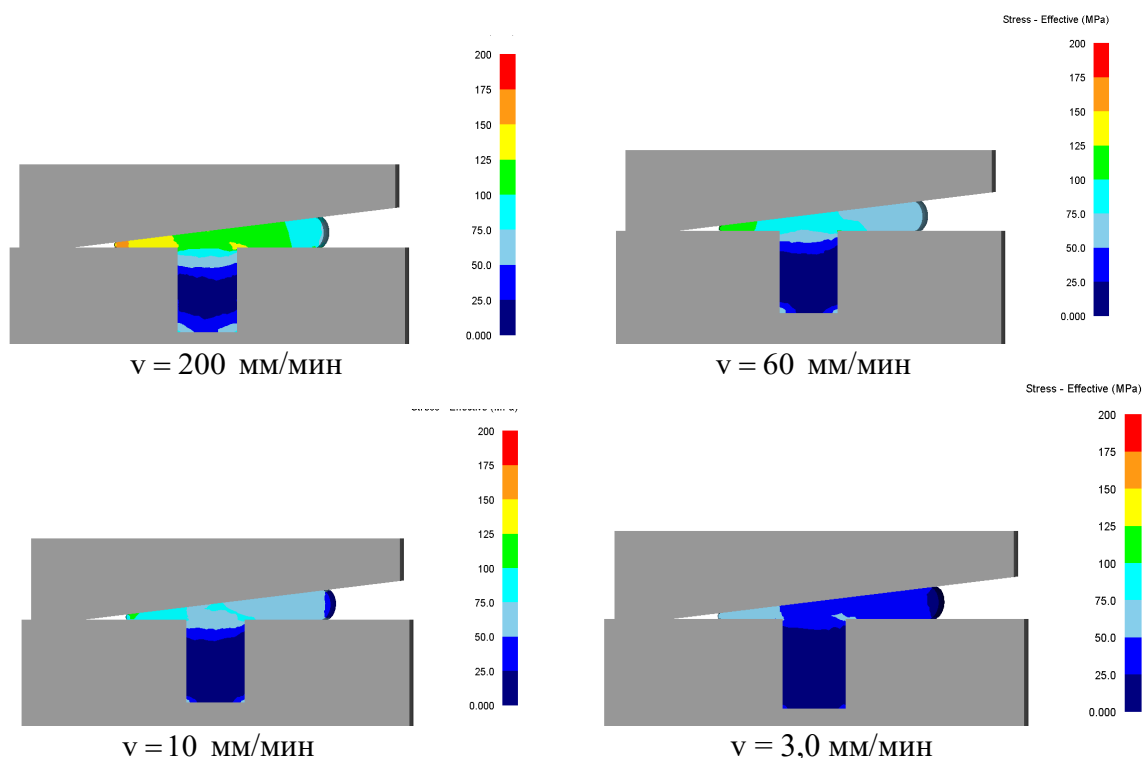


Рис. 4. Схемы процесса высадки скошенным пуансоном с углом скоса $7,0^\circ$

Fig. 4. Schemes of setup process using a titling pad with an obliquity angle $7,0^\circ$

Установлено, что на изменение интенсивностей напряжений в объеме детали наибольшее влияние оказывает изменение скоростных режимов операции. Рост скоростей деформирования приводит к увеличению значений интенсивностей напряжений в два раза. Увеличение угла скоса пуансона ведет к росту интенсивностей напряжений на 20...25 %.

Выявленные зависимости влияния углов α и скоростей деформирования на силу процесса высадки приведены на рис. 5 и рис. 6.

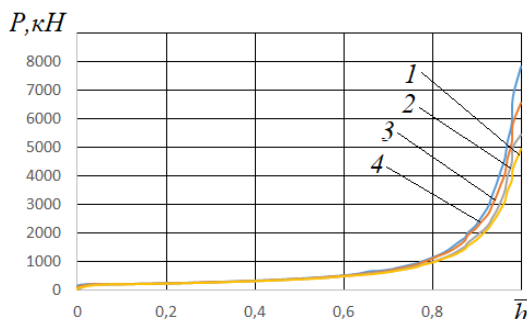


Рис. 5. Изменение силы высадки в течении операции:

1 – $\alpha = 1,0^\circ$; 2 – $\alpha = 3,0^\circ$; 3 – $\alpha = 5,0^\circ$; 4 – $\alpha = 7,0^\circ$

Fig. 5. Change in setup force during the operation:

1 – $\alpha = 1,0^\circ$; 2 – $\alpha = 3,0^\circ$; 3 – $\alpha = 5,0^\circ$; 4 – $\alpha = 7,0^\circ$

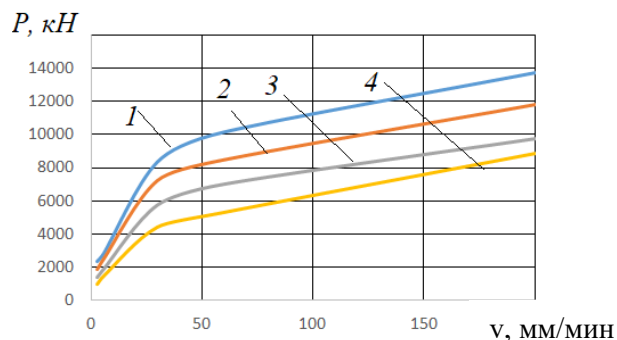
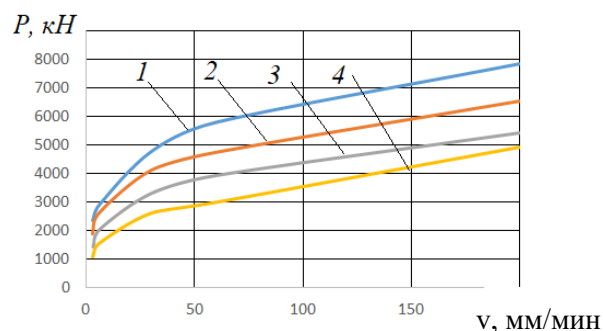


Рис. 6. Изменение силы высадки от скорости деформирования

1 – $\alpha = 1,0^\circ$; 2 – $\alpha = 3,0^\circ$; 3 – $\alpha = 5,0^\circ$; 4 – $\alpha = 7,0^\circ$

Fig. 6. Change in setup force depending on the deformation rate

1 – $\alpha = 1,0^\circ$; 2 – $\alpha = 3,0^\circ$; 3 – $\alpha = 5,0^\circ$; 4 – $\alpha = 7,0^\circ$

Изменённые силы высадки в зависимости от скоростей деформирования и угла конусности носит характер похожий на изменение интенсивностей напряжений. Рост скорости перемещения инструмента в интервале 3...200 мм/мин может приводить к увеличению силовой нагрузки в четыре раза для пуансонов с большими углами конусности и в пять раз для пуансонов с меньшими углами конусности. Рост угла конуса пуансона ведет к снижению силы на 50 %. Разница в величинах углов конусности становится заметной в конце рабочего хода инструмента.

Результаты теоретических исследований, полученных в ходе моделирования, были обобщены. А именно был выполнен регрессионный анализ полученных в ходе моделирования результатов. В качестве входных параметров были приняты скорость деформирования X_1 , угол пуансона X_2 и коэффициент трения X_3 . Данные для регрессионного моделирования приведены в табл. 1. Матрица планирования представлена в табл. 2 [12].

1. Факторное пространство оценки силы вытяжки

1. Factor space for estimating the drawing force

Факторы			Уровни варьирования факторов		
Наименование фактора	Натуральное значение фактора	Кодированное обозначение фактора	$X_{i\min}$ ($X_i = -1$)	X_{i0} ($X_i = 0$)	$X_{i\max}$ ($X_i = +1$)
Скорость деформирования	v	X_1	5,0	17,5	30
Угол пуансона	α	X_2	1,0	4,0	7,0
Коэффициент трения	m_u	X_3	0,3	0,4	0,5

2. Матрица планирования

2. Planning matrix

№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	$\bar{Y}_4$
1	+	-	-	-	2500
2	+	+	-	-	5500
3	+	-	+	-	1400
4	+	+	+	-	3000
5	+	-	-	+	1300
6	+	+	-	+	4600
7	+	-	+	+	765
8	+	+	+	+	2300

По результатам моделирования получены выражения для оценки интенсивности напряжений в кодированных и натуральных величинах:

$$P = 2670 + 1179X_1 - 804X_2 - 429X_3 - 395X_1X_2;$$

$$P = 10,5va + 52,18v + 83,6a - 1231 + 4790m.$$

Результаты регрессионного моделирования хорошо согласуются с результатами компьютерного моделирования. Наибольшее влияние на силовые режимы оказывает скорость деформирования. Таким образом, при необходимости формирования скоса на заготовке с углами более $3,0^\circ$ обеспечение скоростных условий в интервале 3,0...30 мм/мин позволяет обеспечить снижение силовой нагрузки и снижению неравномерности напряженного состояния. Полученные результаты можно использовать при разработке технологий высадки изделий со скошенным фланцем как рекомендации для назначения режимов деформирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Demin V. A., Larin S. N., Riskin R. V., Rizkova A. A. Study the influence of anisotropy of the drawing cylindrical part // CIS Iron and Steel Review / Vol. 16 (2018), pp. 25–28
2. Ларин С.Н., Платонов В.И., Ларина М.В. Влияние геометрии деформирующего инструмента на напряженно-деформированное состояние при комбинированном выдавливании // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 5. С. 451–456.
3. Zhichao Sun, Jing Cao, Huili Wu, Zhikun Yin. Inhomogeneous deformation law in forming of multi-cavity parts under complex loading path // Journal of Materials Processing Technology. 2018. Vol. 254. P. 179–192.
4. Springer P., Prahl U. Characterisation of mechanical behavior of 18CrNiMo7-6 steel with and without under warm forging conditions through processing maps analysis // Journal of Materials Processing Technology, 2016. Vol. 237. P. 216–234.
5. Демин В.А., Ларин С.Н. Технологическое обеспечение и повышение качества заготовок, получаемых обработкой металла давлением // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 8 (134). С. 12–19.
6. Aksenov S. A., Chumachenko E. N., Kolesnikov A. V., Osipov S. A. Determination of optimal gas forming conditions from free bulging tests at constant pressure Journal of Materials Processing Technology. 2015. Vol. 217. P. 158–164.

7. Ларин С.Н., Пасынков А.А., Нуждин Г.А. Обратное выдавливание прутковой заготовки с активным трением и вытяжкой утолщения на торце // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 6 (108). С. 16–20.

8. Малинин Н.Н. Ползучесть в обработке металлов. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.

9. Пасынков А.А., Борискин О.И., Ларин С.Н. Теоретические исследования операции изотермической раздачи труб из труднодеформируемых цветных сплавов в условиях кратковременной ползучести // Цветные металлы. 2018. № 2. С. 74–78.

10. Larin S.N., Pasyunkov A.A. Analysis of forming properties during the isothermal upsetting of cylindrical workpieces in the viscous-plasticity mode // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 441. Issue 1, 2. November 2018.

11. Теория пластических деформаций металлов / Е. П. Унков, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров и др. М.: Машиностроение, 1983. 598 с.

12. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Перминов Д.А. Применение статистического машинного эксперимента для исследования теоретической модели штамповки сердечников пуль // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2014. Вып. 6. С. 61–73.

13. Черняев А.В., Чарин А.В., Гладков В.А. Исследование силовых режимов радиального выдавливания внутренних утолщений на трубных заготовках // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 10. С. 440–445.

14. Теория обработки металлов давлением / Учебник для вузов / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь / Под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 442 с.

15. 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

REFERENCES

1. Demin V. A., Larin S. N., Riskin R. V., Rizkova A. A. Study the influence of anisotropy of the drawing cylindrical part // CIS Iron and Steel Review / Vol. 16 (2018), pp. 25–28
2. Larin S.N., Platonov V.I., Larina M.V. Influence of the geometry of the deforming tool on the stress-strain state during combined extrusion // Bulletin of the Tula State University. Technical sciences, 2020, No. 5. pp. 451–456
3. Zhichao Sun, Jing Cao, Huili Wu, Zhikun Yin. Inhomogeneous deformation law in forming of multi-cavity parts under complex loading path // Journal of Materials Processing Technology. 2018. Vol. 254. P. 179–192.
4. Springer P., Prahl U. Characterisation of mechanical behavior of 18CrNiMo7-6 steel with and without under warm forging conditions through processing maps analysis // Journal

of Materials Processing Technology, 2016. Vol. 237. P. 216–234.

5. Demin V.A., Larin S.N. Technological support and improvement of the quality of blanks obtained by metal pressure treatment // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2022, No. 8 (134), pp. 12–19.

6. Aksenov S.A., Chumachenko E.N., Kolesnikov A.V., Osipov S.A. Determination of optimal gas forming conditions from free bulging tests at constant pressure Journal of Materials Processing Technology. 2015. Vol. 217. P. 158–164.

7. Larin S.N., Pasyнков A.A., Nuzhdin G.A. Reverse extrusion of a rod blank with active friction and extrusion of thickening at the end // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2020, No. 6 (108), pp. 16–20.

8. Malinin N.N. Creep in metal processing. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 216 p.

9. Pasyнков A.A., Boriskin O.I., Larin S.N. Theoretical studies of the operation of isothermal distribution of pipes from difficult-to-form non-ferrous cavities in conditions of short-term creep // Non-ferrous metals, 2018, No. 2, pp. 74–78.

10. Larin S.N., Pasyнков A.A. Analysis of forming properties during the isothermal upsetting of cylindrical

workpieces in the viscous-plasticity mode // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 441. Issue 1, 2. November 2018.

11. Theory of plastic deformations of metals / E. P. Unksov, W. Johnson, V. L. Kolmogorov et al. Moscow: Mashinostroenie, 1983, 598 p.

12. Panfilov G.V., Nedoshivin S.V., Perminov D.A. Application of statistical machine experiment for investigating theoretical models stamping cores bullets. Izvestiya Tula State University: Technical Sciences Series. 2014, No. 6, pp. 61–73.

13. Chernyaev A.V., Charin A.V., Gladkov V.A. Study of power modes of the radial extrusion of internal thicknesses on pipe works. Izvestiya Tula State University: Technical Sciences Series. 2014, No. 10, pp. 440–445.

14. Theory of metal pressure forming: college textbook / V.A. Golenkov, S.P. Yakovlev, S.A. Golovin, S.S. Yakovlev, V.D. Kukhar / Edited by V.A. Golenkov, S.P. Yakovlev. Moscow: Mashinostroenie, 2009. 442 p.

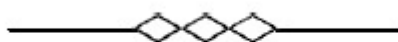
15. Pasyнков A.A., Larin S.N., Isaeva A.N. Theoretical studies of the operation of isothermal expansion of pipes from difficult-to-form non-ferrous alloys in conditions of short-term creep. / Blank production in machine-building, 2020, No. 10, pp. 462–465

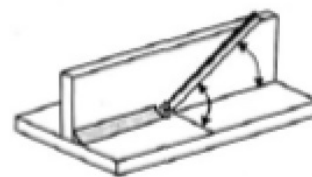
Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 31.07.2023; одобрена после рецензирования 06.08.2023; принята к публикации 11.08.2023.

The article was submitted 31.07.2023; approved after reviewing 06.08.2023; assepted for publication 11.08.2023.





Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №10 (148). С.10-19.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №10 (148). P. 10-19.

Научная статья

УДК 621.791

doi: 10.30987/2223-4608-2023-10-19

Особенности формирования сварных соединений алюминиевого сплава АК9, полученного селективным лазерным плавлением

Виктор Васильевич Овчинников¹, д.т.н.

Руслан Борисович Резцов², аспирант

^{1, 2} Московский политехнический университет, Россия, Москва

¹ vikov1956@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2948-2202>

² anikron_91@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Рассмотрена проблема получения качественных сварных соединений пластин из сплава АК9, изготовленных из порошка методом селективного лазерного плавления. Выполнены сварные стыковые соединения пластин сплава АК9 толщиной 3,0 мм методами сварки плавлением (автоматическая аргонодуговая и электронно-лучевая сварка) и сваркой трением с перемешиванием. Основной металл пластин из сплава АК9 и их сварные соединения подвергались после сварки рентгеновскому просвечиванию, компьютерной томографии, металлографическому анализу и механическим испытаниям на статическое растяжение и статический трехточечный изгиб. Рентгеновский контроль сварных соединений, выполненных автоматической аргонодуговой и электронно-лучевой сваркой, выявил наличие в швах множественной пористости. Зародышами пор в металле шва служат микропоры сферической формы, которые образуются в основном металле в процессе селективного лазерного плавления. Диаметр этих микропор составил 150...200 мкм. В сварочной ванне при сварке плавлением происходит развитие микропор в диаметре до 420...1070 мкм для аргонодуговой сварки и 215...420 мкм для электронно-лучевой сварки. Металлографический анализ поперечных шлифов сварных соединений, выполненных методами сварки плавлением, выявил характерное расположение пор в металле шва. Так для варианта аргонодуговой сварки наиболее крупные поры располагались вблизи лицевой поверхности шва. В зоне сплавления на границе сварного шва и основного металла поры диаметром 80...220 мкм располагались в виде цепочек по всей толщине свариваемых пластин. При испытаниях сварных соединений на статическое растяжение разрушение соединений происходило именно по этой зоне. Коэффициент прочности соединений сплава АК9, полученных сваркой плавлением следующий: для автоматической аргонодуговой сварки 0,46, для электронно-лучевой сварки – 0,66. Установлено, что проблема пористости сварных соединений устраняется при использовании для получения стыковых соединений сварки в твердой фазе (сварка трением с перемешиванием). Коэффициент прочности стыковых соединений пластин сплава АК9, выполненных сваркой трением с перемешиванием, находится на уровне 0,81...0,86 от временного сопротивления основного металла. Разрушение сварных соединений происходит по зоне перемешивания. В зоне шва при сварке трением с перемешиванием в результате динамической рекристаллизации сформирована мелкозернистая равноосная структура со средним размером зерна 4,5...6,2 мкм практически без наличия пор. Основной металл представлен ячеистой структурой, в которой имеются поры размером до 168 мкм.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, алюминиевый сплав, сварка плавлением, сварка трением с перемешиванием, пористость, механические свойства

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту Российского научного фонда №22–19–00121 «Закономерности структурно-фазовых превращений в алюминий-кальциевых сплавах, легированных цинком и магнием, в условиях сварки».

Для цитирования: Овчинников В.В., Резцов Р.Б. Особенности формирования сварных соединений алюминиевого сплава АК9, полученного селективным лазерным плавлением // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 10 (148). С. 10–19. doi: 10.30987/2223-4608-2023-10-19

Specificities of welds formation with aluminum alloy AK 9 obtained by selective laser melting

Viktor V. Ovchinnikov¹, D. Eng.

Ruslan B. Reztsov², PhD student

^{1, 2} Moscow Polytechnic University, Russia, Moscow

¹ vikov1956@mail.ru

² anikron_91@mail.ru

Abstract. The problem of obtaining high-quality plate welds made of AL9 alloy and powder by selective laser melting is viewed. Welded butt joints of plates of AK9CH alloy with a thickness of 3,0 mm were made by melting welding (automatic argon arc and electron beam welding) and friction stir welding. After welding the base metal of the AK9 alloy plates and their welded joints were subjected to X-ray transmission, computed tomography, metallographic analysis and mechanical tests for static tension and static three-point bending. X-ray inspection of welded joints made by automatic argon arc and electron beam welding revealed multiple porosity inside welds. The nuclei of pores in the weld metal are spherical micropores, formed in the parent metal during selective laser melting. The diameter of these micropores is 150...200 microns. In the welding bath during fusion welding, micropores develop up to 420...1070 microns in diameter in case of argon arc welding and 215...420 microns in case of electron beam welding. Metallographic analysis of cross-sections of welded joints performed by fusion welding revealed a characteristic pore distribution in the weld metal. So in case of argon arc welding, the largest pores were located near the front surface of the weld. In the fusion zone at the border of the weld and the base metal, pores with a diameter of 80...220 microns were located in the form of chains along the entire thickness of the plates being welded. When testing welded joints for static tension, the destruction of joints occurred precisely in this zone. The strength coefficient of the AK9 alloy joints obtained by fusion welding is as follows: for automatic argon arc welding 0,46, for electron beam welding – 0,66. It is established that the problem of porosity of welded joints is eliminated when using solid -phase welding for jointing (friction stir welding). The strength coefficient of the jointing of the AK9CH alloy plates made by friction stir welding is at the level of 0,81...0,86 of the time resistance of the base metal. The destruction of welded joints occurs along the mixing zone. In the weld zone during friction stir welding, as a result of dynamic recrystallization, a fine-grained equiaxed structure with an average grain size of 4,5...6,2 microns was formed with virtually no pores. The parent metal is represented by a cellular structure in which there are pores up to 168 microns in size.

Keywords: selective laser melting, aluminum alloy, fusion welding, friction stir welding, porosity, mechanical properties

Acknowledgements: the material was prepared within the framework of scientific research under the project of the Russian Scientific Foundation No. 22-19-00121 «Laws of structural-phase transformations in aluminum-calcium alloys alloyed with zinc and magnesium under welding conditions».

For citation: Ovchinnikov V.V., Reztsov R.B. Specificities of welds formation with aluminum alloy AK 9 obtained by selective laser melting / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 10 (148). P. 10–19. doi: 10.30987/2223-4608-2023-10-19

Введение

Технология селективного лазерного плавления в настоящее время достаточно широко применяется для получения металлических изделий из сталей, титановых и алюминиевых сплавов. Технология селективного лазерного плавления позволяет получать изделия из металлических порошков, которые по своей конфигурации и размерам наиболее приближены к компьютерной модели. Важным является отсутствие требования к наличию сложной оснастки при выращивании изделий. В конечном итоге это позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики деталей [1].

В процессе селективного лазерного плавления источником энергии является остро

сфокусированный лазерный луч. Под действием лазерного излучения формируется ванна расплавленного металла малого размера. Скорость нагрева при ее формировании, а также скорость кристаллизации будут очень высокими. В результате указанных процессов будет формироваться материал с неравновесной микроструктурой, которая не типична таким традиционным процессам как сварка и литье.

Существующее оборудование для селективного лазерного плавления зачастую ограничено по величине рабочей зоны. Увеличение размеров рабочей зоны напрямую связано с усложнением и удорожанием технологического оборудования. Поэтому логичным перспективным представляется применение сварки для соединения отдельных деталей,

полученных селективным лазерным плавлением, в единую конструкцию.

Цель настоящей статьи заключалась в исследовании влияния сварки на микроструктуру и свойства пластин алюминиевого сплава АК9, полученных селективным лазерным плавлением из порошка.

Материалы и методы

Для выращивания пластин методом селективного лазерного плавления исходным материалом служил порошок сплава АК9 с насыпной плотностью 1,4316 г/см³, измеренной плотностью 1,6529 г/см³ и сферичностью частиц более 90 %. Химический состав порошка приведен в табл. 1.

1. Химический состав порошка алюминиевого сплава АК9, % масс.

1. Chemical composition of AK 9 aluminum alloy powder, % by weight.

Содержание элементов, % масс.							
Al	Si	Mn	Mg	Fe	Cu	Zn	Ni
85,1...91,3	8,0...11,0	0,2...0,5	0,2...0,4	До 1,3	До 1,0	До 0,5	До 0,3

В качестве объекта исследований служили пластины толщиной 3,0 мм (рис. 1) из сплава АК9, выращенные селективным лазерным плавлением. Для получения пластин была использована установка послойного лазерного синтеза для металлических порошков марки EOS M 100. При выращивании пластин в качестве рабочей среды использовался аргон.



Рис. 1. Пластины толщиной 3,0 мм из сплава АК9, выращенные селективным лазерным плавлением

Fig. 1. Plates 3,0 mm thick from AK9 alloy grown by selective laser melting

Сварку стыковых соединений образцов осуществляли автоматической аргонодуговой сваркой с присадочной проволокой СвАМг6, электронно-лучевой сваркой без присадочного металла и сваркой трением с перемешиванием. При аргонодуговой сварке использовали следующий режим: ток дуги 180...185 А, скорость сварки 15,2...15,0 м/ч, расход аргона через

сопло горелки 12,2...14 л/мин, скорость подачи присадочной проволоки диаметром 2,0 мм 18...19 м/ч. Питание дуги установки для сварки прямолинейных стыков осуществлялось от инверторного источника питания типа Сварог PRO TIG 315 Р AC/DC.

Электронно-лучевую сварку пластин сплава АК9 выполняли на установке ЭЛУ-20МК на режиме: ток луча $I_L = 140...155$ мА, ток фокусировки $I_f = 472...478$ мА, ускоряющее напряжение $U_{уск} = 60$ кВ, скорость сварки $v_{св} = 450...500$ мм/мин.

Сварку трением с перемешиванием (СТП) пластин сплава AlSi10Mg осуществляли на опытном стенде для сварки трением с перемешиванием листовых образцов, который представлен на рис. 2, а. Сварку образцов осуществляли на режиме: частота вращения рабочего инструмента 600 об/мин; скорость сварки 120...130 мм/мин; осевое усилие на инструмент 2,4...3,2 кН; угол наклона рабочего инструмента от направления сварки 2 °; заглубление инструмента в материал заготовки 3,0 мм.

Для сварки трением с перемешиванием пластин сплава АК9 толщиной 3,0 мм был использован рабочий инструмент с диаметром заплечика 14 мм и стержнем в виде усеченного конуса диаметром 5,0 мм на поверхности заплечика. Диаметр стержня на рабочем торце составлял 3,0 мм и имел на своей поверхности резьбовую накатку (рис. 2, б).



а)



б)

Рис. 2. Опытная установка для сварки трением с перемешиванием листовых заготовок (а) и рабочий инструмент (б) для сварки пластин сплава АК9

Fig. 2. Trial plant for friction stir welding of sheet blanks (a) and working tool (b) for welding AK9 alloy plates

Контроль сварных соединений проведен радиационным методом на рентгеновской системе «Экстравольт-160» (с чувствительностью 100 мкм) и на системе рентгеновской компьютерной томографии с чувствительностью 0,1 мм.

Определение механических характеристик (σ_b , α) сварных соединений проводили в соответствии с ГОСТ 6996-66. Временное сопротивление соединений при растяжении и угол статического изгиба определяли на установке Zwick/Roell Z030. Для испытаний на статический изгиб применялись образцы шириной 10 мм, вырезанные поперек шва.

Исследования микроструктуры проводили на оптическом микроскопе Leica DM IRM с программно-аппаратным комплексом обработки изображения «Image Expert Pro3x».

Фрактографическое изучение поверхности изломов, разрушенных образцов после механических испытаний проводили методами оптической и растровой электронной микроскопии. Электронную микроскопию производили с помощью растрового электронного

микроскопа сверхвысокого разрешения evo-50 фирмы «Karl Zeiss», укомплектованного системой энергодисперсионного микроанализа, позволяющего производить картирование по элементному составу.

Замеры микротвердости проводили на поперечных шлифах сварных соединений с использованием автоматизированного твердомера EmcoTest DuraScan 20 в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6705-1-2007. При измерениях применена нагрузка на индентор 4,9 Н (HV_{0,5}).

Результаты и их обсуждение

На первом этапе исследований была изучена микроструктура образцов основного металла пластин сплава АК9, полученных селективным лазерным плавлением. Было установлено наличие в основном металле пор, диаметр которых варьировался в диапазоне 150...200 мкм (рис. 3). На разных участках структуры основного металла количество пор варьируется в достаточно широких пределах.

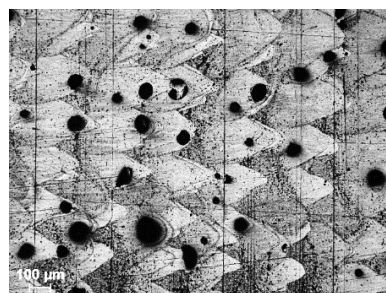
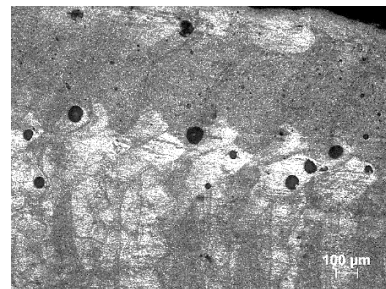


Рис. 3. Пористость различных участков микроструктуры основного материала сплава АК9

Fig. 3. Porosity of various sections of the microstructure of the main material of the AK9 alloy

В процессе лазерного воздействия на порошковый материал происходит его расплавление и последующая кристаллизация. Образующийся при затвердевании температурный градиент направлен перпендикулярно

относительно границ ванны расплава, которая имеет выпуклую форму [2, 3]. Данные условия кристаллизации обуславливают направленный рост кристаллитов от периферии зоны расплава к ее центру. Газовые поры вызваны не полнотой выхода газов из расплава при лазерной обработке. Пузырьки газа в жидкости имеют сферическую форму, которую они сохраняют и после затвердевания металла [4, 5].

Помимо сферических пор в микроструктуре также наблюдаются плоские поры, расположенные перпендикулярно направлению выращивания. Такие поры формируются в результате неполного проплавления порошкового слоя. Образование плоских пор происходит в местах, где частицы расплавились не полностью либо, не произошло «слияния» расплавленных частиц порошка с ранее обработанным слоем.

Для уменьшения пористости в конечных изделиях ответственного назначения применяется горячее изостатическое прессование, во многих случаях позволяющее существенно повысить качество изделий после СЛП (селективное лазерное плавление) [6]. Изостатическое прессование повышает плотность материала, полученного селективным лазерным плавлением, но приводит к образованию в структуре сплава областей с повышенным содержанием растворенного водорода.

Анализ микроструктуры сплава АК9, полученного селективным лазерным плавлением, показал, что в его структуре присутствуют микропоры, которые в условиях сварки плавлением могут развиваться в объеме и приводить к формированию множественной пористости швов, полученных сваркой плавлением [7]. Основным металлом представлен ячеистой структурой.

Высказанное выше предположение о возможности развития микропор, присутствующих в основном металле в поры в металле шва, нашло свое подтверждение при автоматической аргодуговой и электронно-лучевой сварке. На рис. 4 представлены рентгенограммы сварных соединений пластин сплава АК9, полученных автоматической аргодуговой сваркой (см. рис. 4, а) и электронно-лучевой сваркой (см. рис. 4, б) с множественной пористостью.

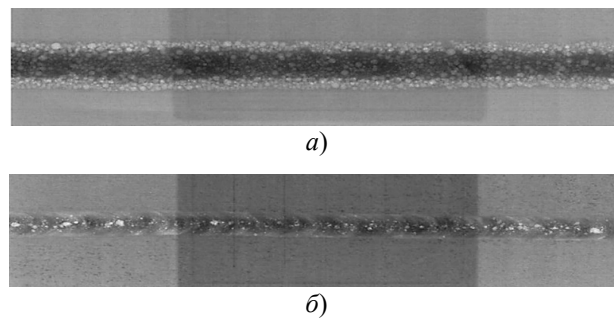


Рис. 4. Рентгенограммы сварных соединений пластин сплава АК9, выполненные автоматической аргодуговой (а) и электронно-лучевой сваркой (б)

Fig. 4. Radiographs of welded joints of AK9CH alloy plates made by automatic argon arc (a) and electron beam welding (b)

С помощью рентгеновской компьютерной томографии и металлографического анализа было установлено, что в случае автоматической аргодуговой сварки наблюдается увеличение размера пор в металле шва до 420...1070 мкм. При электронно-лучевой сварке диапазон изменения диаметра пор в шве составил 215...420 мкм. Такое увеличение диаметра пор в швах можно связать с более длительным пребыванием сварочной ванны при аргодуговой сварке в жидком состоянии, что создает условия для более полного роста газовой пористости.

Металлографические исследования поперечных шлифов сварных соединений сплава АК9, выполненных аргодуговой и электронно-лучевой сваркой, подтвердили наличие развитой пористости в металле шва (рис. 5).

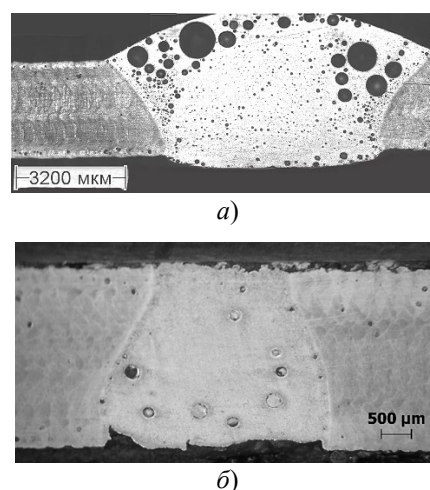


Рис. 5. Макроструктура сварных соединений сплава АК9, выполненных аргодуговой (а) и электронно-лучевой (б) сваркой

Fig. 5. Macrostructure of welded joints of AK9 alloy made by argon arc (a) and electron beam welding (b)

При внимательном рассмотрении представленных макроструктур сварных соединений сплава АК9 можно отметить, что при аргонодуговой сварке большая часть крупных пор расположена в верхней части шва (см. рис. 5, а). Поэтому некоторое снижение скорости сварки способствовало бы переходу газовых пузырьков через межфазную границу жидкого металла и защитной газовой атмосферы с общим снижением количества пор.

Также следует отметить цепочки мелких пор по границе сплавления со стороны металла шва. В приповерхностных слоях основного металла видны поры.

Общее количество пор в металле шва при электронно-лучевой сварке существенно меньше по сравнению со швами, полученными аргонодуговой сваркой (см. рис. 5, б). Также, как и в варианте аргонодуговой сварки, по границе зоны сплавления отмечается наличие цепочек мелких пор.

Образцы для механических испытаний изготавливались в соответствии с требованиями ГОСТ 6996-66 с шириной рабочей части 10 мм. Результаты испытаний образцов сварных соединений на статической растяжение приведены в табл. 2.

2. Механические свойства сварных соединений сплава АК9

2. Mechanical properties of welded joints of AK9 alloy

Образец	Временное сопротивление σ_B , МПа	Коэффициент прочности K	Угол изгиба α , °	Область разрушения образцов при испытаниях
Основной металл	235	1,0	27	Основной металл
Сварное соединение, аргонодуговая сварка	108	0,46	55	Разрушение, преимущественно, по зоне сплавления металла шва и основного металла. В изломах имеются поры диаметром до ~ 1,2 мм (рис. 6, б)
Сварное соединение, электронно-лучевая сварка	155	0,66	44	Разрушение образцов – по зоне сплавления металла шва и основного металла. В изломах имеются поры диаметром до 0,25 мм (рис. 6, з)

Из данных табл. 2 можно отметить, что применение электронно-лучевой сварки вместо аргонодуговой позволяет повысить коэффициент прочности соединения с 0,46 до 0,66. При этом угол изгиба соединений изменяется незначительно, но он превышает угол изгиба основного металла.

В обоих случаях разрушение происходило по зоне сплавления шва и основного металла с наличием большого количества пор в изломах (см. рис. 6).

Таким образом можно отметить, что для сварки плавлением сплава АК9, полученного селективным лазерным плавлением, целесообразно применять концентрированные источники нагрева, такие как электронный и лазерный луч.

При этом следует провести дополнительные исследования по влиянию скорости сварки и развертки луча на количество и диаметр пор в металле шва.

Кардинальной мерой по предотвращению образования газовых пор в металле шва является выполнение соединения в твердой фазе, например, сваркой трением с перемешиванием. Хотя при этом следует учитывать, что данный вид сварки может быть применим далеко не для всех деталей и конструкций.

Рентгеновский контроль и компьютерная томография не выявили в соединениях, выполненных сваркой трением с перемешиванием, каких-либо внутренних дефектов, за исключением светлой полосы в одном из швов.

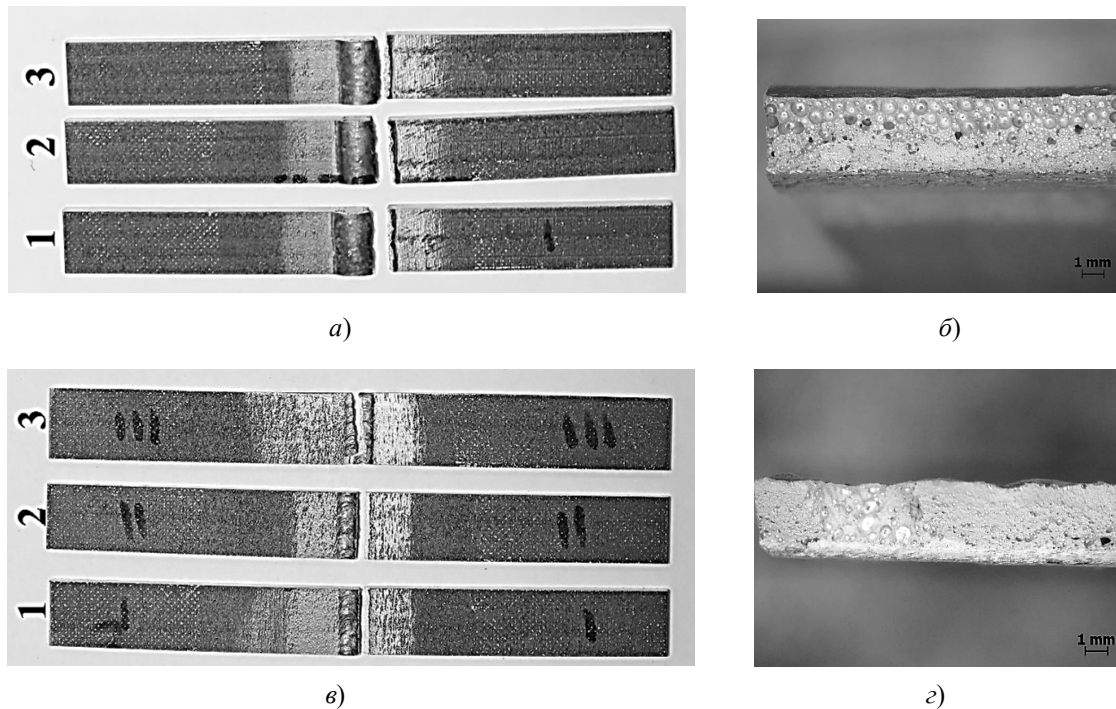


Рис. 6. Разрушение образцов сварных соединений при испытаниях на статическое растяжение (а, в) и поверхность излома (б, г):

а, б – автоматическая аргондуговая сварка; в, г – электронно-лучевая сварка

Fig. 6. Destruction of samples of welded joints during static tensile tests (a, c) and rupture (b, d):

a, b – automatic argon arc welding; c, d – electron beam welding

Результаты механических испытаний образцов сварных соединений пластин сплава АК9 представлены в табл. 3.

Из данных табл. 3 следует, что коэффициент прочности соединения, выполненного сваркой трением с перемешиванием, находится в диапазоне 0,81...0,86.

Следует отметить, что в обоих случаях разрушение сварного соединения при испытании на статическое растяжение произошло по металлу зоны перемешивания (металл шва) (рис. 7).

Различие в прочностных свойствах соединений № 1 и № 2 объясняется тем, что в зоне перемешивания сварного соединения № 1 была обнаружена при рентгеновском контроле светлая полоска, которая оказалась оксидной пленкой с частичным межслойным несплавлением. Наличие такого дефекта в металле шва существенно снижало площадь рабочего сечения образца при испытаниях на статическое растяжение (табл. 3).

3. Механические свойства сварных соединений пластин сплава АК9, выполненных сваркой трением с перемешиванием

3. Mechanical properties of welded joints of AK9CH alloy plates made by friction stir welding

Образец	Временное сопротивление σ_B , МПа	Коэффициент прочности K	Угол изгиба α , °	Область разрушения образцов при испытаниях
Основной металл	235	1,0	27	Основной металл
Сварное соединение № 1, сварка трением с перемешиванием (в соединении белая полоса)	190	0,81	76	По металлу зоны перемешивания (металл шва)
Сварное соединение № 2, сварка трением с перемешиванием (без дефектов)	202	0,86	88	По металлу зоны перемешивания (металл шва)

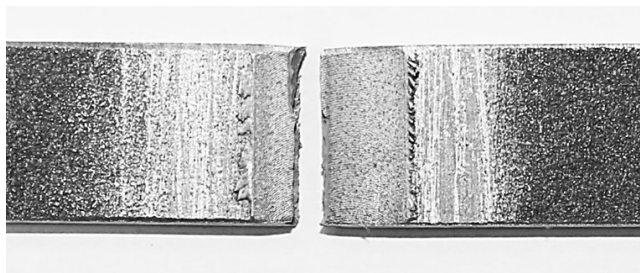


Рис. 7. Разрушение сварных образцов соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием, при испытании на статическое растяжение

Fig. 7. Destruction of welded samples of joints obtained by friction stir welding during static tension testing

Панорамное изображение макроструктур сварного соединения пластин сплава АК9, полученных сваркой трением с перемешиванием, представлено на рис. 8.

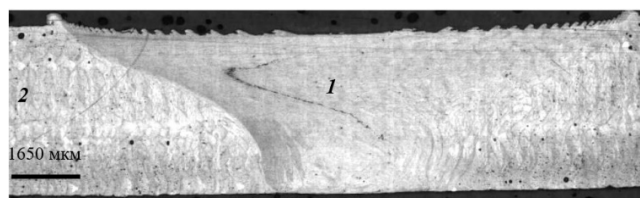


Рис. 8. Панорама сварного соединения пластин сплава АК9, выполненного сваркой трением с перемешиванием (СТП):

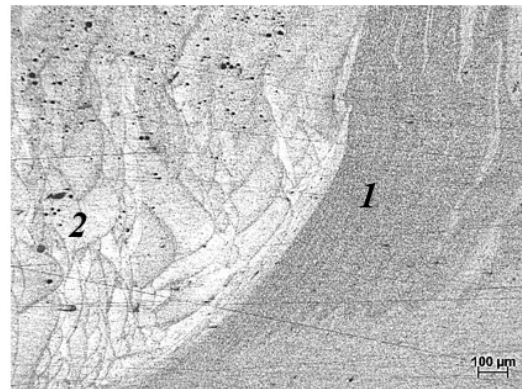
1 – металл шва; 2 – основной металл

Fig. 8. Panorama of the welded joint of AK9CH alloy plates made by friction stir welding with stirring (FSW):
1 – weld metal; 2 – base metal

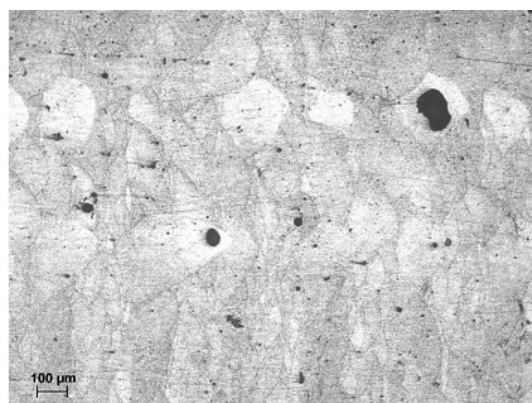
На фотографии макроструктуры сварного соединения (рис. 8) четко выделяется зона перемешивания 1 со структурой, подвергнутой динамической рекристаллизации. Помимо зоны шва отчетливо прослеживается зона основного металла 2. При этом зоны термомеханического воздействия с характерным искривлением текстуры деформации и зоны термического влияния на панораме соединения не прослеживаются.

При большем увеличении области перехода от основного металла к металлу шва в зоне термомеханического воздействия (рис. 9, а) наблюдается резкая граница, которая разделяет эти две структурные области. В зоне шва в результате динамической рекристаллизации сформирована мелкозернистая равноосная

структура со средним размером зерна 4,5...6,2 мкм. Основной металл представлен ячеистой структурой, в которой имеются поры размером до 168 мкм (рис. 9, б). Пор в металле шва (зоне перемешивания) не обнаружено.



а)



б)

Рис. 9. Микроструктура металла сварного соединения (а) на границе зон динамической рекристаллизации (металл шва 1) и термомеханического воздействия 2, а также микроструктура основного металла (б) сплава АК9

Fig. 9. The microstructure of the metal of the welded joint (a) at the boundary of the zones of dynamic recrystallization (weld metal 1) and thermomechanical action 2, as well as the microstructure of the base metal (b) of the AK9 alloy

Методом гидростатического взвешивания и металлографическим методом была определена относительная плотность основного металла и металла шва сплава АК9, полученного СТП (табл. 4). Результаты измерений плотности показывают, что объем пор и несплошностей в металле шва существенно меньше, чем в основном металле.

4. Результаты исследования плотности образцов сплава АК9

4. Results of the study of samples of AK9 alloy density coefficient

Образец	Относительная плотность, %	
	Гидростатическое взвешивание	Металлографический метод
Основной металл	98,2	99,1
Металл зоны перемешивания	98,9	99,6

Результаты замеров микротвердости в различных зонах сварного соединения пластин сплава АК9 приведены в табл. 5.

5. Микротвердость различных структурных зон соединений сплава АК9

5. Microhardness of various structural zones of AK9 alloy compounds

Номер сварного соединения	Микротвёрдость по структурным зонам, Н ₂₀₀			
	Зона динамической рекристаллизации (металл шва)	Зона термомеханического воздействия	Зона термического влияния	Основной металл
2	85...97	91...95	94...111	100...114

Из данных табл. 5 следует, что наибольшие значения микротвердости соответствуют основному металлу. В зоне термического влияния наблюдается некоторое незначительное снижение микротвердости по отношению к основному металлу. В зоне термомеханического воздействия наблюдается существенное снижение значений микротвердости по отношению к основному металлу, которое сохраняется и в пределах зоны перемешивания (металл шва).

Закключение

На основании полученных в исследовании результатов можно констатировать что:

1. Установлено, что при сварке плавлением (автоматическая аргонодуговая сварка и электронно-лучевая сварка) пластин сплава АК9, полученного селективным лазерным плавлением из порошка, в металле шва наблюдается большое количество пор диаметром 420...1070 мкм при аргонодуговой сварке и 215...420 мкм при электронно-лучевой сварке.

2. Источником газовых пор при сварке пластин сплава АК9, полученного селективным лазерным плавлением, являются микропоры диаметром 150...200 мкм, формирующиеся в основном металле на стадии его выращивания. Формирование пор в металле шва при сварке плавлением усиливается наличием фрагментов оксидной пленки, которые поступают в

сварочную ванну с поверхности частичек порошка, из которого выращен основной металл.

3. Коэффициент прочности соединений сплава АК9, полученных сваркой плавлением следующий: для автоматической аргонодуговой сварки 0,46, для электронно-лучевой сварки – 0,66.

4. Коэффициент прочности стыковых соединений пластин сплава АК9, выполненных сваркой трением с перемешиванием, находится на уровне 0,81...0,86 от временного сопротивления основного металла. Разрушение сварных соединений происходит по зоне перемешивания.

5. В зоне шва при сварке трением с перемешиванием в результате динамической рекристаллизации сформирована мелкозернистая равноосная структура со средним размером зерна 4,5...6,2 мкм практически без наличия пор. Основной металл представлен ячеистой структурой, в которой имеются поры размером до 168 мкм.

6. В результате термомеханического воздействия сварки трением с перемешиванием наблюдается превышение плотности зоны перемешивания сплава АК9 над уровнем плотности основного металла, полученного селективным лазерным плавлением.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Simonelli M., Tse Y.Y., Tuck C. Effect of the build orientation on the mechanical Properties and Fracture Modes of SLM Ti-6Al-4V. Mater. Sci. Eng. A. 2014. Vol. 616. P. 1–11.

2. Литунев С.Н., Слободянюк В.Н., Мельников Д.В. Обзор и анализ аддитивных технологий // Омский научный вестник. 2016. Ч. 2. №5 (149). С. 20–24.

3. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.

4. Куликов М.Ю., Ларионов М.А., Гусев Д.В. О взаимодействии шероховатости поверхности прототипированных образцов с условиями их базирования при изготовлении // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2016. № 1 (25). С. 8892.

5. Куликов М.Ю., Ларионов М.А., Гусев Д.В. Исследование взаимосвязи шероховатости поверхности прототипированных образцов с условиями их базирования при изготовлении // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. Вып. 2 (50). С. 108–111.

6. Ларионов М.А., Гусев Д.В. Разработка программы прогнозирования ожидаемых параметров точности изделия, изготовленного методом 3SP RP-технологии // Металлообработка. 2018. № 6 (108). С. 26–29.

7. Wu M.W., Lai P.H., Chen J.K. Anisotropy in the impact toughness of selective laser melted Ti–6Al–4V alloy. Mater. Sci. Eng.: A. 2016. Vol. 650. P. 295–299.

8. Ahuja B, Schaub A, Karg M, Lechner M, Merklein M, Schmidt M. Developing LBM process parameters for Ti–6Al–4V thin wall structures and determining the corresponding mechanical characteristics. Phys. Proc. 2014. Vol. 56. P. 90–98.

9. Kunze K., Etter T., Grässlin J., Shklover V. Texture, anisotropy in microstructure and mechanical properties of IN-738LC alloy processed by selective laser melting (SLM). Mater. Sci. Eng. A. 2015. Vol. 620. P. 213–222.

10. Frazier W. E. Metal additive manufacturing: A review. J. Mater. Eng. Perform. 2014. Vol. 23. No. 6. P. 1917–1928.

11. Vrancken B., Thijs L., Kruth J.P., Van Humbeeck J. Microstructure and mechanical properties of a novel β titanium metallic composite by selective laser melting. Acta Mater. 2014. Vol. 68. P. 150–158.

12. Дриц А.М., Овчинников В.В. Сварка алюминиевых сплавов. М.: Руда и металла, 2020. 476 с.

REFERENCES

1. Simonelli M., Tse Y.Y., Tuck C. Effect of the build orientation on the mechanical Properties and Fracture Modes of SLM Ti–6Al–4V. Mater. Sci. Eng. A. 2014. Vol. 616. P. 1–11.

2. Litunov S.N., Slobodyanyuk V.N., Melnikov D.V. Review and analysis of additive technologies // Omsk Scientific Bulletin, 2016, part 2, No. 5(149), pp. 20–24.

3. Additive technologies in mechanical engineering: a manual for engineers / M.A. Zlenko, M.V. Nagaytsev, V.M. Dovbysh. Moscow: SSC RF FSUE «NAMI», 2015. 220 p.

4. Kulikov M.Yu., Larionov M.A., Gusev D.V. On the interaction of the surface roughness of prototyped samples with the conditions of their basing during their sampling // Scientific Notes of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University, 2016, No. 1(25), pp. 88–92.

5. Kulikov M.Yu., Larionov M.A., Gusev D.V. Investigation of the relationship of surface roughness of prototyped samples with the conditions of their basing during their sampling // Bulletin of the Bryansk State Technical University, 2016, Issue 2 (50), pp. 108–111.

6. Larionov M.A., Gusev D.V. Development of a program for predicting the expected accuracy parameters of a product manufactured using 3SP RP technology // Metalworking, 2018, No. 6 (108), pp. 26–29.

7. Wu M.W., Lai P.H., Chen J.K. Anisotropy in the impact toughness of selective laser melted Ti–6Al–4V alloy. Mater. Sci. Eng.: A. 2016. Vol. 650. P. 295–299.

8. Ahuja B, Schaub A, Karg M, Lechner M, Merklein M, Schmidt M. Developing LBM process parameters for Ti–6Al–4V thin wall structures and determining the corresponding mechanical characteristics. Phys. Proc. 2014. Vol. 56. P. 90–98.

9. Kunze K., Etter T., Grässlin J., Shklover V. Texture, anisotropy in microstructure and mechanical properties of IN-738LC alloy processed by selective laser melting (SLM). Mater. Sci. Eng. A. 2015. Vol. 620. P. 213–222.

10. Frazier W. E. Metal additive manufacturing: A review. J. Mater. Eng. Perform. 2014. Vol. 23. No. 6. P. 1917–1928.

11. Vrancken B., Thijs L., Kruth J.P., Van Humbeeck J. Microstructure and mechanical properties of a novel β titanium metallic composite by selective laser melting. Acta Mater. 2014. Vol. 68. P. 150–158.

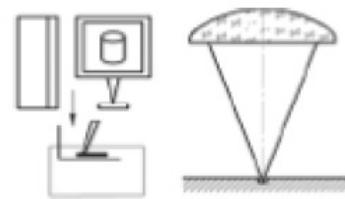
12. Drits A.M., Ovchinnikov V.V. Aluminium alloys welding. Moscow: Ruda i metall, 2020, 476 p.

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 29.07.2023; одобрена после рецензирования 11.08.2023; принята к публикации 19.08.2023.

The article was submitted 29.07.2023; approved after reviewing 11.08.2023; assepted for publication 19.08.2023.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №10 (148). С.20-29.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №10 (148). P. 20-29.

Научная статья
УДК 621.791.9
doi: 10.30987/2223-4608-2023-20-29

Моделирование процесса селективного лазерного плавления в аддитивном производстве

Александр Григорьевич Григорьянц, Д.Т.Н.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
mt12@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. В статье рассмотрены возможности теоретического анализа на основе численного моделирования сложных процессов аддитивного производства методом селективного лазерного плавления. Рассмотрены методы высокоточного моделирования формирования единичной ванны расплава с учетом геометрии сформированного порошкового слоя, распределения энергии в пятне, эффектов переотражения луча, силы отдачи паров, эффекта Марангони и механизмов денудации. Были проведены экспериментальные исследования выращивания образцов из медного порошка БрХ с частицами размером 20...50 мкм методом селективного лазерного плавления с использованием излучения волоконного лазера непрерывного действия длиной волны 1,064 мкм. В том числе выполнены эксперименты в условиях полного совпадения условий и режимов выращивания с расчетной моделью. Для оценки точности системы моделирования сопоставлялись размеры области плавления и морфология поверхности дорожки расплава. Представленная расчетная модель использована при разработке технологии выращивания изделий из порошков медных сплавов методом селективного лазерного плавления. Также представлены исследования в области моделирования напряженно-деформированного состояния в сформированном в процессе СЛП композиционном материале, состоящего из матрицы сплава Ас9С, армированной частицами карбида титана. Были выполнены расчеты для установления влияния формы (сфера, икосаэдр, призма), размеров (1,0 мкм; 5,0 мкм; 10 мкм) и концентрации по массе (1,0 %; 3,0 %; 5,0 %; 7,0 %; 10 %; 15 %), а также с учетом наличия пор различной формы. Результаты расчетов сопоставлены с результатами экспериментов. Численные модели с последующей экспериментальной апробацией оптимального варианта позволяют многократно сократить затраты времени для разработки новых сложных и многообещающих аддитивных технологий.

Ключевые слова: лазерные технологии, аддитивные технологии, лазер, порошок, селективное лазерное плавление

Для цитирования: Григорьянц А.Г. Моделирование процесса селективного лазерного плавления в аддитивном производстве // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 10 (148). С. 20–29. doi: 10.30987/2223-4608-2023-20-29

Modeling of the selective laser melting process in additive manufacturing

Alexander G. Grigoryants, D.Eng.
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
mt12@bmstu.ru

Abstract. The possibilities of theoretical analysis based on numerical modeling of complex processes of additive manufacturing by selective laser melting method are viewed. Methods of high-precision modeling of the formation of a single melt bath are discussed, taking into account the geometry of the formed powder layer, the energy distribution in the spot, the effects of ray re-reflection, the vapor recoil force, the Marangoni effect and denudation mechanisms. Experimental studies on the cultivation of samples from BrX copper powder with particles of 20...50 microns in size by selective laser melting using continuous fiber laser radiation with a wavelength of 1.064 microns were carried out. In particular, all the experiments were carried out under conditions when growing conditions and modes are completely coincident with the calculated model. To assess the accuracy of the modeling system, the dimensions of the melting region and the morphology of the surface of the melt were compared. The presented computational model was used in the development of technology for growing products from copper alloy powders using selective laser melting method. Research in the field of modeling the stress-strain state in a composite material formed in the SLP process, consisting of an Ak9ch alloy matrix reinforced with titanium carbide particles, is also presented. Calculations were performed to identify the influence of shape (sphere, icosahedron, prism), size (1,0 microns; 5,0 microns; 10 microns) and mass concentration (1,0 %; 3,0 %; 5,0 %; 7,0 %; 10 %; 15 %), taking into account the presence of pores of various shapes. The results of calculations are compared with the results of experiments. Numerical models with subsequent experimental approbation of the optimal variant make it possible to significantly reduce the time spent for the development of new complex and promising additive technologies.

Keywords: laser technologies, additive technologies, laser, powder, selective laser melting

For citation: Grigoryants A.G. Modeling of the selective laser melting process in additive manufacturing / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 10 (148). P. 20–29. doi: 10.30987/2223-4608-2023-20-29

Введение

При селективном лазерном плавлении происходят сложные физические процессы плавления, формирование расплавленной ванны, испарение, кристаллизация, остывание, происходящие с высокими скоростями. Исследование таких динамических процессов, происходящих в малых объемах металла, экспериментальными методами весьма затруднительно и, зачастую невозможно. В связи с этим в последние годы все чаще обращаются к моделированию процесса в численном виде с использованием современных вычислительных средств и программного продукта.

Методы численного моделирования в настоящее время характеризуются быстрым развитием, возможностью учета в расчетной модели процессов плавления и кристаллизации, распределения плотности мощности лазерного излучения, переотражения излучения, испарения металла, силы давления отдачи паров расплавленного металла, усадку при затвердевании. При этом в расчетной модели с использованием метода дискретных элементов рассматриваются сложные процессы взаимодействия частиц порошка при формировании порошкового слоя [1]. При моделировании реального процесса в модели проводится дискретизация пространства и времени,

закрывающаяся в том, что геометрия порошкового слоя разбивается на расчетные ячейки, а время процесса – на расчетные временные интервалы [2].

Методы исследования и обсуждения

Моделирование процесса реализовано с использованием программного обеспечения FLOW3D, предназначенного для изучения сложных явлений теплопереноса при лазерном воздействии, таких как теплопередача, массоперенос, испарение, кристаллизация. На начальном этапе для описания взаимодействия частиц порошка при формировании порошкового слоя использовался метод дискретных элементов.

Моделирование формирования порошкового слоя соответствует принятой в установках селективного лазерного плавления (СЛП), выпускаемых Московским центром лазерных технологий, схеме технологического процесса (рис. 1) [3]. Определенный объем частиц порошка высыпается в бункер выращивания и распределяется по камере построения, форма и геометрические размеры которой задаются с последующим выравниванием с помощью приспособления – так называемого разравнивающего «ножа»

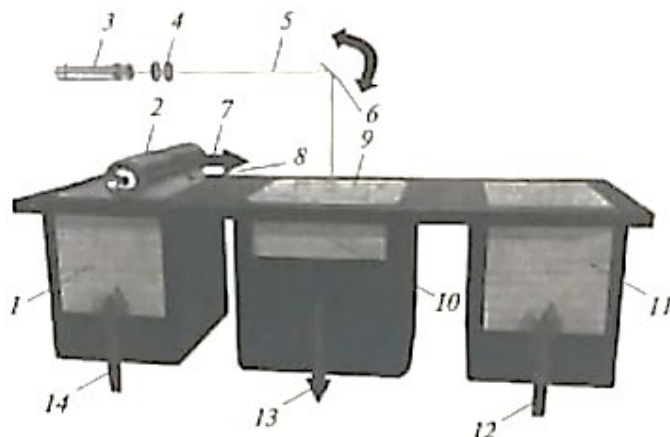


Рис. 1. Установка с бункерной схемой подачи порошка:

1, 11 – бункеры питателя; 2 – разравнивающий ролик; 3 – лазер; 4 – линзы; 5 – лазерный луч; 6 – сканирующая линза; 7 – направление движения валика; 8 – свежий порошок; 9 – изделие; 10 – камера построения; 12, 14 – направление движения бункера-питателя; 13 – направление движения детали

Fig. 1. Installation with a hopper flow pattern of powder supply:

1, 11 – feeder bins; 2 – leveling rolling element; 3 – laser; 4 – lenses; 5 – laser beam; 6 – scanning lens; 7 – direction of rolling element movement; 8 – fresh powder; 9 – product; 10 – construction chamber; 12, 14 – direction of feeder bin movement; 13 – direction of the part movement

Метод дискретных элементов позволяет описать взаимодействие частиц порошка при формировании порошкового слоя и рассчитать движение большого количества частиц, определить траекторию движения, скорость и силы, действующие на частицы [4]. Расчет физических параметров в каждом узле расчетной сетки проводится методом конечных элементов. В расчетной модели отслеживаются и определяются фазовые переходы между твердой и жидкой фазами, а также фазовые переходы жидкость – пар для учета испарения и конденсации.

В расчетной модели используются все современные достижения и математические представления многообразных физических процессов, происходящих при формировании единичной дорожки под воздействием лазерного излучения на порошковые материалы [5]. Представленный перечень физических процессов охватывает теплоперенос в твердой и жидкой фазах, фазовый переход жидкость – пар, испарение материала с формированием парогазового канала и кинжального проплавления, фазовый переход из жидкого состояния в твердое [6]. При этом моделируется лазерный источник с учетом реального распределения интенсивности излучения, вводятся условия преотражения лазерного излучения в порошkovом слое.

Совокупное представление основных физических процессов сводится к математической модели в виде следующих дифференциальных уравнений.

Уравнение теплопроводности с математическим представлением процессов в каждом элементарном объеме тела:

- поглощение тепловой энергии при нагреве или выделении тепловой энергии при охлаждении;
- прохождение теплового потока через элементарный объем тела;
- выделение или поглощение теплоты за счет действия внутренних источников или стоков теплоты.

Уравнения теплопереноса в жидкой фазе определяются для элементарного объема в виде совокупности следующих составляющих:

- уравнение неразрывности или сплошности среды;
- уравнение переноса энергии в текучей среде – уравнение Фурье-Кирхгофа;
- уравнение переноса импульса в текучей среде – уравнение Навье-Стокса;
- уравнение фазового перехода жидкость – пар определяется уравнением Клапейрона-Менделеева;
- уравнение давления испарения материала моделируется на основе уравнения кривой давления насыщенных паров.

– уравнение фазового перехода из жидкого состояния в твердое – модель объемной усадки, основанная на решении уравнений энергии и определении конечной формы затвердевающего объема материала.

Для получения результатов построена численная модель, описывающая процесс селективного лазерного плавления с использованием основополагающих физических уравнений для оценки взаимодействия частиц порошка между собой при формировании слоя, воздействия лазерного излучения на порошковый материал с учетом переотражения в порошковом слое, учет состояний материала в твердой и жидкой фазах. Высокая точность расчетов обеспечивается представлением расчетной области в виде нескольких миллионов ячеек. При этом типичное время вычисления для моделирования одной

дорожки составляет десятки часов на современных процессорах. Следует особо подчеркнуть, что анализ условий формирования единичной дорожки является основой технологического процесса селективного лазерного плавления при изготовлении изделий.

Представленная расчетная модель использована при разработке технологии выращивания изделий из порошков медных сплавов методом селективного лазерного плавления [7].

Использовалась трёхмерная модель расчётной области для процесса селективного лазерного плавления. В качестве подложки использована нержавеющая сталь марки AISI316L с дополнительным подогревом в 250 °С для уменьшения оттока теплоты из зоны обработки. Лазерное излучение перемещается по поверхности порошкового слоя с заданной скоростью (рис. 2).

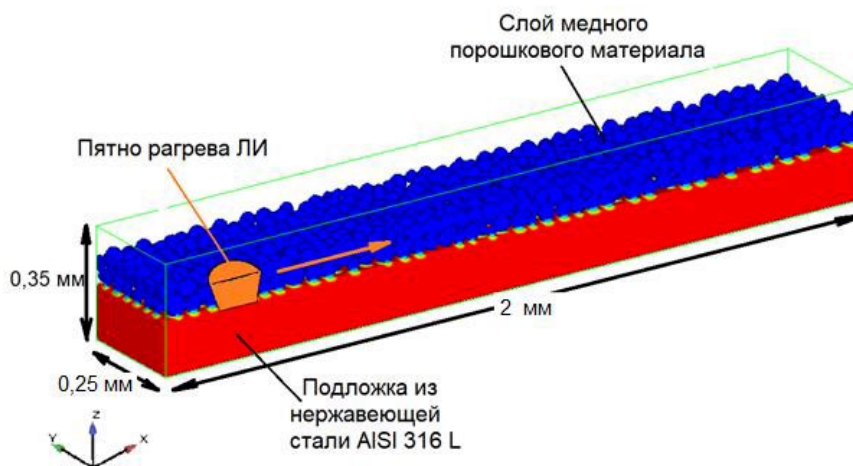


Рис. 2. Трёхмерная модель расчетной области для процесса селективного лазерного плавления

Fig. 2. Three-dimensional model of the computational domain for the process of selective laser melting

Для повышения точности расчета использована мелкая расчетная сетка с размером 3,5 мкм, а для участков, удаленных от зон термического воздействия, для уменьшения вычислительных затрат времени использована более глубокая сетка с размером 5,0 мкм. Общее количество расчетных элементов составляло 2,7 миллиона ячеек. Ориентировочное время вычислений для моделирования одной дорожки составляет порядка 36 ч с использованием процессора AMD Ryzen Theardripper с оперативной памятью 128 ГБ.

Были проведены экспериментальные исследования выращивания образцов из медного порошка БрХ с частицами размером

20...50 мкм методом селективного лазерного плавления с использованием излучения волоконного лазера непрерывного действия длиной волны 1,064 мкм. В том числе выполнены эксперименты в условиях полного совпадения условий и режимов выращивания с расчетной моделью, основа которой была рассмотрена выше. Для оценки точности системы моделирования сопоставлялись размеры области плавления и морфология поверхности дорожки расплава.

Наглядное сопоставление результатов моделирования и эксперимента представлено на рис. 3.

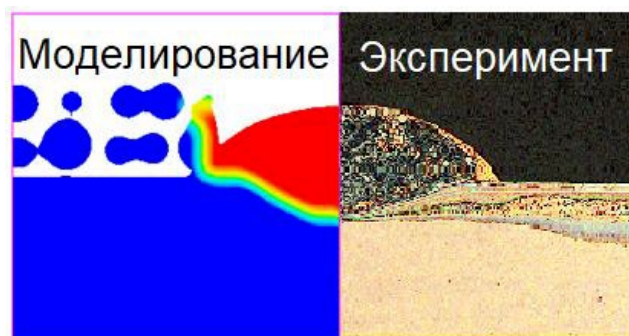


Рис. 3. Сопоставление результатов эксперимента и численного моделирования

Fig. 3. Comparison of experimental results and numerical modeling

Поперечные сечения ванны сплавления совпадают, т. е. получены одинаковые результаты, как по ширине, так и по высоте оплавленной зоны, что видно из рис. 3.

В процессе селективного лазерного плавления благодаря высокой концентрации энергии лазерного излучения происходит плавление порошка в ванне расплава и перегрев жидкой ванны, где при температурах $T > T_{пл}$ происходит испарение материала.

Важным представляется установить, какая степень влияния испарения на конечные показатели выращенного слоя, в первую очередь на его размеры, и есть ли необходимость в учете этого сложного явления в расчетах. Для этого проведено сопоставление результатов расчетов для двух моделей, в одной из которых испарение не учитывалось, а во второй расчет проводился с учетом испарения. Сопоставление этих двух результатов расчетов проведено на рис. 4.

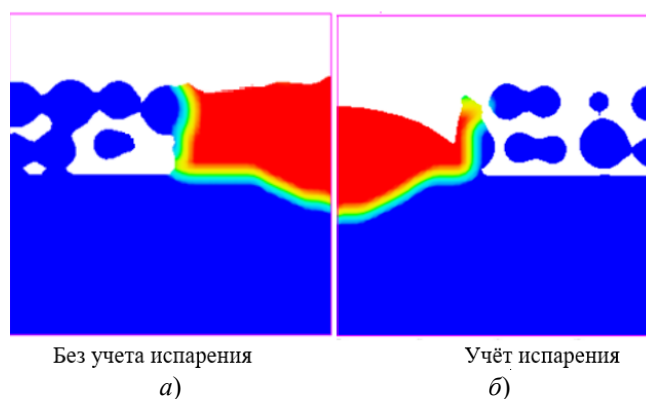


Рис. 4. Поперечное сечение ванны расплава:

а – широкая ванна расплава с незначительным сплавлением с подложкой, при пренебрежении испарением; *б* – ванна расплава овальной формы с ярко выраженным глубоким проплавлением

Fig. 4. Cross-section of the melt bath:

a – a wide melt bath with slight fusion with the substrate, neglecting evaporation; *b* – oval shaped melt bath with pronounced deep penetration (melting)

Отсутствие испарения в расчетной модели приводит к увеличению ширины ванны расплава и уменьшению сплавления с подложкой (см. рис. 4). Учет испарения означает появление парогазового канала и образование кинжального проплавления. При испарении также

происходит уменьшение теплосодержания ванны расплава, что наглядно демонстрируют расчетные данные на рис. 5 при сопоставлении объемов ванны расплава в моделях без учета испарения и с учетом испарения.

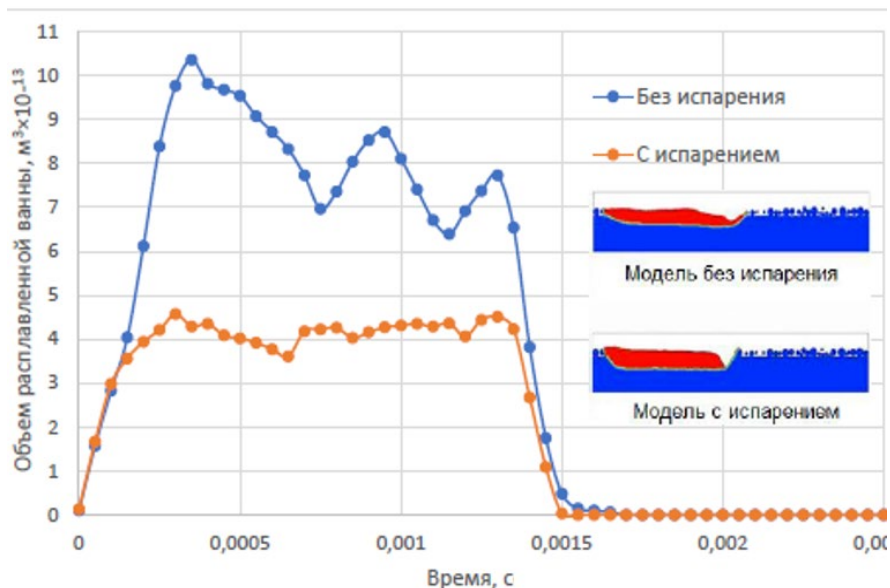


Рис. 5. Сравнение объемов ванны расплава для двух случаев

Fig. 5. Comparison of the volumes of the melt bath for two cases

Результаты расчета дают возможность получить профиль выращиваемой дорожки, который влияет на стабильность формирования единичного слоя и последующих стадий процесса выращивания.

Рассмотренные результаты компьютерного моделирования процесса нагрева, расплавления и формирования жидкой ванны при воздействии лазерного излучения на порошковый материал, последующей кристаллизации при охлаждении с учетом современных сложных представлений физических процессов позволяют глубоко раскрыть механизм селективного лазерного плавления. Компьютерное моделирование позволяет значительно сократить и частично заменить дорогостоящие экспериментальные исследования, направленные в основном на анализ конечных результатов и требующие значительных затрат и длительности исследований. Это особенно важно при разработке технологии выращивания новых материалов, ранее не использованных в селективном лазерном плавлении, а также применении разнообразных новаторских решений для повышения качества и производительности процесса.

Рассмотренные выше модели с высокой точностью моделируют процесс выращивания дорожки методом селективного лазерного плавления в численном виде с использованием современных вычислительных средств. Однако при исследовании композиционных

материалов с микроскопическими включениями такие подходы не способны отразить поведение материала в объемах, соизмеримых с размерами армирующих частиц. Поэтому была поставлена задача численного расчета напряжений и деформаций с использованием микромеханических методов. В этих методах рассматривается микрообъем материала, существенно меньший, чем размер единичной дорожки, к которому прикладывают соответствующие тепловые нагрузки. В микромеханических моделях учитывается состав, объемная доля, распределение, морфология и размер армирующих включений наряду с упругими и пластическими характеристиками матрицы и армирующих частиц. В настоящее время микромеханическое моделирование представляет собой наиболее надежный расчетный анализ, в котором взаимосвязаны структура и свойства матрицы и армирующей частицы в композиционном материале [8].

В работе [9] представлены результаты расчетного моделирования напряженного состояния в зависимости от формы, размера и концентрации армирующих частиц TiC, а также от наличия и объема пор в матрице алюминиевого сплава Al9ч.

Расположение частиц, их геометрия носят случайный характер и имитируются при построении представительного объема элемента. Для решения задач микромеханики использовано программное обеспечение Digimat,

разработанное для многоячеечного моделирования композитов с металлической матрицей, армированных частицами. При генерации представительного элемента объема распределение армирующих частиц в объеме матрицы определяется алгоритмом случайной последовательности адсорбцией, в котором частицы с заданным размером и формой случайным образом вводятся в объем. В этой программе могут быть сгенерированы представительные элементы объема с различным размером и содержанием частиц TiC.

Выполнено исследование влияния формы (сфера, икосаэдр, призма), размера (1,0 мкм; 5,0 мкм; 10 мкм) и массовой концентрации (1,0 %; 3,0 %; 5,0 %; 7,0 %; 10 %; 15 %) армирующих частиц на напряжения и деформации в композиционном материале в процессе селективного лазерного плавления.

Наглядный вид некоторых представительных объемов и характеристики конечно-элементной сетки представлены на рис. 6.

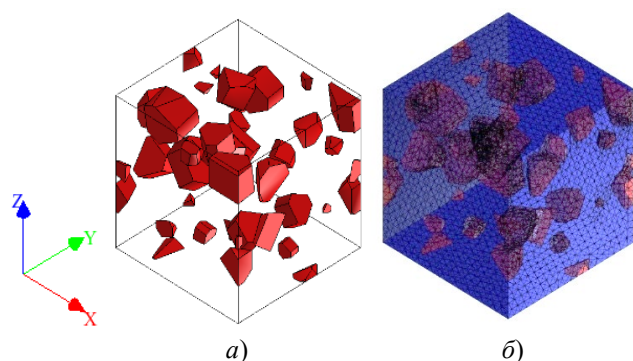


Рис. 6. Пример представительных элементов объема с частицами размером 5,0 мкм 15% TiC (а) призматической формы и соответствующего разбиения на конечные элементы и 15 %TiC (б)

Fig. 6. Example of representative volume elements with particles of 5,0 microns in size 15%TiC (a) of a prismatic shape and the corresponding finite element division and 15%TiC (b)

В расчет вводятся соответствующие граничные условия в виде механических и термических нагрузок, которые устанавливаются решением задачи механики сплошной среды [10]. Были выполнены расчеты для всех представительных элементов объема для установления влияния формы (сфера, икосаэдр, призма), размеров (1,0 мкм; 5,0 мкм; 10 мкм) и

концентрации по массе (1,0 %; 3,0 %; 5,0 %; 7,0 %; 10 %; 15 %). Результаты расчетов позволили установить, что во всех рассмотренных случаях напряжения не достигали предельных значений ни в материале матрицы, ни в армирующих частицах. Но следует отметить, что во всех этих случаях моделирование проведено для идеальных условий отсутствия таких дефектов, как поры и несплавления. Как и следовало ожидать, наибольшая концентрация напряжений на участках границы раздела фаз матрицы и армирующих элементов.

В качестве примера на рис. 7 представлены результаты расчетов для одного из представительных элементов.

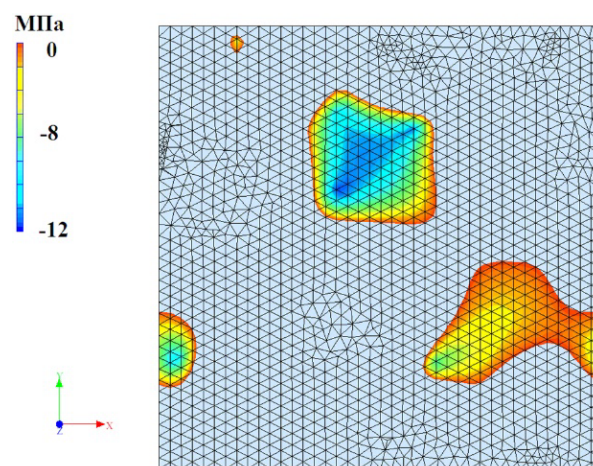


Рис. 7. Распределение растягивающих напряжений

Fig. 7. Tension stress distribution

Из представленных на рис. 7 результатов расчетов наглядно видно, что в материале матрицы возникают как растягивающие, так и сжимающие напряжения в зависимости от удаления от армирующих частиц. В армирующих частицах наблюдаются сжимающие напряжения. Особенно важно, что растягивающие напряжения существенно ниже предела текучести и не могут приводить к разрушению матрицы Ак9ч при отсутствии дефектов.

Важным представляется установление закономерностей формирования напряженного состояния в зависимости от размеров армирующих частиц их концентрации. Для алюминиевой матрицы рост размеров армирующих частиц (1,0 мкм; 5,0 мкм; 10 мкм) приводит к незначительному росту напряжений (рис. 8), тогда как для армирующих частиц влияние размеров сказывается в большей степени (рис. 9).

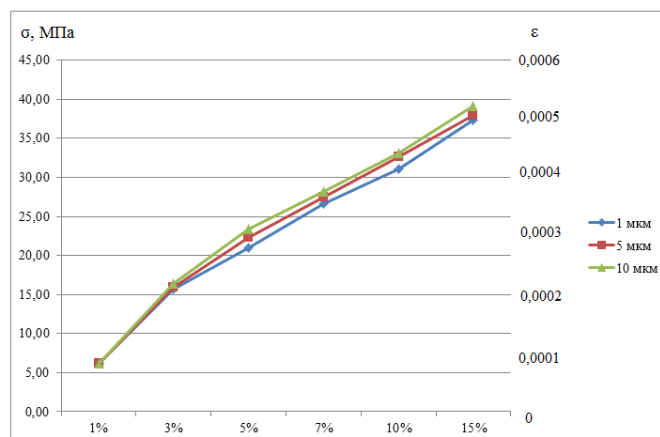


Рис. 8. Усредненные (эквивалентные) значения напряжений и деформаций в матрице в зависимости от размера и массовой доли армирующих частиц сферической формы

Fig. 8. Averaged (equivalent) values of stresses and deformations in the matrix depending on the size and mass fraction of spherical reinforcing particles

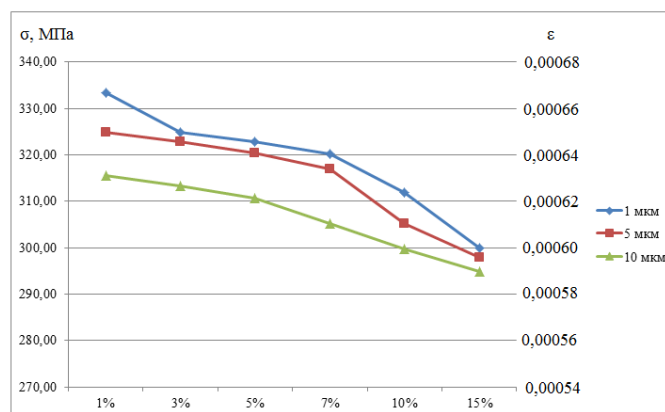


Рис. 9. Усредненные (эквивалентные) значения напряжений и деформаций в армирующих частицах в зависимости от размера и массовой доли армирующих частиц сферической формы

Fig. 9. Averaged (equivalent) values of stresses and deformations in reinforcing particles depending on spherical reinforcing particles fraction of mass and size

Увеличение концентрации армирующих частиц TiC приводит к значительному росту напряжений в алюминиевой матрице (см. рис. 8), но в самих армирующих частицах уровень напряжений снижается (см. рис. 9).

Теоретическая модель процесса селективного лазерного плавления практически полностью адекватна реализуемому процессу выращивания реальных металлических объектов из порошковых материалов. Благодаря этому возрастает значимость многочисленных результатов анализа расчетных результатов. Практический интерес представляет сопоставление результатов анализа напряженного состояния для армирующих частиц TiC, имеющих менее благоприятную форму, чем сфера, т. е. с большей концентрацией напряжений. Установлено, что размер частицы незначительно влияет на напряженное состояние, тогда как концентрация частиц

приводит к существенному увеличению напряжений в матрице при одновременном снижении напряжений в армирующих частицах.

Сопоставление результатов расчета для армирующих частиц, имеющих форму сферы и форму икосаэдра, показывают, что основные закономерности образования напряжений и деформаций подобны. Однако вследствие увеличенной концентрации напряжений в острых ребрах армирующих частиц, имеющих форму икосаэдра, уровень напряжений в армирующих частицах значительно выше. Этим самым повышается вероятность образования трещин, а также могут быть понижены механические свойства композиционного материала по сравнению с армированием частицами сферической формы.

Наибольший интерес представляют результаты расчетов напряженно-деформированного состояния при выращивании

композиционного материала с матрицей из алюминиевого сплава Аk9ч, армированной частицами TiC призматической формы с различными размерами и концентрацией в матрице. Этот случай наиболее близок к реальной технологии, т. к. колотые частицы карбида титана, использованные в исследованиях, имеют приблизительно призматическую форму.

Анализ и сопоставление напряженно-деформированного состояния при выращивании композиционного материала с матрицей из алюминиевого сплава, армированного частицами TiC, имеющих форму сферы, икосаэдра и призмы, наглядно указывают на значительное влияние формы частиц на напряжения и деформации. Подтвердилось соображение, что более острые кромки и углы колотых армированных частиц TiC являются концентраторами напряжений. Поэтому полученные в расчетах значения напряжений для призматической формы армирующих частиц значительно выше, чем для сферических. Промежуточные значения напряжений получены для частиц, имеющих форму икосаэдра. Таким образом, появляется возможность существенного снижения напряжений и деформаций при выращивании деталей и изделий из

композиционных материалов за счет использования сферических армирующих частиц карбида титана и развитием соответствующей производственной базы.

Для оценки влияния пор на формирование напряженно-деформированного состояния при выращивании композиционного материала необходимо ввести в модель предварительного элемента объема пустоты заданного размера и формы. За основу был принят рассмотренный выше расчет напряжений и деформации при выращивании композита на основе матрицы из алюминиевого сплава Аk9ч с армирующими частицами TiC. Моделирование выполнено для случая с армирующими частицами размером 5,0 мкм в форме призмы с концентрацией 10 %. Были выбраны для расчетов три значения пористости – 0,5 %; 1,0 %; 3,0 %. То есть пористость выше 3,0 % не рассматривается, т. к. в большинстве случаев пригодные детали должны иметь пористость не выше 3,0 %.

Результаты расчета в пористом представителем элементе объема с двумя видами пор в форме призмы и в сферической форме представлены на рис. 10.

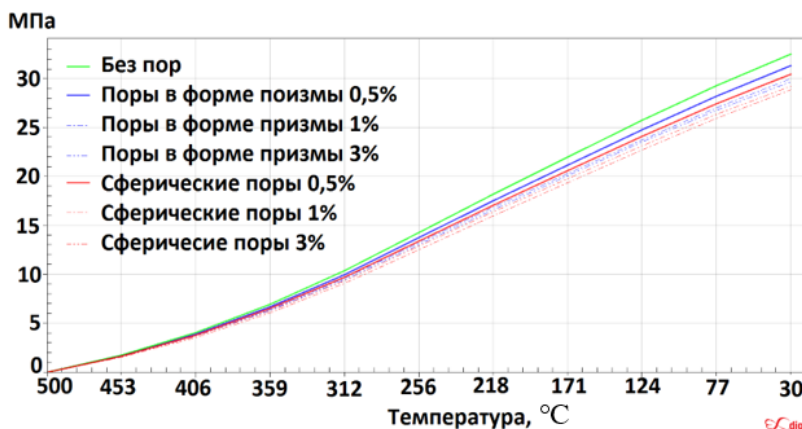


Рис. 10. Результаты расчётов напряжений в пористом компоненте

Fig. 10. Results of stress calculations in a porous component

Полученные результаты показывают, что поры незначительно влияют на напряжения, лишь немного снижаются напряжения с увеличением объема пор.

Заключение

Представленные выше некоторые результаты теоретического анализа сложных процессов

выращивания методом селективного лазерного плавления демонстрирует неограниченные возможности численного моделирования аддитивных технологий. Предварительные расчетные данные с последующей экспериментальной апробацией позволяют многократно сократить затраты времени для разработки и оптимизации новых сложных и многообещающих технологий аддитивного производства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

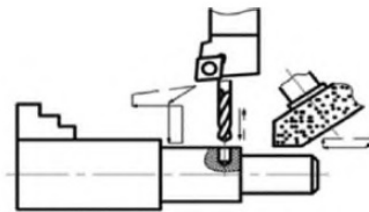
1. **Bikas H., Stavropoulos P., Chrysosolouris G.** Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. Vol. 83 (1) p. 389–405.
2. **Multi-physics** modeling of single / multiple-track defect mechanisms in electron beam selective melting / W. Yan [et al.]. *Acta Mater.* 2017. 134. P. 324–333.
3. **Григорьянц А.Г., Колчанов Д.С., Дренин А.А.** Установка для селективного лазерного плавления металлических порошков // IV международная конференция «Аддитивные технологии: настоящее и будущее», март 2018. С. 221–234.
4. **Finite** element modelling of a particle size on the stress strain curve of near beta titanium alloy / Srinivasu G. [et al.]. *Materials and Design.* 2013. 46. P. 8–15
5. **Tian Y., Yang L., Zhao D., Huang Y., Pan J.** Numerical analysis of powder bed generation and single track forming for selective laser melting of SS316L stainless steel // *Journal of Manufacturing Processes*, No. 58, October 2020. pp. 964–974.
6. **Smith J.W., Xiong W.T., Yan S., Lin P.K., Cheng P.K., Kafka O.L., Wagner G.J., Cao J., Liu W.K.** Linking process, structure, property and performance for metal-based additive manufacturing: computational approaches with experimental support // *Compt. Mech.*, Vol. 5, No. 57, 2016. pp. 583–610.
7. **Влияние** основных параметров процесса селективного лазерного плавления на стабильность формирования единичных дорожек при выращивании изделий из медных сплавов / А.А. Дренин [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, Т.6, № 711, 2019. С. 20–29.
8. **Simulation** of anisotropic load transfer and stress distribution in Si C/Al composites subjected to tensile loading / Zhang J.F [et al.]. *Mechanics of Materials.* 2018. 122, p. 96–103.
9. **Колчанова А.В., Григорьянц А.Г., Колчанов Д.С.** Высокоточное моделирование термических напряжений для процесса селективного лазерного плавления композиционных материалов // Сборник докладов Четырнадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроение России». 2021. Т. 1. С. 327–337.
10. **Kouznetsova V.** Computational homogenization for the multi-scale analysis of multi-phase materials. Phd Thesis 1 Research Tu/e/Graduation Tu/e. Mechanical Engineering, Technische Universiteit Eindhoven. 2022, 135 p.

REFERENCES

1. **Bikas H., Stavropoulos P., Chrysosolouris G.** Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. Vol. 83 (1) p. 389–405.
2. **Multi-physics** modeling of single / multiple-track defect mechanisms in electron beam selective melting / W. Yan [et al.]. *Acta Mater.* 2017. 134. P. 324–333.
3. **Grigoryants A.G., Kolchanov D.S., Drenin A.A.** Installation for selective laser melting of metallic powders // *Proceedings of the IV-th International Conference «Additive technologies: Present and future»*, March 2018, pp. 221–234.
4. **Finite** element modelling of a particle size on the stress strain curve of near beta titanium alloy / Srinivasu G. [et al.]. *Materials and Design.* 2013. 46. P. 8–15
5. **Tian Y., Yang L., Zhao D., Huang Y., Pan J.** Numerical analysis of powder bed generation and single track forming for selective laser melting of SS316L stainless steel // *Journal of Manufacturing Processes*, No. 58, October 2020. pp. 964–974.
6. **Smith J.W., Xiong W.T., Yan S., Lin P.K., Cheng P.K., Kafka O.L., Wagner G.J., Cao J., Liu W.K.** Linking process, structure, property and performance for metal-based additive manufacturing: computational approaches with experimental support // *Compt. Mech.*, Vol. 5, No. 57, 2016. pp. 583–610.
7. **Influence** of the main parameters of the selective laser melting process on the stability of the formation of single tracks when growing copper alloy products / A.A. Drenin [et al.] // *Bulletin of higher educational institutions. Mechanical Engineering*, Vol.6, No. 711, 2019. pp. 20–29.
8. **Simulation** of anisotropic load transfer and stress distribution in Si C/Al composites subjected to tensile loading / Zhang J.F [et al.]. *Mechanics of Materials.* 2018. 122, p. 96–103.
9. **Kolchanova A.V., Grigoryants A.G., Kolchanov D.S.** High-precision modeling of thermal stresses for the process of selective laser melting of composite materials // *Conference proceedings of the Fourteenth All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists (with international participation) «The future of machine building in Russia»*, 2021, vol. 1, pp. 327–337.
10. **Kouznetsova V.** Computational homogenization for the multi-scale analysis of multi-phase materials. Phd Thesis 1 Research Tu/e/Graduation Tu/e. Mechanical Engineering, Technische Universiteit Eindhoven. 2022, 135 p.

Статья поступила в редакцию 15.09.2023; одобрена после рецензирования 20.09.2023; принята к публикации 26.09.2023.

The article was submitted 15.09.2023; approved after reviewing 20.09.2023; accepted for publication 26.09.2023.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №10 (148). С.30-38.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №10 (148). P.30-38.

Научная статья

УДК 621.7

doi: 10.30987/2223-4608-2023-30-38

Расчет высокопроизводительных циклов шлифования валков холодной прокатки на основе оптимизации цикла по радиальному усилию

Сергей Михайлович Братан¹, д.т.н.

Василий Игоревич Головин², к.т.н.

Ирина Александровна Дымченко³, аспирант

Юрий Константинович Новоселов⁴, д.т.н.

^{1, 2, 3, 4} Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

¹ serg.bratan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9033-1174>

² golovin@mail.sevsu.ru, <https://orcid.org/0009-0009-8756-7715>

³ iadymchenko@mail.sevsu.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0558-7907>

⁴ yknovoselov@mail.sevsu.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6513-222X>

Аннотация. В настоящее время операция шлифования валков прокатных станов с использованием мелкозернистых кругов является наиболее прогрессивным методом финишной обработки, т. к. исключение трудоемких доводочных процедур из технологического цикла позволило обеспечить заданную точность размеров, формы, шероховатости поверхности, физико-механических свойств обрабатываемого материала, снизить трудоемкость изготовления изделий. Учитывая, что производительность шлифования мелкозернистыми кругами повышается с повышением глубины резания единичным зерном, рассмотрена методика расчета циклов шлифования по радиальному усилию для обработки поверхности валков холодной прокатки мелкозернистыми абразивными кругами. Проведен расчет, а также определены оптимальные режимы высокопроизводительного цикла шлифования деталей из стали 9Х2, 55...60 HRC, кругами 1-400х50х203 63С М14 СМ 8Б с изменением радиальной составляющей силы резания на этапах цикла. Для экспериментальной проверки рассчитанного цикла были проведены опыты по шлифованию образцов $d \times l = 65 \times 250$ мм при постоянном радиальном усилии, соответствующей заданной шероховатости поверхности и с изменением радиального усилия. Радиальное усилие шлифования задавалось натягом технологической системы и поддерживалось по прибору для регистрации радиального усилия в течение каждого прохода. При проведении опытов проводились замеры: съема металла на диаметр рычажной скобой; параметров шероховатости поверхности на профилометре-профилографе мод. 201. Проведенные испытания подтвердили эффективность применения расчетных циклов с изменением радиального усилия. При использовании предложенных циклов обеспечивается заданная шероховатость поверхности, при этом производительность операции увеличивается в 2,0 – 2,5 раза.

Ключевые слова: шлифование, валки холодной прокатки, операция, производительность, радиальная составляющая силы резания, мелкозернистые шлифовальные круги, режим шлифования

Для цитирования: Братан С.М., Головин В.И., Дымченко И.А., Новоселов Ю.К. Расчет высокопроизводительных циклов шлифования валков холодной прокатки на основе оптимизации цикла по радиальному усилию // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 10 (148). С. 30–38. doi: 10.30987/2223-4608-2023-30-38

Calculation of high-duty cold reduction rollers grinding cycles based on radial force cycle optimization

Sergey M. Bratan¹, D. Eng.
Vasily I. Golovin², PhD Eng.
Irina A. Dymchenko³, PhD student
Yuri K. Novoselov⁴, D. Eng.

^{1, 2, 3, 4} Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

¹ serg.bratan@gmail.com,

² golovin@mail.sevsu.ru,

³ iadymchenko@mail.sevsu.ru,

⁴ yknovoselov@mail.sevsu.ru

Abstract. Currently, the grinding operation of fabrication mill rollers through the use of fine-grained wheels is the most progressive method of finishing, because it saves from labor-intensive finishing processes in the technological cycle allowing to get a desired accuracy of the size, shape, surface roughness, physical and mechanical properties of the work material along with the reduction of manufacturing content. Considering that grinding rate of fine-grained wheels increases with an depth-of-cut increase in a single grain, the method of calculating grinding cycles by radial force for finishing of cold reduction rollers using fine-grained abrasive wheels is viewed. The calculation was carried out, and the optimal modes of a high-performance grinding cycle of parts made of steel 9X2, 55...60 HRC, wheels 1-400x50x203 63C M14 CM 8B with a change in the radial component of the cutting force at the cycle stages were determined. For experimental verification of the calculated cycle, grinding samples $d \times l = 65 \times 250$ mm at a constant radial force corresponding to a given surface roughness and with a change in radial force were tested. Radial grinding force was set by technological system tightness and maintained by a device for registering a radial force within each run. During the experiments, the following measurements: removal of metal to diameter with a lever bracket; surface roughness parameters on a profilometer-profilograph mod. 201 were carried out. The conducted tests proved the effectiveness of design cycles with a change in radial force. When using the proposed cycles, a given surface roughness is provided, while the productivity of the operation increases by 2,0 – 2,5 times.

Keywords: grinding, cold reduction rollers, operation, productivity, radial component of cutting force, fine-grained grinding wheels, grinding mode

For citation: Bratan S.M., Golovin V.I., Dymchenko I.A., Novoselov Yu.K. Calculation of high-duty cold reduction rollers grinding cycles based on radial force cycle optimization / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 10 (148). P. 30–38. doi: 10.30987/2223-4608-2023-30-38

Введение

В настоящее время в качестве финишных операций при изготовлении валков холодной прокатки используются процессы абразивной обработки, такие как шлифование и суперфиниширование [1]. Для исключения трудоемких доводочных процедур из технологического цикла в последнее время стали использовать процессы круглого наружного шлифования мелкозернистыми кругами, что позволило обеспечить заданную точность размеров, формы, шероховатости поверхности, физико-механических свойств обрабатываемого материала, снизить трудоемкость изготовления изделий [2]. В условиях серийного производства необходимо обеспечить шероховатость поверхности валка Ra не более 0,02 мкм, точность поверхности по пятому качеству. Большими проблемами для производства являются: определение числа операций шлифования деталей,

выбор характеристик шлифовальных кругов и назначение режимов шлифования [3]. Решение первых двух проблем подробно изложено в работах [4 – 7]. Сведения по назначению оптимальных режимов обработки для операции шлифования валков в литературе практически отсутствуют.

Целью данной работы является разработка методики расчета высокопроизводительных циклов шлифования валков холодной прокатки, на основе построения математических моделей и оптимизации цикла по радиальному усилию.

Материалы и методы

Известно, что производительность шлифования мелкозернистыми кругами повышается с повышением глубины резания единичным зерном.

В работе [9] показано, что производительность шлифования повышается с повышением интенсивности радиального усилия шлифования P_y / l_k . При шлифовании большинства металлов зависимость скорости врезания δ_M (радиальный сьем за единицу времени) от интенсивности радиального усилия имеет вид прямой линии, проходящей через начало координат, при этом зависимость изменения шероховатости поверхности от интенсивности усилия шлифования выражается функцией вида:

$$Rz = b_0 \left(\frac{P_y}{l_k} \right)^{b_1}, \quad (1)$$

где b_0 , b_1 – коэффициенты регрессии; P_y – радиальная составляющая силы резания; Π – припуск на шлифование; l_k – длина линии контакта шлифовального круга с заготовкой.

Максимально допустимая глубина резания единичным абразивным зерном $h_{\max}$ при припуске на шлифование Π определится (рис. 1) по уравнению:

$$h_{\max} = \Pi - \delta + C_1 \cdot Rz_1, \quad (2)$$

где δ – радиальный сьем материала; C_1 – коэффициент пропорциональности; Rz_1 – высота неровностей по десяти точкам (сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины).

Максимальная глубина резания единичным зерном при шлифовании соответствует наибольшей впадине текущей шероховатости поверхности Rz_T . Это выражается зависимостью:

$$h_{\max} = C_T \cdot Rz_T. \quad (3)$$

Подставляя значение Rz_T из уравнения (1) при $l_k = B$ в уравнение (3) и определяемое при этом $h_{\max}$ в уравнение (2), получим:

$$\frac{P_y}{B} = \left(\frac{\Pi - \delta + C_1 \cdot Rz_1}{b_0 \cdot C} \right)^{\frac{1}{b_1}}, \quad (4)$$

где B – высота круга.

При работе круга в режиме самозатачивания радиальный сьем материала δ пропорционален скорости врезания и времени τ [10]:

$$\delta = a_0 P_y \tau / l_k, \quad (5)$$

где a_0 – коэффициент регрессии.

Подставляя в уравнения (5) значение $\frac{P_y}{B}$ из уравнения (4), запишем бесконечно малое приращение радиального съема металла:

$$\left(\frac{b_0 \cdot C}{\Pi - \delta + C_1 \cdot Rz_1} \right)^{\frac{1}{b_1}} d\delta = a_0 d\tau. \quad (6)$$

Определяя δ из уравнения (6) и подставляя его в уравнения (4) получим зависимость изменения интенсивности радиального усилия шлифования от времени шлифования:

$$\frac{P_y}{B} = \left(\frac{b_0 \cdot b_1 \cdot C}{a_0 \cdot (1 - b_1) \cdot (A + \tau)} \right)^{\frac{1}{1 - b_1}}, \quad (7)$$

где A – постоянная интегрирования.

Уравнения (7) показывает, что для получения высокой производительности при шлифовании мелкозернистыми кругами, интенсивность радиального усилия $\frac{P_y}{B}$ должна снижаться по мере съема припуска. В начальный период времени целесообразно работать с радиальным усилием, значительно превышающим усилие, при котором обеспечивается получение заданной шероховатости поверхности. Однако интенсивность усилия шлифования может быть повышена до определенной величины, определяемой прочностью абразивного зерна и прочностью закрепления его в круге.

В общем случае, когда снимаемый припуск Π больше поверхностного слоя, в котором распределена предварительная шероховатость, весь припуск под шлифование тонкозернистым кругом может быть разбит на три участка (см. рис. 1).

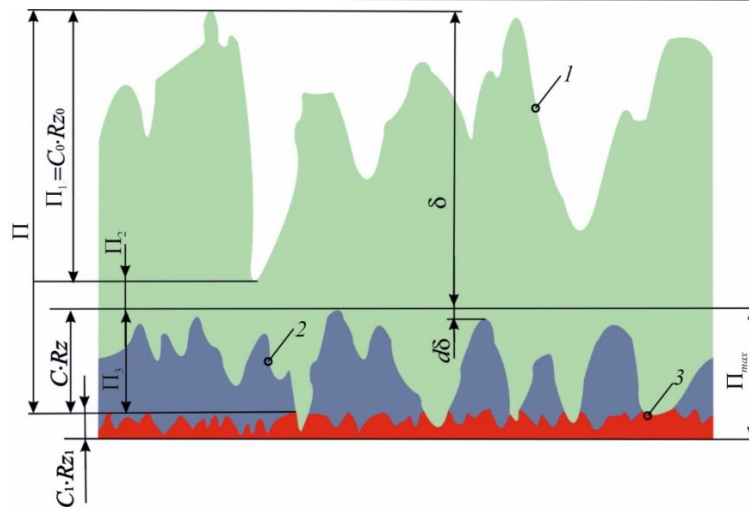


Рис. 1. К расчету высокопроизводительного цикла шлифования:

1 – предварительная шероховатость; 2 – текущая шероховатость поверхности; 3 – шероховатость поверхности после шлифования

Fig. 1. For the calculation of a high-performance grinding cycle:

1 – preliminary roughness; 2 – current surface roughness; 3 – surface roughness after grinding

Величина припуска первого участка равна слою, в котором распределена предварительная шероховатость поверхности $\Pi_1 = C_0 \cdot Rz_0$. В период удаления этого слоя меняется длина линии контакта круга с деталью [6]:

$$P_y = B \cdot [\sigma_y] \cdot [0,5 \pm \Phi(x)] \quad (8)$$

Переменная x в уравнении (8) определится на основе аппроксимации экспериментальных данных функцией плотности нормального распределения:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx.$$

Показатель нормального распределения могут быть приняты равными:

$$\sigma = \frac{C_0 \cdot Rz_0}{6}; \quad \alpha = \frac{C_0 \cdot Rz_0}{2}.$$

Учитывая, что параметр E по функции плотности нормального распределения характеризующий изменение длины линии контакта

$$E = \sum_{i=1}^n l_i / l - \text{определяется по уравнению:}$$

$$E = 0,5 \pm \Phi(x),$$

где «+» – при $x > 0$; «-» – при $x < 0$, переменная величина x может быть вычислена по уравнению:

$$x = \frac{6y}{C_0 \cdot Rz_0} - 3 = \frac{6(\delta + C \cdot Rz)}{C_0 \cdot Rz_0} - 3. \quad (9)$$

При подстановке в уравнение (9) значение δ из уравнения (8) и значения Rz из уравнения (1) при $P_y / l_k = [\sigma_y]$:

$$x = \frac{6(a_0 \cdot [\sigma_y] \cdot \tau + C \cdot b_0 \cdot [\sigma_y]^{b_1})}{C_0 \cdot Rz_0}. \quad (10)$$

Графически изменение радиального усилия шлифования на первом участке цикла представлено на рис. 2 линией АД'.

Ко второй части припуска может быть отнесен слой металла Π_2 , лежащий под слоем предварительной шероховатости поверхности и сошлифуемый при максимально допустимой интенсивности радиального усилия шлифования. В период удаления этого слоя длина линии контакта круга с деталью не меняется и равна длине круга. Радиальное усилие сохраняется постоянным и может быть определено по уравнению (8), т. к. параметр E при $\delta > C_0 \cdot Rz_0$ мало отличается от единицы.

После съема основной части припуска $\Pi_1 + \Pi_2$ радиальное усилие шлифования должно быть уменьшено до усилия, при котором обеспечивается заданная шероховатость поверхности. При этом участке цикла снимается оставшаяся часть припуска Π_3 .

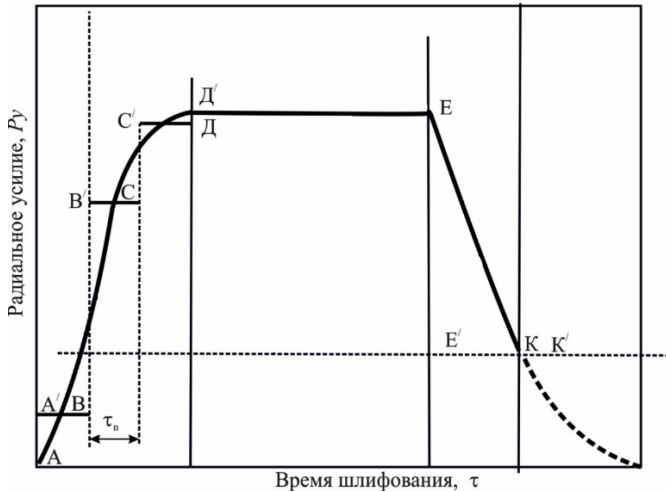


Рис. 2. Высокопроизводительные циклы шлифования мелкозернистыми кругами по радиальному усилию шлифования

Fig. 2. High-performance grinding cycles with fine-grained wheels according to the radial grinding force

Снижение радиального усилия шлифования на третьем участке цикла определяется по уравнению (7). Графически изменение радиального цикла представлено на рис. 2 линиями ЕК.

При шлифовании с продольной подачей радиальное усилие может быть изменено только в начале или конце прохода. Рассмотрим особенности контакта круга с деталью в период удаления первой части припуска при наличии продольной подачи. В этом случае (рис. 3) линия касается круга с деталью не параллельна обрабатываемой поверхности (линия АВ). Условия контакта круга с деталью изменяются не только по мере съема предварительной шероховатости поверхности, но и по высоте круга. При шлифовании с максимальной допустимой интенсивностью радиального усилия шлифования, линия АВ будет прямой. Элементарное приращение длины линии контакта круга с деталью (рис. 3), принимая параметр E при бесконечно малом приращении H постоянным определяется:

$$dl_K = dH \cdot E. \quad (11)$$

Из подобия треугольников $A'B'C'$ и ABC определим:

$$dH = \frac{B}{\delta_n} d\delta, \quad (12)$$

где δ – слой металла, снимаемый за один проход, определяется по уравнению (5) при $P_y / l_K = [\sigma_y]$ и $\tau = \tau_n$:

$$\delta_n = a_0 \cdot [\sigma_y] \cdot \tau_n. \quad (13)$$

Учитывая, что мощность, развиваемая электродвигателем, должна быть больше мощности требуемой по тангенциальному усилию шлифования:

$$P_z \cdot v_K \leq N_{\Sigma} \cdot \eta, \quad (14)$$

где N_{Σ} – мощность электродвигателя привода круга, кВт; η – коэффициент полезного действия передачи.

Тангенциальное усилие шлифования может быть выражено через факторы режима шлифования уравнением:

$$P_z = C_z \cdot v_K^{W_z} \cdot v_{ин}^{X_z} \cdot S^{Y_z} \cdot t_M^{Z_z}. \quad (15)$$

Подставляя в неравенство (15) значение из уравнения (14) после преобразования получим:

$$v_K^{W_z} \cdot v_{ин}^{X_z} \cdot S^{Y_z} \cdot t_M^{Z_z} \leq \frac{N_{\Sigma} \cdot \eta}{C_z}. \quad (16)$$

где $v_K, v_{ин}$ – окружная скорость круга и скорость заготовки; S – продольная подача; t_M – глубина резания; W_z, X_z, Y_z, Z_z – показатели степени.

Определяя l_K (11) из уравнения (12), (10), (9) и (13) и подставляя его значение в неравенство (16), получим при знаке равенства уравнение для расчета радиального усилия шлифования каждого прохода P_{y_i} на первом и втором участках цикла:

$$P_{y_i} = \frac{B \cdot [\sigma_y] \cdot C_0 \cdot Rz_0}{6\delta_n} \cdot \int_{x_i}^{x_{i+1}} [0,5 \pm \Phi(x)] dx, \quad (17)$$

где x_i и x_{i+1} – значения переменной x для начала i -го $i+1$ -го проходов.

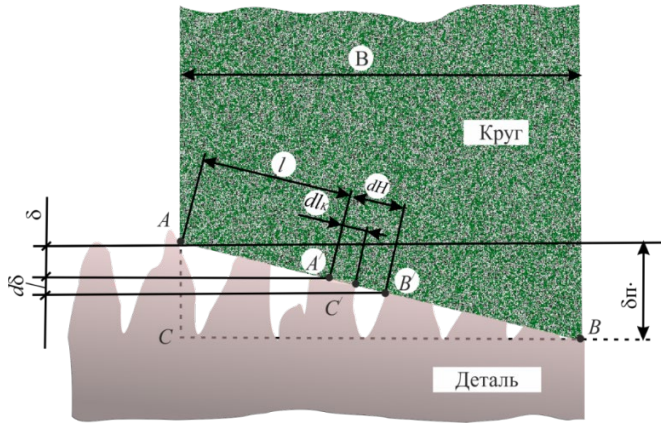


Рис. 3. Контакт тонкозернистого круга с деталью при шлифовании с продольной подачей

Fig. 3. Contact of a fine-grained wheel with a part in longitudinal-feed grinding

На третьем участке цикла радиальное усилие шлифования может быть изменено также как на первом и втором участках, периодически. При непосредственном снижении усилия с усилия второго участка цикла до усилия, при котором обеспечивается заданная шероховатость поверхности, число проходов j на третьем участке цикла определится (см. рис. 1) по уравнению:

$$j = \frac{\Pi_3}{\delta'_n} = \frac{C_\sigma \cdot Rz_\sigma - C_1 \cdot Rz_1}{\delta'_n}, \quad (18)$$

где Π_3 – слой металла, снимаемый за проход на усилии третьего участка цикла, определяется из уравнения (5) при подстановке вместо P_y/l_K его значения из уравнения (1) при $Rz = Rz_1$; C_σ и Rz_σ – шероховатость поверхности и коэффициент неоднородности шероховатости второго участка цикла.

Rz_σ определяется из уравнения (5) при $P_y/l_K = [\sigma_y]$

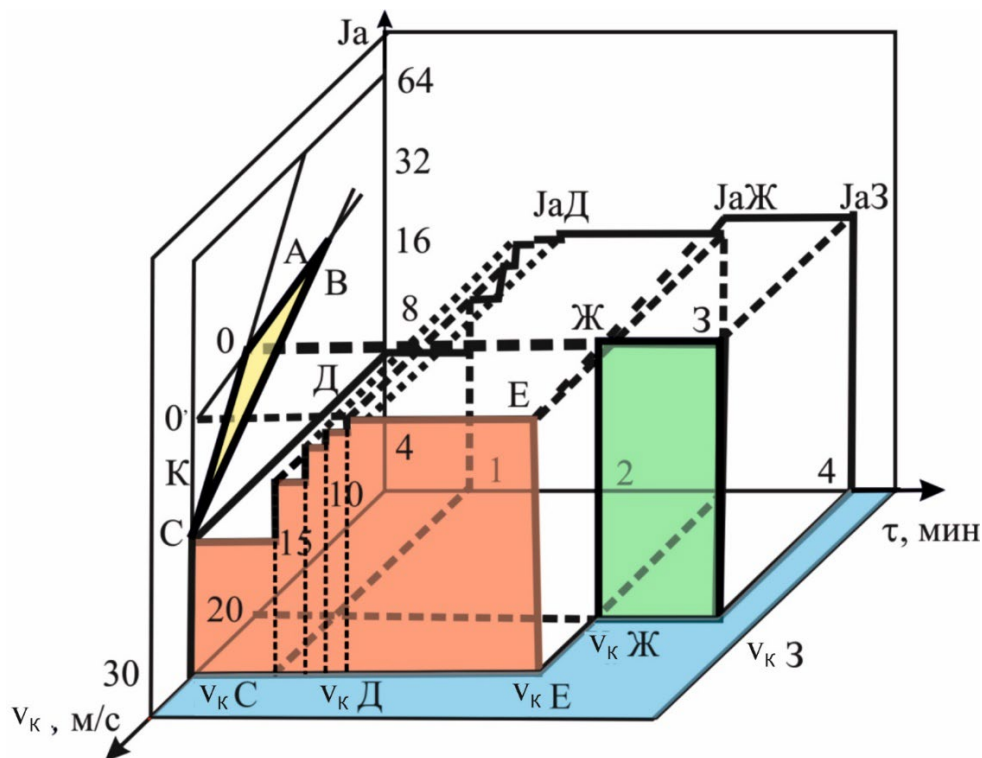


Рис. 4. Высокопроизводительный цикл шлифования валков с изменением нагрузки на электродвигатель привода круга и скорости круга

Fig. 4. High-performance grinding cycle of rollers with a change in the load on the electric motor of the wheel drive and the speed of the wheel

Подставляя в уравнение (19) значения Rz_σ и δ'_n получим:

$$j = \left(C_\sigma \cdot b_0 \cdot [\sigma_y]^{b_1} - C_1 \cdot Rz_1 \right) / \left(a_0 \cdot (Rz_1 / b_0)^{1/b_1} \cdot \tau_n \right). \quad (19)$$

Графически высокопроизводительный цикл при шлифовании мелкозернистыми кругами с продольной подачей на рис. 4 представлен ломаной линией А'ВВ'СС'ДД'ЕЕ'К'.

Пример расчета цикла и его экспериментальная проверка. Рассмотрим пример расчета высокопроизводительного цикла шлифования деталей из стали 9Х2, HRC = 55...60, кругами 1-400×50×203 63С М14 СМ 8Б. Размеры детали $d \times l = 65 \times 250$ мм, припуск на шлифование $\Pi = 0,03$ мм. Предварительная шероховатость поверхности соответствует $Rz_0 = 6,0$ мкм. Шероховатость после шлифования должна соответствовать $Rz_1 = 6,0$ мкм. Коэффициенты неоднородности шероховатости $C = C_0 = C_1 = C_\sigma = 2$. Шлифование ведется с продольной подачей $S = 0,4$ м/мин, допустимая интенсивность радиального усилия шлифования P_y / l_K для круга 63С М14 СМ 8Б, определенная экспериментально по радиальному усилию, при котором наблюдалось осыпание круга, равна 15 Н.

Дополнительными опытами при шлифовании образцов без предварительной шероховатости были установлены следующие эмпирические зависимости изменение радиального съема металла и шероховатости поверхности

от интенсивности радиального усилия шлифования:

$$\delta = 1,07 \left(\frac{P_y}{l_K} \right) \cdot \tau, \text{ мкм};$$

$$Rz = 0,4 \left(\frac{P_y}{l_K} \right)^{0,19}, \text{ мкм}.$$

Откуда в соответствии с уравнениями (5) и (1), коэффициенты регрессий равны: $a_0 = 1,07$; $b_0 = 0,4$; $b_1 = 0,19$.

Подставляя в уравнение (17) вместо коэффициентов и постоянных их значения и расчленяя пределы интегрирования, определим изменение радиального усилия шлифования на первых двух участках цикла:

$$P_y = 60 \left[\int_{-3}^{x_{i+1}} [0,5 \pm \Phi(x)] dx - \int_{-3}^{x_i} [0,5 \pm \Phi(x)] dx \right], \quad (20)$$

где x — определится из уравнения (10); $x = 8,03$; $\tau = 2,32$.

Данные по значениям x_i ; x_{i+1} ;

$\int_{-3}^{x_{i+1}} [0,5 \pm \Phi(x)] dx$; $\int_{-3}^{x_i} [0,5 \pm \Phi(x)] dx$ и значениям P_y приведены в табл. 1.

1. Расчетные значения параметров

1. Calculated values of parameters

Номер участка цикла	Номер прохода	x_{i+1}	x_i	$\int_{-3}^{x_{i+1}} [0,5 \pm \Phi(x)] dx$	$\int_{-3}^{x_i} [0,5 \pm \Phi(x)] dx$	$P_y, \text{ Н}$
1	1	+2,64	-2,32	2,63	0,003	158
2	2	+7,63	+2,64	7,99	2,638	300
2	3	+12,63	+7,63	12,998	7,998	300
3	4	-	-	-	-	97

На третьем участке цикла (четвертый проход) радиальное усилие должно быть снижено до усилия, обеспечивающего получение

заданной шероховатости поверхности. Определяется из уравнения (1) при $Rz_1 = 0,50$ мкм, $P_y = 97$ Н (табл. 2).

Число проходов на третьем участке цикла определяется по уравнению (19) $j = 0,18$. Принимаем $j = 1,0$ (см. табл. 1).

Для экспериментальной проверки рассчитанного цикла были проведены опыты по шлифованию образцов $d \times l = 65 \times 250$ мм на станке RSM M500 В CNC при постоянном радиальном усилии, соответствующей заданной шероховатости поверхности $P_y = 100$ Н и с изменением радиального усилия по радиальное усилие циклу. Радиальное усилие шлифования задавалось натягом технологической системы и поддерживалось по прибору для регистрации

радиального усилия в течение каждого прохода постоянными с точностью ± 20 Н.

При проведении опытов проводились замеры: съема металла на диаметр рычажной скобой, с ценой деления 0,001 мм; шероховатости поверхности Ra , мкм, на профилометре-профилографе мод. 201.

Повторность опытов при радиальном усилии $P_y = 100$ Н и при изменении радиального усилия по циклу была принята равной девяти. Усредненные данные по производительности шлифования, шероховатости поверхности и машинному времени обработки образца приводятся в табл. 2.

2. Усредненные данные по производительности шлифования, шероховатости поверхности и машинному времени обработки образца

2. Averaged data on grinding rate, surface roughness and machining-cycle time of the sample

Радиальное усилие P_y , Н	Производительность Q_M , мм ³ /мин	Шероховатость поверхности Ra , мкм	Машинное время T_M , мин
100	250	0,112	6,2
Изменяется по циклу	720	0,114	2,5

Заклучение

Предложенная методика позволяет рассчитать высокопроизводительный цикл шлифования мелкозернистыми кругами. Проведенные эксперименты подтверждают эффективность применения расчетных циклов, так данные табл. 2 показывают, что при изменении радиального усилия шлифования по циклу при высокой производительности процесса достигается заданная шероховатость поверхности. При шлифовании с постоянным радиальным усилием $P_y = 100$ Н машинное время шлифования детали в 2,5 раза выше, чем при шлифовании с изменением радиального усилия по рассчитанному циклу.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Malkin S., Guo C. **Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives**. New York: Industrial Press, 2008. 372 p. ISBN 978-0-8311-3247-7.
2. Суслов А.Г., Шалыгин М.Г., Кузнецов С.В. Исследование поверхностей с различной механической

обработкой на уровне субшероховатости // Научные технологии в машиностроении. 2015. № 9 (51). С. 45–47.

3. Bratan S., Roshchupkin S., Kharchenko A., Belousov S. Quality improvement of manufacturing rolling mill rolls, CIS Iron and Steel Review. Metallurgical Equipment. 2021. Vol. 22. P. 26–31. doi: 110.17580/cisisr.2021.02.05.

4. Носенко В. А., Федотов Е. В., Даниленко М. В. Математическое моделирование распределения вершин зерен при шлифовании в результате различных видов изнашивания с использованием марковских случайных процессов // МНИЖ. 2015. № 2-1 (33).

5. Bratan S., Ságová Z., Sága M., Yakimovich B., Kuric I. New Calculation Methodology of the Operations Number of Cold Rolling Rolls Fine Grinding/ Applied Sciences (Switzerland), 2023, 13 (6), 3484. <https://doi.org/10.3390/app1306348>

6. Братан С.М., Дымченко И.А., Головин В.И., Новоселов Ю.К. Методика расчета числа операций при тонком шлифовании валков холодной прокатки и ее экспериментальная проверка // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 2 (358). С. 90–106.

7. L. Godinoa, I. Pomboa, J.A. Sanchez, J. Alvarez. On the development and evolution of wear flats

in microcrystalline sintered alumina grinding wheels, Journal of Manufacturing Processes. 2018. Vol. 32. P. 494–505.

8. **Братан С.М., Рощупкин С.И., Часовитина А.С., Гупта К.** Влияние на вероятность удаления материала относительных вибраций абразивного инструмента и заготовки при чистовом шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2022. Т. 24. № 1. С. 33–47. DOI 10.17212/1994-6309-2022-24.1-33-47.

9. **Корчак С.Н.** Производительность процесса шлифования стальных деталей. М.: Машиностроение, 1974. 280 с.

10. **Bratan S., Roshchupkin S., Chasovitina A.** The correlation of movements in the technological system during grinding precise holes, 2021, Materials Science Forum, 1037 MSF, pp. 384–389. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.384

REFERENCES

1. Malkin S., Guo C. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives. New York: Industrial Press, 2008. 372 p. ISBN 978-0-8311-3247-7.

2. Suslov A.G., Shalygin M.G., Kuznetsov S.V. Investigation of different machined surfaces for studying the level of sub-roughness // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2015, No. 9 (51), pp. 45–47.

3. Bratan S., Roshchupkin S., Kharchenko A., Belousov S. Quality improvement of manufacturing rolling mill rolls, CIS Iron and Steel Review. Metallurgical Equipment. 2021. Vol. 22. P. 26–31. doi: 110.17580/cisr.2021.02.05.

4. Nosenko V. A., Fedotov E. V., Danilenko M. V. Mathematical modeling of grain vertex distribution during grinding as a result of various types of wear using Markov random processes. IRJ, 2015, No. 2-1 (33).

5. Bratan S., Ságová Z., Sága M., Yakimovich B., Kuric I. New Calculation Methodology of the Operations Number of Cold Rolling Rolls Fine Grinding/ Applied Sciences (Switzerland), 2023, 13(6), 3484. <https://doi.org/10.3390/app1306348>

6. Bratan S.M., Dymchenko I.A., Golovin V.I., Novoselov Yu.K. Methodology for calculating the number of operations during fine grinding of cold reduction rollers and its experimental verification // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology, 2023, No. 2 (358). pp. 90–106.

7. L. Godinoa, I. Pomboa, J.A. Sanchez, J. Alvarez. On the development and evolution of wear flats in microcrystalline sintered alumina grinding wheels, Journal of Manufacturing Processes. 2018. Vol. 32. P. 494–505.

8. Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Chusovitina A.S., Gupta K. The effect of the relative vibrations of the abrasive tool and the workpiece on the probability of material removing during finishing grinding// Metalworking (technology, equipment, tools), 2022, vol. 24, No. 1, pp. 33–47. DOI 10.17212/1994-6309-2022-24.1-33-47.

9. Korchak S.N. Productivity of the grinding process of steel parts. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 280 p.

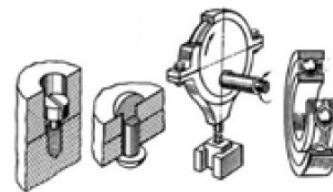
10. Bratan S., Roshchupkin S., Chasovitina A. The correlation of movements in the technological system during grinding precise holes, 2021, Materials Science Forum, 1037 MSF, pp. 384–389. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.384

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 31.07.2023; одобрена после рецензирования 17.08.2023; принята к публикации 21.08.2023.

The article was submitted 31.07.2023; approved after reviewing 17.08.2023; assepted for publication 21.08.2023.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №10 (148). С.39-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №10 (148). P.39-48.

Научная статья

УДК 621.757

doi: 10.30987/2223-4608-2023-39-48

Научноёмкие технологии в сборочном производстве

Михаил Владимирович Вартанов¹, д.т.н.

Нгуен Ван Линь², аспирант

^{1,2}Московский политехнический университет, Москва, Россия

¹ m.v.vartanov@mospolytech.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6057-9478>

² nguyenlinh.hvktqs@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4754-1632>

Аннотация. Сборка является важным этапом производства, оказывающим значительное влияние на качество изготовленных изделий. В связи с усложнением конструкций, повышением требований к качеству и повышением технико-экономических характеристик выпускаемых изделий, а также с постоянным научно-техническим прогрессом в машиностроении, задача гарантирования качества и достижения максимальной идентичности изделий становится все более актуальной. Успешность реализации проектов автоматизации сборочного производства связана с необходимостью параллельности геометрического и технологического проектирования. В статье излагается подход к решению данной проблемы на основе последовательного технологического совершенствования изделия с позиций сборки. В настоящее время проблема качества сборки является ключевой в машиностроении. В статье рассмотрены взаимосвязь сборки со всеми предшествующими этапами производства. Был произведен анализ проблем, связанных с сборочным производством в данной области. Уровень автоматизации сборки в России в области машиностроения не превышает 10 %. Повышение уровня автоматизации сборки может быть достигнуто только на основе создания и исследования новых методов автоматической и роботизированной сборки. В статье излагаются технологические возможности и области применения новых методов автоматической сборки. Анализируются возможности образцов экспериментального сборочного оборудования, созданного и исследованного в университетах России. Особой проблемой является отсутствие в России централизованного производителя автоматического сборочного оборудования. В статье обращается внимание на необходимость перехода к созданию и внедрению интеллектуального сборочного оборудования и технологий. В результате этого анализа выявлены вопросы, решение которых может быть реализовано на отраслевом и государственном уровнях.

Ключевые слова: сборочное производство, точность сборки, технологии сборки, эффективность производства, оборудование на агрегатно-модульной основе, технологичность изделий, системы CAD/CAM/CAPP, САПР

Для цитирования: Вартанов М.В., Линь Н.В. Научноёмкие технологии в сборочном производстве // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 10 (148). С. 39–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-39-48

High-tech technologies in assembly production

Mikhail V. Vartanov¹, D.Eng.

Nguyen V. Lin², PhD student

^{1,2} Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

¹ m.v.vartanov@mospolytech.ru

² nguyenlinh.hvktqs@gmail.com

Abstract. Assembly is an important stage of production that has a substantial impact on the quality of manufactured products. Due to the complexity of structures, severization of quality requirements and increased technical and economic characteristics of manufactured products, taking into account constant scientific and technological progress in machine building, the task of quality assurance and achieving the maximum identity of products is becoming more and more relevant. The success of assembly automation projects implementation is associated with the need for geometric and technological design concurrency. The success of the implementation of assembly automation projects is associated with the need for both geometric and technological design concurrency. The article describes an approach to solving this problem considering the consistent technological improvement of the product through assembly prism. Currently, the problem of assembly quality is a key one in mechanical engineering field. The article discusses the intercoordination of the assembly with all the stages of production, going before. An analysis of the problems associated with assembly production in this area was carried out. The level of assembly automation in Russia in the field of mechanical engineering does not exceed 10 %. An increase in the level of assembly automation can be achieved only through the creation and research of new methods of automatic and robotic assembly. The article describes the technological capabilities and applications of new methods of automatic assembly. The possibilities of samples of experimental assembly equipment, created and studied at the universities of Russia, are studied. A particular problem is the lack of a single source manufacturer of automatic assembly equipment in Russia. The article draws attention to the need of the creation and implementation of intelligent assembly equipment and technologies. As a result of this analysis, issues have been identified, the solution of them can be made at the sector-specific and state levels.

Keywords: assembly production, assembling accuracy, assembly technology, production efficiency, building-block concept equipment, manufacturability of products, CAD/CAM/CAPP systems, CAD

For citation: Vartanov M.V., Lin N.V. High-tech technologies in assembly production / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 10 (148). P. 39–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-39-48

Введение

Сборка тесно связана со всеми предыдущими этапами производства, и качество сборки непосредственно зависит от качества этих этапов. Одной из причин проблем с качеством сборки является то, что часто на этом этапе работают сотрудники с низкой квалификацией, у которых отсутствуют необходимые контрольно-измерительные инструменты. В результате этого возникают дефекты, которые могут привести к низкой надежности и большому проценту отказов машин и приборов.

Проблемы сборочного производства, перечисленные [1], уже довольно известны. Проблемы автоматизации сборки включают недостаточный уровень развития теории и технологии, неэффективность конструкций, множество видов соединений и условий сборки, требование точного взаимного ориентирования деталей, а также наличие размерных, кинематических и динамических связей в машинах. В России отсутствует централизованный производитель модульного сборочного оборудования. Оборудование, как правило, создается под функционал неавтоматизированного производства. Кроме того, конструкторская и технологическая подготовка не всегда взаимосвязаны, что может приводить к потере информации, а также несовершенству нормативных документов, регулирующих качество сборки.

Совершенствование сборки ведется по следующим направлениям [2]:

- обеспечение технологичности конструкций изделий;
- обеспечение параллельности конструкторско-технологического проектирования на основе методов CAD/CAM/CAE;
- модульный принцип конструирования изделий;
- создание и освоение в производстве новых методов сборки;
- обеспечение стабильного качества сборки на основе автоматизации и роботизации сборочных процессов;
- разработка адаптивного сборочного оборудования, обеспечивающего широкие возможности переналадки;
- технологическое проектирование сборки на основе принципов технологической наследственности.

Для создания эффективного технологического оборудования важно использовать подход, основанный на агрегатно-модульной конструкции с использованием нормализованных узлов, называемых технологическими модулями. Этот подход позволяет создавать многократно используемые модули для различных целей, что ускоряет процесс разработки и снижает издержки. Многие производители в мире используют подобный подход, среди которых фирмы Bosch, Renault, Sormel, Hitachi, Citizen Watch, Sortimat и НПО «Автопром-сборка». Существуют также специализированные научно-технические журналы, посвященные

сборке машин и приборов, которые издаются в России, Польше, Великобритании и США.

Для мелко- и среднесерийного производства эффективность сборочного процесса повышается благодаря использованию гибких сборочных систем, основанных на переналаживаемом технологическом оборудовании. Гибкость остается важным аспектом и при массовом производстве. Тем не менее, автоматизация и роботизация сборочного производства представляют собой особую проблему, которая требует особого внимания.

В условиях мелко- и среднесерийного производства достижение высокой эффективности сборочного производства связано с использованием гибких сборочных систем на базе переналаживаемого технологического оборудования. Важность гибкости подчеркивается также и в условиях массового производства. Следует отметить, что автоматизация и роботизация сборочного производства представляют особую сложность.

Анализ технологических требований к изделию и выявление сборочных задач

При разработке технологии сборки необходимо провести анализ первичных данных, включающих конструкторскую документацию, программу выпуска, продолжительность выпуска изделия, имеющиеся производственные ресурсы, каталоги необходимого сборочного оборудования и оснастки, а также информацию о предыдущих технологических процессах и рекомендации по технологическим режимам и инструкции.

Основными технологическими задачами, которые должны учитываться и обеспечиваться технологическим процессом являются [3]: точность пространственного положения деталей в собранном изделии; точность кинематики в изделии; обеспечение герметичности изделий и соединений; температурные условия эксплуатации; точность фиксации деталей; обеспечение требуемого дисбаланса в изделии; точность момента затяжки.

В настоящее время проблемы методологии связаны с нарушением принципов передачи достоверной информации при технической подготовке производства. Одной из таких проблем, на которую обращает внимание компания ADEM [4], является отсутствие стандарта на формат 3D-модели, содержащей конструкторские данные, такие как геометрия детали, пространственные отклонения, шероховатость и т. д.

Технологичность конструкций изделий при сборке

Для обеспечения технологичности изделий необходимо установить связь между конструкцией и технологией. Однако до настоящего времени это является менее формализованной задачей технической подготовки производства, решаемой эвристическим подходом и зависящей от квалификации специалистов. Подобное положение значительно осложняет возможности автоматизации сборки изделий. После завершения конструкторской подготовки производства внесение принципиальных изменений в конструкцию изделия становится невозможным. Это связано с возрастанием сроков подготовки производства и необходимостью проведения дополнительных экспериментов. Доступные САПР не решают эту проблему. Только интеграция CAD\CAM\CAPP-систем может решить данную проблему. Известно решение на основе объединения Solid Work и программного обеспечения DFMA от компании «Boothroyd and Dewhurst Inc.» (США) (рис. 1).

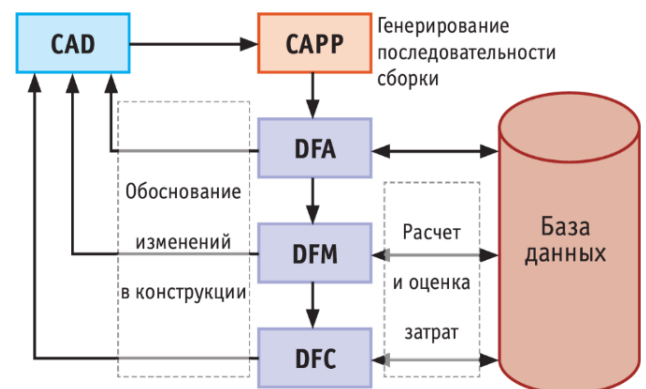


Рис. 1. Концепция САПР на основе метода DFMA

Fig. 1. CAD concept based on the DFM method

В работе [6] описан метод подготовки сборочного производства на основе параллельного конструкторско-технологического проектирования. Основная цель данного подхода – избежать необходимости переработки изделия, сократить время подготовки производства и уменьшить затраты. Однако для этого необходимо применять соответствующие методы и процедуры. Существует два возможных подхода для решения данной проблемы: использование технологических усовершенствований на прототипе или формирование множества технических решений и их последующая оптимизация (рис. 2).

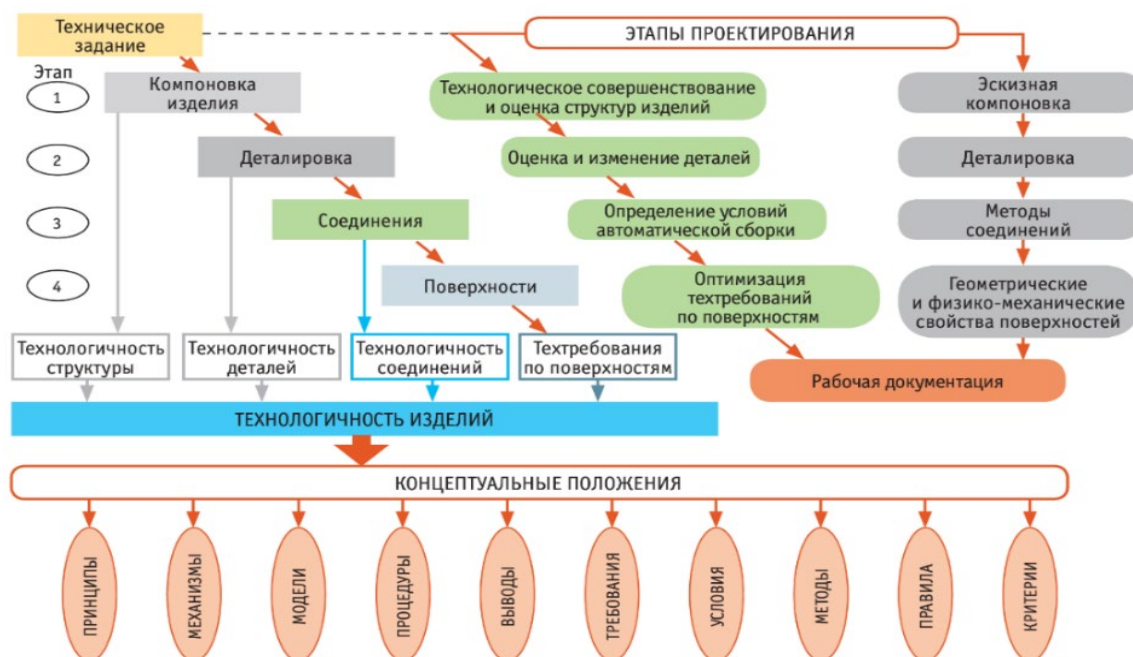


Рис. 2. Методология параллельного конструкторско-технологического проектирования

Fig. 2. Methodology of parallel process design engineering

Технологическое обеспечение качества сборки

В настоящее время существует два основных типа методов обеспечения качества сборки – пассивные и активные (рис. 3).

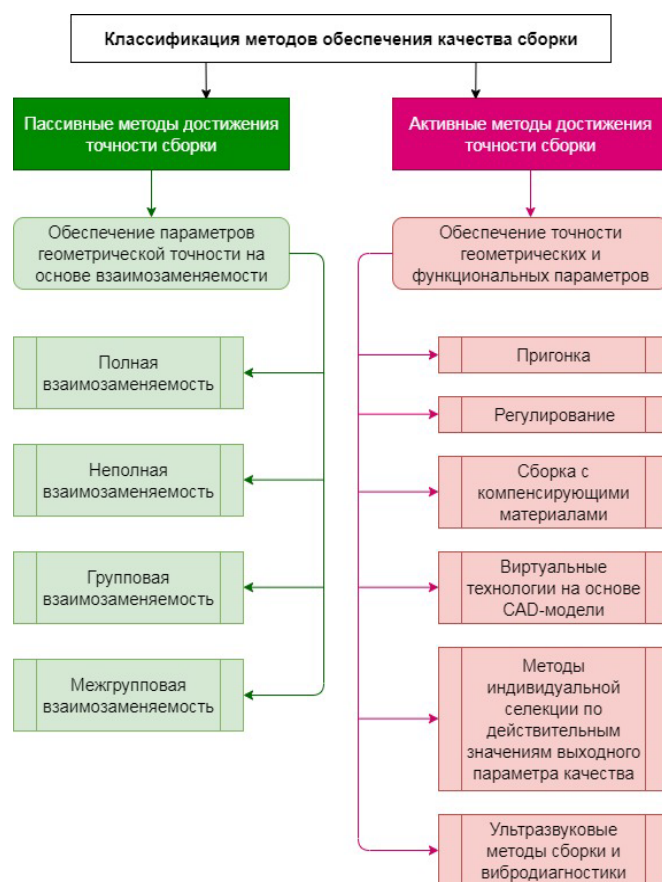


Рис. 3. Классификация методов обеспечения точности

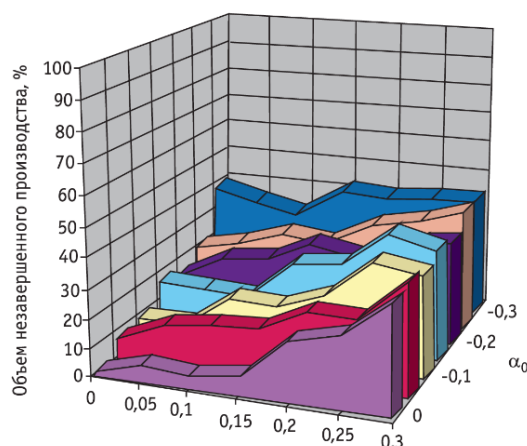
Fig. 3. Classification of methods for ensuring accuracy

Выбор конкретного метода зависит от соотношения между конструкторским и технологическим допусками, а также от экономических факторов. Современные методы обеспечения точности сборки учитывают асимметричное распределение размеров сопрягаемых деталей.

Использование классической селективной сборки в случае асимметричного распределения размеров может привести к большому объему незавершенного производства, что является проблемой (рис. 4). Для снижения объема незавершенного производства успешно применяется метод межгрупповой взаимозаменяемости (рис. 5) [7, 8]. Современное производство горного оборудования успешно использует данный метод.

Группа методов, направленных на формирование точности изделия, называется «активными». Они основаны на применении активных метрик и включают в себя такие методы, как пригонка, регулирование, использование компенсирующих материалов, применение виртуальных моделей, индивидуальная селекция и ультразвуковые методы контроля качества.

В некоторых случаях при производстве авиационных двигателей или автомобилей представительского класса применяют методы пригонки деталей, что увеличивает трудоемкость сборки и может привести к неоднократным переборкам изделий.



Параметр	Значение
Допуск, $ITA=ITB$, мкм	150
Максимальный зазор, S_{max} , мкм	150
Минимальный зазор, S_{min} , мкм	50
Групповые допуски, $a=b=ITB/2$, мкм	50
Количество групп, $n_1=n_2$	3
Нижнее предельное отклонение размера вала (поршня), мкм	-75
Закон распределения размеров вала (поршня)	Нормальный
Закон распределения размеров отверстия (цилиндра)	Нормальный
Объем производства, шт.	200

Рис. 4. Определение некомплектных деталей при достижении точности методом групповой взаимозаменяемости

Fig. 4. Determination of incomplete parts when achieving accuracy by the method of group interchangeability

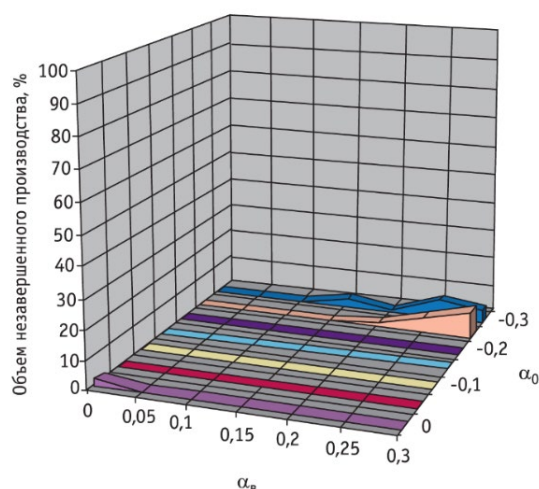


Рис. 5. Определение некомплектных деталей при достижении точности методом межгрупповой взаимозаменяемости

Fig. 5. Characterization of incomplete parts for achieving accuracy by intergroup interchangeability method

Метод функциональной взаимозаменяемости является альтернативой применения метода пригонки [9]. Качество сборки оценивается не на основе размерного анализа изделия, а на основе обеспечения функционального параметра. Варьирование взаимного углового положения деталей позволяет добиться требуемых выходных параметров. Все шире при технологической подготовке производства применяется виртуальная сборка на основе САД-моделей. Метод наиболее эффективен при сборке деталей сложного профиля.

В промышленной практике актуальны методы сборки, использующие компенсаторы, включая сборку с компенсирующими материалами (например, пластмассами и легкоплавкими металлами). Одним из новых методов, получивших название «*injected metal*», является заливка легкоплавким металлом из искусственно созданного большого зазора в цилиндрическом соединении.

Для серийного производства может быть эффективен метод индивидуального подбора деталей. В России были разработаны соответствующие теоретические и информационные ресурсы для его реализации в машиностроении.

При производстве изделий выбор метода сопряжения является важным фактором. В настоящее время разработаны новые методы, которые позволяют контролировать прочность прессовых соединений на основе заданных параметров качества при механической обработке сопрягаемых поверхностей [10]. Кроме того, для улучшения качества прессовых соединений и их нагрузочной способности можно использовать ультразвук [11]. Применение ультразвуковых колебаний позволяет повысить качество соединений благодаря эффекту УЗ-сварки.

Если условия собираемости, основанные на размерном анализе позиций, не выполнены, то применяют адаптивную сборку. Технические решения на основе адаптивной сборки описаны в технической литературе и могут быть реализованы с использованием пассивной или активной адаптаций [12]. Методы активной адаптации находятся на стадии исследований. В Ковровской государственной технологической академии давно и успешно занимаются исследованием и разработкой

устройств пассивной адаптации для резьбовых соединений [13] (рис. 7). В основе метода заложена последовательная работа двух кинематических цепей устройства.

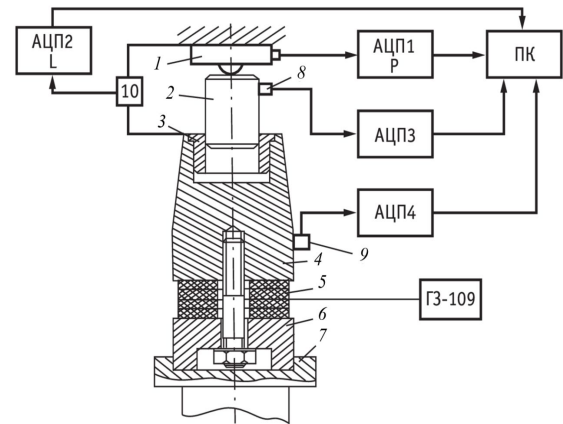


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для исследования процессов при виброзапрессовке:

1 – датчик силоизмерительный резистивного типа; 2, 3 – соединяемые детали (вал и втулка соответственно); 4 – концентратор колебательной энергии; 5 – пьезоэлектрический вибровозбудитель; 6 – противовес; 7 – шток гидроцилиндра; 8, 9 – датчики вибрации типа КВ-10; ГЗ-109 – генератор звуковой; 10 – датчик перемещения резистивного типа; АЦП1...АЦП4 – аналого-цифровой преобразователь (ЛА2USB); P – усилие запрессовки; L – перемещение; ПК – персональный компьютер

Fig. 6. Scheme of a test installation for the study of processes during vibration pressing:

1 – force measuring sensor of resistive type; 2, 3 – inter-connected parts (shaft and sleeve, respectively); 4 – vibrational energy concentrator; 5 – piezoceramic vibration exciter; 6 – counterweight; 7 – hydraulic cylinder rod; 8, 9 – vibration sensors of KV-10 type; GZ-109 – sound generator (SG); 10 – resistive type displacement sensor; ADC1...ADC4 – analog-to-digital converter (LA2USB); P – pressing force; L – displacement; PC – personal computer

Компания AtlasCorpo (США) предлагает инновационные решения для сборочных систем, включая интеллектуальные гайковерты. Эти решения могут быть как ручными, так и автоматическими. Использование виртуальных станций позволяет контролировать инструмент, обмениваться данными и проверять аксессуары. За счет применения интеллектуального модуля, можно хранить информацию обо всех выполненных операциях и легко настраивать электрические гайковерты.

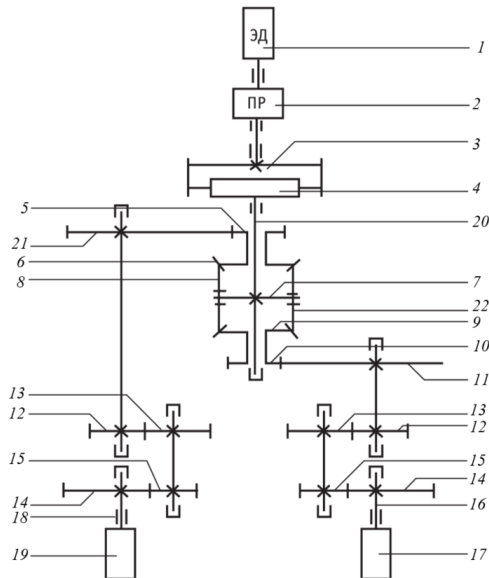


Рис. 7. Структурная схема адаптивного резьбовзвинчивающего устройства:

1 – электродвигатель; 2 – планетарный редуктор; 3, 4 – полумуфта; 5, 6, 9, 10 – сдвоенные шестерни; 7 – ось сателлита; 8, 22 – сателлит; 11, 21 – колесо; 12, 13, 14, 15 – зубчатые передачи; 16, 18 – шпиндель; 17, 19 – патрон; 20 – ось дифференциала

Fig. 7. Block diagram of adaptive threading device:

1 – electric motor; 2 – planetary reduction gear uni; 3, 4 – half couplings; 5, 6, 9, 10 – twin gear members; 7 – planet axis; 8, 22 – planet; 11, 21 – wheel; 12, 13, 14, 15 – gears; 16, 18 – spindle; 17, 19 – workholder; 20 – differential axis

Для проектирования автоматической сборочной операции необходимо выполнить ряд дополнительных шагов. Основные этапы автоматической сборки включают в себя проверку технологичности изделия для автоматизированной сборки, выбор способа и устройств для автоматической загрузки деталей, разработку технических решений для автоматического ориентирования деталей, проверку условий собираемости в автоматическом режиме, а также выбор методов и технических средств для автоматического контроля в процессе выполнения автоматической сборки.

Проблема автоматизации сборки широко освещена в специальной технической литературе [14]. Решение этой задачи достаточно сложно и требует определенного опыта, особенно учитывая ограниченность стандартного оборудования для автоматической сборки на рынке. В России отсутствует централизованный производитель сборочного оборудования, и заказчикам приходится проектировать

нестандартное технологическое оборудование. Тем не менее, за последние годы были известны успешные примеры автоматизации сборочных процессов малыми научно-производственными компаниями.

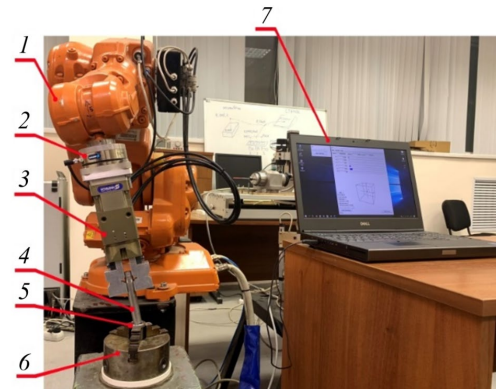


Рис. 8. Экспериментальная установка для исследования роботизированной сборки:

1 – робот ABB IRB 140; 2 – силомоментный датчик; 3 – схват; 4 – вал; 5 – втулка; 6 – базовое приспособление; 7 – персональный компьютер

Fig. 8. Test installation for the study of robotic assembly:

1 – robot ABB IRB 140; 2 – force-torque sensor; 3 – grip; 4 – shaft; 5 – sleeve; 6 – basic device; 7 – personal computer

Одной из серьезных проблем автоматической сборки является необходимость обеспечения точности соединений, которая постоянно возрастает. При роботизированной сборке деталей возможны осевые или угловые погрешности положения из-за неточности движений робота-манипулятора, недостаточной повторяемости и геометрических погрешностей деталей. Для корректировки их используется точное движение, которое называется адаптацией движения, и может быть выполнено путем активной или пассивной адаптации, или их комбинации. При сборке с высокой точностью и малыми зазорами наиболее эффективна активная адаптация, основанная на управлении с обратной связью с помощью силомоментных датчиков или технического зрения. Однако теоретические основы роботизированной сборки с активной адаптацией пока недостаточно разработаны. В работе [15] представлено исследование, удостоверяющее технологическую надежность процесса сборки на основе обратной связи и алгоритмов корректировки программных траекторий для соединений «вал – втулка» (рис. 8).

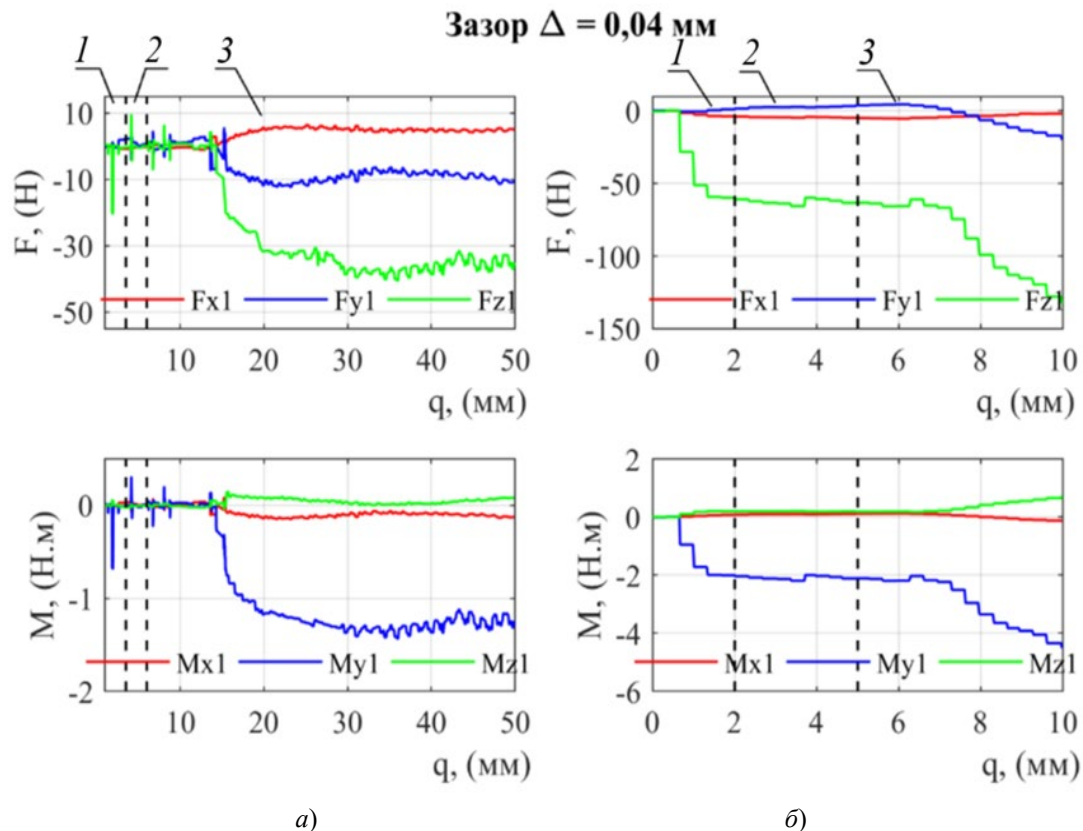


Рис. 9. Зависимость изменения векторов сил и моментов на трех этапах сопряжения:

a – с применением алгоритма управления; *b* – при отсутствии алгоритма управления;

1 – область одноточечного контакта; *2* – область трехточечного контакта; *3* – область двухточечного контакта

Fig. 9. Dependence of changes in vectors of forces and moments at three stages of integration:

a – using a control algorithm; *b* – a control algorithm absent;

1 – the area of single-point contact; *2* – the area of three-point contact; *3* – the area of two-point contact

Были разработаны математические модели контактных состояний для роботизированной сборки цилиндрических соединений. Использование идентификатора положения деталей позволяет установить их положение на основе контактных реакций в зоне соединения. Была доказана высокая эффективность модели Гауссовой смеси распределения на основе ожидания максимизации для идентификации контактных состояний деталей в процессе роботизированной сборки. Результаты экспериментальных исследований подтверждают, что алгоритм позиционно-силового управления при роботизированной сборке позволяет сократить величину сборочной силы с 120 до 40 Н для соединений с зазором 0,4 мм, а также увеличить глубину сопряжения с 10 до 50 мм [15] (рис. 9).

В России осуществляется процесс разработки специализированного технологического оборудования и автоматизированных линий для оборонной промышленности, в том числе для

производства патронов. На текущий момент исследования и работы по разработке новых образцов технологического оборудования проводятся в ряде высших учебных заведений РФ.

Заключение

В ближайшей перспективе ожидается значительная трансформация сборочного производства. Одним из первоочередных шагов должна стать автоматизация отдельных позиций. Следующим этапом станет автоматизация технологических систем. С учетом сложившейся многономенклатурности современного производства стоит задача переноса решений, оправдавших себя в массовом и крупносерийном производстве. Хорошие перспективы применения имеет адаптивная сборочная оснастка.

Поскольку четвертая промышленная революция в первую очередь означает автоматизацию производства, изделия должны быть спроектированы с учетом технологичности автоматической

сборки. Для решения вызванных данной революцией проблем необходимо использовать модульное автоматическое сборочное оборудование. Расширение сферы применения аддитивных технологий также приведет к существенным трансформациям в производстве сборки. Это связано с тем, что аддитивные технологии не требуют ограничений для проектирования изделий в соответствии с методами их производства. Например, в перспективе возможно исключить разбиение корпуса агрегатов на несколько составных частей благодаря использованию аддитивных технологий, что приведет к значительному уменьшению объема сборочных работ.

Сборочное производство играет ключевую роль в обеспечении качества промышленной продукции. От того как правильно выбраны и реализованы технологические решения зависит успешность изделий на рынке.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Справочник технолога-машиностроителя.** В 2-х томах. Том 2 / Под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. 6-е изд., перераб. и доп. М., Инновационное машиностроение, 2018. 818 с. ISBN: 978-5-6040281-7-9
2. **Безъязычный В.Ф., Семенов А.Н.** Научные и методические основы сборки. Состояние теории // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2004. №4. С. 3–7.
3. **Холодкова А.Г., Кристал М.Г., Штриков Б.Л. и др.** Технология автоматической сборки. М., Машиностроение, 2010. 560 с. ISBN: 978-5-217-03412-3
4. **Зинченко Д.** Особенности и преимущества системы ADEM области создания управляющих программ для станков с ЧПУ // «Станкоинструмент». 2019. №1 (014). С. 72–80. DOI: 10.22184/2499-9407.2019.14.01.72.80
5. **Попов А.М.** Повышение сборочной технологичности конструкций изделий в интегрированных системах автоматизированного проектирования // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. №1. С. 14–19. EDN: PGPJJP
6. **Вартанов М.В.** Методологическое обеспечение технологичности конструкций изделий машиностроения в процессе проектирования // Автоматизация и современные технологии. 2016. С. 33–36.
7. **Набатников Ю.Ф.** Метод селективной сборки в условиях мелкосерийного производства // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. №9. С. 19–32. EDN: PYRMJH
8. **Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н.** Анализ собираемости изделий типа «вал-втулка» // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. №1. С. 23–26. EDN: PGPJKJ
9. **Семенов А.Н., Сазанов А.А.** Особенности обеспечения функционального качества авиационной топливной форсунки на этапе сборки // 2-й международный научно-технический семинар «Современные технологии сборки», М., МГТУ «МАМИ». 2011. С. 65–71.
10. **Безъязычный В.Ф., Федулов В.М.** К вопросу

технологического обеспечения качества соединений деталей при сборке с гарантированных натягом // «Сборка в машиностроении, приборостроении». 2012. № 6. С. 33–41.

11. **Шуваев В.Г.** Обеспечение качества прессовых соединений методами вибрационной диагностики при ультразвуковой сборке // МНТС «Современные технологии сборки», Москва, МГТУ «МАМИ». 2013. С. 126–131.

12. **Кузнецова С.В., Симаков А.Л., Вартанов М.В., Зинина И.Н.** Синтез управления процессом адаптации детали при сборке методом обратной задачи динамики // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. №3. С. 104–111. EDN: UGUHCZ

13. **Житников Ю.З., Житников Б.Ю.** Обоснование универсальной кинематической схемы многошпиндельных гайковертов с произвольным числом шпинделей на основе структурных схем управления процессом сборки // Современные технологии сборки: матер. VI междунар. науч.-техн. семинара; под ред. М.В. Вартанова. М.: Московский Политех. 2019. С. 40–45. EDN: EEPMLE

14. **Машиностроение.** Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. М.: Машиностроение. Технология сборки в машиностроении. Том III-5 // А.А. Гусев, В.В. Павлов; под ред. Ю.М. Соломенцева. М.: Машиностроение, 2001. 640 с. ISBN: 5-217-01959-X

15. **Нгуен Ван Зунг.** Повышение технологической надежности роботизированной сборки на основе разработки алгоритма управления роботом // Известия ТулГУ. 2022. № 4. С. 518–528.

REFERENCES

1. Handbook of a machine-building technologist. In 2 volumes. Volume 2 / Edited by A.S. Vasiliev, A.A. Kutin. 6th ed., updated and revised. Moscow, Innovative Mechanical Engineering, 2018, 818 p. ISBN: 978-5-6040281-7-9
2. Bez'yazichny V.F., Semenov A.N. Scientific and methodological foundations of assembly. The state of theory // Assembly in mechanical engineering, instrumentation, 2004, No.4, pp. 3–7.
3. Kholodkova A.G., Kristal M.G., Shtrikov B.L. et al. Technology of automatic assembly. M., Mechanical Engineering, 2010, 560 p. ISBN: 978-5-217-03412-3
4. Zinchenko D. Features and advantages of the ADEM system in the field of creating control programs for CNC machines // «Stankoinstrument», 2019, No.1 (014). pp. 72–80. DOI: 10.22184/2499-9407.2019.14.01.72.80
5. Popov A.M. Improving the assembly manufacturability of product designs in integrated computer-aided design systems // Assembly in mechanical engineering, instrumentation, 2012, No. 1, pp. 14–19. EDN: PGPJJP
6. Vartanov M.V. Methodological support of the manufacturability of mechanical engineering product designs in the design process // Automatization and modern technologies, 2016, pp. 33–36.
7. Nabatnikov Yu.F. Method of selective assembly in conditions of small-scale production // Assembly in mechanical engineering, Instrumentation. 2012, No. 9, pp. 19–32. EDN: PYRMJH
8. Sorokin M.N., Anurov Yu.N. Analysis of the assemblability of products of the «shaft-sleeve» type //

Assembly in mechanical engineering, instrumentation. 2012. No.1. pp.23–26. EDN: PGPJKJ

9. Semenov A.N., Sazanov A.A. The importance of ensuring the functional quality of an aviation fuel injector at the assembly stage // Proceedings of the 2nd International Scientific and Technical Seminar «Modern assembly technologies», Moscow, MSTU "MAMI", 2011. pp. 65–71

10. Bez'yazichniy V.F., Fedulov V.M. On the issue of technological assurance of the quality of connections of components during assembly with guaranteed tightness // «Assembly in mechanical engineering, instrumentation 2, 2012, No. 6, pp. 33–41.

11. Shuvaev V.G. Quality assurance of press joints by vibration diagnostics methods during ultrasonic assembly // MNTS «Modern assembly technologies», Moscow, MSTU «MAMI», 2013, pp. 126–131.

12. Kuznetsova S.V., Simakov A.L., Vartanov M.V., Zinina I.N. Synthesis of control over the adaptation process of a part during assembly by the method of the inverse

dynamics problem // Problems of mechanical engineering and automation, 2019, No.3, pp. 104–111. EDN: UGUHCZ

13. Zhitnikov Yu.Z., Zhitnikov B.Yu. Substantiation of the universal kinematic scheme of multi-spindle wrenches with an arbitrary number of spindles based on structural control schemes of the assembly process // Modern assembly technologies: proceedings of the VI-th International Scientific and Technical seminar; edited by M.V. Vartanov. Moscow: Moscow Polytech. 2019, pp. 40–45. EDN: EEPMLE

14. Mechanical engineering. Encyclopedia / Ed. council: K.V. Frolov (chief) et al. Moscow: Mashinostroenie. Assembly technology in mechanical engineering, volume III-5 // A.A. Gusev, V.V. Pavlov; edited by Yu.M. Solomentseva. Moscow: Mashinostroenie, 2001, 640 p. ISBN: 5-217-01959-X

15. Nguyen Van Zung. Improving the technological reliability of a robotic assembly based on the development of a robot control algorithm // Bulletin of TulSU, 2022, No. 4, pp. 518–528.

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

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

Статья поступила в редакцию 20.06.2023; одобрена после рецензирования 07.07.2023; принята к публикации 17.08.2023.

The article was submitted 20.06.2023; approved after reviewing 06.06.2023; assepted for publication 17.08.2023.

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

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

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

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

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

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

Сдано в набор 17.10.2023. Выход в свет 30.10.2023.

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

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Брянский государственный технический университет» 241035,

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

12+