

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

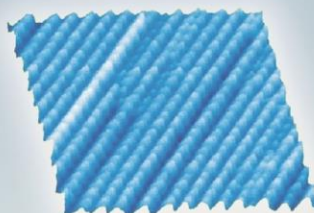
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

11(149)
2023

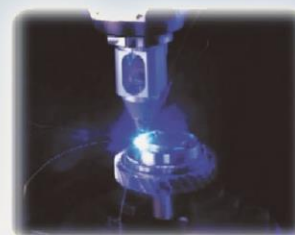
**ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
И КОМБИНИРОВАННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



**НАНОТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**



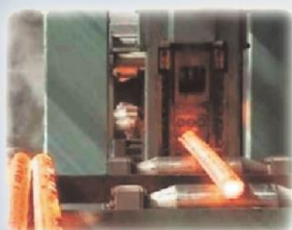
**ЛАЗЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



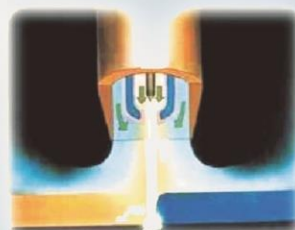
**ТЕХНОЛОГИИ
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В СВАРОЧНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



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



НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 11 (149)

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

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Кокарев С.С., Соловьев М.Е., Балдаев С.Л., Балдаев Л.Х.

Восстановление пространственной функции распределения
неоднородностей покрытия по функции распределения на шлифе. 3

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА

Яцко Д.С. Аддитивные технологии для создания магнитных материалов . . . 17

ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Базров Б.М. Организация мелкосерийного производства деталей на
принципах модульной технологии 24

Тотай А.В., Нагоркин М.Н., Селифонов В.С. Многокритериальная
оптимизация операционных режимов технологических процессов. 30

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

Бычковский В.С. Условия и режимы обработки технологического
процесса маслonaполнения полимерных деталей 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 «Наукоёмкие технологии в машиностроении»,
допускаются со ссылкой на источник информации и только
с разрешения редакции.

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 11 (149)

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

MATERIALS SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING

Kokarev.S.S., Soloviev M.E., Baldaev S.L., Baldaev L.Kh. Space function
recovery of the distribution of coating inhomogeneities according to the
distribution function on the polished specimen 3

ADDITIVE TECHNOLOGIES AND LASER PROCESSING

Yatsko D.S. Additive technologies for magnetic materials generation 17

TECHNOLOGIES OF MECHANICAL PROCESSING OF WORKPIECES

Bazrov B.M. Organization of small-scale production of parts based on module
technology patterns. 24

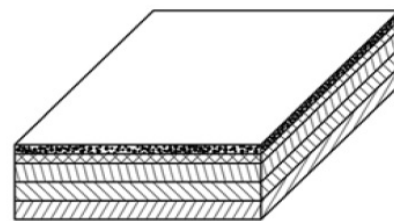
Totay A.V., Nagorkin M.N., Selifonov V.S. Calculation of high-duty cold
reduction rollers grinding cycles based on radial force cycle optimization 30

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

Bychkovsky V.S. Conditions and operating modes of the procedure specification
of polymer parts oil-filling process 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. №11 (149). С.3-16.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №11 (149). P. 3-16.

Научная статья
УДК 621.793.71:53.086
doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-16

Восстановление пространственной функции распределения неоднородностей покрытия по функции распределения на шлифе

Сергей Сергеевич Кокарев¹, к.ф.-м.н.
Михаил Евгеньевич Соловьев², д.ф.-м.н.
Сергей Львович Балдаев³, к.т.н.
Лев Христофорович Балдаев⁴, д.т.н.

¹ Региональный научно-образовательный центр «Логос», Ярославль, Россия

² Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия

^{3,4} ООО «Технологические системы защитных покрытий», Москва, Щербинка, Россия

¹ logos-center@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6944-1400>

² me_s@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8840-248X>

³ s.baldaev@tspc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1917-7979>

⁴ l.baldaev@tspc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9084-8771>

Аннотация. При экспериментальном исследовании структуры слоя специального покрытия, наносимого на металлы методом газотермического напыления одним из основных методов, является изучение микроснимков шлифов. На основе компьютерного анализа микрофотографий можно получить функцию распределения неоднородностей в образце. Однако, поскольку микрофотография представляет собой плоское изображение, получаемая функция будет двумерной, тогда как в реальном образце распределение дефектов описывается трехмерной функцией. В настоящей работе рассмотрена проблема восстановления пространственной функции распределения дефектов в газотермическом покрытии на основании анализа микрофотографий шлифов. Реальное включение неправильной формы при этом заменяется эффективным трехосным эллипсоидом. Решена задача в общем виде редукции пространственной функции распределения f неоднородностей на функцию их распределения f_{Π} на плоскости сечения Π , включающая некоторое интегральное преобразование I . Показано, что в частном случае сферических частиц обращение I^{-1} существует и является интегральным преобразованием того же типа, что I . Рассмотрено пространственное распределение сферических частиц, не зависящее от продольной координаты z , в котором размеры частиц ограничены в каждой точке функцией $R(x, y)$, зависящей от координат. Это распределение качественно соответствует стационарной технологии напыления, при которой в глубинных слоях вблизи подложки материал покрытия проплавляется полностью и образует однородный расплав, а ближе к поверхности и краям нерасплавленные до конца частицы образуют вкрапления заметных размеров. В качестве второго примера рассмотрена редукция функции распределения Фуллера, применяемой при оптимизации гранулометрического состава порошковых материалов. Установлено, что редукция плотности функции распределения эллипсоидов на сечение плоского шлифа переносит плотность распределения центров без изменения, а произведение распределений Фуллера с независимыми параметрами переводит в произведение распределений с противоположными параметрами степени и с прежними значениями параметров эллипсоида.

Ключевые слова: порошковое покрытие, газотермическое напыление, функция распределения неоднородностей

Для цитирования: Кокарев С.С., Соловьев М.Е., Балдаев С.Л., Балдаев Л.Х. Восстановление пространственной функции распределения неоднородностей покрытия по функции распределения на шлифе // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 11 (149). С. 10.30987/2223-4608-2023-3-16

Space function recovery of the distribution of coating inhomogeneities according to the distribution function on the polished specimen

Sergey S. Kokarev¹, Cand. Sc. in Ph. and M.

Mikhail E. Soloviev², Dr. Sci in Ph. and M.

Sergey L. Baldaev³, Ph.D. Eng.

Lev Kh. Baldaev⁴, D. Eng.

¹ Regional Scientific and Educational Center «Logos», Yaro-slavl, Russia

² Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

^{3, 4} LLC «Technological systems of protective coatings», Moscow, Shcherbinka, Russia

¹ logos-center@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6944-1400>

² me_s@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8840-248X>

³ s.baldaev@tspc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1917-7979>

⁴ l.baldaev@tspc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9084-8771>

Abstract. In the experimental studies of the structure of the special coating layer overlaid on metal applying gas-thermal spraying technique, one of the main methods is the study of polished specimen micrography. According to the computer analysis of microphotographs, it is possible to obtain the distribution function of inhomogeneities in the sample. However, since micrography is a flat image, the resulting function will be two-dimensional, whereas in a real sample, the distribution of defects is described by a three-dimensional function. In this paper, the problem of the space function recovery for the distribution of defects in a gas-thermal coating is viewed on the basis of the analysis of polished specimen micrography. The actual inclusion of an irregular shape is replaced by an effective three-axis ellipsoid. The problem is solved in the general form of reduction of the space function f of inhomogeneities distribution according to their distribution function f_P on the cross – sectional plane P , which includes some integral transformation I . It is shown that in the special case of spherical particles, the inversion I^{-1} exists and is an integral transformation of the same type as I . The space distribution of spherical particles is also viewed, which does not depend on the longitudinal coordinate z , where particle sizes are limited at each point by a function $R(x,y)$, depending on the coordinates. This distribution is suitable in its essence to the stationary spraying technology, when in deep layers near the substrate, the coating material melts completely and forms a single melt, while closer to the surface and edges, the parts that are not completely melted form inclusions of noticeable sizes. The reduction of the Fuller distribution law, used to optimize the granulometric composition of powder materials, is viewed as a second example. It is found that the reduction of the density of the ellipsoid distribution function to the section of a flat strip transfers the density of the distribution of centers as original, and the product of Fuller distributions times independent parameters is transformed into the product of distributions times the opposite degree parameters and also the previous values of the parameters of the ellipsoid

Keywords: powder coating, gas thermal spraying, inhomogeneity distribution function

For citation: Kokarev S.S., Soloviev M.E., Baldaev S.L., Baldaev L.Kh. Space function recovery of the distribution of coating inhomogeneities according to the distribution function on the polished specimen / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 11 (149). P. 3–16. doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-16

Введение

Одной из распространенных методик экспериментального исследования внутренней структуры слоя, напыленного с помощью газотермической [1 – 3], плазменно-разрядной [4] или лазерной технологии [5, 6], является снятие поперечных шлифов с дорожки напыления и изучение неоднородностей в сечении шлифа [7 – 9]. С помощью специальных компьютерных программ, работающих на основе различных алгоритмов распознавания изображений [10 – 12], можно получать, таким образом, различные количественные характеристики покрытия, одной из которых является функция распределения неоднородностей [13 – 15]. На функцию распределения неоднородностей

могут влиять различные технологические факторы: условия нанесения покрытия [12], состав порошка [13], структура материала [14, 15].

При экспериментальной оценке функции распределения неоднородностей на основании анализа микрофотографий шлифов возникает чисто теоретическая нетривиальная проблема экстраполяции эмпирической функции распределения неоднородностей в сечении шлифа на пространственную функцию распределения, которая и представляет реальный практический интерес. В настоящей статье мы рассматриваем задачу экстраполяции в некоторой упрощенной постановке, при которой типичным паттерном неоднородности является трехосный эллипсоид.

Определение пространственной функции распределения неоднородностей

Полагая, что процесс формирования покрытия содержит неустраняемый и неконтролируемый случайный фактор, в результате которого частицы порошка или легирующей добавки имеют вид отдельной фазы (зерен), вкрапленной в матрицу основного вещества, целесообразно использовать функцию распределения этих зерен по совокупности существенных переменных, которые являются случайными величинами. Эту функцию можно определить следующим образом. Примем, что каждое зерно представляет собой трехосный эллипсоид $E(\xi)$ (или эффективный эллипсоид, в некотором строго определенном смысле, заменяющий реальное зерно с неправильной формой), который характеризуется в пространстве набором параметров:

$$\xi = \{X, \Theta, A\}, \quad (1)$$

$$\vec{n} = (\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta), \quad \theta \in [0; \pi/2], \quad \varphi \in [0; \pi). \quad (2)$$

Набор $A = (a_1, a_2, a_3)$ – набор полуосей эллипсоида, причем $a_1 \leq a_2 \leq a_3$.

Определим теперь функцию распределения $f(\xi)$ посредством следующего соотношения: вероятность $dP(\xi)$ того, что эллипсоид имеет параметры ξ лежащие в объеме dV_ξ в окрестности точки ξ дается выражением:

$$dP(\xi) = f(\xi)dV_\xi = f(\xi)dV_X \cdot dV_\Theta \cdot dV_A, \quad (3)$$

где $dV_X = dx dy dz$; $dV_\Theta = d\Omega(\theta, \varphi)d\varphi$; $dV_A = da_1 da_2 da_3$ – мера (элементы объемов) в подпространствах параметров, при этом $d\Omega(\theta, \varphi) = \sin \theta d\theta d\varphi$ – стандартный элемент телесного угла (элемент площади на единичной сфере). Из общих соображений $f(\xi) \geq 0$ и удовлетворяет условию нормировки:

$$\int_{R_\xi^9} f(\xi)dV_\xi = 1, \quad (4)$$

где R_ξ^9 – девятимерная область определения f пространства параметров.

Редукция пространственной функции распределения: общий подход

Перейдем теперь к задаче о редукции пространственной плотности вероятности $f(\xi)$

где $X = (x, y, z)$ – положение центра E в пространстве в некоторой системе координат, жестко связанной с материалом покрытия; Θ – пространство угловых переменных, которое можно параметризовать матрицей $L(\vec{n}, \varphi)$ вращения вокруг оси $\vec{n}$ на угол φ и которое задает ориентацию эллипсоида по отношению к некоторой начальной ориентации. Последнюю можно определить как такое положение трехосного эллипсоида, при котором меньшая полуось ориентирована вдоль оси x , средняя – вдоль оси y , и самая большая – вдоль оси z . При этом, с учетом симметрии эллипсоида, следует ограничить направления вектора $\vec{n}$ верхним полупространством, в котором $z \geq 0$, а угол вращения $\varphi \in [0; \pi)$. Таким образом, в сферической системе координат (θ, φ) , ассоциированной стандартным образом с выбранной декартовой, вектор $\vec{n}$ будет иметь следующие компоненты:

распределения эллиптических неоднородностей на плоскость и вопросу о ее восстановлении по функции $f_\Pi(\xi_\Pi)$, снятой на каком-то плоском сечении Π . Уравнение произвольного эллипсоида в пространстве получается из его уравнения в специальной системе координат $\{X, Y, Z\}$, согласованной с его центром и осями:

$$\frac{x^2}{a_1^2} + \frac{y^2}{a_2^2} + \frac{z^2}{a_3^2} = 1, \quad (5)$$

с помощью подстановки:

$$\vec{R} \mapsto \vec{R}' = L(\vec{n}, \varphi)(\vec{R} - \vec{r}), \quad (6)$$

где $\vec{R} = (X, Y, Z)$; $\vec{R}' = (X', Y', Z')$; $\vec{r} = (x, y, z)$ – координаты центра эллипсоида; $L(\vec{n}, \varphi)$ – матрица вращения вокруг оси $\vec{n}$ на угол φ . После подстановки (6) в (5), уравнение (5) примет вид:

$$Q_2(\vec{R}, \vec{R}) + Q_1(\vec{R}) + Q_0 = 0, \quad (7)$$

где Q_2, Q_1, Q_0 – квадратичная, линейная формы и форма нулевого порядка соответственно, коэффициенты которых зависят от девяти параметров: трех координат центра $(x, y, z) = \vec{r}$, трех угловых переменных $(\theta, \varphi, \varphi) = \Theta$, и трех параметров

полуосей эллипсоида $(a_1, a_2, a_3) = A$. Ввиду громоздкости этих зависимостей мы их не приводим здесь в явном виде. На плоскости Π полагаем $Z = 0$ и получаем уравнение эллипса в виде:

$$Q_2(\vec{R}_\Pi, \vec{R}_\Pi) + Q_1(\vec{R}_\Pi) + Q_0 = 0, \quad (8)$$

которое тоже включает в себя квадратичную, линейную формы и форму нулевого порядка по координатам $\vec{R}_\Pi = (X, Y)$ плоскости Π . На этой плоскости произвольный эллипсоид получается из канонического:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (9)$$

$$P_{2|XX} = \frac{a^2 + (b^2 - a^2) \cos^2 \psi}{a^2 b^2}; P_{2|YY} = \frac{b^2 + (a^2 - b^2) \cos^2 \psi}{a^2 b^2}; P_{2|XY} = \frac{(a^2 - b^2)}{a^2 b^2} \sin 2\psi;$$

$$P_{1|X} = 2 \frac{x_\Pi((a^2 - b^2) \cos^2 \psi - a^2) + y_\Pi \sin \psi \cos \psi (b^2 - a^2)}{a^2 b^2};$$

$$P_{1|Y} = 2 \frac{y_\Pi((b^2 - a^2) \cos^2 \psi - b^2) + x_\Pi \sin \psi \cos \psi (b^2 - a^2)}{a^2 b^2};$$

$$P_{0|X} = \frac{x_\Pi^2((b^2 - a^2) \cos^2 \psi + a^2) + y_\Pi^2((a^2 - b^2) \cos^2 \psi + b^2) + 2x_\Pi y_\Pi \sin \psi \cos \psi (a^2 - b^2)}{a^2 b^2}.$$

На плоскости Π именно пять параметров $\{x_\Pi, y_\Pi, a, b, \psi\} \equiv \xi_\Pi$ являются наблюдаемыми.

Рассмотрим теперь семейство эллипсоидов, которые в сечении плоскостью Π дают один и тот же эллипс с фиксированным набором параметров ξ_Π . Это семейство характеризуется четырехмерной поверхностью в девятимерном пространстве параметров $\xi \in R^9$, уравнение на которую получается из требования эквивалентности уравнений (7) и (11), что сводится, по существу, к пропорциональности коэффициентов соответствующих форм:

$$y_1 = Q_{2|XX}(\xi); y_2 = Q_{2|YY}(\xi); y_3 = Q_{2|XY}(\xi); y_4 = Q_{1|X}(\xi); y_5 = Q_{1|Y}(\xi), \quad (13)$$

и дополним этот набор до девяти частью старых параметров z, a_1, a_2, a_3 . В итоге получаем замену системы координат:

$$\xi = (X, \Psi, A) \rightarrow \xi' = (Y, z, A), \quad (14)$$

с помощью подстановки, аналогичной (6):

$$\vec{R}_\Pi \mapsto \vec{R}'_\Pi = L(\vec{e}_z, \psi)(\vec{R}_\Pi - \vec{r}_\Pi), \quad (10)$$

где $\vec{R}_\Pi = (X, Y)$; $\vec{R}'_\Pi = (X', Y')$; $\vec{r}_\Pi = (x_\Pi, y_\Pi)$ – координаты центра эллипса на плоскости Π ; $L(\vec{e}_z, \psi)$ – матрица вращения на плоскости Π на угол ψ . Коэффициенты результирующих форм P_2, P_1, P_0 , определяющих уравнение произвольного эллипса на плоскости Π :

$$P_2(\vec{R}_\Pi, \vec{R}_\Pi) + P_1(\vec{R}_\Pi) + P_0 = 0 \quad (11)$$

имеют следующий явный вид:

$$Q_2(\xi) = \lambda P_2(\xi_\Pi); \quad Q_1(\xi) = \lambda P_1(\xi_\Pi) \quad (12)$$

– пять уравнений в компонентах, а равенство $Q_0(\xi) = \lambda P_0(\xi_\Pi)$ является просто определением параметра пропорциональности λ . Для корректного переноса функции $f(\xi)$ на плоскость Π теперь целесообразно ввести в пространстве параметров ξ новую систему координат: в качестве новых координат следует взять пять функций, входящих в левые части уравнений (12). А именно, положим:

где $Y = (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5)$. Эти пять координат должны оставаться фиксированными для всех эллипсоидов, дающих один и тот же эллипс в сечении плоскостью Π , т. е. уравнение поверхности этого семейства эллипсоидов в новых координатах имеет вид: $Y = const$.

Замене переменных (14) соответствует 9×9 матрица Якоби $J(\xi'|\xi)$ и ее определитель (якобиан) $|J(\xi'|\xi)|$, где:

$$J(\xi'|\xi) = \left(\frac{\partial \xi'}{\partial \xi} \right), \quad (15)$$

причем эта матрица единична по строкам, соответствующим части старых переменных z, A . По этой причине якобиан преобразования (14) фактически равен частичному якобиану:

$$dP = f(\xi) dV_X dV_\Theta dV_A = f(x(Y), y(Y), z, \theta(Y), a_1, a_2, a_3) \Delta^{-1}(x(Y), y(Y), \Theta(Y)) dV_Y dz dV_A, \quad (17)$$

где предполагается, что $\Delta \neq 0$, преобразование по общей теореме об обратном отображении локально обратимо и параметры $x, y, \theta, \varphi, \Phi$ можно выразить в виде функций от y_i и, к примеру, запись $f(Y)$ является сокращением $f(y_1, y_2, y_3, y_4, y_5)$.

$$|J(\xi'|\xi)| = |J(Y|x, y, \Theta)| = \Delta(x, y, \Theta), \quad (16)$$

который зависит только от части переменных, что отражено в обозначении. Записывая теперь элемент вероятности (3) в новых координатах, с учетом правила якобианов $|J(\xi'|\xi)| dV_\xi = dV_{\xi'}$ для преобразования элементов объема, мы получим:

Теперь мы можем частично проинтегрировать выражение (17) по совокупности дополнительных переменных, которые являются ненаблюдаемыми на плоскости Π :

$$dP \rightarrow dP'_\Pi = \int_{D \subset R^4} dP = \left(\int_{D \subset R^4} \frac{f(x(Y), y(Y), z, \theta(Y), a_1, a_2, a_3)}{\Delta(x(Y), y(Y), \Theta(Y))} dz dV_A \right) dV_Y. \quad (18)$$

После интегрирования зависимость dP'_Π от ненаблюдаемых переменных z, A полностью пропадает. Теперь для окончательного перехода на плоскость переменных Π нужно сделать еще одну замену переменных:

$$Y \rightarrow (x_\Pi, y_\Pi, \psi, a, b), \quad (19)$$

которое, фактически, задают равенства (12) и (13) в совокупности. Если обозначить эти соотношения символически $Y = g(\xi_\Pi)$, а соответствующий якобиан преобразования $J(Y|\xi_\Pi)$ обозначить $\delta(\xi_\Pi)$, то формула (18) примет вид:

$$dP_\Pi(\xi_\Pi) = \left(\int_{D \subset R^4} \frac{f(x(Y), y(Y), z, \theta(Y), A)}{\Delta(x(Y), y(Y), \Theta(Y))} dz dV_A \right) \Big|_{Y=g(\xi_\Pi)} \delta(\xi_\Pi) dV_{\xi_\Pi}, \quad (20)$$

откуда, окончательно:

$$f_\Pi(\xi_\Pi) = \left[\left(\int_{D \subset R^4} f(x(Y), y(Y), z, \theta(Y), A) dz dV_A \right) \frac{\delta(\xi_\Pi)}{\Delta(x(Y), y(Y), \Theta(Y))} \right] \Big|_{Y=g(\xi_\Pi)}. \quad (21)$$

Формула (21) и решает в общем виде задачу редукции пространственной функции распределения f неоднородностей на функцию их распределения f_Π на плоскости сечения Π . Ввиду громоздкости общих формул перехода $\xi \rightarrow \xi' \rightarrow \xi_\Pi$ использование этой формулы в общем случае возможно только в численном

виде. Задача ее обращения в общем виде или даже в конкретном случае остается под вопросом. Формально она ставится так: по известной функции распределения $f_\Pi(\xi_\Pi)$ (возможно, при некоторых дополнительных предположениях) вывести формулу для $f(\xi)$. Схематически обе задачи иллюстрируются диаграммами:

$$f(\xi) \xrightarrow{I^{-(21)}} f_\Pi(\xi_\Pi); \quad f_\Pi(\xi_\Pi) \xrightarrow{I^{(21)}} f(\xi), \quad (22)$$

где первая стрелка характеризует задачу редукции, которая в общем виде решается формулой (21), включающей некоторое интегральное преобразование I , а вторая стрелка характеризует задачу восстановления пространственной функции распределения с помощью обращения I , если такое обращение существует. В следующем разделе мы покажем, что при некоторых разумных предположениях в самом простом случае сферических частиц обращение I^{-1} существует и является интегральным преобразованием того же типа, что I .

Редукция пространственной функции распределения для сферических частиц

В качестве пробной (и практически важной!) задачи, на основе которой можно понять методику редукции и восстановления функции распределения, рассмотрим случай сферических частиц-зерен. В этом случае, ввиду сферической симметрии частиц, теряет смысл ориентация зерен и девятимерное пространство параметров ξ редуцируется до четырехмерного пространства R_ξ^4 , три координаты которого отвечают за положения центров сфер, а четвертая – за их радиусы a . Ввиду значительного изменения размерности области определения, удобнее пользоваться не общей формулой (21), а проделать вывод заново, с целью

избежания громоздких выкладок с простым конечным результатом. Пусть, как и раньше, Π – плоскость сечения, которую без ущерба для общности можно принять за плоскость XU выбранной декартовой системы координат. Если $f(x, y, z, a)$ – функция распределения зерен в пространстве, то функция распределения на плоскости Π получится из нее посредством надлежащей замены переменной, которая приводит к некоторому интегральному преобразованию исходной функции распределения. Действительно, рассмотрим сферическую частицу некоторого радиуса a в ее сечении плоскостью Π . Это сечение представляет собой круг радиуса r , который связан с радиусом шара посредством соотношения:

$$r = \sqrt{a^2 - z^2}, \quad (23)$$

где $|z|$ – расстояние от центра шара до плоскости Π в выбранной системе координат. Очевидно, что «правильной переменной» в плоскости Π является именно величина r , а не a , поскольку именно первая переменная наблюдается на плоскости, а последняя на ней не видима, равно как и сама координата z . Таким образом, правильный переход от функции f к функции f_Π заключается в переходе от переменной a к переменной r :

$$dP = f(x, y, z, a) dV_\Pi dz da = f(x, y, z, \sqrt{r^2 + z^2}) dV_\Pi dz \frac{da}{dr} dr, \quad (24)$$

где $dV_\Pi = dx dy$, и промежуточному интегрированию по z , поскольку целое семейство пространственных шаров, положение которых удовлетворяет уравнению (23), дает одно и то же сечение в плоскости Π . С учетом того, что $da/dr = r/\sqrt{r^2 + z^2}$, для вероятности dP_Π обнаружения круговой неоднородности в плоскости Π в объеме параметров $[x; x + dz] \times [y; y + dy] \times [r; r + dr]$, т. е. получаем:

$$dP_\Pi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(x, y, z, \sqrt{r^2 + z^2}) r}{\sqrt{r^2 + z^2}} dz dV_\Pi dr. \quad (25)$$

В формуле (25) предполагается, что функция f имеет компактный носитель по четвертой переменной (т. е. равна нулю вне некоторого конечного промежутка R), либо спадает

на z -бесконечности достаточно быстро (подойдет любая отрицательная степень z в асимптотике f при $|z| \rightarrow \infty$), чтобы несобственный интеграл сходился. Следуя общей логике определения функции распределения, отсюда заключаем, что редуцированная на плоскость функция распределения

$$f_\Pi(x, y, r) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(x, y, z, \sqrt{r^2 + z^2}) r}{\sqrt{r^2 + z^2}} dz \quad (26)$$

представляет собой нетривиальное интегральное преобразование типа преобразования Абеля (модифицированное преобразование Абеля). Очевидно, что вклад в распределение круговых неоднородностей на плоскости Π получается как от шаров с центрами, лежащими в полупространстве $z > 0$, так и $z < 0$, хотя,

возможно в разной степени ввиду того, что функция f явно зависит от z . При этом на плоскости Π вклады от одного полупространства и другого неотличимы. Поэтому имеет смысл представить выражение (26) в виде, отражающем эту неотличимость. Для этой цели

разобьем область интегрирования на части $z < 0$ и $z > 0$ и выполним следующие преобразования (пишем выражения в сокращенном виде, выделяя только существенные для выкладки зависимости):

$$f_{\Pi}(x, y, r) = \left(\int_{-\infty}^0 + \int_0^{\infty} \right) \frac{f(z, \sqrt{r^2+z^2})r}{\sqrt{r^2+z^2}} dz = \quad (27)$$

$$\left(-\int_0^{\infty} + \int_0^{\infty} \right) \frac{f(z, \sqrt{r^2+z^2})r}{\sqrt{r^2+z^2}} dz = \int_0^{\infty} \frac{f(-z, \sqrt{r^2+z^2})r}{\sqrt{r^2+z^2}} dz +$$

$$\int_0^{\infty} \frac{f(z, \sqrt{r^2+z^2})r}{\sqrt{r^2+z^2}} dz = 2r \int_0^{\infty} \frac{f_+(z, \sqrt{r^2+z^2})}{\sqrt{r^2+z^2}} dz,$$

где $f_+(x) \equiv \frac{f(x)+f(-x)}{2}$ – четная часть функции f . Таким образом, окончательная формула:

$$f_{\Pi}(x, y, r) = 2r \int_0^{\infty} \frac{f_+(x, y, z, \sqrt{r^2+z^2})}{\sqrt{r^2+z^2}} dz, \quad (28)$$

решает прямую задачу для функции распределения сферических неоднородностей: по известной пространственной функции распределения $f(x, y, z, a)$ она позволяет вычислить

функцию распределения плоского сечения Π среды с помощью некоторого интегрального преобразования.

Пример 1: редукция с зависимостью от двух координат

В качестве примера рассмотрим пространственную функцию распределения вида:

$$f(x, y, z, a) = A(kx^4y^2 - a)^2\theta(kx^4y^2 - a), \quad (29)$$

где $\theta(x)$ – ступенчатая функция Хевисайда, равная единице при $x \geq 0$, и равная нулю при $x < 0$. Эту зависимость легче интерпретировать, если переписать ее в свернутом виде: $f = A(R(x, y) - a)^2\theta(R(x, y) - a)$. Она описывает пространственное распределение сферических частиц, не зависящее от продольной координаты z , в котором размеры частиц ограничены в каждой точке функцией $R(x, y)$, зависящей от

координат, причем вблизи начала системы координат размеры частиц малы. Это распределение качественно соответствует стационарной технологии напыления, при которой в глубинных слоях вблизи подложки материал покрытия проплавляется полностью и образует однородный расплав, а ближе к поверхности и краям нерасплавленные до конца частицы образуют вкрапления заметных размеров. Применение формулы (28) приводит к зависимости:

$$f_{\Pi}(x, y, r) = Ar^3 \left[\left(1 + \frac{2k^2x^8y^4}{r^2} \right) \ln \left(\sqrt{\frac{k^2x^8y^4}{r^2} - 1} + \frac{kx^4y^2}{r} \right) - \right. \quad (30)$$

$$\left. - \frac{3kx^4y^2}{r} \sqrt{\frac{k^2x^8y^4}{r^2} - 1} \right].$$

Сравнительное поведение зависимостей f и f_{Π} для рассматриваемого примера показано на рис. 1.

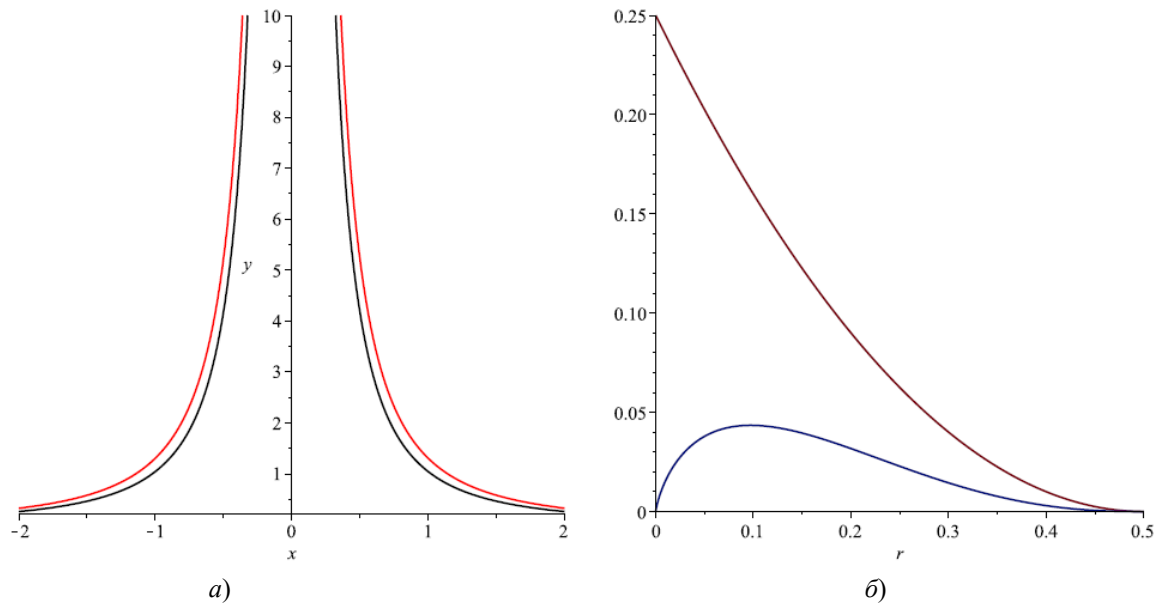


Рис. 1. Зависимости f и f_p для (30) и его преобразования (28) соответственно при $A = 1, 0; k = 0, 5$:
 a – эквипотенциальные линии $f = f_p = 0,2$ при $a = r = 0,1$ на плоскости переменных (x, y) (нижняя – f , верхняя f_p);
 b – распределения по размерам в точке $x = y = 1$ (верхняя кривая – f , нижняя f_p)

Fig. 1. Dependences f and f_p for (30) and its transformations (28), respectively, at $A = 1, 0; k = 0, 5$:
 a – equipotential lines $f = f_p = 0,2$ at $a = r = 0,1$ on the plane of variables (x, y) (lower – f , upper f_p); b – size distributions at the point $x = y = 1$ (the upper curve is f , the lower one is f_p)

Как это наглядно видно из приведенных рисунков, зависимость от поперечных координат переносится интегральным преобразованием практически без заметных изменений, в то время как распределение частиц по размерам трансформируется существенно или даже кардинально, особенно в области частиц малых размеров.

Пример 2: редукция распределения Фуллера

Предположим, что имеется плоский слой с координатой x , ориентированной вдоль толщины слоя: $x \in [0; \ell]$, в котором плотность функции распределения частиц имеет вид:

$$f(x, a) = g(x) \cdot \Phi(a), \quad (31)$$

где $g(x)$ – некоторое распределение центров частиц;

$$\Phi(a) = \begin{cases} (a/a_0)^s/a_0, & a \in [0; a_0]; \\ 0, & a \notin [0; a_0] \end{cases} \quad (32)$$

– плотность распределения Фуллера с параметром максимального размера a_0 и параметром степени $-0,5 \leq s \leq 0$. Поскольку распределение по размерам факторизовано с распределением по координатам центров и от координаты z , нормальной к сечению шлифа, плотность функции распределения $f(x, a)$ не зависит, то формула редукции (26) сохранит координатную часть $g(x)$ неизменной и можно сосредоточиться лишь на преобразовании части $\Phi(a)$, отвечающей за размеры. Имеем по формуле (26):

$$\Phi_p(r) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Phi(\sqrt{r^2+z^2})r}{\sqrt{r^2+z^2}} dz = \frac{2r}{a_0^{s+1}} \int_0^{\sqrt{a_0^2-r^2}} (r^2+z^2)^{(s-1)/2} dz, \quad (33)$$

где была учтена четность подынтегральной функции и конечность верхнего предела интегрирования, на котором аргумент $\Phi(a)$ должен принимать свое максимальное значение a_0 . Интеграл (33) выражается через

гипергеометрическую функцию $F(\alpha, \beta, \gamma, x)$ таким образом, что редуцированная на плоскость шлифа функция плотности распределения по размерам частиц имеет вид:

$$\Phi_{\Pi}(r) = \frac{2r^s \sqrt{a_0^2 - r^2}}{a_0^{s+1}} F\left(\frac{1}{2}, \frac{1-s}{2}, \frac{3}{2}, 1 - \frac{a_0^2}{r^2}\right). \quad (34)$$

Сравнительное поведение зависимостей Φ и Φ_{Π} для рассматриваемого примера при $a_0 = 1,0$; $s = -0,3$ показано на рис. 2.

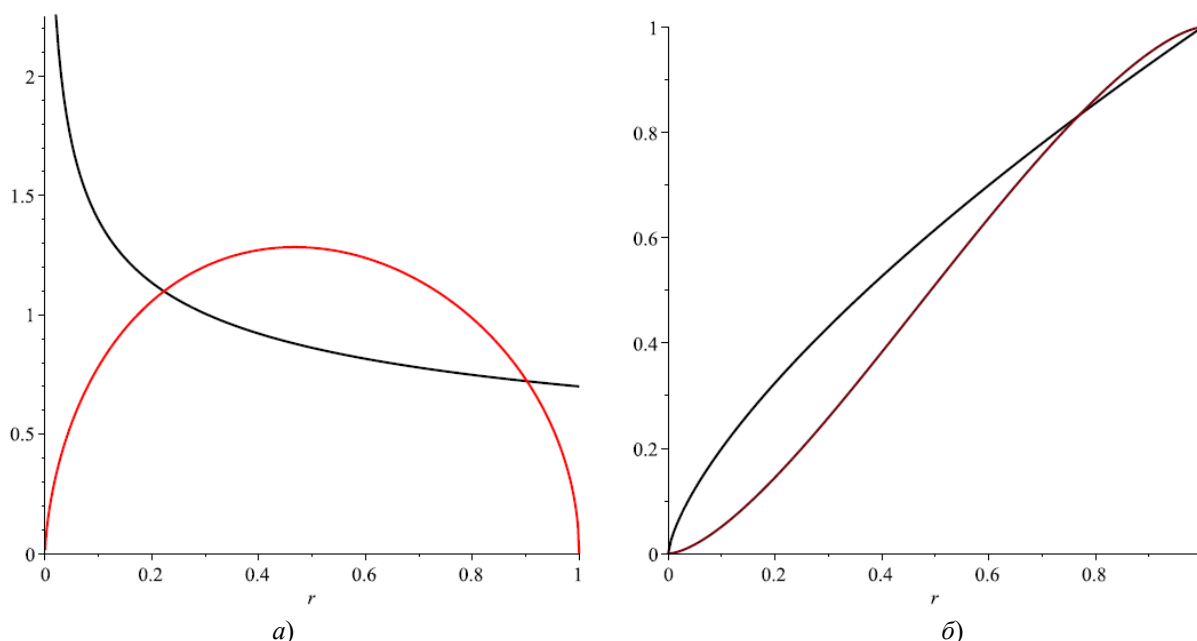


Рис. 2. Зависимости Φ (верхняя кривая) и Φ_{Π} (нижняя кривая) при $a_0 = 1,0$; $s = -0,3$ (а); интегральные распределения для тех же зависимостей при тех же параметрах (б)

Fig. 2. Dependencies F (upper curve) and F_P (lower curve) at $a_0 = 1,0$; $s = -0,3$ (a); integral distributions for the same dependencies at the same parameters (b)

Как хорошо видно из приведенных зависимостей, редуцированная на плоскость плотность распределения Фуллера заметно отличается на краях от его пространственного оригинала – она обращается там в ноль. Для интегральных функций распределения наблюдается качественно та же картина: вблизи нуля редуцированная интегральная функция заметно отстает от пространственной, а вблизи правого края распределения она несколько опережает пространственную. Эти обстоятельства необходимо учитывать для правильной интерпретации результатов обработки данных по эмпирическому распределению неоднородностей на шлифах.

Восстановление пространственной функции распределения

Формулой (28) можно пользоваться и в обратную сторону для приближенного восстановления пространственной функции

распределения. Действительно, если считать, что функция в левой части (28) известна из исследования шлифа, а для функции в правой части на основе экспериментальных данных или некоторых общих теоретических соображений выбран некоторый аппроксиматор, содержащий разумное число параметров, то выполняя интегрирование в правой части мы получим равенство двух функций, которое можно понимать в смысле задачи регрессионного анализа. Такой подход не гарантирует высокой точности и в неблагоприятном случае потребует большого числа параметров регрессии.

Более строгая постановка задачи подразумевает обращение формулы (28), точнее, даже его принципиальной возможности. Можно утверждать, что, в случае зависимости функции f от координаты z , эта задача не может иметь решения, поскольку, подбирая эту зависимость надлежащим образом при любой зависимости f от переменной a , первой можно

компенсировать последнюю и получить любую наперед заданную зависимость f_{Π} , что очевидно из структуры выражения (28). С другой стороны, практически важный для любой технологии напыления случай, в котором f не зависит от координаты z (т. е. от координаты вдоль дорожки напыления), соответствует ситуации стационарной работы плазменной свечи, которая напыляет материал на поверхность в строго фиксированных условиях и свойства покрытия стационарны вдоль длины дорожки. В этом случае точное обращение формулы (28) оказывается возможным и в этом разделе мы выведем формулу для него.

Стартуем с формулы (28), в которой, в силу независимости f от z $f_+ = f$. Опуская не существенную для дальнейших рассуждений зависимость f и f_{Π} от поперечных координат $\{x, y\}$ (они в последующих рассмотрениях

являются постоянными параметрами и зависимость от них тривиально переносится с f на f_{Π} и обратно как зависимость от параметров), перепишем формулу (28) в более простом виде:

$$f_{\Pi}(r) = 2r \int_0^{\infty} \frac{f(\sqrt{r^2+z^2})}{\sqrt{r^2+z^2}} dz. \quad (35)$$

Вводя новую удобную переменную $u = \sqrt{r^2+z^2}$; $dz/\sqrt{r^2+z^2} = du/z = du/\sqrt{u^2-r^2}$, интеграл в (35) можно переписать в виде:

$$f_{\Pi}(r) = 2r \int_r^{\infty} \frac{f(u)}{\sqrt{u^2-r^2}} du, \quad (36)$$

в котором зависимость $f(u)$ является искомой, а $f_{\Pi}(r)$ считается известной. Умножим обе части уравнения (36) на $(r^2-s^2)^{-1/2}$ и проинтегрируем их по r в пределах от s до $+\infty$. В результате получим:

$$\int_s^{\infty} \frac{f_{\Pi}(r)}{\sqrt{r^2-s^2}} dr = 2 \int_s^{\infty} r \int_r^{\infty} \frac{f(u)}{\sqrt{u^2-r^2} \sqrt{r^2-s^2}} dr du = 2 \int_{W_2} \frac{f(u)}{\sqrt{u^2-r^2} \sqrt{r^2-s^2}} dr du \quad (37)$$

– интеграл по клиновидной области W_2 на плоскости $r-u$ (рис. 3), задаваемой системой неравенств: $s \leq r < \infty$ и $r \leq u < \infty$.

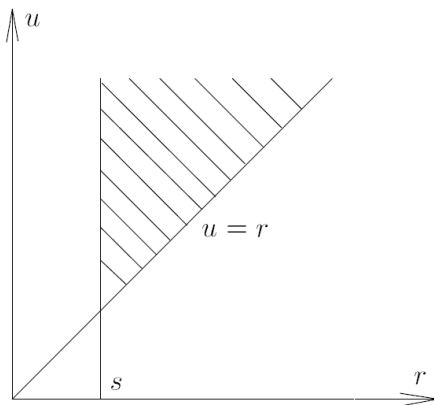


Рис 3. Область интегрирования в двойном интеграле (37)

Fig. 3. The area of integration in the double integral (37)

Выполним интегрирование по этой области последовательно: сначала по переменной r в пределах от s до u , а потом по переменной

u в пределах от s до ∞ . Первое интегрирование не зависит от вида $f(u)$ и сводится к вычислению безразмерного интеграла:

$$I = \int_s^u \frac{r dr}{\sqrt{u^2-r^2} \sqrt{r^2-s^2}} \stackrel{q=r^2}{=} \frac{1}{2} \int_{s^2}^{u^2} \frac{dq}{\sqrt{u^2-q} \sqrt{q-s^2}} \stackrel{t=\sqrt{q-s^2}}{=} \int_0^{\sqrt{u^2-s^2}} \frac{dt}{\sqrt{u^2-s^2-t^2}} \stackrel{\eta=t/\sqrt{u^2-s^2}}{=} \int_0^1 \frac{d\eta}{\sqrt{1-\eta^2}} = \frac{\pi}{2}. \quad (38)$$

Подставляя этот результат в (37), получаем:

$$\int_s^\infty \frac{f_\Pi(r)}{\sqrt{r^2 - s^2}} dr = \pi \int_s^\infty f(u) du, \quad (39)$$

откуда, дифференцируя обе части по s , получаем искомое обращение:

$$f(s) = -\frac{1}{\pi} \frac{d}{ds} \int_s^\infty \frac{f_\Pi(r)}{\sqrt{r^2 - s^2}} dr. \quad (40)$$

1. Пример: восстановление линейной редуцированной функции распределения

В качестве примера рассмотрим наблюдаемую функцию f_Π в виде линейной убывающей до нуля зависимости:

$$f_\Pi = A \left(1 - \frac{r}{r_0}\right), \quad (41)$$

где r_0 и A – некоторые параметры (возможно, зависящие от координат x, y на Π). Применение формулы (40) к этой зависимости приводит к функции распределения в пространстве:

$$f = \frac{A}{\pi s} \sqrt{1 - \frac{s^2}{r_0^2}}. \quad (42)$$

Рассматриваемые зависимости представлены на рис. 4

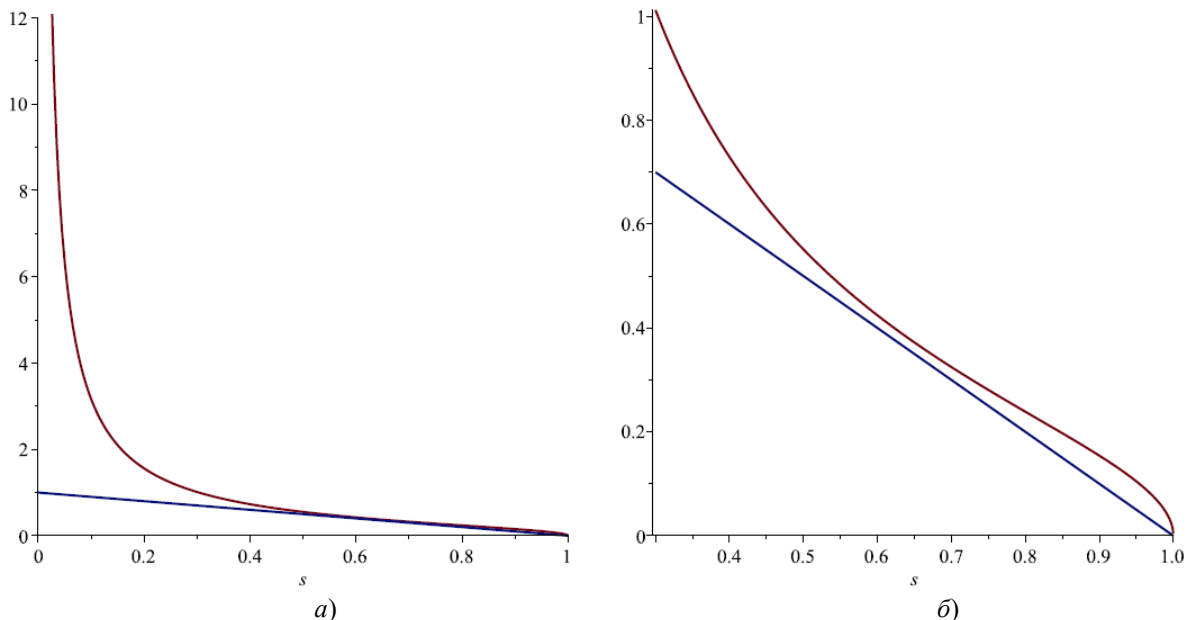


Рис. 4. Плоская и восстановленная по ней пространственная функции распределения сферических неоднородностей в сравнении (а); увеличенный масштаб вблизи правых концов при $A = r_0 = 1, 0$ (б)

Fig. 4. The planar and reconstructed space function of the distribution of spherical inhomogeneities in comparison (a); an enlarged scale near the right ends at $A = r_0 = 1, 0$ (b)

Рис. 4 иллюстрирует общую закономерность: плоские и пространственные функции распределения по размерам сферических неоднородностей близки друг к другу в области неоднородностей максимальных размеров и довольно сильно расходятся в области неоднородностей малых размеров. Нетривиальный характер близости в области больших размеров дополнительно проиллюстрирован на правом рисунке, который более детально отражает поведение зависимостей на правой границе распределений. Существование предельного размера в плоской функции распределения получает простое

объяснение: в восстановленной пространственной функции распределения отсутствуют частицы с размером большим, чем r_0 , следовательно, и у сечений этих частиц не может быть большего размера. Далее, частицы большего размера попадают в сечение плоскостью Π с большей вероятностью, чем частицы малых размеров, по чисто геометрическим причинам, поэтому для соблюдения линейного закона убывания плоской функции распределения, плотность вероятности мелких частиц в пространстве должна быть существенно выше, что и отражают полученные теоретические зависимости.

Редукция функции распределения эллипсоидов

Рассмотрим теперь частицы примесей в виде эллипсоидов вращения в слое с поперечной координатой X с плотностью функцию распределения:

$$f(x, a_1, a_2) = g(x) \cdot \Phi_1(a_1) \cdot \Phi_2(a_2), \quad (43)$$

где $g(x)$ – некоторое распределение центров частиц вдоль толщины; $\Phi_1(a_1)$, $\Phi_2(a_2)$ – распределения Фуллера, задаваемые парой параметров $\{(a_{01}, s_1), (a_{02}, s_2)\}$ для каждой из полуосей, при этом оси вращения всех эллипсоидов параллельны оси X . Поскольку мы рассматриваем очень простой частный случай общей схемы «Редукция пространственной функции распределения для сферических частиц», то для сокращения выкладок имеет смысл не пользоваться приведенными там общими громоздкими формулами, а проиллюстрировать их смысл, заново проделав процедуру редукции в явном виде. Уравнение некоторого пространственного эллипсоида вращения E в рассматриваемом случае имеет вид:

$$\frac{(X-x)^2}{a_1^2} + \frac{(Y-y)^2 + (Z-z)^2}{a_2^2} = 1. \quad (44)$$

Пусть плоскость шлифа Π совпадает с плоскостью $Z = 0$, тогда в сечении получаем эллипс $\Pi \cap E \equiv E_\Pi$, с уравнением:

$$\frac{(X-x)^2}{a^2} + \frac{(Y-y)^2}{b^2} = 1, \quad (45)$$

где

$$a = a_1 \sqrt{1 - \frac{z^2}{a_2^2}}; \quad b = a_2 \sqrt{1 - \frac{z^2}{a_2^2}}. \quad (46)$$

Для записи редуцированной функции распределения (далее мы будем выписывать ее с точностью до постоянных нормировочных множителей, опуская их), необходимы обратные формулы:

$$a_2 = \sqrt{b^2 + z^2}; \quad a_1 = \frac{a}{b} \sqrt{b^2 + z^2}, \quad (47)$$

а также якобиан перехода $(a_1, a_2) \rightarrow (a, b)$. Непосредственный расчет по формулам (47) через матрицу Якоби или с помощью внешних форм приводит к простому результату: $\Delta(a_1, a_2 | a, b) = 1$. Таким образом, выделяя из общего элемента объема промежуточную переменную z , по которой необходимо произвести усреднение, получаем для редуцированной функции распределения следующее выражение:

$$f_\Pi(x, a, b) = \int_{-L}^L g(x) \cdot \Phi_1\left(\frac{a}{b} \sqrt{b^2 + z^2}\right) \Phi_2\left(\sqrt{b^2 + z^2}\right) dz \sim \quad (48)$$

$$g(x) a^{s_1} b^{s_2+1} \int_{-\xi_L}^{\xi_L} (1 + \xi^2)^{(s_1+s_2)/2} d\xi \equiv a^{s_1} b^{s_2+1} I(\xi_L, (s_1 + s_2)/2),$$

где $\xi_L = \frac{L}{b}$; L – размер слоя в z -направлении, который надо рассматривать как параметр

регуляризации $L \rightarrow \infty$. Интеграл в (48) вычисляется через гипергеометрическую функцию:

$$I(R, s) = \frac{-\pi^{3/2} (2s+1) + 2R^{2s+1} \Gamma(-s) \Gamma(s+3/2) \cos(\pi s) F(-s, -1/2-s, 1/2-s, -R^{-2})}{(2s+1) \cos(\pi s) \Gamma(s+3/2) \Gamma(-s)}. \quad (49)$$

Поскольку слой является протяженным по оси Z , то нужно рассмотреть асимптотику (49) при $R \rightarrow \infty$ – она имеет простой вид:

$$I(R, s) \xrightarrow{R \rightarrow \infty} \frac{2}{2s+1} R^{2s+1}. \quad (50)$$

Подставляя это в (48), получаем после простых преобразований:

$$f_{\Pi}(x, a, b) \sim g(x) \cdot a^{s_1} b^{-s_1} = g(x) \left(\frac{a}{b}\right)^{s_1}.$$

Таким образом, редукция плотности функции распределения (43) эллипсоидов на сечение плоского шлифа переносит плотность распределения центров без изменения, а произведение распределений Фуллера с независимыми параметрами переводит в произведение распределений с противоположными параметрами степени и с прежними значениями параметров $a_0 = a_{10}, b_0 = a_{02}$. Можно сказать, что редуцированная функция плотности зависит только от отношения размеров полуосей. Это обстоятельство можно использовать для экспериментальной проверки справедливости пространственного распределения Фуллера для примесей по исследованию свойств распределения сечений примесей на шлифе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. М.: Металлургия, 1992. 432 с.
2. Газотермическое напыление / под общей ред. Л.Х. Балдаева. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.
3. Davis J.R. Handbook of thermal spray technology. ASM International, 2004. 338 p.
4. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2008. 360 с.
5. Pinkerton A.J. Advances in the modeling of laser direct metal deposition // Journal of Laser Applications. 2015. V. 27. S15001. <https://doi.org/10.2351/1.4815992>.
6. Yu T., Yang L., Zhao Yu., Sun J., Li B. Experimental research and multi-response multi-parameter optimization of laser cladding Fe313 // Optics and Laser Technology. 2018. V. 108. P. 321–332. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.06.030>.
7. Sawant M.S., Jain N.K. Evaluation of stellite coatings by μ -PTA powder, laser, and PTA deposition processes // Materials and Manufacturing Processes. 2017. V. 33:10. P. 1043–1050. <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2017.1364764>.
8. Alaluss K., Mayr P. Additive Manufacturing of Complex Components through 3D Plasma Metal Deposition – A Simulative Approach // Metals. 2019. V. 9. P. 574–693. <https://doi.org/10.3390/met9050574>.
9. Prozorova M.S., Kovaleva M.G., Arsenenko M. Yu., et al. Microstructure and mechanical properties of alumina powder coatings by a new multi-chamber detonation sprayer // Surface Review and Letters. 2016. V. 23. No. 01. P. 1550088-1–1550088-7. <https://doi.org/10.1142/S0218625X15500882>.

10. Murphy T., Schade C.T., Zwiren, A. Using automated image analysis for characterization of additive manufacturing powders // International Journal of Powder Metallurgy. 2018. V. 54. P. 47–59.

11. Bakas G., Dimitriadis S., Deligiannis S. et al. A Tool for Rapid Analysis Using Image Processing and Artificial Intelligence: Automated Interoperable Characterization Data of Metal Powder for Additive Manufacturing with SEM Case // Metals. 2022. V.12. P. 1816-1–1816-15. <https://doi.org/10.3390/met12111816>.

12. Соловьев М.Е., Раухваргер А.Б., Балдаев С.Л., Балдаев Л.Х., Мищенко В.И. Влияние условий плазменного напыления порошка оксида алюминия на пористость и электрическое сопротивление покрытия // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 5 (143). С. 22–32.

13. Zhu H., Huang Y., Ren J., Zhang B. et al. Bridging Structural Inhomogeneity to Functionality: Pair Distribution Function Methods for Functional Materials Development // Advanced Science. 2021. V. 17. P. 2003534-1–2003534-31.

14. Tsitsiashvili G., Osipova M. Asymptotic Relations in Applied Models of Inhomogeneous Poisson Point Flows // Mathematics. 2023. V.11. P. 1881-1–1881-10. <https://doi.org/10.3390/math11081881>.

15. Sluzalec A. Stochastic characteristics of powder metallurgy processing // Applied Mathematical Modelling. 2015. V. 39, No 23-24. P. 7303–7308. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.03.013>.

REFERENCES

1. Kudinov V.V., Bobrov G.V. Deposition of coatings by spraying. Theory, technology and equipment. Moscow: Metallurgiya, 1992, 432 p.
2. Gas thermal spraying / under the general editorship of L.H. Baldaev. Moscow: Market DS, 2007, 344 p.
3. Davis J.R. Handbook of thermal spray technology. ASM International, 2004. 338 p.
4. Puzryakov A.F. Theoretical foundations of plasma spraying technology. Moscow: Publishing House Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, 2008, 360 p.
5. Pinkerton A.J. Advances in the modeling of laser direct metal deposition // Journal of Laser Applications. 2015. V. 27. S15001. <https://doi.org/10.2351/1.4815992>.
6. Yu T., Yang L., Zhao Yu., Sun J., Li B. Experimental research and multi-response multi-parameter optimization of laser cladding Fe313 // Optics and Laser Technology. 2018. V. 108. P. 321–332. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.06.030>.
7. Sawant M.S., Jain N.K. Evaluation of stellite coatings by μ -PTA powder, laser, and PTA deposition processes // Materials and Manufacturing Processes. 2017. V. 33:10. P. 1043–1050. <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2017.1364764>.

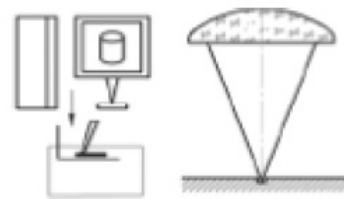
- | | |
|--|--|
| <p>8. Alaluss K., Mayr P. Additive Manufacturing of Complex Components through 3D Plasma Metal Deposition – A Simulative Approach // Metals. 2019. V. 9. P. 574–693. https://doi.org/10.3390/met9050574.</p> <p>9. Prozorova M.S., Kovaleva M.G., Arseenko M. Yu., et al. Microstructure and mechanical properties of alumina powder coatings by a new multi-chamber detonation sprayer // Surface Review and Letters. 2016. V. 23. No. 01. P. 1550088-1–1550088-7. https://doi.org/10.1142/S0218625X15500882</p> <p>10. Murphy T., Schade C.T., Zwiren, A. Using automated image analysis for characterization of additive manufacturing powders // International Journal of Powder Metallurgy. 2018. V. 54. P. 47–59.</p> <p>11. Bakas G., Dimitriadis S., Deligiannis S. et al. A Tool for Rapid Analysis Using Image Processing and Artificial Intelligence: Automated Interoperable Characterization Data of Metal Powder for Additive Manufacturing with SEM Case // Metals. 2022. V.12. P. 1816-1–1816-15. https://doi.org/10.3390/met12111816</p> | <p>12. Soloviev M.E., Raukhvarger A.B., Baldaev S.L., Baldaev L.H., Mishchenko V.I. Influence of the conditions of plasma spraying of aluminum oxide powder on the porosity and electrical resistance of the coating // Science-intensive technologies in machine building, 2023, No. 5 (143), pp. 22–32.</p> <p>13. Zhu H., Huang Y., Ren J., Zhang B. et al. Bridging Structural Inhomogeneity to Functionality: Pair Distribution Function Methods for Functional Materials Development // Advanced Science. 2021. V. 17. P.2003534-1–2003534-31.</p> <p>14. Tsitsiashvili G., Osipova M. Asymptotic Relations in Applied Models of Inhomogeneous Poisson Point Flows // Mathematics. 2023. V.11. P. 1881-1–1881-10. https://doi.org/10.3390/math11081881</p> <p>15. Sluzalec A. Stochastic characteristics of powder metallurgy processing // Applied Mathematical Modelling. 2015. V. 39, No 23-24. P. 7303–7308. https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.03.013.</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 12.07.2023; одобрена после рецензирования 20.07.2023; принята к публикации 24.07.2023.

The article was submitted 12.07.2023; approved after reviewing 20.07.2023; assepted for publication 24.07.2023.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №11 (149). С.17-23.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №11 (149). P. 17-23.

Научная статья
УДК 620.16
doi: 10.30987/2223-4608-2023-17-23

Аддитивные технологии для создания магнитных материалов

Дмитрий Сергеевич Яцко, мл. науч. сотр.
Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия
d.s.yatsko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1761-2540>

Аннотация. Материалы и материалы, обладающие магнитными свойствами, являются одной из фундаментальных основ того мира, что построило человечество. Магниты являются ключевыми элементами большинства устройств, применяемых в промышленности, науке и технике. Развитие технологии изготовления постоянных магнитов с целью достижения максимальной эффективности генерируемого магнитного поля при минимальном размере магнита можно разделить на два ключевых направления: изменение состава магнита и изменение формы магнитного поля. Исследование в данной работе направлено на разработку технологии изготовления магнитов сложной формы для контроля формы магнитного поля. Современные технологии производства активно используют различные программные продукты для моделирования внешнего вида, состава, физических и химических свойств конечного продукта. Для более точного изготовления и минимизации постобработки применяют автоматизированные комплексы, работающие по 3D модели, позволяющие изготавливать готовый продукт производства. Ручной труд постепенно заменяется машинным, а роль человека на производстве постепенно изменяется. Крупное производство начинает использовать роботизированные системы и конвейеры, позволяющие значительно увеличить производительность, снизить затраты и влияние человеческого фактора на качество готового продукта. Рынок аддитивных технологий за последние годы растёт с повышающимися темпами. В работе рассмотрено применение аддитивных технологий с целью получения материалов сложной формы, обладающих магнитными свойствами. Предложены обоснование и варианты решения основных препятствий на пути создания новой технологии изготовления магнитных материалов сложной формы. Предложены технологическое решение, и оборудование позволяющие получить магнитные материалы используя аддитивных технологий.

Ключевые слова: аддитивные технологии, сплавы SmCo, SmFe волоконный лазер, магниты, роботизированные комплексы

Для цитирования: Яцко Д.С. Аддитивные технологии для создания магнитных материалов // Научноёмкие технологии в машиностроении // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 11 (149). С. 17–23.
doi: 10.30987/2223-4608-2023-17-23

Additive technologies for magnetic materials generation

Dmitry S. Yatsko, SRF
Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, Russia
d.s.yatsko@mail.ru

Abstract. Materials and materials with magnetic properties are one of the mainstays of the world of mankind. Magnets are the key elements of most devices used in industry, science and technology. The development of permanent magnet manufacturing technology taking into account the maximum efficiency of the generated magnetic field with a minimum size of the magnet can be divided into two key directions: changing the composition of the magnet and changing the shape of the magnetic field. The research in this paper is aimed at developing a technology for manufacturing shaped magnets for controlling the shape of the magnetic field. Modern production technologies actively use various software products to simulate the design, composition, physical and chemical properties of the final product. For more precise manufacturing and minimization of post-processing, 3-D automated complexes are used, that make it possible to produce a finished product. Manual labor is gradually being replaced by machine labor, and the role of man at the place of production is gradually changing. Large-scale production begins to use robotic systems and conveyors, which significantly increases productivity, reduces costs and the influence of the human factor on the quality of the finished product. The market of additive technologies has been growing at an increasing pace in recent years. The paper considers the application of additive technologies for obtaining materials of complex shape with magnetic properties. The substantiation and solutions of the main obstacles in the development of a new technology for the manufacture of shaped magnetic materials are proposed. Technological solutions and equipment giving the possibility to obtain magnetic materials through the use of additive technologies make a motion.

Keywords: additive technologies, SmCo alloys, SmFe fiber laser, magnets, robotic complexes

For citation: Yatsko D.S. Additive technologies for magnetic materials generation / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 11 (149). P. 17–23. doi: 10.30987/2223-4608-2023-17-23

Введение

Одним из перспективных направлений развития технологий являются лазерные аддитивные технологии (ЛАТ)[1]. В отличие от традиционных методов производства ЛАТ в большей степени ориентированы на универсальность и снижение затрат материала и времени при производстве. У аддитивного принципа изготовления деталей есть свои ограничения из-за малой исследованности, но, учитывая относительно небольшую историю развития [2] и постоянное увеличение скорости развития производственных технологий в целом, можно предположить, что за 10 лет аддитивные технологии «созреют», а ещё через 5,0...10 лет постепенно войдут в существующее производство или станут его аналогом.

В настоящее время сложно представить современное производство без предварительного компьютерного моделирования готовых изделий. Компьютерная модель позволяет оценить вид будущего изделия и устранить недочёты на этапе проектирования. В случае успешного моделирования, по электронной геометрической модели может быть изготовлен образец или макет для проверки его работоспособности и пригодности. То, что казалось фантастикой 30 лет назад, стало реальностью.

Значительное развитие получили технологии, использующие металлические порошки и энергию лазерного излучения для изготовления конечного продукта. На рис. 1 показано,

что основное развитие получили технологии 3D печати металлическими порошками в закрытой ёмкости [3].

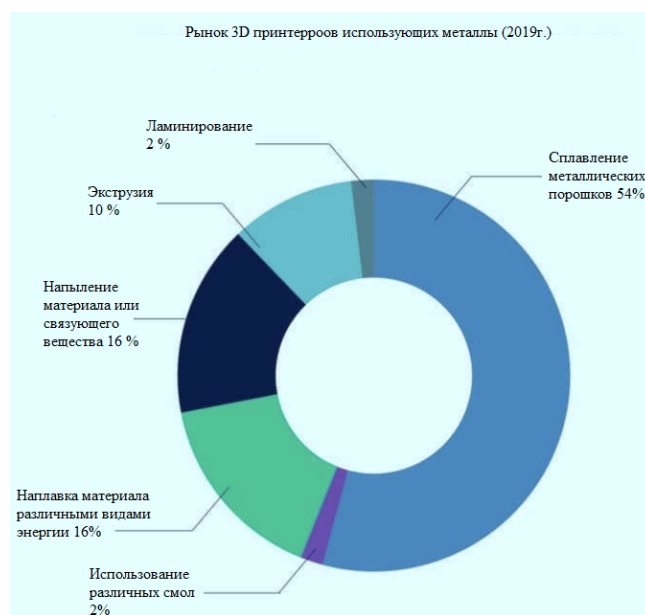


Рис. 1. Соотношение используемых технологий 3D печати [3]

Fig. 1. The ratio of 3D printing technologies [3]

По данным таких аналитических и консалтинговых компаний, как GlobalData [4], утверждается, что в 2020 г. объём рынка 3D печати достиг показателя в 13,9 млрд долл. Также прогнозируется постепенный рост рынка аддитивных технологий до 33 млрд долл. к 2025 г. и 60 млрд долл. к 2030 г. (рис.2).

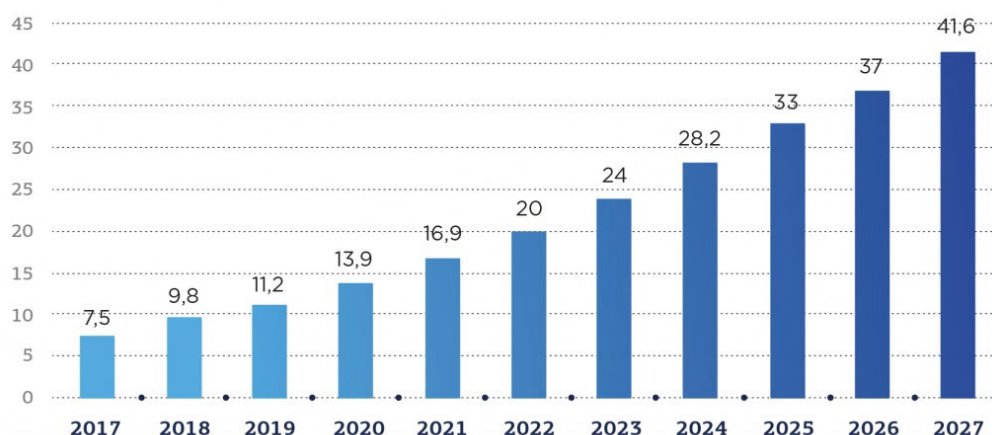


Рис. 2. Состояние и прогноз объема мирового рынка аддитивных технологий, млрд долл. [4]

Fig. 2. The state and forecast of the volume of additive technologies world market, billion dollars [4]

Таким образом можно сказать, что проведение исследований в области аддитивных технологий является перспективным направлением развития науки на протяжении ближайших десяти лет.

Учитывая основные преимущества применения аддитивных технологий (экономия ресурсов) следует выбирать те направления исследований, в которых применяются дорогостоящие и дефицитные материалы. Наиболее подходящими под определение «дефицитные» подходят материалы из группы редкоземельных. При исследовании области применения редкоземельных металлов можно выделить производство магнитов и магнитных материалов.

Материалы и методики

Исследование в области применения аддитивного производства с целью изготовления постоянных магнитов и магнитных материалов позволит повысить автоматизацию производства и расширить область применения аддитивных технологий (АТ). Применения магнитного поля для задания ориентации магнитных доменов в изготавливаемом магните накладывает ограничение на список технологи, пригодных к использованию. Если рассматривать аддитивные процессы, получившие широкое распространение [5, 6] и учитывать влияние магнитного поля, то количество пригодных к использованию АТ сокращается. По мнению автора работы, наиболее перспективной к применению является адаптированная технология

селективного сплавления порошка. Вопрос исследования магнитных свойств материалов [7, 8], полученных по технологии аддитивного производства в настоящий момент исследуется в различных коллективах [9, 10]. Однако исследование способов и свойств магнитов, созданных по аддитивной технологии, не является широко изученным.

Из-за влияния магнитного поля применение процесса аддитивного производства, при котором энергия от внешнего источника используется для соединения материалов путем их сплавления в процессе нанесения значительно усложняется, особенно при использовании смеси металлических порошков с разными магнитными свойствами.

Таким образом, для получения материала заданной формы, обладающего магнитными свойствами, необходимо решить две задачи:

- нанесение на поверхность равномерного слоя порошкового материала, способного удержаться на поверхности под воздействием магнитного поля;
- сплавление порошка в магнитном поле по заданной траектории.

Вопрос движения инструмента по сложной траектории давно представлял интерес для промышленности. На данный момент есть различные решения, представленные роботизированными системами и станками с ЧПУ, работающими с соответствующим программным обеспечением. Разработанная электронная геометрическая модель физического объекта должна иметь высокую точность (порядка

единиц микрометров), что сокращает дальнейшую механическую обработку.

В рамках проведённой работы использован роботизированный комплекс на базе робота KUKA KR-30HA и волоконного лазера производства компании IPG LC-1-K (рис. 3).

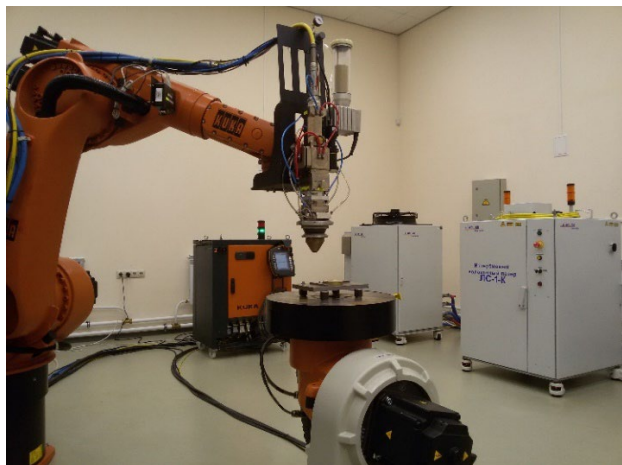


Рис. 3. Лазерный технологический комплекс

Fig. 3. Laser technology complex

Для создания постоянного магнитного поля использованы неодимовые магниты, в количестве шести штук, размером $100 \times 100 \times 10$ мм. Постоянные магниты собраны в два «блока» по три штуки, разделённые параллелепипедом из немагнитного материала толщиной 80 мм. Данная конструкция позволяет поддерживать магнитное поле между магнитами напряжённостью 520 ± 20 мТл. Сплавление металлических порошков выполнено между магнитами в магнитном поле на немагнитной подложке, как показано на рис. 4.

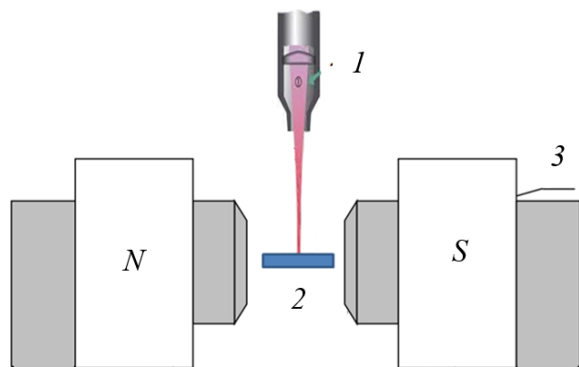


Рис. 4. Расположение сплавляемого металла между магнитами

Fig. 4. Location of the fused metal between magnets

Для фокусировки лазерного излучения на поверхности 2, находящейся в магнитном поле между магнитами 3 использована оптическая лазерная головка 1 с фокусирующей линзой.

Учитывая техническое разнообразие доступных методов, выбор производился из следующего списка:

- использование лент или пластин из материала, который будет наплавляться на поверхность в магнитном поле;
- осаждение материала на поверхность с последующим сплавлением в магнитном поле;
- напыление разогретого порошка на сверхзвуковой скорости (аналог системы «ООО Димет») с последующим сплавлением в магнитном поле;
- нанесение порошков со связующим, которое будет удерживать порошок на поверхности с последующим сплавлением в магнитном поле.

У вышеописанных способов есть свои преимущества и недостатки. При использовании лент или пластин сильно ограничивается применимость на поверхностях сложной формы. Данный вариант можно использовать для относительно плоских, крупногабаритных деталей.

Осаждение магнитного материала на поверхности позволит получить равномерный слой, однако получаемые слои будут тонкими. Данный вариант хорошо подойдёт для получения тонких магнитных плёнок или чувствительных слоёв.

Применение системы холодного газодинамического напыления позволит получать равномерные слои материала, однако необходимо использовать большой объём защитного газа, что значительно увеличит стоимость процесса.

Применение порошкового материала и фиксирующего состава сопряжено со сложностью получения равномерных слоёв, но требует минимального количества дополнительного оборудования. Применение порошков и фиксирующего состава позволяет использовать различные комбинации на основе используемых металлов, что значительно ускорит определение свойств новых наиболее эффективных сплавов.

Исследование проведено на примере порошков Sm, Co, Fe и их смесей, наносимых на немагнитную подложку из стали нержавеющей аустенитного класса 12X18H10T.

Для фиксации порошков в магнитном поле использован раствор канифоли в растворителе, который, при высыхании, фиксировал порошки на поверхности пластины. Сплавление порошков лазерным излучением производилось в двух направлениях, вдоль и поперёк линий магнитной индукции, как показано на рис. 5, остатки порошка счищались металлической щёткой.

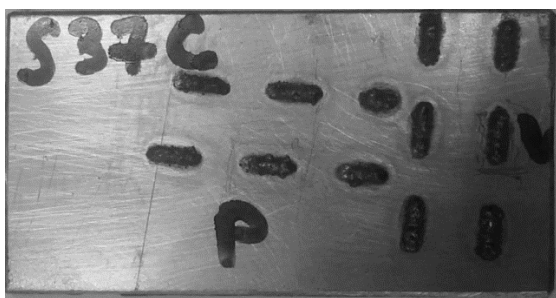


Рис. 5. Образец сплавления порошков в магнитном поле

Fig. 5. Sample of powder fusion in a magnetic field

Результаты исследований

В результате проведённой работы были получены образцы наплавки порошков Sm, Co, Fe в магнитном поле в различных комбинациях. Для исследования свойств магнитных структур, получаемых при сплавлении порошков в магнитном поле, было подготовлено три образца из порошков SmCo (в соотношении: 37 Sm, 63 Co). Спрессованный порошок в форме цилиндра диаметром 8,0 мм и толщиной 2,0 мм сплавлялся лазерным излучением с плотностью мощности 393 Вт/мм² на немагнитной подложке в магнитном поле.

Первый образец получен из порошка SmCo в соотношении 37 % масс. Sm к 63 % масс. Co сплавленного в магнитном поле лазерным излучением мощностью 393 Вт/мм². Второй образец получен посредством сплавления двух слоёв при мощности 393 Вт/мм², для получения образца большей толщины. Третий образец получен посредством сплавления двух слоёв на мощность 393 Вт/мм² на первом цилиндре и 314 Вт/мм² на втором (рис. 6).

Магнитные свойства полученного материала (отдельно от подложки) исследованы на СКВИД магнитометре MPMSXL (Quantum Design) путём измерения петель магнитного гистерезиса при температуре 300 К в магнитном поле от -20000 Э до +20000 Э. Исследуемые образцы получены сплавлением порошков SmCo в соотношении 37 Sm к 63 Co (по массе).

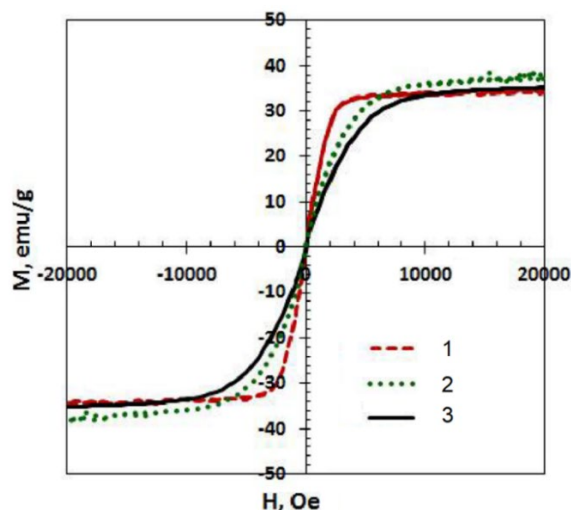


Рис. 6. Кривые намагничивания образцов при комнатной температуре в магнитных полях от -20000 Э до +20000 Э

Fig. 6. Magnetization curves of samples at room temperature in magnetic fields from -20000 E to +20000 E

Видно, что все три кривые имеют близкий характер намагничивания с близкими значениями намагничённости насыщения (32...34 emu/g), малой остаточной намагничённости и малой коэрцитивной силой. Образцы различаются значениями напряжённости магнитного поля, при котором наступает насыщение намагничённости. Насыщение намагничённости наблюдается при следующих напряжённостях магнитных полей: ± 4000 Э для первого образца, при ± 8000 Э для второго образца и при ± 12000 Э для третьего образца. В состав всех образцов входят два оксида Fe_3O_4 и FeSmO_3 , которые обладают ферромагнитными свойствами. Увеличение насыщения намагничённости образцов также совпадает с увеличением концентрации $\text{SmCo}_{0.5}$ ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$) в наплавленном материале, что подтверждается исследованиями спектров дифракции образцов (рис. 7) на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$)

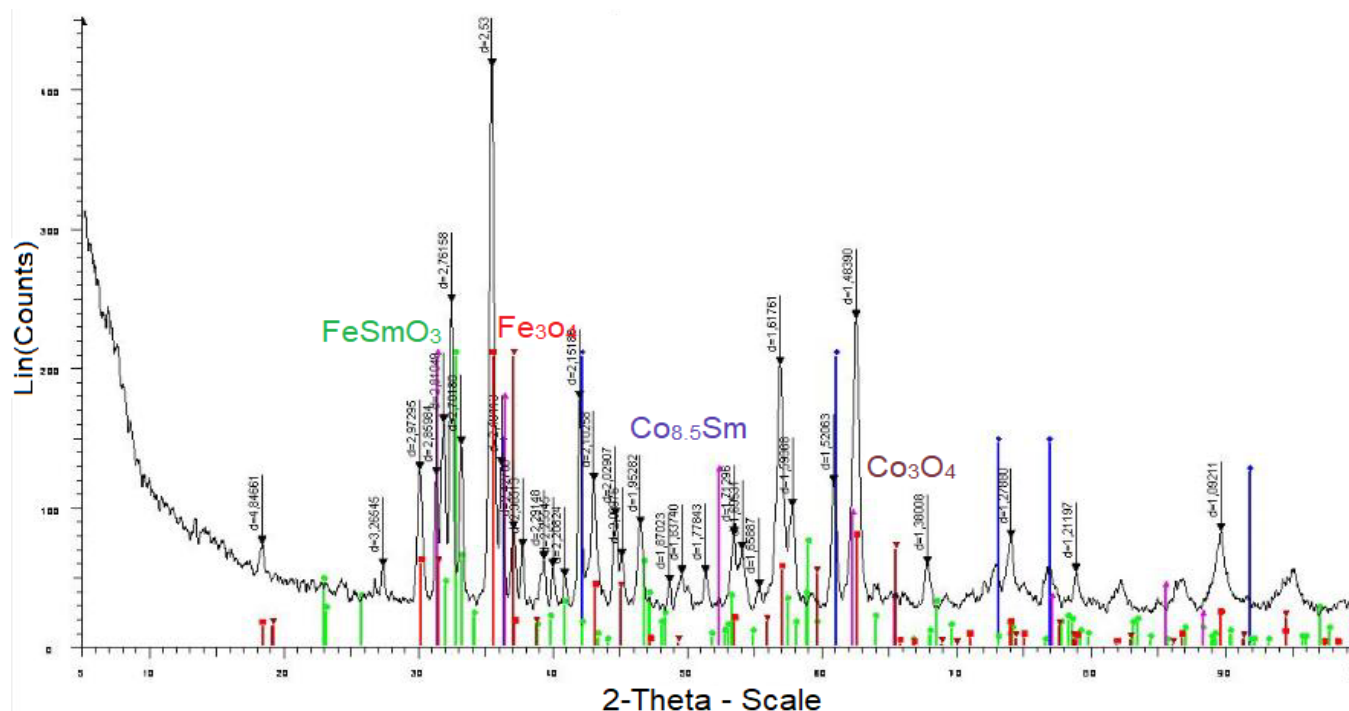


Рис. 7. Спектр дифракции третьего образца

Fig. 7. Diffraction spectrum of the third sample

Обсуждение результатов

В результате проведённых исследований были получены образцы, подтверждающие возможность применения аддитивных технологий для получения магнитных материалов. Экспериментально доказано, что при сплавлении порошков и их смеси в магнитном поле образуются ферромагнитные соединения ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$). $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ – высококоэрцитивный материал с высокой намагниченностью насыщения, высокой точкой Кюри и коэрцитивной силой. Это один из наиболее перспективных магнитных материалов, используемых на данный момент. Возможность получения данного соединения методами аддитивных технологий однозначно указывает на перспективность дальнейших исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Армашова-Тельник Г.С., Соколова П.Н., Дегтерев Д.В. Аддитивные технологии: новационный эффект в промышленности // Вестник ВГУИТ. 2020. №4 (86). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/additivnyye-tehnologii-novatsionnyy-effekt-v-promyshlennosti> (Дата последнего обращения: 11.05.2023).

2. Смуров И.Ю., Конов С.Г., Котобан Д.В. О внедрении аддитивных технологий и производства в отечественную промышленность // Новости материаловедения. Наука и техника. 2015. № 2 (14). С. 11–22. EDN TONSTV.

3. Metal 3D printers in 2022: a comprehensive guide // [Электронный ресурс]. URL: <https://www.aniwaa.com/buyers-guide/3d-printers/best-metal-3d-printer/> (Дата последнего обращения 11.05.2023)

4. Рынок технологий 3D-печати в России и мире: перспективы внедрения аддитивных технологий в производство // [Электронный ресурс] URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-tehnologiy-3d-pechati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tehnologiy-v-proizv/> (дата обращения 11.05.2023 г.).

5. Колесников Л.А., Манжула Г.П., Шелег В.К., Якимович А.М. Состояние и перспективы развития технологий быстрого прототипирования в промышленности (часть первая) // Наука и техника. 2013. № 5. С. 3–9. EDN TGGWON.

6. Журнал «Аддитивные технологии» №2 2021 г. // ООО «ПРОМЕДИА» URL: <https://additiv-tech.ru/archive/2021> (дата обращения 11.05.2023 г.)

7. J. Coey. Permanent magnets: Plugging the gap // Scripta Materialia, vol. 67, pp. 524–529, 2012.

8. Magnetic properties of $\text{Sm}_2(\text{Fe}, \text{Ti})_{17}$ compounds and their nitrides with $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ and $\text{Th}_2\text{Ni}_{17}$ structures / Ye. V. Shcherbakova1, G. V. Ivanova1, N. V. Mushnikov1, I. V. Gerasieva1 // Journal of Alloys and Compounds. 2000. V. 308. P. 15–20.

9. Kazantseva I.N.V., Koemets Yu.N., Shishkin D.A., Ezhov I.V., Davydov D.I., Rigmant M.B., Kochnev A.V. A magnetic study of deformed medical austenitic steel manufactured by 3d laser printing // *Physics of Metals and Metallography*. 2022. V. 123. P. 1139–1146.

10. Сафин А.Р., Behera Ranjan Kumar. Аддитивное производство и оптимизация топологии магнитных материалов для электрических машин // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2021. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/additivnoe-proizvodstvo-i-optimizatsiya-topologii-magnitnyh-materialov-dlya-elektricheskikh-mashin> (дата обращения: 02.06.2023).

REFERENCES

1. Armashova-Telnik G.S., Sokolova P.N., Degtyarev D.V. Additive technologies: an innovative effect digitalization in industry. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2020, No. 4 (86). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/additivnye-tehnologii-novatsionnyy-effekt-v-promyshlennosti> (the date of access 11.05.2023)

2. Smurov I.Yu., Konov S.G., Korban D.V. On the introduction of additive technologies and production in the domestic industry // *News of material Science. Science and technology*, 2015, No. 2, pp. 11-22. EDN TONSTV .

3. Metal 3D printers in 2022: a comprehensive guide // [Electronic resource]. URL: <https://www.aniwaa.com/buyers-guide/3d-printers/best-metal-3d-printer/> (date of access 11.05.2023)

4. 3D printing technology market in Russia and the world: prospects for the introduction of additive technologies

in production // [Electronic resource] URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-tehnologiy-3d-pechati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tehnologiy-v-proizv/> (date of access 11.05.2023).

5. Kolesnikov L.A., Manzhula G.P., Sheleg V.K., Yakimovich A.M. The state and prospects of development of rapid prototyping technologies in industry (part one) // *Science and Technology*, 2013, No. 5, pp. 3–9. EDN TGGWOH.

6. Additive Technologies (journal) No. 2 2021 // PRO-MEDIA LLC URL: <https://additiv-tech.ru/archive/2021> (date of access 11.05.2023).

7. J. Coey. Permanent magnets: Plugging the gap // *Scripta Materialia*, vol. 67, pp. 524–529, 2012.

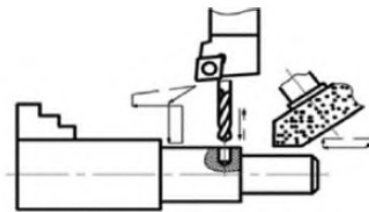
8. Magnetic properties of $\text{Sm}_2(\text{Fe}, \text{Ti})_{17}$ compounds and their nitrides with $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ and $\text{Th}_2\text{Ni}_{17}$ structures / Ye. V. Shcherbakova I., G. V. Ivanova I., N. V. Mushnikov I., I. V. Gervasiaeva I. // *Journal of Alloys and Compounds*. 2000. V. 308. P. 15–20.

9. Kazantseva I.N.V., Koemets Yu.N., Shishkin D.A., Ezhov I.V., Davydov D.I., Rigmant M.B., Kochnev A.V. A magnetic study of deformed medical austenitic steel manufactured by 3d laser printing // *Physics of Metals and Metallography*. 2022. V. 123. P. 1139–1146.

10. Safin A.R., Behera Ranjan Kumar. Additive manufacturing and optimization of the topology of magnetic materials for electric machines // *Izvestiya vuzov. Energy problems*. 2021, No.3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/additivnoe-proizvodstvo-i-optimizatsiya-topologii-magnitnyh-materialov-dlya-elektricheskikh-mashin/> (date of access: 02.06.2023).

Статья поступила в редакцию 03.06.2023; одобрена после рецензирования 09.06.2023; принята к публикации 26.09.2023.

The article was submitted 03.06.2023; approved after reviewing 09.06.2023; assepted for publication 26.09.2023.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №11 (149). С.24-29.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №11 (149). P.24-29.

Научная статья

УДК 621.9

doi: 10.30987/2223-4608-2023-24-29

Организация мелкосерийного производства деталей на принципах модульной технологии

Борис Мухтарбекович Базров, д.т.н.
ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук, Москва, Россия
modul_lab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3297-9818>

Аннотация. Отмечается, что традиционное мелкосерийное производство отличается низкой эффективностью из-за применения широкоуниверсального станочного оборудования, возможности которого в значительной степени недоиспользуются на рабочем месте, низкой по производительности технологической схемой обработки поверхностей детали – последовательной обработки поверхностей, организационной формой производства в виде участков по типу станков – участок токарных станков, участок фрезерных станков и т. п., что приводит к большим расстояниям перемещений заготовок по рабочим местам в процессе обработки. Стремление повысить эффективность производства посредством организации партий запуска деталей, которые формируются по конструктивному подобию, например корпусные детали, детали типа тел вращения и т. п., не дает существенного эффекта, т. к. решается задача только минимизировать затраты времени, связанные со сменой приспособлений и переустановкой заготовок, при этом не учитывается оптимальная очередность деталей в партии. С целью повышения эффективности мелкосерийного производства предлагается его организация на принципах модульной технологии, сущность которой заключается в представлении детали не совокупностью отдельных поверхностей, а модулей поверхностей, где под модулем поверхности понимается сочетание поверхностей, с помощью которого деталь выполняет соответствующую функцию. Это позволяет обеспечить специализацию рабочих мест, которые организуются не под методы обработки, а под изготовление соответствующих групп модулей поверхностей. Последние позволяют воспользоваться более производительной технологической схемой обработки поверхностей детали – последовательно-параллельной обработкой поверхностей. При организации производства появляется возможность воспользоваться планировкой рабочих мест в линию согласно поточному методу, что позволит существенно сократить расстояние перемещений заготовок деталей по рабочим местам

Ключевые слова: мелкосерийное производство, модульная технология, станок, рабочее место, деталь

Для цитирования: Базров Б.М. Организация мелкосерийного производства деталей на принципах модульной технологии // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 11 (149). С. 24–29.
doi: 10.30987/2223-4608-2023-24-29

Organization of small-scale production of parts based on module technology patterns

Boris M. Bazrov, D. Eng.
A.A. Blagonravov Institute of Machines Science
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
modul_lab@mail.ru

Abstract. It is emphasized that the traditional job shop production is characterized by low efficiency due to the use of superuniversal machining facilities for their underemployment of performance capabilities at work and also low-productivity of process flowsheet when machining part surfaces as a sequential surfaced job, the organizational form of production in the form of sections by type of machine tools, i.e. a section of lathes, a section of milling machines, etc. It results in large travel length of workpieces in the machining process at work. The desire to increase the efficiency of production by organizing launch of batch workpieces that are formed in a constructive similarity, such as structures, parts of rotation body types, etc., does not have a significant effect, because the task is just minimizing the run time spent on changing fixtures and reinstalling workpieces, but not taking into account an optimal sequence of parts in the batch. For increasing the efficiency of small-scale production, the module technology is proposed. The main idea of it is to represent the part not as a network of separate surfaces, but as surface modules, where the surface module is understood as a combination of surfaces and the part performs its proper function with the help of this module. This enables a good specialization of workplaces that are organized not for processing methods, but for manufacturing the appropriate groups of surface modules. The latter make it possible to take advantage of a more productive process flowsheet for machining part surfaces. It is sequential parallel surface job that is used. When organizing production, it becomes possible to use the layout of workplaces in line according to the in-line method, which will significantly reduce the part travel length at workplaces.

Keywords: small-scale production, module technology, machine, workplace, part

For citation: Bazrov B.M. Organization of small-scale production of parts based on module technology patterns / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 11 (149). P. 24–29. doi: 10.30987/2223-4608-2023-24-29

Традиционное мелкосерийное производство характеризуется низким уровнем специализации рабочих мест, применением широкоуниверсальных станков и технологической оснастки и низкой по производительности технологической схемой изготовления поверхностей детали – последовательной их обработки [1 – 7].

В результате мелкосерийное производство отличается низкой эффективностью. Причиной такой организации мелкосерийного производства является не столько широкое разнообразие изготавливаемых деталей, сколько непредсказуемость их разнообразия и низкая повторяемость в течение рабочей смены.

С целью повышения эффективности мелкосерийного производства образуют группы деталей в партии запуска по конструктивному подобию, например, партия корпусных деталей, партия валов и т. п.

Традиционное формирование партий запуска деталей нацелено на повышение эффективности их изготовления за счет снижения затрат времени на переход изготовления последующей детали, связанных со сменой приспособления и установкой заготовки. При этом не учитываются затраты времени, связанные со сменой инструмента, количеством настроечных размеров под изготовление поверхностей детали и назначением режимов обработки. Кроме того, не учитывается и оптимальная очередность изготавливаемых деталей в партии, которая тоже оказывает существенное влияние на эффективность их изготовления, т. к. детали в партии в некоторой степени конструктивно отличаются друг от друга.

Наибольшая эффективность их изготовления будет в том случае, если изготовление последующей детали в партии будет требовать минимального изменения затрат времени на переналадку технологической системы, связанной со сменой приспособления и установкой заготовки.

Иными словами, оптимальным выбор последующей детали будет тогда, когда перечисленные затраты времени на переход изготовления последующей детали будут теми же самыми, что и при изготовлении предыдущей детали в партии. Это возможно в том случае, если последующая деталь повторяет предыдущую.

Таким образом, критерием определения последующей детали в партии будет минимальное увеличение затрат времени на переналадку технологической системы после изготовления предыдущей детали. В этих условиях при формировании партии деталей в качестве первой изготавливаемой детали должна быть деталь, требующая минимальных затрат времени на наладку технологической системы. Недостатком такого формирования партии деталей является отсутствие учета такого фактора, как последовательность обработки поверхностей детали, т. к. очередность их изготовления связана с перенастройкой технологической системы на обработку других поверхностей, включая изменение режима обработки.

Однако надо иметь в виду, что эффект от изготовления партий деталей будет в том случае, если снижение трудоемкости изготовления деталей будет выше увеличения трудоёмкости технологической подготовки производства, связанные с формированием партий деталей.

К недостаткам традиционного мелкосерийного производства относятся:

- низкий уровень специализации рабочих мест;
- применение широкоуниверсального станочного оборудования, низкий процент использования технологических и технических возможностей которых имеет место при выполнении технологических операций;
- низкая по производительности технологическая схема обработки поверхности детали – последовательная обработка поверхностей;
- высокая стоимость оборудования;
- сложность управления производственным процессом;
- не высокий эффект от изготовления деталей партиями.

С целью повышения эффективности мелкосерийного производства предлагается воспользоваться модульной технологией, согласно которой [8 – 10] деталь представляется совокупностью модулей поверхностей (МП), где главным преимуществом является ограниченное разнообразие видов МП. Оно состоит из 26 видов, где 14 базирующих модулей поверхностей (МПБ), по шесть видов рабочих модулей поверхностей (МНР) и связующих модулей поверхностей (МПС), где каждый вид МП имеет несколько конструктивных решений с соответствующими техническими характеристиками.

Применение модульной технологии позволяет повысить эффективность мелкосерийного производства за счет:

- повышения уровня специализации рабочих мест;
- применения более производительной технологической схемы обработки детали – последовательно-параллельной обработки поверхностей детали;
- улучшения управляемости производственным процессом.

Организация мелкосерийного производства должна начинаться с представления производственной программы на модульном уровне.

Производственная программа представляется номенклатурой деталей с указанием количества каждого их наименования, а также видов МП, содержащихся в деталях каждого наименования с указанием их количества.

В качестве исходных данных выступают:

- номенклатура рабочих мест, где за каждым рабочим местом закрепляется соответствующая

группа видов МП таким образом, чтобы вся номенклатура рабочих мест охватывала все виды МП. С целью придания гибкости производству каждое рабочее место должно дублировать по одному виду МП, изготавливаемых на смежных рабочих местах;

- станки, специализированные под изготовление групп МП, закрепленных за рабочими местами;

- технологическое обеспечение каждого рабочего места под изготовление МП, включающее перечень модулей технологических процессов (МТО) под изготовление всех МП, модули инструментальных наладок (МИ) под осуществление всех МТО, модули контрольно-измерительных средств (МКИ) для контроля МП, модули управляющих программ (МУП) под реализацию МТО;

- установочно-зажимные элементы для установки заготовок;

- элементная база средств технологического обеспечения изготовления МП.

Элементная база средств технологического обеспечения на модульном уровне содержит модули средств технологического обеспечения МП: модули станка (МО), а также МТО, МИ, МКИ, МУП.

Деление номенклатуры МП по рабочим местам зависит от типа производства, чем меньше серийность производства, тем больше группа видов МП должна изготавливаться на одном рабочем месте. При разделении номенклатуры видов МП на группы по рабочим местам возникает задача определения этих групп.

Если разнообразие изготавливаемых деталей переменное и непредсказуемое, то целесообразно формировать группы изготавливаемых на станках МП по конструктивному подобию, что упрощает конструкции станков и повышает эффективность обработки за счет снижения разнообразия технологии.

В отличие от традиционных технологических процессов разрабатываются модульные технологические процессы.

Надо отметить, что главным недостатком традиционного технологического процесса изготовления деталей является то, что деталь рассматривается как совокупность независимых элементарных геометрических поверхностей. Отсюда возникают сложные технологические размерные цепи, приводящие к ужесточению допусков операционных размеров и избыточное множество

вариантов последовательности изготовления этих поверхностей и, как следствие, многовариантность технологических процессов изготовления одной детали.

В то же время технолог, понимая наличие связей между отдельными поверхностями, обусловленных совместным выполнением служебных функций, предусматривает их изготовление на одной операции или на разных операциях последующим расчетом технологических размерных цепей. Однако степень учета этих взаимосвязей во многом зависит от опыта и квалификации технолога, что влияет на качество технологического процесса, увеличивает трудоемкость, сроки его отладки и внедрения в производство.

Методика построения модульного технологического процесса позволяет свести к минимуму указанные недостатки. Это является результатом того, что деталь описывается не множеством элементарных поверхностей, а совокупностью модулей поверхностей, где поверхности уже объединены по признаку совместного выполнения служебных функций с указанием конструкторских баз каждого МП.

Следует отметить, что модульный процесс объединяет в себе преимущества единичного, типового и группового процессов, приобретая дополнительно гибкость. Все эти преимущества обеспечиваются методикой разработки модульного технологического процесса, в основу которой положены следующие основные принципы:

- деталь должна быть представлена совокупностью модулей поверхностей;
- все поверхности одного МП должны изготавливаться на одной операции, желательно с одного станка;
- технологический процесс должен учитывать все особенности детали;
- технологическая операция должна строиться методом компоновки из модулей технологических процессов изготовления МП.

Разработка непосредственно модульного технологического процесса, как и традиционного единичного процесса, включает разработку маршрутного технологического процесса и проектирование технологических операций методом компоновки из МТО под изготовление МП.

Разработка маршрута включает: выбор технологических баз и последовательности изготовления МП детали с последующим их объединением в технологические операции.

Рассмотрим в качестве примера организацию рабочего места, специализированного под изготовление у деталей таких МП как Б211, Б212, Б311, Б312 (рис. 1) с заданными диапазонами размеров и уровня точности.

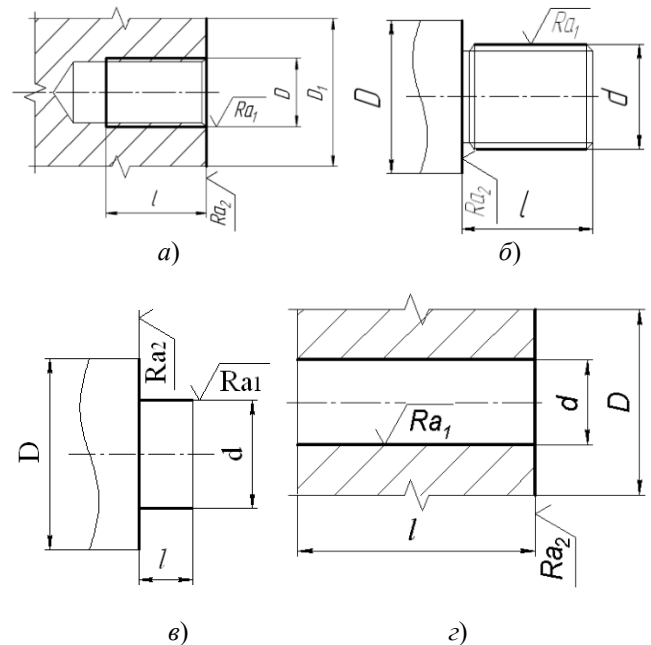


Рис. 1. Эскизы модулей поверхностей:

а – Б211; б – Б212; в – Б311; г – Б312

Fig. 1. Sketches of surface models:

а – Б211; б – Б212; в – Б311; г – Б312

Данное рабочее место должно включать следующее технологическое обеспечение: перечень МТО под изготовление всех МП, МУП под реализацию всех МТО, МИ, МКИ всех МП, а также токарно-револьверный станок модели Т16К20, набор инструментов, обеспечивающих организацию всех инструментальных наладок под осуществление МТО по изготовлению модулей поверхностей.

На токарно-револьверном станке модули инструментальных наладок реализуются посредством вывода на рабочие позиции инструментов в резцедержателе и револьверной головке. Управляющая программа для выполнения технологической операции разрабатывается посредством компоновки из соответствующих МУП.

Теперь формирование партий деталей, поступающих на рабочее место, осуществляется следующим образом: первым признаком так же, как и в традиционном мелкосерийном производстве, является конструктивное подобие деталей, что снижает разнообразие схем базирования

заготовок деталей, станочных приспособлений для установки заготовок.

Далее в отличие от формирования партий деталей в традиционном производстве в качестве второго признака предлагается принять общность видов МП, содержащихся в деталях, что позволяет снизить затраты времени, связанные с переналадкой технологических систем при переходах на изготовление новых деталей. При этом определяется такая очередность изготовления деталей в партии, при которой затраты времени при переходе на изготовление новой детали связаны со сменой приспособления, установкой заготовки, перенастройкой технологической системы на изготовление модулей поверхностей будут минимальны.

В традиционном мелкосерийном производстве создаются участки под типы станков, участок токарных станков, участок фрезерных станков и т. п.

Соответственно и при изготовлении детали последние совершают значительные перемещения от одного участка станков к другому в соответствии с составляющими ее поверхностями. Это существенно усложняет управление производственным процессом и снижает его эффективность. Применение модульной технологии при планировке рабочих мест позволяет воспользоваться некоторыми преимуществами поточного метода.

Поточный метод является наиболее эффективным методом организации производственного процесса [11], основными признаками которого являются: прямолинейность, непрерывность, параллельность, пропорциональность, ритмичность и гибкость.

Применение модульной технологии в условиях мелкосерийного производства позволяет в определенной степени использовать преимущества поточного метода, заключающиеся в расстановке рабочих мест в линию.

Однако в отличие от традиционного поточного метода изготавливаются конструктивно-различные детали, при этом некоторые детали могут изготавливаться с любого рабочего места или требовать возврата к рабочим местам.

Надо отметить, что характерной особенностью традиционного мелкосерийного производства является одновременный запуск производства разных деталей, что затрудняет применение поточного метода.

Применение поточного метода в мелкосерийном производстве накладывают ряд ограничений на проектирование модульных технологических процессов. Во-первых, при разработке маршрутного технологического процесса необходимо стремиться к обеспечению такой последовательности технологических операций, которая соответствует прямоочности рабочих мест и к минимуму возврата заготовки к предыдущим рабочим местам. Во-вторых, рабочее место в отличие от рабочего места при традиционном поточном методе должно отличаться более широкими технологическими и техническими возможностями.

При этом следует принять во внимание, что для выполнения производственной программы необходимо дублирование рабочих мест.

Выводы

1. Мелкосерийное производство деталей отличается низкой эффективностью за счет:

- низкого уровня использования технических и технологических возможностей дорогого широкоуниверсального оборудования на рабочем месте;
- низкой по производительности технологической схемой обработки поверхностей детали – последовательной обработки поверхностей;
- организации производства участками по типу станков, приводящему к увеличению расстояний перемещений заготовок по рабочим местам;
- низкой эффективности использования партий запуска деталей, направленных на минимизацию затрат времени, связанных только с переустановкой заготовок.

2. С целью повышения эффективности мелкосерийного производства предлагается его организация на принципах модульной технологии.

3. Применение модульной технологии позволяет повысить эффективность мелкосерийного производства за счет:

- специализации рабочих мест;
- использования более производительной технологической схемы обработки поверхностей детали – последовательно-параллельной обработки поверхностей;
- организации партий запуска с целью минимизировать затраты времени как на переустановку заготовки, так и на перенастройку технологической системы на изготовление модулей поверхностей и планировки рабочих мест в линию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Желобанов С.С. Рациональное планирование наладок станков с ЧПУ в условиях мелкосерийного производства // Вестник машиностроения. 2012. № 5. С. 81–82.
2. Колесникова О.В., Лелюхин В.Е. Организация системы планирования мелкосерийного производства // В сборнике: Современное состояние и перспективы развития технических наук. Сборник статей Международной научно-практической конференции. Ответственный редактор Сукиасян А.А., 2015. С. 62–65.
3. Федоров В.К., Епанешникова И.К. Особенности обеспечения качества организации единичного (мелкосерийного) производства // В сборнике: Управление качеством. Избранные научные труды четырнадцатой Международной научно-практической конференции. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «МАТИ – Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского». 2015. С. 391–394.
4. Типнер Л.М., Исхакова Н.Р. Проблемы организации в условиях единичного и мелкосерийного производства // Экономика и бизнес: теория и практика. 2019. № 5-3. С. 97–102.
5. Кудашева И.О., Костин Д.А., Хайкова Я.Д. Структурная организация технологических процессов и систем в среднесерийном и мелкосерийном производствах // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2022. Т. 22. № 8. С. 82–92.
6. Матвеева Е.А. Организация мелкосерийного производства предприятий машиностроения в условиях компьютеризации // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. 2012. № 4 (20). С. 51–61.
7. Савинов С.В. Способы и методы повышения эффективности мелкосерийного производства // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2021. № 5. С. 104–110.
8. Справочник технолога / под общей ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
9. Базров Б.М. Модульная технология // Научные технологии в машиностроении. 2011. № 4. С. 3–10.
10. Базров Б.М. Организация машиностроительного производства на принципах модульной технологии // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2006. № 6. С. 67–78.
11. Организация и планирование машиностроительного производства (производственный менеджмент) / Грачева К.А., Захарова Л.А., Одинцова Л.А. и др.; под ред. Ю.В. Скворцова, Л.А. Некрасова. М.: Высш. шк., 2003. 470 с.

REFERENCES

1. Zhelobanov S.S. Rational planning of NC machine tools setting-up in a small-scale production conditions. Bulletin of Mechanical Engineering, 2012, No. 5, pp. 81–82.
2. Kolesnikova O.V., Lelyukhin V.E. Organization of small-scale production planning system // Collected works: The current state and prospects of the development of technical sciences. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Responsible editor Sukiasyan A.A., 2015, pp. 62–65.
3. Fedorov V.K., Epaneshnikova I.K. Features of quality assurance of the organization of a single (small-scale) production // Collected works: Quality Management. Selected proceedings of the Fourteenth International Scientific and Practical Conference. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Moscow State Technological University named after K.E. Tsiolkovsky», 2015, pp. 391–394.
4. Tipner L.M., Iskhakova N.R. Problems of organization in conditions of single and small-scale production // Economics and Business: theory and practice, 2019, No. 5-3, pp. 97–102.
5. Kudasheva I.O., Kostin D.A., Kakova Ya.D. Structural organization of technological processes and systems in medium-scale and small-scale production // Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University, 2022, vol. 22, No. 8, pp. 82–92.
6. Matveeva E.A. Organization of small-scale production of machine-building enterprises in the conditions of computerization // Bulletin of the Volga State University named after V.N. Tatishchev, 2012, No. 4 (20), pp. 51–61.
7. Savinov S.V. Methods and techniques for improving the efficiency of small-scale production // Modern science: actual problems of theory and practice. Issue: Natural and Technical Sciences, 2021, No. 5, pp. 104–110.
8. Technologist's reference book / under the general editorship of A.G. Suslov. Moscow: Innovation Mechanical Engineering, 2019, 800 p.
9. Bazrov B.M. Module technology // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2011, No. 4, pp. 3–10.
10. Bazrov B.M. Organization of machine-building production based on module technology // Problems of mechanical engineering and reliability of machines, 2006, No. 6, pp. 67–78.
11. Organization and planning of machine-building production (production management) / Gracheva K.A., Zakharova L.A., Odintsova L.A., et al; edited by Yu.V. Skvortsova, L.A. Nekrasova. Moscow: Vysh. shk., 2003, 470 p.

Статья поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 17.09.2023; принята к публикации 21.09.2023.

The article was submitted 11.09.2023; approved after reviewing 17.09.2023; assepted for publication 21.09.2023.

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №11 (149). С.30-38.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №11 (149). P.30-38.

Научная статья
УДК 621.01:658
doi: 10.30987/2223-4608-2023-30-38

Многокритериальная оптимизация операционных режимов технологических процессов

Анатолий Васильевич Тотай¹, д.т.н.
Максим Николаевич Нагоркин², д.т.н.
Виталий Сергеевич Селифонов³, к.т.н.

^{1, 2, 3} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ totai_av@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4794-9881>
² nagorkin_mn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4536-7522>
³ vitalserg82@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8660-2915>

Аннотация. Рассмотрены вопросы, достаточно редко объединяемые в одном небольшом исследовании. Прежде всего, это известная проблема технологического обеспечения заданного качества поверхностного слоя закалённых сталей лезвийным инструментом из сверхтвёрдых материалов и состояние микроклимата рабочих зон металлорежущих станков. Сделана попытка создания математической модели, объединяющей эти две целевые функции. В качестве математического аппарата, позволяющего оптимизировать режимы чистового и тонкого точения, был применён метод линейного программирования, позволивший наглядно с помощью его графического изображения представить картину влияния включённых в модель технических ограничений на оптимальные значения скорости резания и подачи. На основе аналитических исследований получены зависимости образования паров сероводорода в рабочих зонах металлорежущих станков, использующих в качестве смазывающе-охлаждающих жидкостей сульфорезолы различных марок. Теоретически установлено, что наибольшее влияние на интенсивность образования паров сероводорода оказывает температура в зоне резания, на которую в большей степени оказывает скорость точения. В работе даны коэффициенты к эмпирическим зависимостям, позволяющим установить усреднённую температуру в зоне резания при обработке различных сталей, а также высокопрочных чугунов и цветных сплавов. В качестве параметров состояния поверхностного слоя цилиндрических поверхностей принималась шероховатость и коэффициент степени наклёпа, которые в значительной степени определяют долговечность изделий в условиях трения и циклических нагрузжений. Тестирование полученных математических моделей позволило получить оптимальные значения подачи и скорости резания для чистового и тонкого точения закалённых сталей 45 и 65Г.

Ключевые слова: линейное программирование, графическая модель, целевая функция, параметры оптимизации

Для цитирования: Тотай А.В., Нагоркин М.Н., Селифонов В.С. Многокритериальная оптимизация операционных режимов технологических процессов // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 11 (149). С. 30–38. doi: 10.30987/2223-4608-2023-30-38

Multiple-criteria optimization of operational modes of technological processes

Anatoly V. Totay¹, D. Eng.
Maxim N. Nagorkin², D. Eng.
Vitaly S. Selifonov³, Ph. D. Eng.

^{1, 2, 3} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ totai_av@mail.ru
² nagorkin_mn@mail.ru
³ vitalserg82@mail.ru

Abstract. The issues that are rarely combined in one small study are viewed. First of all, this is a well-known problem of engineering support of a specified quality of hardened steels surface layer using a blade tool made of superhard materials and the state of microclimate of operating areas of metal-cutting machines. It had a shot at creating a mathematical model that combines these two objective functions. As a mathematical tool that allows optimizing the modes of finishing and fine turning,

the linear- programming technique was applied, which visualises through its graphic image, a picture of the influence of the engineering constraints included in the model on the optimal values of the cutting speed and feed. On the basis of analytical studies, the dependences of the formation of hydrogen sulfide vapors in the operating areas of metal-cutting machines using sulfofresols of various brands as lubricating and cooling fluids were obtained. Theoretically, it has been established that the maximal influence on the intensity of hydrogen sulfide vapor formation is exerted by the temperature in the cutting zone, which is more effected by the lathe turning speed. The paper presents empirical dependencies ratios that allows finding an average temperature in the cutting zone in the process of various steels treatment, as well as high-strength alloys and non-ferrous alloys. The roughness and the degree of cold work coefficient were taken as parameters of the surface layer condition for cylindrical surfaces, which decisively determine the durability of the products under conditions of friction and cyclic loads. Testing of the obtained mathematical models made it possible to obtain optimal values of feed and cutting speed for finishing and fine turning of hardened steels 45 and 65G.

Keywords: linear programming, graphical model, objective function, optimization parameters

For citation: Totay A.V., Nagorkin M.N., Selifonov V.S. Calculation of high-duty cold reduction rollers grinding cycles based on radial force cycle optimization / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 11 (149). P. 30–38. doi: 10.30987/2223-4608-2023-30-38

Введение

Современное машиностроение и один из главных его компонентов обрабатывающая промышленность в условиях жёсткой конкуренции как на внутреннем, так и на внешнем рынках поставлены перед необходимостью добиваться минимальной себестоимости выпускаемой продукции.

Подобная ситуация предполагает более углубленный подход на основе последних достижений науки к этапу технологической подготовки производства, при котором широко использовались бы не только технико-экономические критерии, но и целевые функции процессов, учитывающие эксплуатационные характеристики изделий и вопросы промышленной экологии.

Попытки создать универсальные математические модели по оптимизации операционных технологических процессов различных методов обработки привели к появлению очень громоздких и не гибких документов, используемых на практике с минимальной эффективностью.

Очевидно, что каждая стадия технологии изготовления изделия, материализованная в конкретный маршрут обработки, имеет свои задачи, реализация которых должна гарантировать достижение конструктивных требований к изделиям.

В настоящее время обеспечение высоких требований по точности и шероховатости поверхностного слоя деталей может быть реализовано большим количеством методов обработки и их последовательностью. В этой

ситуации наиболее рациональным представляется создание математических моделей процессов для каждой отдельной стадии обработки (черновая, получистовая, чистовая и отделочная). В данной работе рассматривается применение оптимизационных моделей при технологической подготовке производства деталей класса валов с конструктивными требованиями по точности шероховатости соответственно: 6, 7 квалитет и $Ra = 0,16...0,32$ мкм [1 – 3].

Учитывая то обстоятельство, что на первых двух стадиях технологического маршрута снимается, как правило, до 85 % припуска на обработку, то набор технологических ограничений, включаемых в модель процесса, может быть одним и тем же.

Как показывает практика внедрения систем автоматизированного проектирования технологических процессов (ТП), в подавляющем большинстве случаев они применяются на предприятиях, функционирующих в рамках не ниже, чем среднесерийного производства.

Подобная ситуация, очевидно, предполагает и соответствующий уровень организационного и технического обеспечения заготовительного передела. Другими словами, на стадии обработки технологу приходится иметь дело с припусками, соответствующими научно-обоснованным значениям для различных методов получения заготовок.

Это положение даёт возможность исключить ряд технических ограничений из математических моделей без риска некорректного описания того или иного метода обработки [4 – 6]. К таким можно отнести ограничения по

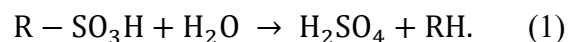
мощности электродвигателя привода главного движения, по прочности и жёсткости режущего инструмента, по прочности механизма подачи станка. Кроме того, можно исключить ограничение по шероховатости поверхности, т. к. данный параметр никогда не контролируется на черновой и получистовой стадии технологического процесса.

При проектировании операционных ТП изготовления деталей класса валов в случаях соотношения длины заготовки к диаметру более семи на усмотрение технолога может быть включено техническое ограничение по жёсткости заготовки. Наряду с перечисленными техническими ограничениями, обеспечивающими выполнение соответствующей технологической операции, в условиях современного обрабатывающего производства нельзя не обращать внимание на экологическую обстановку в механических цехах. Речь в данном случае идёт о микроклимате как непосредственно на рабочих местах станочников, так и в цехе, где могут одновременно работать несколько сотен металлорежущих станков, использующих смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС), большинство которых представляют смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) [7].

Для предотвращения схватывания и износа режущего инструмента при наиболее тяжёлых температурах и механических нагрузках применяют антизадирные присадки. Чаще

всего это вещества, содержащие хлор, серу, фосфор. Рассмотрим содержание присадки, в которых в зависимости от условий применения масляных СОЖ, содержание серы составляет 0,5...3,0 %, т. к. хлор-фторосодержащие противозадирные присадки менее распространены.

При использовании серосодержащих СОЖ могут образовываться аэрозоли нефтяных масел в присутствии тиолов, сульфидов, сульфокислот. При наличии воды сульфокислоты подвергаются гидролизу:



Таким образом, в воздушном пространстве рабочей зоны металлорежущего станка будут находиться молекулы вышеуказанных соединений. Наибольшую опасность для человека представляет сероводород.

Расчёт дозы сероводорода в рабочей зоне может быть произведён по формуле:

$$D = \int_0^{\infty} C^4(t) dt, \quad (2)$$

где D – доза сероводорода в рабочей среде; C – концентрация вещества.

На основании анализа имеющихся экспериментальных данных сформирована таблица влияния величины параметра « C » на клинические симптомы персонала (табл. 1)

1. Изменение состояния здоровья при воздействии сероводорода на человека

1. Changes in the health state showing how hydrogen sulfide had a bad effect on humans

lgC мг/м ³	Диапазон значений										
	от -7	от -1,5	от 0	от 0,8	от 1,2	от 1,7	от 2,0	от 2,3	от 2,6	от 3,0	от 3,3
Клинические симптомы	порог восприятия запаха	обнаружение вкуса	умеренный запах	начальное раздражение глаз	запах, кашель, раздражение глаз	сильное раздражение глаз, горла	кашель, раздражение глаз	выраженный конъюнктивит	возможная потеря сознания	быстрая потеря сознания	Немедленная потеря сознания

При резании металлов количество используемой СОЖ может достигать 30...40 л/мин, в результате чего накапливается большое количество серы.

Большую опасность как для человека, так и для окружающей среды представляет воздействие отработанных СОЖ. Доказано, что воздействие на человека СОЖ в условиях производства может привести к возникновению ряда профессиональных заболеваний. Работы отечественных учёных подтверждают тот факт, что аэрозоли нефтяных масел, входящих в состав СОЖ, могут привести к поражению организма вплоть до липоидной пневмонии, изменить сосудистую и нервную системы, вызвать кожно-трофические нарушения (в том числе дерматиты), способствовать снижению иммунобиологической реактивности. Наркотическим действием обладают пары углеводородов, нитрид натрия, триэтанолламин способствует нарушению газового обмена в организме человека и поражению мышц сердца, поражение печени и почек могут вызвать хлоро-содержащие присадки, трихлорэтан – источник выделения фосгена и т. д. Кроме того, установлено, что не являются индифферентными для организма человека продукты термической деградации безвредных компонентов СОЖ, а также возможные новые химические образования в зоне обработки.

В результате испарения отработавших СОЖ происходит загрязнение воздушной среды. Токсичные компоненты (органические соединения хлора и тяжелых металлов, диоксид серы) распространяются как в производственном помещении, так и в окружающую среду, что приводит к негативному воздействию на персонал и биосферу. Наиболее опасно испарение синтетических масел, а при испарении масел, содержащих полихлордефинылы, образуются еще более токсичные соединения – полихлордибензодиоксины и полихлордибензофураны.

Интенсивность образования сероводорода в рабочей зоне станочника в значительной степени будет зависеть от температуры, сопровождающей процесс резания [8].

Среднюю температуру в зоне резания при точении можно с достаточной для практики точностью определить по зависимости [7]:

$$\theta_{cp} = C_{\theta} t^{x_{\theta}} S^{y_{\theta}} v^{z_{\theta}} r^{n_{\theta}}, \quad (3)$$

где t – глубина резания в мм; S – подача в мм/об; v – скорость резания в м/мин; r – радиус при вершине резца в мм; C_{θ} , x_{θ} , y_{θ} , z_{θ} , n_{θ} – коэффициенты.

Значения коэффициентов в формуле приведены в табл. 2.

2. Значения коэффициентов в расчётных зависимостях средней температуры в зоне резания при токарной обработке (марки режущих инструментов соответствуют общепринятым рекомендациям)

2. The values of the coefficients in the calculated dependences of the average temperature in the cutting zone during turning (the brands of cutting tools meet the requirements of generally accepted recommendations)

Материал заготовки	Коэффициент				
	C_{θ}	x_{θ}	y_{θ}	z_{θ}	n_{θ}
Среднеуглеродистые стали	96,4	0,080	0,060	0,25	0,070
Легированные стали	118	0,092	0,061	0,28	0,082
Жаропрочные стали	86,7	0,110	0,059	0,31	0,076
Высокопрочные чугуны	134	0,078	0,063	0,26	0,067
Цветные сплавы	121	0,060	0,048	0,18	0,053

Как видно из табл. 1, опасная концентрация составляет порядка 600 мг/м³, что, как показывает термодинамический анализ, с большой долей вероятности будет сопутствовать

высокоскоростным методам обработки с использованием значительного количества СОЖ.

В этой связи, желательно, операционные режимы резания назначать из условия не

превышения температуры в зоне резания 350...400 °С.

Для этого, выражая из формулы (2) скорость резания и задаваясь определённой лимитирующей температурой в зоне резания, получим неравенство:

$$v \leq \sqrt[z_{\theta}]{\frac{\theta}{C_{\theta} t^{x_{\theta}} S^{y_{\theta}} v^{z_{\theta}} r^{n_{\theta}}}} \quad (4)$$

Наряду с концентрацией сероводорода вторым основным фактором является время его воздействия на работника.

Значения концентрации сероводорода и время его воздействия, вызывающие сопутствующие клинические симптомы, приведены в табл. 3.

3. Физиологические симптомы влияния концентрации паров сероводорода и времени его воздействия

3. Physiological symptoms of the influence of hydrogen sulfide vapor concentration and the time of its exposure

Уровень	Классификация концентрации H ₂ S (мг/м ³)	Время воздействия				
		10 мин	30 мин	60 мин	240 мин	480 мин
1	не вызывает потерю трудоспособности	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
2	вызывает потерю трудоспособности	59,0	45,0	39,0	28,0	24,0
3	опасно для жизни	106	85,0	71,0	52,0	44,0
4	немедленный летальный исход	948	720	605	428	-

Кроме конкретного значения температуры в зоне резания на количество выделяемого на рабочем месте станочника сероводорода оказывает влияние объём стружки, рабочей части инструмента и заготовки, непосредственно контактирующей со струей СОЖ.

На основании приведённых рассуждений и данных, сформируем набор технологических ограничений, позволяющих оптимизировать операционные режимы и условия чернового и получистового обтачивания.

Ограничение 1. Это ограничение устанавливает связь между скоростью резания, определяемой принятой стойкостью инструмента, его геометрией, глубиной резания, подачей и механическими свойствами обрабатываемого материала с одной стороны, и скоростью резания, определяемой кинематикой станка с другой:

$$V = \frac{C_v \cdot K_v}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S^{y_v}} \quad (5)$$

где T – период стойкости инструмента; t и S – глубина резания и подача; C_v , K_v , m , x_v , y_v – коэффициенты, зависящие от конкретных условий операции соответственно [1].

Скорость резания, определяемая кинематикой станка:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (6)$$

Тогда техническое ограничение, представленное в виде неравенства, будет иметь вид:

$$n \cdot S^{y_v} \leq \frac{318 \cdot C_v \cdot K_v}{T^m \cdot D \cdot t^{x_v}} \quad (7)$$

Ограничения 2 и 3. Характеризуют наибольшую и наименьшую скорость резания, возможную на станке выбранной модели:

$$n \geq n_{\text{ст. min}} \quad (8)$$

$$n \leq n_{\text{ст. max}} \quad (9)$$

Ограничения 4 и 5. Наименьшая и наибольшая допустимые подачи для конкретного станка:

$$S \geq S_{\text{ст. min}}; \quad (10)$$

$$S \leq S_{\text{ст. max}}. \quad (11)$$

$$n^{z_{\theta}} \cdot S^{y_{\theta}} \leq 10^{3z_{\theta}} \cdot \theta_{\text{ср}} / C_{\theta} \cdot \pi^{z_{\theta}} \cdot D^{z_{\theta}} \cdot t^{x_{\theta}} \cdot r^{n_{\theta}}, \quad (12)$$

где C_{θ} , x_{θ} , y_{θ} , n_{θ} и z_{θ} – коэффициенты в эмпирических зависимостях.

Для определения оптимальных режимов резания (в нашем случае n и S) может быть применён метод линейного программирования. Суть метода заключается в определении неотрицательных значений переменных, удовлетворяющих системе ограничений в виде линейных неравенств, обеспечивающих наибольшее или наименьшее значение заданного критерия оптимальности или оценочной функции. Решению заданной задачи предшествует процедура приведения всех технических ограничений и оценочной функции к линейному виду.

На примере первого ограничения эта операция выглядит следующим образом:

$$\ln n + Y_v \cdot \ln S \leq \ln \left(\frac{318 \cdot C_v \cdot K_v}{T^m \cdot D \cdot t^{x_v}} \right). \quad (13)$$

Далее введём следующие обозначения:

$$\ln n = x_1; \ln(100S) = x_2; \ln \left(\frac{318 \cdot C_v \cdot K_v}{T^m \cdot D \cdot t^{x_v}} \right) = b_1$$

и подставив их в неравенство (13), получим:

$$x_1 + y_v \cdot x_2 \leq b_1. \quad (14)$$

Так как минимальная себестоимость технологической операции будет обеспечена при максимальном значении произведения $n \times S$, то для линейного вида модели оптимальную функцию f_0 можно представить в виде

$$f_0 = (x_1 + x_2) \rightarrow \max. \quad (15)$$

Тогда математическая модель процесса резания на черновой и получистовой стадии будет выглядеть следующим образом:

Ограничение 6. Характеризует расчётное значение скорости резания, исключающую вредную концентрацию сероводорода в рабочей зоне станка, использующего СОЖ. Преобразуя зависимость (3) в неравенство, аналогичное (7), получим:

$$\begin{cases} x_1 + y_v \cdot x_2 \leq b_1 \\ x_1 \geq b_2 \\ x_1 \leq b_3 \\ x_2 \geq b_4 \\ x_2 \leq b_5 \\ z_{\theta} x_1 + y_{\theta} x_2 \leq b_6 \end{cases} \quad (16)$$

Математическая модель процесса резания может быть изображена в графическом виде. В этом случае каждое техническое ограничение представляется граничной прямой, определяющей полуплоскость возможного существования решений системы неравенств. Граничные прямые, пересекаясь, образуют многоугольник, внутри которого любая точка удовлетворяет всем неравенствам (рис. 1). Этот многоугольник называют многоугольником решений.

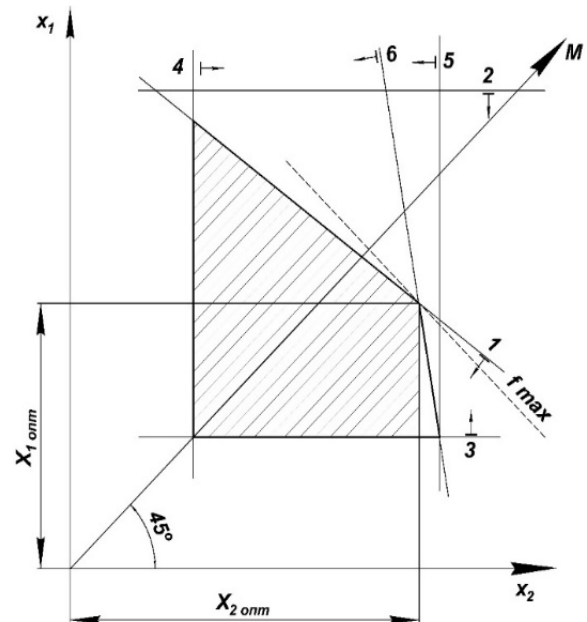


Рис. 1. Графическое изображение модели процесса резания

Fig. 1. Graphic representation of the cutting process model

Вычисление оптимальных значений $X_{1\text{опт}}$ и $X_{2\text{опт}}$ сводится к последовательному вычислению координат всех возможных точек перечисления граничных прямых и затем определению для них наибольшей суммы по выражению (15).

После определения координат $X_{1\text{опт}}$ и $X_{2\text{опт}}$ вычисляют оптимальные значения элементов режима резания по формулам:

$$n_{\text{опт}} = \exp(x_{1\text{опт}}); \quad (17)$$

$$S_{\text{опт}} = \exp(x_{2\text{опт}}) / 100. \quad (18)$$

Оптимизация режимов обтачивания для чистовой и отделочной стадий обработки, несмотря на выбранные в качестве примера только лезвийные методы, имеет многовариантные пути решения. Прежде всего, это касается наличия или отсутствия в технологическом маршруте термообработки и её технических условий.

Если термообработка запланирована после получистовой стадии и твёрдость не превышает 42...44 HRC, то чистовое и отделочное (тонкое) обтачивание можно осуществлять резцами из чёрной оксидной керамики типа ВОК. Если твёрдость поверхности более 55 HRC, то из лезвийных инструментов могут быть применены резцы из композитов на основе кубического нитрида бора.

Для оптимизации режимов операций финишной стадии технологического процесса в предложенную математическую модель следует добавить ещё два технических ограничения:

– по регламентированной шероховатости поверхности;

– по оптимальной степени наклёпа, определяемой в зависимости от конкретных условий эксплуатации детали [9 – 11].

Для рассматриваемого примера в качестве финишной операции выбран метод тонкого точения [12].

Зависимость шероховатости Ra , мкм, поверхности от режимов алмазного точения в общем виде имеет вид:

$$Ra = C_R \frac{R_{a\text{пр}}^{K_R} \cdot S^{Y_R} \cdot (90 + \gamma)^{n_R}}{V^{Z_R} \cdot \rho_{kp}^{m_R} \cdot r^{q_R}} \quad (19)$$

где $Ra_{\text{пр}}$ – шероховатость, полученная на предыдущей операции; S – подача; γ – передний угол резца; v – скорость резания; ρ_{kp} – радиус округления главной режущей кромки; r – радиус при вершине резца; $C_R, K_R, Y_R, n_R, Z_R, m_R, q_R$ – коэффициенты, зависящие от конкретных условий обработки.

Преобразуя зависимость (19) в неравенство, получим:

$$\frac{n^{Z_R}}{S^{Y_R}} \leq \frac{C_R \cdot R_{a\text{пр}}^{K_R} \cdot (90 + \gamma)^{n_R} \cdot 1000^{Z_R}}{Ra \cdot (\pi \cdot D)^{Z_R} \cdot \rho_{kp}^{m_R} \cdot r^{q_R}} \quad (20)$$

В математическую модель алмазного точения приведенное неравенство включается после логарифмирования аналогично первому ограничению.

Как уже было сказано, включение в математическую модель технического ограничения по уровню наклёпа поверхностного слоя способствует повышению эксплуатационных свойств деталей машин. При эксплуатации в условиях трения скольжения или знакопеременных нагрузок в подавляющем большинстве случаев стремятся получать поверхностный слой со значительными коэффициентами степени наклёпа K_H , который определяется как отношение поверхностной к исходной микротвёрдости материала:

$$K_H = H_{\text{пов.}} / H_{\text{исх.}} \quad (21)$$

Общий вид зависимости K_H от режимов тонкого точения [8] представлен в формуле (22):

$$K_H = C_H \cdot t^{x_H} \cdot S^{y_H} \cdot V^{z_H} \cdot r^{q_H}, \quad (22)$$

где: t – глубина резания; S – подача; v – скорость резания; r – радиус при вершине резца; C_H, x_H, y_H, z_H, q_H – коэффициенты, учитывающие условия обработки.

Значения коэффициентов и констант в формуле (22) для расчёта параметра K_H приведены в табл. 4.

4. Значения коэффициентов в формуле (22) при обработке резцом из композитов 01 и 10

4. The values of the coefficients in the formula (22) when chiselling with a cutter made of composites 01 and 10

Обрабатываемый материал	C_H	x_H	y_H	z_H	q_H
Сталь 45, 40...44 HRC	1,25	0,027	0,180	-0,041	0,028
Сталь 65Г, 60...64 HRC	1,75	0,029	0,016	-0,040	0,031

После стандартного преобразования получим неравенство, представляющее собой техническое ограничение по наклёпу поверхностного слоя:

$$\frac{n^{z_H}}{s^{y_H}} \leq \frac{C_H \cdot t^{x_H} \cdot r^{q_H} \cdot 1000^{z_H}}{K_H \cdot (\pi \cdot D)^{z_H}}. \quad (23)$$

В случае отсутствия в маршруте обработки конкретной детали термообработки коэффициент C_H следует умножить на 1,08, т. к. в результате действия механизма

наследственности на финишной операции обрабатываемый материал уже будет иметь поверхностную твёрдость, отличную от твёрдости исходной [13].

Работоспособность предложенных математических моделей была протестирована на конкретных примерах оптимизации режимов резания при обработке валов трибосистемы подшипник скольжения.

Результаты тестирования приведены в табл. 5.

5. Результаты тестирования математической модели процесса резания

5. Results of testing the mathematical model of the cutting process

Чистовое точение								Тонкое точение							
Оптимальные режимы								Оптимальные режимы							
Без технического ограничения по микроклимату				С техническим ограничением по микроклимату				Без технического ограничения по наклёпу				С техническим ограничением по наклёпу			
Сталь 45 закалённая		Сталь 65Г закалённая		Сталь 45 закалённая		Сталь 65Г закалённая		Сталь 45 закалённая		Сталь 65Г закалённая		Сталь 45 закалённая		Сталь 65Г закалённая	
S мм/об	v м/мин	S мм/об	v м/мин	S мм/об	v м/мин	S мм/об	v м/мин	S мм/об	v м/мин	S мм/об	v м/мин	S мм/об	v м/мин	S мм/об	v м/мин
0,18	142	0,15	131	0,14	121	0,13	108	0,11	221	0,09	184	0,10	152	0,09	142

Как видно из приведённых результатов, существенной корректировке в сторону уменьшения подвергалась скорость как чистового, так и тонкого точения. Очевидно, что подобного результата следовало ожидать, т. к. технические ограничения по микроклимату рабочих зон и наклёпу поверхностного слоя по своей физической сущности скорость резания делают главным фактором, определяющим обоснованность многокритериальной оптимизации.

Закключение

Предложенный в данной работе подход позволил более широко представить проблему оптимизации режимов механической обработки, затрагивающей сегодня только сферу операционных технологий. Используя в качестве целевой функции (критерия оптимизации) лишь производительность труда, в условиях современного производства представляется

явно недостаточным. Таким подходом мы исключаем технолога, как главной фигуры обрабатывающего производства, от обязанностей и забот как по оздоровлению климата в механических цехах, так и от задач обеспечения надёжности и долговечности выпускаемой продукции. Как показывает практика использования многокритериальных моделей оптимизации, снижение основного времени на чистовых и финишных операциях технологического процесса вполне компенсируется снижением затрат на поддержание приемлемого микроклимата и, в тоже время, обеспечивает достижение заданного ресурса выпускаемой продукции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Качество** машин: справочник: в 2 т. Т. 1. / А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич [и др.]; под общ. ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 1995. 256 с. ISBN 5-217-02707-X.

2. **Старков В.К.** Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве: монография / В.К. Старков. М.: Машиностроение, 1989. 296 с. ISBN 5-217-00833-1.

3. **Суслов А.Г., Дальский А.М.** Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение. 2002. 684 с. ISBN 5-217-03108-5.

4. **Бонди Б.** Основы линейного программирования / Б. Бонди: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. 176 с. ISBN 5-256-00186-8.

5. **Лунгу К. Н.** Линейное программирование. Руководство к решению задач. М.: Физматлит, 2005. 128 с. ISBN 5-9221-0631-7.

6. **Боршова Л.В.** Оптимизация процесса механической обработки деталей сложного профиля: монография / Л.В. Борисова, В.Ф. Пегашник, М.В. Миронова. Нижний Тагил: НТИ УрФУ, 2019. 150 с. ISBN 978-5-9544-0099-1.

7. **Тотай А.В., Зяблова Е.С., Кареев Р.Р., Лексина Я.И.** Оптимизация микроклимата рабочих зон металлорежущих станков // Научный аспект. Самара, 2020. Т.6. С. 817–827

8. **Muller-Hummel, Lahres M.** Temperature measurement on diamond-coated tools during machining // Ind. Diam. Rev. 1995. 55, №2.

9. **Тотай А.В.** Технологическое обеспечение физико-химических свойств поверхностного слоя деталей машин / Научно-технические технологии в машиностроении. 2012. № 9. С. 8–11.

10. **Инженерия поверхности деталей** / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение. 2008. 320 с. ISBN 978-5-217-03427-7.

11. **Алехин В.П., Алехин О.В.** Физические закономерности деформации поверхностных слоёв материалов монография / В.П. Алехин, О.В. Алехин; М-во здравоохранения и науки Российской Федерации, Московский гос. индустриальный ун-т. М.: Изд-во МГИУ, 2011. 455 с. ISBN 978-5-2760-1914-7.

12. **Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений** / А.Г. Суслов, В.П. Федоров, О.А. Горленко [и др.]; под общ. ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение. 2006. 447 с. ISBN 5-217-03308-8.

13. **Totay A.V.** Integral criterion of the state of physical parameters of the surface layer of machine parts / A.V. Totay, M.N. Nagorkin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2021. Vol. 1061. 012040. doi: 10.188/1757 899X/1061/1/01204.

REFERENCES

1. Machine Quality: reference book. In 2 Vol., Vol. 1 / A.G. Suslov, E.D. Brown, N.A. Vitkevich et al. Moscow: Mashinostroenie, 1995, 256 p. ISBN 5-217-02707-X.

2. Starkov V.K. Cutting processing. Stability and quality management in automated production: monograph / V.K. Starkov. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 296 p. ISBN 5-217-00833-1.

3. Suslov A.G. Dalsky A.M. Scientific foundations of engineering technology. Moscow: Mashinostroenie, 2002, 684 p. ISBN 5-217-03108-5.

4. Bondi B. The main programs of linear software/ B. Bondi: trans. from Engl. Moscow: Radio and Communications, 1989., 176 p. ISBN 5-256-00186-8.

5. Lungu K. N. Linear programming. A guide to solving problems. Moscow: Fizmatlit, 2005, 128 p. ISBN 5-9221-0631-7.

6. Borshova L.V. Optimization of mechanical processing process of parts with complex profile: monograph / L.V. Borisova, V.F. Pegashnik, M.V. Mironova. Nizhny Tagil: NITI UrFU, 2019. 150 p. ISBN 978-5-9544-0099-1.

7. Totai A.V., Zyablova E.S., Kareev R.R., Leksina Ya.I. Optimization of microclimate of working zones of metal-cutting machines // Scientific aspect. Samara, 2020, vol.6, pp. 817–827.

8. Muller-Hummel, Lahres M. Temperature measurement on diamond-coated tools during machining // Ind. Diam. Rev. 1995. 55, № 2.

9. Totai A.V. Engineering support of physico-chemical properties of the surface layer of machine parts / Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2012, No. 9. pp. 8–11.

10. Part surface engineering / Composite authors; edited by A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2008, 320 p. ISBN 978-5-217-03427-11

11. Alekhin V.P., Alekhin O.V. Physical patterns of deformation of surface layers of materials monograph / V.P. Alekhin, O.V. Alekhin; Ministry of Health and Science of the Russian Federation, Moscow State. industrial university M.: Publishing house MGIU, 2011. 455 p. ISBN 978-5-2760-1914-7.

12. Engineering support and improvement of operational properties of parts and their joints/ A.G. Suslov, V.P. Fedorov, O.A. Gorlenko [et al.]; under the general editorship of A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2006, 447 p. ISBN 5-217-03308-8.

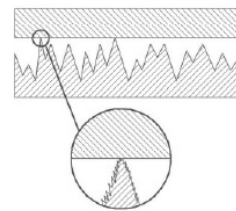
13. Totay A.V. Integral criterion of the state of physical parameters of the surface layer of machine parts / A.V. Totay, M.N. Nagorkin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2021. Vol. 1061. 012040. doi: 10.188/1757 899X/1061/1/0120

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 07.07.2023; одобрена после рецензирования 17.07.2023; принята к публикации 24.07.2023.

The article was submitted 07.07.2023; approved after reviewing 17.07.2023; assepted for publication 24.07.2023.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 11 (149). С. 39-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 11 (149). P. 39-48.

Научная статья
УДК 62-1/-9/621.2.082.18
doi: 10.30987/2223-4608-2023-39-48

Условия и режимы обработки технологического процесса маслонаполнения полимерных деталей

Владимир Сергеевич Бычковский, аспирант
Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия
bikovskii_vs@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5507-2798>

Аннотация. На железнодорожном транспорте применяется большое количество полимерных деталей, работающих в сложных условиях, испытывающих на себе недопустимый износ из-за работы в открытых узлах трения с присутствием запылённости и загрязнения без какой-либо жидкостной смазки. Существующие технологии, решающие эту проблему, применяются только при изготовлении самого материала детали, которые влекут за собой изменение эксплуатационных свойств всей детали, но нет технологии, которая будет изменять эксплуатационные свойства только поверхностного слоя. Для решения данной проблемы разрабатывается новый технологический процесс повышения эксплуатационных характеристик готовых полимерных деталей. Данная технология заключается в наполнении масляной смесью их поверхностного слоя на заданную глубину большего допустимого износа. Одним из самых важных этапов разработки данного технологического процесса является определение различных условий и режимов обработки, необходимых для обеспечения параметров технологического процесса. Для решения этой цели в работе сформирована целевая функция двух параметров. В данной работе определены критерии оценивания параметров технологического процесса маслonaполнения. Для определения границ параметров целевой функции выполнены аналитические расчеты и экспериментальные исследования по определению температурных границ применения смеси для наполнения, исходя из температуры ее кипения и испарения гексана из нее. Благодаря определенным начальным и граничным условиям определены рекомендованные режимы для выполнения технологического процесса маслonaполнения. Итогом работы стало определение конкретных границ целевой функции двух параметров и порядок этапов проведения технологического процесса, что позволяет обеспечить его стабильность и производительность.

Ключевые слова: маслonaполнение, технологический процесс, режимы обработки, начальные условия, граничные условия, целевая функция

Для цитирования: Бычковский В.С. Условия и режимы обработки технологического процесса маслonaполнения полимерных деталей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 11 (149). С. 39-48.
doi: 10.30987/2223-4608-2023-39-48

Conditions and operating modes of the procedure specification of polymer parts oil-filling process

Vladimir S. Bychkovsky, Ph.D. student
Irkutsk State University of Railway Communication, Irkutsk, Russia
bikovskii_vs@mail.ru

Abstract. A large number of polymer parts, used in railway transport, operating in difficult conditions, significantly wear off caused by conditions in open friction units, having dust loading and other contamination without any liquid lubrication. Existing technologies, used for solving this problem, aimed at making just the material of the part, which

results in a change in the operational properties of the whole part, but there is no technology that will be useful in changing the operational properties of the surface layer itself. In order for a decision to be adopted on, a new procedure specification is being developed to improve the performance characteristics of ready-made polymer parts. This technology consists in filling their surface layer with an oil mixture to a given depth of approved wear. One of the most important stages in the development of this technological process is the determination of various conditions and operating modes necessary to ensure the parameters of this operating procedure. For that purpose, the objective function of two parameters is formed in the work. In this paper, the criteria for evaluating the parameters of the specification procedure of oil filling are determined. The analytical calculations and experimental studies are performed for the boundary delimitation of the parameters and temperature limits for the application of the filling mixture based on the temperature of its boiling and evaporation of hexane. Due to certain initial and boundary conditions, the recommended operating modes for performing the specification procedure of oil filling are determined. The result of the work was the determination of the specific boundaries of the objective function of two parameters and the order of the stages of the procedure, which allows ensuring its stability and performance.

Keywords: oil filling, specification procedure, operating modes, initial conditions, boundary conditions, objective function

For citation: Bychkovsky V.S. Conditions and operating modes of the procedure specification of polymer parts oil-filling process / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 11 (149). P. 39–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-39-48

Введение

В машиностроение присутствуют узлы трения с полимерными деталями, работающими в условиях обеднённой или безжидкостной смазки. Данные детали под нагрузкой испытывают значительный износ. Примерами таких деталей могут быть втулки, вкладыши, проставки, прокладки и т. д. Подобные детали, работающие в таких условиях, присутствуют в тележках грузовых или пассажирских вагонов на железной дороге. Существующие технологии, повышающие ресурс полимерных деталей, производятся только при изготовлении самого материала, при этом меняются эксплуатационные свойства всей детали.

Увеличение износостойкости (за счет добавления в расплав полимера масла, графита и т. п.), влечет за собой повышение пластичности полимера, а комбинированное решение по добавлению (например, масла и углеволокна) для увеличения жесткости и уменьшения износа, усложняет технологии по их механической обработке [1]. Исходя из этого, возникает необходимость в разработке технологии, которая позволит повысить эксплуатационные свойства только поверхностного слоя, не изменяя свойства всей детали.

Для решения данной проблемы, основываясь на том, что полимеры способны впитывать в себя влагу, например, для полиамида до 10 % [2], и согласно уже существующим технологиям пропитки полимеров для целей:

понижения износа в узлах трения, увеличения жесткости при механической обработке, наполнения краской пористой резины по Flash-технологии для штампов отливок на бумажных документах [3, 4], возникает возможность в разработке технологии наполнения маслом готовых полимерных деталей на заданную глубину, которая будет выше допустимого износа.

Данный процесс позволит повысить качество поверхностного слоя за счет уменьшения износа, не изменяя эксплуатационные свойства всей детали, работающей в условиях отсутствия внешней жидкостной или какой-либо смазки. Данная технология обеспечит повышение срока межремонтного обслуживания и долговечность машины, имеющие в себе узлы сухого трения или в случаях долгого простоя закрытых узлов с жидкостной смазкой, в которых присутствуют полимерные или композиционные детали. Но для того, чтобы разработать данный технологический процесс наполнения полимерных деталей, необходимо определить его начальные и граничные условия, а также его режимы, необходимые для обеспечения его параметров таких как: стабильность, производительность и качество [5].

Материалы и методы

Для обеспечения установленных параметров технологического процесса необходимо сформировать целевую функцию и определить критерии, по которым они будут

оцениваться [6]. Необходимо учесть, что критерий оценивания должен соответствовать следующим требованиям: иметь определенный физический смысл, иметь численное выражение, быть максимальным или минимальным для советующего параметра. Итак, критерии оценивания и их обеспечивающие факторы параметров технологического процесса:

- критерием оценивания стабильности является минимальное отклонение результатов скорости пропитки и повышение эксплуатационных характеристик поверхностного слоя при одних и тех режимах должно обеспечиваться начальными и граничными условиями, а также выполнение кондиционирования детали, согласно ГОСТ 12423-2013, перед проведением технологического процесса;

- критерием оценивания производительности является скорость пропитки, обеспечиваемая оптимальными параметрами технологического процесса;

- критерием оценивания качества готовой детали является повышение ее эксплуатационных характеристик, обеспечивается также оптимальными режимами проведения процесса маслonaполнения.

Как было выяснено для повышения производительности и качества готовой детали необходимо определить оптимальные режимы. Согласно проведенному литературному исследованию, найден технологический процесс, разработанный авторами [7], заключающийся в термовакуумном наполнении полиамидных образцов моторным маслом М8-В с добавлением в наполнитель гексана с целью повышения скорости и глубины пропитки за счет понижения его вязкости. Данные исследования были взяты за основу разработки нового технологического процесса маслonaполнения полимерных деталей.

В данной работе авторы применяли термовакуумную сушку полиамидных образцов с целью избавления от влаги в теле полимера, эти действия необходимы для освобождения места под заполнение масляной смесью в открытые поры. Исходя из этого, для повышения эффективности пропитки полимера смесью, было принято использовать электротермический способ нагрева в поле высокой частоты, заключающийся в размещении детали между двумя пластинами, имитирующими

конденсатор, в котором под действием переменного поля высокой частоты происходит нагрев диэлектрического материала средней и высокой полярности. Для этой задачи была рассмотрена технология электротермической сушки полимерных и композиционных материалов, в котором определение достижения сухого состояния осуществлялся за счет контроля анодного тока [8]. Согласно этому исследованию, для операции технологического процесса сушки технологическим режимом будет являться величина анодного тока.

Так как после выполнения операции сушки происходит само наполнение, то важно учесть, что полимерная деталь будет находиться в горячем состоянии, а полного охлаждения допустить нельзя из-за факта гигроскопичности полимеров, исходя из этого, необходимо учесть при какой температуре будет производиться пропитка при подаче наполнителя или погружение полимерной детали в наполнитель. Как было рассмотрено ранее, исходя из понижения вязкости масляного наполнителя режимами самой операции маслonaполнения будет являться: процентное содержание гексана (вязкость) и температура полимерного образца.

Исходя из проведенного анализа, стало необходимо формирование целевой функции для достижения повышения производительности или же достижения повышения качества. Так как оба эти параметра зависят от одних и тех же режимов обработки и стремятся к максимуму, целевая функция, состоявшая из двух параметров, составлена на примере скорости пропитки по достижении кратчайшего времени пропитки на заданную глубину полимерной детали (1):

$$u(T, \mu) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где u – скорость пропитки, мм/с; T – температура полимерной детали °С; μ – вязкость наполнителя, Па·с.

Для выполнения данной целевой функции необходимо определение начальных граничных условий ее параметров. Для этой цели принято предварительное ограничение для вязкости:

$$\mu_{\text{гекс}} < \mu < \mu_{\text{масла}} \quad (2)$$

где μ – вязкость гексана и масла соответственно, Па·с.

Для определения начальных температурных пределов необходимо определить начальные и граничные условия. Данные условия также обеспечивают стабильность технологического процесса и будут зависеть от температуры окружающей среды, а также вследствие присутствия гексана в смеси ввиду факта его выхода из нее из-за низкой температуры кипения по сравнению с маслом М8-В, можно делать вывод, что начальной температурной границей целевой функции будет являться температура, соответствующая нормальным условиям, а конечная температура – началом испарения гексана из смеси:

$$T_{\text{норм.}} < T < T_{\text{исп.}}, \quad (3)$$

где T – температура полиамидной детали, соответствующая нормальным условиям и допустимой температуре до испарения гексана.

Результаты исследований

Дальнейшим действием стало определение итоговых границ параметров целевой функции. В целях определения конкретных границ параметров целевой функции определены начальные условия технологического процесса маслonaполнения, которые соответствуют нормальным условиям, согласно ГОСТ 8.395-80: температура $25 \pm 2,0$ °С; давление $750 \pm 5,0$ мм рт. ст.; влажность 55 ± 10 %.

Далее стало необходимо определение граничных условий проведения процесса маслonaполнения. Определенные граничные условия определены, исходя из решения добавления гексана в масло. Поэтому первым этапом для их определения выяснено, при каких критических температурах можно проводить процесс маслonaполнения, для этого проведен расчет температуры кипения масляного наполнителя.

Для проведения расчетов было принято решение взять три основных пропорции гексана с маслом, представленных в табл. 1 в первом столбце. Само выполнение расчета основывалось на законе Рауля, при смешивании двух материалов, в котором один –

растворитель, другой – растворяемое вещество, происходит процесс разбавления. Исходя из этого закона, температура кипения смеси понижается относительно температуры кипения масла. Поэтому важно знать при какой температуре для отдельной концентрации это происходит.

В данном случае гексан (C_6H_{14}) является растворителем, а моторное масло М8-В растворяемым веществом.

Температура кипения раствора определяется по формуле:

$$T_{\text{кип.}} = T_{\text{кип.а}} + \Delta T_{\text{кип.}}, \quad (4)$$

где $T_{\text{кип.а}}$ – температура кипения растворителя, 68 °С; $\Delta T_{\text{кип.}}$ – повышение температуры кипения раствора.

Повышение температуры кипения определяется (5):

$$\Delta T_{\text{кип.}} = K_3 \cdot \frac{m_b \cdot 1000}{m_a \cdot \mu_b}, \quad (5)$$

где K_3 – эбуллиоскопический коэффициент; m_b – масса растворимого вещества, кг; m_a – масса растворителя, кг; μ_b – молярная масса растворимого вещества, г/моль.

Эбуллиоскопический коэффициент рассчитывается по формуле (6):

$$K_3 = \frac{R \cdot T_a^2 \cdot \mu_a}{\Delta H_{va}}, \quad (6)$$

где R – универсальная газовая постоянная, 8,31 Дж·К⁻¹·моль⁻¹; T_a – температура кипения растворителя, 68 °С; μ_a – молярная масса растворителя, г/моль; ΔH_{va} – молярная энтальпия парообразования растворителя, 3000 Дж/моль.

Далее определена молярная масса растворимого вещества по формуле (7):

$$\mu_b = \rho_b \cdot V_m, \quad (7)$$

где ρ – плотность вещества, 0,886 кг/л; V_m – молярный объем газов, 22,4 л/моль.

Далее определяется масса веществ: моторного масла и гексана:

$$m_b = \rho_b \cdot V_b, \quad (8)$$

где ρ – плотность вещества, 8,86 кг/м³;
 V_b – объем вещества, л.

Для расчета массы гексана используется формула:

$$m_a = M_a \cdot n, \quad (9)$$

где M_a – молярная масса вещества: гексан 86,17 г/моль, масла 19,84 г/моль; n – количество вещества, моль.

Для нахождения количества вещества необходима формула

$$n = \frac{V_b}{V_m}. \quad (10)$$

Итоги по определению температуры кипения представлены в табл. 1 и в виде графических данных на рис. 1.

1. Результаты расчета предельных граничных условий – температуры кипения смеси гексана и масла

1. Results of calculation of the limiting boundary conditions – the boiling point of a mixture of hexane and oil

Содержание гексана, %	Масса гексана, кг	Масса масла, кг	Количество вещества (гексана), моль	Повышение температуры кипения, °C	Температура кипения масляного наполнителя, °C
20	0,0154	0,014	0,00017	65	133
40	0,03	0,011	0,00035	47	115
60	0,046	0,007	0,00053	21	89

Примечание: температура кипения моторного масла М8-В 270 °C; температурный предел эксплуатации 20...170 °C.

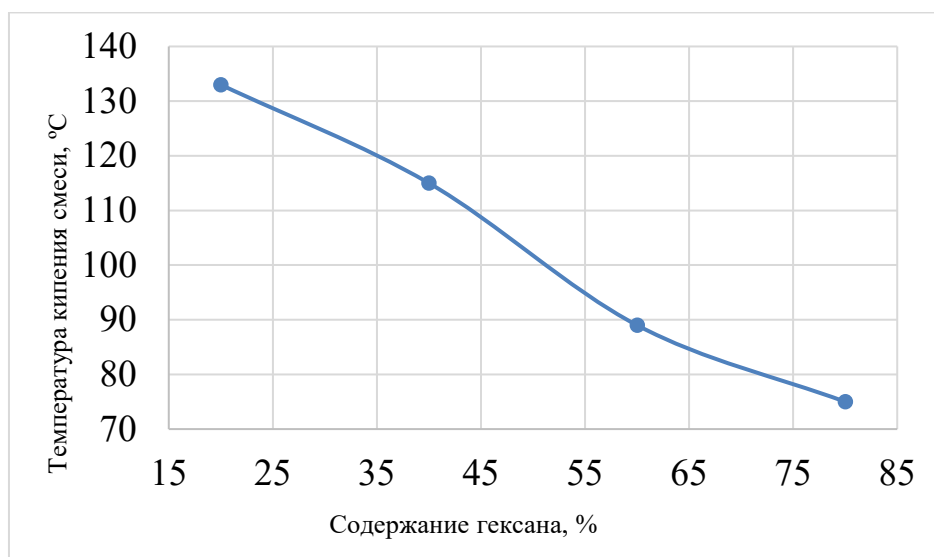


Рис. 1. Зависимость изменения температуры кипения от концентрации смеси

Fig. 1. Dependence of the boiling point change on the concentration of the mixture

Из полученных результатов видно значительное уменьшение температуры кипения смеси гексана и масла по сравнению с температурой кипения чистого масла, 190 °С. Полученные результаты указывают на критические температурные граничные условия превышения, которых нельзя допускать. Исходя из этого, необходимо определить рекомендуемые граничные условия, которые определяются исходя из условий испарения гексана из наполнителя, превышение которых может привести к снижению эффективности пропитки: снижению стабильности и производительности технологического процесса.

Для решения этой задачи проведен эксперимент по определению рекомендуемых граничных условий – определение

температуры начала испарения гексана из смеси с маслом для различных пропорций. Для данного исследования разработан нагревательный стенд (рис. 2), состоящий из нагревательного элемента 1, ванны 2, расположенного на нем с прозрачной крышкой 4, необходимой для определения процесса испарения гексана из смеси, путем образования капель на ней. Контроль температуры смеси и нагревательного элемента производится по термопарам. Поддержание заданной температуры нагревательного элемента производится с помощью твердотельного реле и регулятором нагрева. Для проведения эксперимента написана управляющая программа, загруженная в управляющую плату.

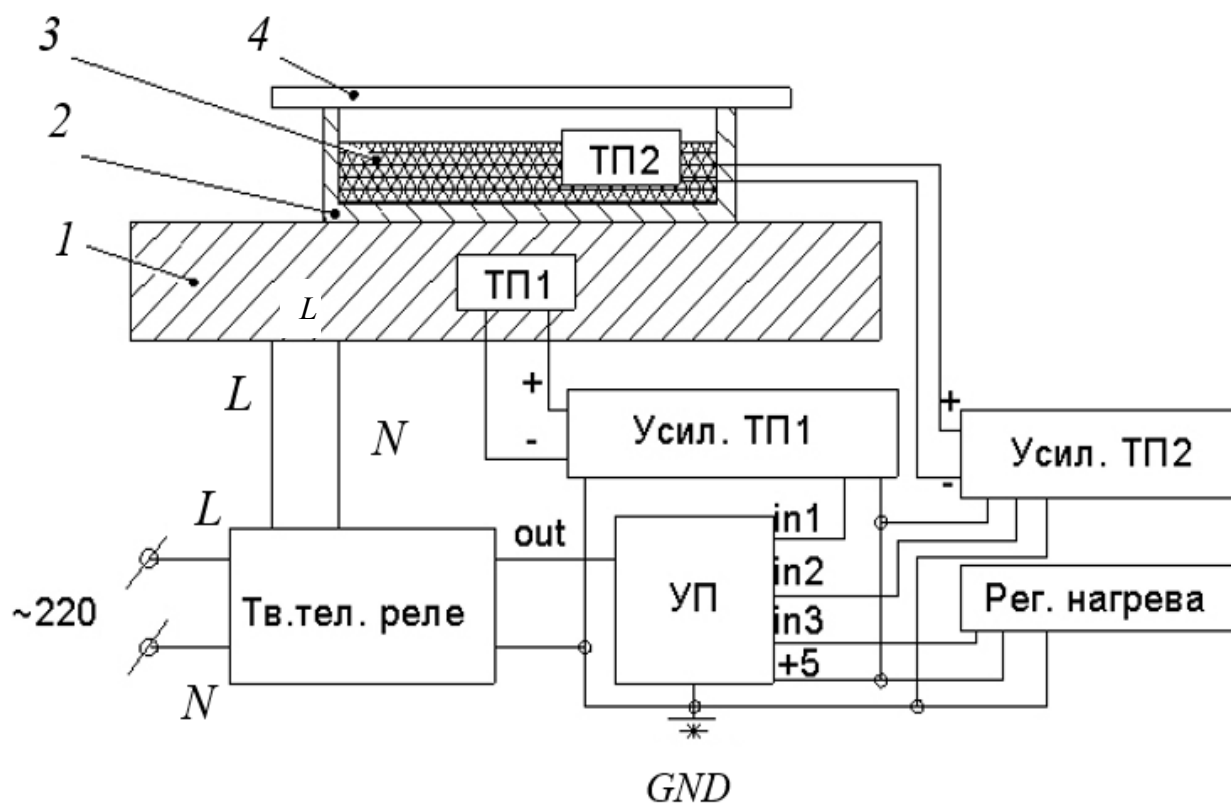


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 – нагревательный элемент; 2 – ванна; 3 – наполнитель; 4 – крышка для конденсата; ТП1, ТП2 – первая и вторая термопара; Усил. ТП1, Усил. ТП2 – усилитель первой и второй термопары; УП – управляющая плата; L, N – фаза и ноль сети 220 вольт; GND – заземление; Тв. тел. реле – твердотельное реле; Рег. нагрева – регулятор нагрева

Fig. 2. Scheme of the test installation:

1 – heating element; 2 – bath; 3 – filler; 4 – condensate cap; TP1, TP2 – first and second thermocouple; Ampl. TP1, Ampl. TP2 – amplifier of the first and second thermocouple; DB – drive board; L, N – phase and zero of the 220 volt network; GND – grounding; Solid-state relay – solid relay; Heating Reg. – heating regulator

Результаты проведенного эксперимента определения начала испарения гексана для

различных пропорций представлены в табл. 2 и на рис. 3.

2. Результаты эксперимента определения рекомендованных граничных условий – температуры испарения гексана из масляного наполнителя

2. The results of the experiment for determining the recommended boundary conditions – the temperature of hexane evaporation from the oil filler

Гексан, %	Масло, %	Гексан, мл	Масло, мл	Температура, °C
20	80	4,0	16	91
40	60	8,0	12	78
60	40	12	8,0	52

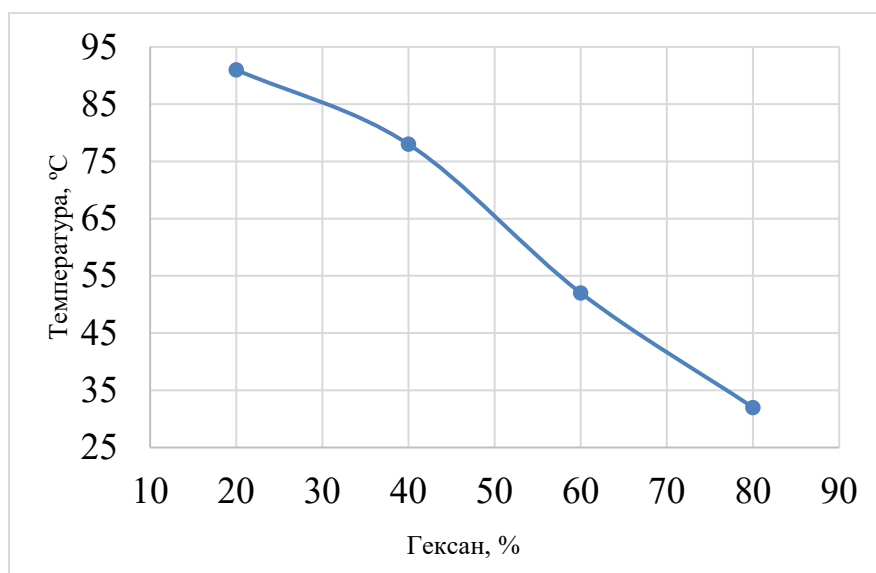


Рис. 3. График зависимости температуры испарения от содержания гексана в масле

Fig. 3. Graph of the dependence of the evaporation temperature on the hexane content in the oil

Согласно полученным данным выяснено, что для содержания гексана 20 % рекомендованная температура не выше 91 °C, а для 60 % – температура 52 °C. Данные температурные границы гарантируют обеспечение стабильности выполнения технологического процесса. Также видна схожая закономерность падения температуры как для зависимости испарения, так и зависимости кипения наполнителя от процентного содержания гексана.

Исходя из полученных результатов, следующим этапом исследования стала задача определить какие необходимо назначать режимы технологического процесса

маслонаполнения. Согласно выявленному ранее, режимами технологического процесса будут являться: для операции сушки – величина анодного тока; для проведения операции наполнения – процентное содержание гексана и температура полимерной детали. Так как уже определены значения процентного содержания гексана согласно табл. 1 и табл. 2. Далее необходимо назначить рекомендованные температуры полимерной детали, исходя из граничных условий по кипению смеси и испарению гексана из масла.

Итогом рекомендованных режимов технологического процесса маслонаполнения является следующее:

- 20 %, 40 %, 60 %, температура – 35 °С;
- 20 %, 40 %, 60 %, температура – 50 °С;
- 20 %, 40 %, температура – 75 °С.

Также стоит указать, что еще одним важным режимом технологического процесса будет время пропитки, исходя из определённой скорости наполнения для каждого конкретного полимерного материала. Данное значение режима необходимо для достижения глубины пропитки, которая должна быть больше допустимого износа полимерной детали. Определение скорости пропитки возможно определять экспериментально или с применением математической модели маслonaполнения.

Сформированные режимы технологического процесса: анодный ток; пропорции

смеси; температура детали; время пропитки; подбор данных режимов направлены на повышение стабильности и производительности процесса, а также повышение качества поверхностного слоя полимерной детали.

Обсуждение результатов исследования

Проведенные исследования позволили сформировать целевую функцию и определить конкретные границы параметров целевой функции технологического процесса. Согласно определенным условиям и рекомендованным режимам данные границы параметров целевой функции будут иметь вид (11):

$$35\text{ °C} < T < 75\text{ °C}; \mu_{\text{Гекс.20 \%}} < \mu < \mu_{\text{Гекс.60 \%}}, \quad (11)$$

где $\mu_{\text{Гекс.20 \%}}$, $\mu_{\text{Гекс.60 \%}}$ — вязкость наполнителя при содержании гексана в нем при 20 % и 60 % соответственно.

Исходя из проведённых исследований можно сформировать предварительный порядок этапов проведения технологического процесса маслonaполнения: кондиционирование детали; подготовка смеси с необходимым процентным содержанием гексана в масле; ВЧ-сушка, контроль анодного тока; охлаждение детали до температуры советующей пропорции смеси; погружение детали в масляный наполнитель или подача масляного наполнителя; контроль достижения наполнения на заданную глубину проникновения [9, 10].

Заключение

Результатом проведенных исследований стала разработка и определение научных подходов разработки технологического процесса маслonaполнения, путем выполнения аналитических расчетов и проведения экспериментов, что позволило определить начальные и граничные условия, а также рекомендованные режимы, благодаря которым сформирован предварительный порядок этапов проведения технологического процесса.

Также сформированная целевая функция и определённые границы ее параметров позволяют определить режимы, наиболее

благоприятно сказывающие на параметрах технологического процесса: производительность и качество, достижение наибольшей скорости пропитки и достижение наибольшего повышения износостойкости готовой полимерной детали [11].

Благодаря данной целевой функции появляется возможность в проведении исследования оптимальных режимов технологического процесса, которые дадут наилучший результат по проникновению наполнителя за кратчайшее время на заданную глубину тела не менее чем на допустимую величину износа полиамидной детали.

Результаты проведенной работы направлены на обеспечение повышения стабильности и производительности технологического процесса, а также повышение качества готовой полимерной продукции, что позволит повысить межремонтный ресурс и долговечность деталей, применяемых на железной дороге в частности, так и в машиностроении в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бычковский В.С., Филиппенко Н.Г. Попов С.И., Попов А.С. Термовакuumное нанесение самосмазывающихся покрытий полимерных материалов узлов трения машин и механизмов транспортного машиностроения // Современные технологии.

Системный анализ. Моделирование. 2018. № 2 (58). С. 58–64.

2. **Butorin D.V., Filippenko N.G., Livshits A.V., Popov S.I.** Analysis of failures of bearings of axle box unit with polyamide cages and prospects of increasing their service life // Article Scopus. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019. 2020. P. 1001–1010.

3. **Буторин, Д.В., Чуклай И.В., Филиппенко Н.Г.** Технология маслonaполнения полимерных и композитных антифрикционных материалов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Седьмой международной научно-практической конференции, посвященной 355-летию со дня основания города Иркутска, 29 марта – 01 апреля 2016 г. Иркутск: в 2 т., Т.2. Иркутск: ИрГУПС, 2016. С. 490–495.

4. **Ярославцев В.М.** Высокоэффективные технологии обработки изделий из композиционных материалов // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование» МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 4. С. 1–24.

5. **Шахрай С.Г., Ржечицкий Э.П., Горовой В.О.** Исследование параметров технологических процессов и анализ производительности оборудования // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 3 (51). С. 84–88.

6. **Тлустенко С.Ф., Коптев А.Н.** Методология оптимизации целевых функций технологических систем производства летательных аппаратов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. № 6, Т. 22. С. 36–42.

7. **Буторин Д.В., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В., Егоров А.И., Грамаков Д.С.** Технология жидкофазного наполнения полимеров и композитов на их основе моторными маслами Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2017. Т. 2. С. 422–431.

8. **Филиппенко Н.Г.** Автоматизированная система управления процессом высокочастотной обработки полимерных материалов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 1 (33). С. 101–107.

9. **Бычковский В.С., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В., Баканин Д.В., Фарзалиев Э.Ф.** Автоматизированный способ контроля наполнения маслом полимерных и композиционных материалов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68. № 4 (45). С. 9–16.

10. **Bychkovsky V., Butorin D., Bakanin D., Filippenko N., Kuraitis A., Larchenko A.** Contact method of volume control of temperature of a polymer sample at high-frequency heating. // Article Scopus. Journal of physics: conference series. International scientific conference energy management of municipal facilities and sustainable energy technologies. 2020. P. 123–158.

11. **Бычковский В.С., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В., Баканин Д.В., Фарзалиев Э.Ф.О.** Сравнительный анализ физико-эксплуатационных характеристик полимерных образцов, наполненных маслом // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. № 2 (47). Т. 69. С. 91–96.

REFERENCES

1. Bychkovsky V.S., Filippenko N.G. Popov S.I., Popov A.S. Thermal vacuum deposition of a self-lubricating coating of polymeric materials of friction units of machines and mechanisms of transport engineering. Sovremennye tekhnologii. Sistemniy analiz. Modelirovanie. 2018, Vol. 58, No. 2, pp. 58–64.

2. Butorin D.V., Filippenko N.G., Livshits A.V., Popov S.I. Analysis of failures of bearings of axle box unit with polyamide cages and pro-spects of increasing their service life // Article Scopus. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019. 2020. P. 1001–1010.

3. Butorin, D.V., Chuklay I.V., Filippenko N.G. Technology of oil filling of polymer and composite anti-friction materials // Transport infrastructure of the Siberian region: proceedings of the 7-th International Scientific and Practical Conference dedicated to the 355th anniversary of the founding of the city of Irkutsk, March 29 – April 01, 2016 Irkutsk: in 2 vols., vol.2, Irkutsk: IrGUPS, 2016, pp. 490–495.

4. Yaroslavtsev V.M. Highly efficient technologies for machining of products made of composite materials: textbook. Electronic scientific and technical publication "Science and Education" Moscow: Publ. house of MSTU named after N.E. Bauman, 2012, No. 4, pp. 1–24.

5. Shakh-ray S.G., Rzechitsky E.P., Gorovoy V.O. Study of parameters of technological processes, and equipment performance evaluation. // Sovremennye tekhnologii. Sistemniy analiz. Modelirovanie. 2016, No. 3 (51), pp. 84–88.

6. Tlustenko S.F., Koptev A.N. Methodology of optimization of target functions of technological systems for production of aircraft // Izvestia of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2020, No. 6, vol. 22, pp. 36–42.

7. Butorin D.V., Filippenko N.G., Livshits A.V., Egorov A.I., Gramakov D.S. Technology of liquid-phase filling of polymers and composites with motor oils. Transport infrastructure of the Siberian region. 2017, Vol. 2. pp. 422–431.

8. Filippenko N.G. Automated control system of polymeric materials high-frequency processing. // Sovremennye tekhnologii. Sistemniy analiz. Modelirovanie. 2012, No. 1 (33), pp. 101–107.

9. Bychkovsky V.S., Filippenko N.G., Livshits A.V., Bakanin D.V., Farzaliev E.F. Automated method of oil filling control of polymer and composite materials // Electrotechnologies and electrical equipment in the agro-industrial complexes, 2021, vol. 68, No. 4 (45), pp. 9–16.

10. Bychkovsky V., Butorin D., Bakanin D., Filippenko N. Kuraitis A., Larchenko A. Con-tact method

of volume control of temperature of a polymer sample at high-frequency heating. // Article Scopus. Journal of physics: conference series. International scientific conference energy management of municipal facilities and sustainable energy technologies. 2020. P. 123–158.

11. Bychkovsky V.S., Filippenko N.G., Livshits A.V., Bakanin D.V., Farzaliev E F.O. Comparative analysis of physical and operational characteristics of polymer samples filled with oil // Electrotechnologies and electrical equipment in the agro-industrial complexes. 2022, No. 2 (47). vol. 69, pp. 91–96.

Статья поступила в редакцию 29.07.2023; одобрена после рецензирования 04.08.2023; принята к публикации 11.08.2023

The article was submitted 29.07.2023; approved after reviewing 04.08.2023; assepted for publication 11.08.2023

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 17.11.2023. Выход в свет 30.11.2023.

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+