

# НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

9 (159)

2024

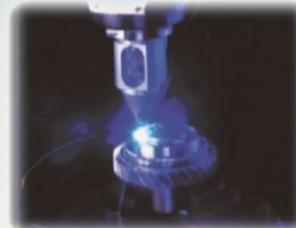
ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ  
И КОМБИНИРОВАННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ



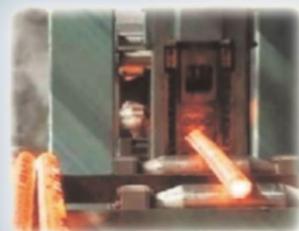
НАНОТЕХНОЛОГИИ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ



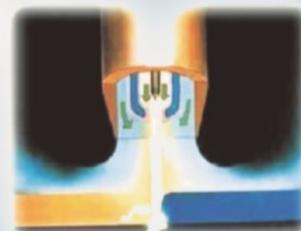
ЛАЗЕРНЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ



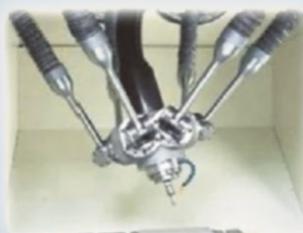
ТЕХНОЛОГИИ  
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ



НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ  
ПРОИЗВОДСТВЕ



НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В СВАРОЧНОМ  
ПРОИЗВОДСТВЕ



ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ  
ЗАГОТОВОК НА СТАНКАХ С ЧПУ  
И ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ

# НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

**№ 9 (159)**

**2024**

Издается с июля 2011 г.

**ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ**

**Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей**

## Главный редактор

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

## Зам. главного редактора

д.т.н., доц. ШАЛЫГИН М.Г. (г. Брянск)

## Председатель редакционного совета

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

## Зам. председателя редакционного совета

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

## Редакционный совет:

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

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

д.н., доктор инженер ВАЛЬДЕНМАЙЕР Т.

(г. Штутгарт, Германия)

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

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

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

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

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

д.т.н., проф. ЛАРИН С.Н. (г. Тула)

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

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

д.т.н., проф. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

DOI:10.30987/issn.2223-4608

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

Подписной индекс: **Э79195**.

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

E-mail: editntm@yandex.ru

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Системно-синергетический  
анализ и синтез управляемого процесса резания . . . . . 3

### ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Извеков А.А., Смоленцев В.П., Кириллов О.Н. Пути  
совершенствования качества наукоемких изделий  
комбинированными методами . . . . . 14

### НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ СБОРКЕ МАШИН

Бочкарев П.Ю. Развитие теории и принципов планирования  
многономенклатурных технологических процессов  
механообработки и сборки . . . . . 25

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИХ СОЕДИНЕНИЙ

Васильев В.А., Александрова С.В. Управление качеством  
наукоемких процессов. . . . . 33

### АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА

Григорьянц А.Г. Получение композиционных материалов  
при аддитивном производстве . . . . . 42

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

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

# SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

**№ 9 (159)**

**2024**

**Publishes from July 2011**

**MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL**

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

**Editor-in-chief**

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

**Deputy chief editor**

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

**Chairman of Editorial Committee**

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

**Chairman Assistant**

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

**Editorial Committee:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

DOI:10.30987/issn.2223-4608

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

Subscription index: **379195**.

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

E-mail: editntm@yandex.ru

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

**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

**Zakovorotny V.L., Gwindzhilia V.E.** System-synergetic analysis and synthesis  
of a controlled cutting process . . . . . 3

### TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

**Izvekov A.A., Smolentsev V.P., Kirillov O.N.** Ways of quality improvement  
for high-tech products by combined methods . . . . . 14

### SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MACHINE ASSEMBLY

**Bochkarev P.Yu.** Development of the theory and principles for planning  
multiproduct manufacturing activity of machining and assembly . . . . . 25

### TECHNOLOGICAL SUPPORT OF OPERATIONAL PROPERTIES OF MACHINE PARTS AND THEIR CONNECTIONS

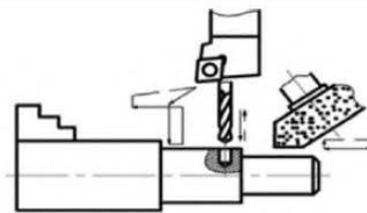
**Vasiliev V.A., Alexandrova S.V.** Quality management of knowledge-based  
processes . . . . . 33

### ADDITIVE TECHNOLOGIES AND LASER PROCESSING

**Grigoryants A.G.** Production of composite materials in additive  
manufacturing . . . . . 42

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

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



Научная статья

УДК 621.9:531.3

doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-13

### Системно-синергетический анализ и синтез управляемого процесса резания

Вилор Лаврентьевич Заковоротный<sup>1</sup>, д.т.н.

Валерия Енвериевна Гвинджилия<sup>2</sup>, к.т.н.

<sup>1,2</sup> Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>1</sup> [vzakovorotny@dstu.edu.ru](mailto:vzakovorotny@dstu.edu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2187-9897>

<sup>2</sup> [vvgvindjiliya@donstu.ru](mailto:vvgvindjiliya@donstu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>

**Аннотация.** В настоящее время достигнуты выдающиеся успехи в создании станков с системами ЧПУ ЭВМ. Они обеспечивают с высокой точностью соответствие программы и траекторий исполнительных элементов. Однако обеспечить изготовление деталей с такой же точностью удастся лишь в исключительных случаях. Это связано с тем, что при изготовлении деталей необходимо рассматривать всю управляемую динамическую систему резания, в которой качество детали является результатом различных физических взаимодействий в процессе обработки. В отличие от известных исследований и разработок в статье уровень моделирования опирается на системно-синергетическое представление, включающее процедуру расширения – сжатия пространства состояния. Система учитывает упругие деформации ее элементов, эволюционные изменения их свойств, неуправляемые возмущения, раскрывает физические взаимодействия. Это сложная система, отдельные координаты состояния которой, во-первых, зависят от программируемых траекторий, во-вторых, они характеризуются внутренними связями и самоорганизацией, в-третьих, они влияют на выходные свойства резания. Выходные свойства включают параметры качества деталей и приведенные затраты на их изготовление. В статье излагаются основные положения синергетического системного анализа и синтеза управления динамической системой резания, приводится ее математическое моделирование, рассматривается поэтапная процедура анализа и синтеза модели, рассматривается пример практического применения.

**Ключевые слова:** динамическая система резания, синергетическое управление, эффективность обработки на станках с ЧПУ, технология машиностроения

**Для цитирования:** Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Системно-синергетический анализ и синтез управляемого процесса резания // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 9 (159). С. 3–13. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-13

### System-synergetic analysis and synthesis of a controlled cutting process

Vilor L. Zakovorotny<sup>1</sup>, D. Eng.

Valeria E. Gwindzhilia<sup>2</sup>, PhD Eng.

<sup>1,2</sup> Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>1</sup> [vzakovorotny@dstu.edu.ru](mailto:vzakovorotny@dstu.edu.ru)

<sup>2</sup> [vvgvindjiliya@donstu.ru](mailto:vvgvindjiliya@donstu.ru)

**Abstract.** Currently, good progress has been produced in the creation of machine tools with CNC computer systems. They are able to ensure the coincidence of program and the trajectories of the actuators with high accuracy. But when manufacturing parts with the same accuracy it becomes possible in rare circumstances. This is because of the necessity to take into account

the entire controlled dynamic cutting system when manufacturing parts, while the quality of the part depends on various physical interactions under process work. In contrast to the well-known research and development, the paper focuses on the fact that the modeling level is based on a system-synergetic representation, which includes the procedure of expansion – compression of the state space. The system takes into account elastic deformations of its elements, evolutionary changes in their properties, uncontrollable disturbances, revealing physical interactions. This is a complex system, where its individual coordinates of the state depend on programmable trajectories first of all, secondly, they are characterized by internal connections and self-organization, and finally, they affect the output properties of cutting. The output properties include parts quality parameters and specified costs for parts manufacture. The article describes the main provisions of the synergetic system analysis and synthesis of a dynamic cutting system control, provides its mathematical modeling, views a simple procedure for analyzing and synthesizing a model. The example of practical application has been also observed.

**Keywords:** dynamic cutting system, synergetic control, machining job efficiency of CNC machines, mechanical engineering technology

**For citation:** Zakovorotny V.L, Gwindzhilia V.E. System-synergetic analysis and synthesis of a controlled cutting process / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 9 (159). P. 3–13. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-13

### Введение

В последнее десятилетие получил развитие системно-синергетический подход для повышения эффективности процесса резания [1 – 4]. Он основан на расширении-сжатии размерности пространства состояния [1]. Расширение размерности направлено на раскрытие взаимодействий, влияющих на выходные свойства обработки. Сжатие основано на переходе траекторий в диссипативных системах к своему терминальному аттрактору. Применительно к резанию расширение размерности заключается в том, что между траекториями исполнительных элементов станка (ТИЭС) и выходными

свойствами обработки ставится динамическая система резания (ДСР), состоящая из подсистем инструмента и заготовки. Они объединяются в единую систему связи, формируемой резанием, представляющей зависимость сил от координат состояния [5 – 10]. Пространство состояния (рис. 1) включает управляемые ТИЭС (перемещения  $L = \{L_1, L_2, L_3\}^T$  и скорости  $v = dL / dt$ ), а также деформации и их скорости инструмента (векторы  $X = \{X_1, X_2, X_3\}^T$ ,  $v_x = dX / dt$ ) и заготовки (векторы  $Y = \{Y_1, Y_2, Y_3\}^T$ ,  $v_y = dY / dt$ ). Они рассматриваются в подвижной системе ТИЭС.

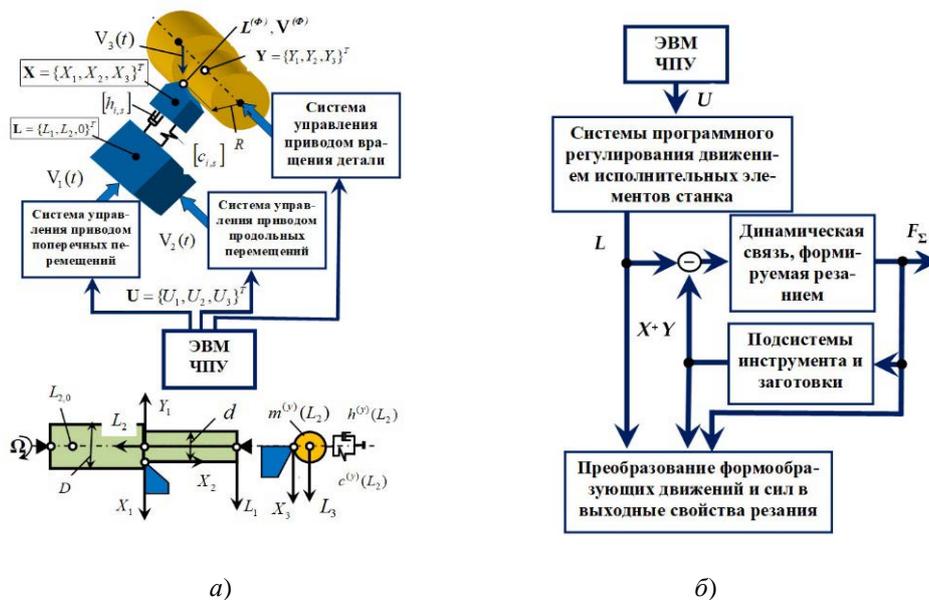


Рис. 1. Пространство состояния управляемой системы резания:

а – схема сил и формирования движений; б – упрощенная схема преобразования координат

Fig. 1. The state space of the controlled cutting system:

а – diagram of forces and the formation of movements; б – simplified scheme of change of coordinates

Рассматриваются изменения свойств системы, обусловленных траекторией мощности необратимых преобразований энергии по работе [11, 12]. Процесс резания характеризуется как эволюционная система с внутренними обратными связями. В статье изложены все этапы синергетического анализа и синтеза на примере невозмущенной системы точения.

### Материалы и методы

*Математическое моделирование системы.* При анализе и синтезе систем ЧПУ используется принцип подчинения. В синергетической парадигме подчинение заменяется согласованием траекторий. Поэтому проектированию подлежат желаемые траектории формообразующих движений  $L^{(\Phi)}$ . Остальные траектории вплоть до программы ЧПУ определяются

на основе их взаимного согласования. Траектории  $L^{(\Phi)}$  есть сумма:

$$L^{(\Phi)} = L - X - Y. \quad (1)$$

При заданных  $L^{(\Phi)}$  и  $dL^{(\Phi)} / dt = v^{(\Phi)}$ , для определения  $L$  необходимо вычислить  $X, Y$ , а также обеспечить их асимптотическую устойчивость. Рассмотрим также скорости деформаций  $dX / dt = v_X = \{v_{X,1}, v_{X,2}, v_{X,3}\}^T$  и  $dY / dt = v_Y = \{v_{Y,1}, v_{Y,2}, v_{Y,3}\}^T$ . Траектории  $X$  и  $Y$  рассматриваются в подвижной системе координат ТИЭС.

Вначале остановимся на свойствах подсистем инструмента и заготовки. Для этого воспользуемся ранее полученными результатами [9, 10], согласно которым справедливо:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 X}{dt^2} + h \frac{dX}{dt} + cX = F; \\ m^{(Y)}(L_2) \frac{d^2 Y_1}{dt^2} + h^{(Y)}(L_2) \frac{dY_1}{dt} + c^{(Y)}(L_2) Y_1 = F^{(0)} \chi_1; \\ m^{(Y)}(L_2) \frac{d^2 Y_3}{dt^2} + h^{(Y)}(L_2) \frac{dY_3}{dt} + c^{(Y)}(L_2) Y_3 = F^{(0)} \chi_3, \end{cases} \quad (2)$$

где  $m = [m_s]$ ,  $m_s = m, s = 1, 2, 3$ , кг·с<sup>2</sup>/мм;  
 $h = [h_{s,l}]$ , кгс/мм;  $c = [c_{s,l}]$ , кг/мм;  
 $s, l = 1, 2, 3$  – матрицы инерционных, скоростных и упругих коэффициентов подсистемы инструмента;  $m^{(Y)}(L_2)$ ,  $h^{(Y)}(L_2)$ ,  $c^{(Y)}(L_2)$  – обобщенные масса, коэффициенты демпфирования и жесткости подсистемы заготовки. При

продольном точении вала эти параметры зависят от  $L_2$ . Представим силу  $F$  в виде  $F = \{F_1, F_2, F_3\} = F^{(0)} \{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}$ , причем  $(\chi_1)^2 + (\chi_2)^2 + (\chi_3)^2 = 1$ . Для дальнейшего рассмотрим технологические режимы (подачу  $S_p(t)$ , глубину  $t_p(t)$  и скорость  $v_p(t)$  резания) в виде:

$$S_p(t) = \int_{t-T}^t [v_2(\xi) - v_{X_2}(\xi) - v_{Y_2}(\xi)] d\xi; \quad v_p(t) = \pi D \Omega - v_{X_3}(t) - v_{Y_3}(t); \quad t_p(t) = D/2 - (L_1 - X_1 - Y_1), \quad (3)$$

где  $T = (\Omega)^{-1}$  время оборота заготовки, с;  
 $D$  – ее диаметр, м. Если  $X = 0$ ,  $Y = 0$ , то мы имеем традиционные режимы:  $S_p^{(0)}$ ,  $t_p^{(0)}$  и

$v_p^{(0)} = v_3 = \pi D \Omega$ . Тогда модель связи силы  $F^{(0)}$  с координатами системы имеет уравнение [9]:

$$T^{(0)} dF^{(0)} / dt + F^{(0)} = \rho \{1 + \mu \exp[-\zeta(v_3 - v_{X_3} - v_{Y_3})]\} [t_P^{(0)} - X_1 - Y_1] \int_{t-T}^t \{v_2(\xi) - v_{X_2}(\xi)\} d\xi, \quad (4)$$

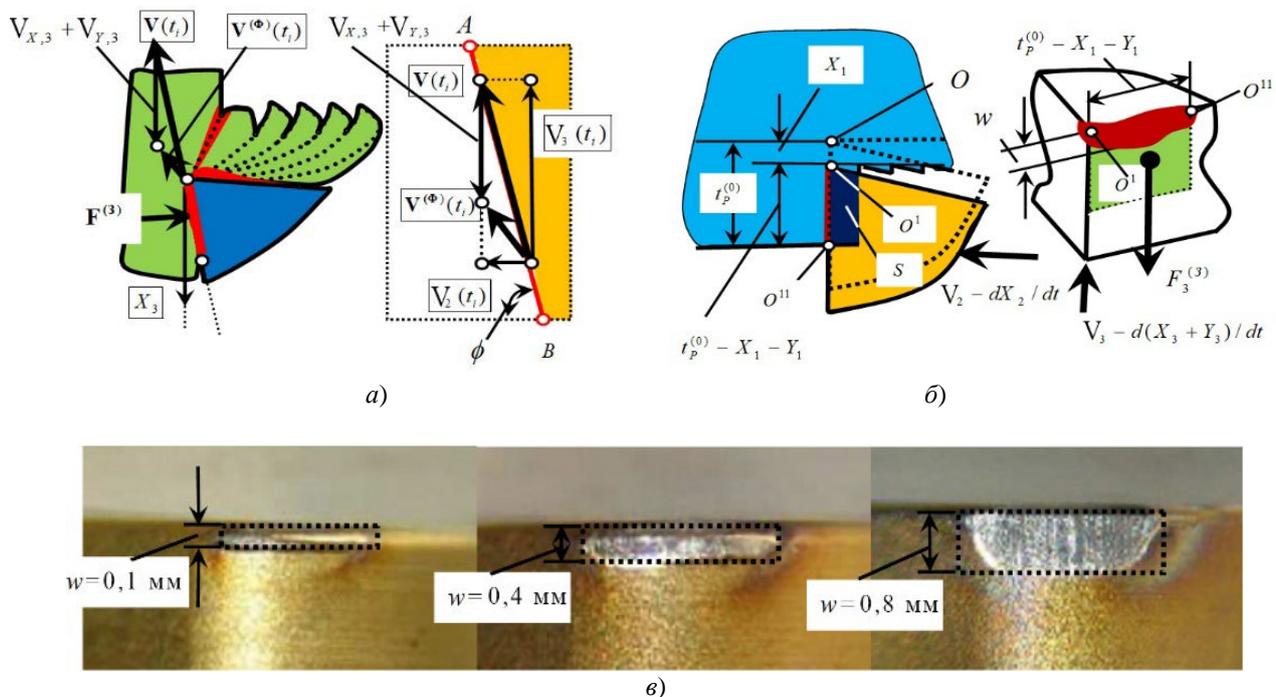
где  $\rho$  – давление на переднюю грань, кг/мм;  
 $\mu$  – безразмерный параметр;  $\zeta$  – коэффициент,  $\text{с}\cdot\text{м}^{-1}$ ;  $T^{(0)}$  – постоянная времени стружкообразования. Системы (1) – (4) позволяют определить  $X$ ,  $Y$  и  $L^{(\Phi)}$ , а также проанализировать устойчивость траекторий.

*Эволюционные изменения.* Примером эволюции является износ инструмента, которому соответствует изменение параметров  $\{p_1, p_2, \dots, p_m\}$  в уравнениях (1) – (4):

$$p_i = p_{i,0} + \Delta p_i(w), \quad (5)$$

где  $p_{i,0}, i=1, 2, \dots, n$  – параметры при  $w=0$ ;  $\Delta p_i$  – их приращения. Будем считать заданными траектории мощности  $N(t)$  и работы  $A(t)$ . Очевидно,  $A(t) = \int_0^t N(t) dt$ .

Совокупность  $N(t) = dA / dt, A(t)$  характеризует фазовый портрет в плоскости «работа – мощность». От  $N = \varphi(A)$ , приведенной к длине контакта (« $O^1 - O^{11}$ » на рис. 2), зависит изнашивание [11, 12].



**Рис. 2. Схема формирования износа инструмента по задней грани:**

*a* – образование длины контакта режущего лезвия; *b* – схема оценивания ленточки износа по задней грани; *в* – фотографии износа по задней грани

**Fig. 2. Diagram of the tool wear formation along the back face:**

*a* – formation of the contact length of the cutting blade; *b* – diagram of the assessment of the wear point along the back face; *c* – photos of wear along the back face

При обработке инструментом из твердого сплава износ наблюдается в основном по задней грани (рис. 2, в). Тогда необходимо рассматривать  $A(t)$  и  $N(t)$  в области контакта задней грани. Поэтому необходимо

рассмотреть модель сил  $F^{(3)} = \{F_1^{(3)}, F_2^{(3)}, F_3^{(3)}\}^T$ , действующих на заднюю грань. Нас интересует работа и мощность по направлению движения инструмента. Поэтому необходимо знать силу  $F_3^{(3)}$  и выразить

ее через координаты состояния (рис. 2, а, б). После врезания (см. рис. 2, а) формируется траектория следа под углом  $\varphi = \arctg(v_3 / v_2)$  (см. рис. 2, б). Направление  $\varphi$  обозначено «А – В» (см. рис. 2, б). При увеличении  $(v_{X,3} + v_{Y,3})$ , как показано на векторной диаграмме на рис. 2, б, имеет место изменение направления движения инструмента в сторону заготовки. При этом силы на задней грани возрастают, увеличивается площадь контакта (см. рис. 2, б), а также суммарная мощность.

При смещении вектора в затемненную область инструмент отходит от заготовки и уменьшается площадь срезаемого слоя  $S$  (см. рис. 2, а). Если система устойчива и не возмущена, то траектория по направлению «А – В» (см. рис. 2) является аттрактором. За счет возмущений или при потере устойчивости образуется периодическое сближение и отталкивание граней от заготовки. Для моделирования  $F^{(3)}$  удобно рассматривать агрегированные координаты:

$$v = (v_2 + v_2^{(\Delta)}(t) - dX_2 / dt) / (v_3 + v_3^{(\Delta)}(t) - dX_3 / dt); v^* = v_2 / v_3. \quad (6)$$

Представляя увеличение сил при сближении экспонентой, имеем:

$$F_3^{(3)} = k_\phi k_T F_0 + k_T \rho_0 \{ [t_p^{(0)} - X_1(t) - Y_1(t)] \exp[\zeta(v - v^*)] \}, \quad (7)$$

где  $\rho_0$  – сила, приведенная к длине контакта, кг/мм;  $\zeta$  – безразмерный параметр;  $k_T$  – коэффициент трения;  $k_\phi$  – коэффициент упругого восстановления. Тогда с учетом (7) получаем

выражение для мощности  $N$  в области контакта задней грани, приведенной к длине контакта режущего лезвия (отрезок « $O^1 - O^{11}$ » на рис. 2):

$$N = \left\langle \frac{k_\phi k_T}{[t_p^{(0)} - X_1(t) - Y_1(t)]} F_0 + k_T \rho_0 \{ \exp[\zeta(v - v^*)] \} \right\rangle [v_3 - v_{X,3} - v_{Y,3}]. \quad (8)$$

Таким образом,  $N$  зависит практически от всех параметров (4) и (7) и от режимов, задаваемых ТИЭС. Скорость  $v^{(w)}(t)$  связана с  $v^{(L)}(L)$  соотношением:

$$v^{(w)}(L) = \frac{dw}{v_p dt} = \frac{v^{(w)}(t)}{v_3 - dX_3 / dt - dY_3 / dt}, \quad (9)$$

которое показывает, что (9) может иметь минимум при варьировании скорости  $v_3$ , который зависит от параметров модели. Скорость  $v^{(w)}(t)$  можно оценить на основе интегрального уравнения Вольтера [12, 13] относительно

мощности  $N(t)$  по работе  $A(t)$ . Следовательно,

$$v^{(w)}(t) = \alpha_1 N(t) + \alpha_2 \int_0^A W(A - \xi) N(\xi) d\xi, \quad (10)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент,  $\text{кг}^{-1}$ ;  $\alpha_2$  – коэффициент размерности,  $\text{кг}^2 \cdot \text{м}^{-1}$ ;  $W(t - \zeta)$  – безразмерное ядро интегрального оператора, учитывающее два конкурирующих процесса адаптации и деградации взаимодействующих поверхностей. Их удобно моделировать ядром

$$W(A - \xi) = \{ -\exp[-\lambda_1(A - \xi)] + \mu_v \exp[\lambda_2(A - \xi)] \}, \quad (11)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  – параметры размерности,  $\text{кгм}^{-1}$ ;  $\mu_v$  – безразмерный коэффициент. Если известно  $v^{(w)}$ , то

$$w(t) = \int_0^t v^{(w)}(\xi) d\xi. \quad (12)$$

Параметры  $\lambda_1, \lambda_2, \mu_v, \alpha_1, \alpha_2$  и их связь с износом определяются экспериментально. Приведем пример продольного течения вала из стали 20Х при режимах:  $t_p^{(0)} = 1,0$  мм,  $S_p^{(0)} = 0,1$  мм. На рис. 3 приведены примеры траектории эволюции износа в функции времени и деформационных смещений инструмента при различных начальных значениях параметра  $\rho(0) = \text{var}$ . На иллюстрациях точки бифуркаций обозначены: *A, B, C, D, E*. Им соответствуют аналогичные точки на кривой развития износа. Это точки изломов на кривых эволюции. Во всех случаях скорость изнашивания положительна, то есть  $dw/dt > 0$ , т. к. развитие износа связано с необратимыми преобразованиями энергии.

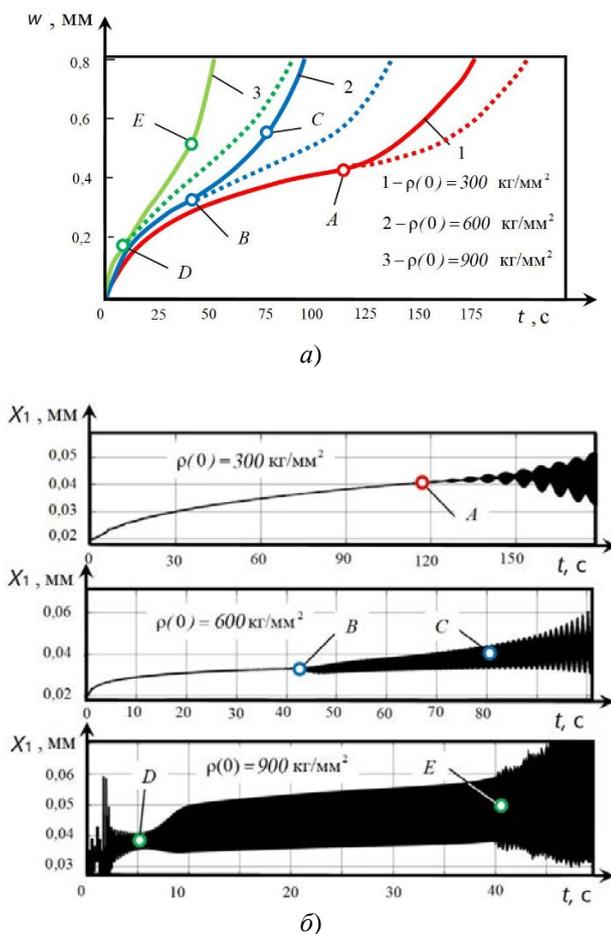


Рис. 3. Пример эволюции износа (а) и траектории деформационных смещений (б)

Fig. 3. An example of the evolution of wear (a) and the trajectory of deformation displacements (b)

Если при вычислении эволюции рассматривать квазистатику, то обнулив все производные в уравнении динамики, получим кривые, показанные пунктиром после первой точки бифуркаций. Таким образом, после потери устойчивости и формирования притягивающих множеств деформаций интенсивность изнашивания инструмента возрастает. В зависимости от начальных значений  $\rho(0)$  в системе формируются все типы притягивающих множеств, рассмотренных ранее [9 – 12]. Притягивающим множествам деформаций соответствуют нелинейные периодические изменения сил, действующих на задние грани (рис. 4). Они возрастают при увеличении колебательных скоростей в направлении  $X_2$  (рис. 4). Этим всплескам соответствуют почти  $\delta$  образные увеличения мощности. Если принять гипотезу о преобразовании мощности в производство тепла, то мы получим одно из объяснений образования температурных всплесков в узле трения [14]. Их также можно представить в виде импульсной последовательности, параметры которой зависят от вида и размаха притягивающих множеств деформаций. На иллюстрации на участке  $\Delta t$  притягивающим множеством является предельный цикл. Его регуляризация вызывает уменьшение дисперсии расстояний между импульсами. Не будем останавливаться на эффектах эволюции. Отметим, что одной из особенностей резания является эволюция его свойств, которые являются необратимыми. Это свойство необходимо учитывать при создании виртуальных моделей обработки на станках [16, 17].

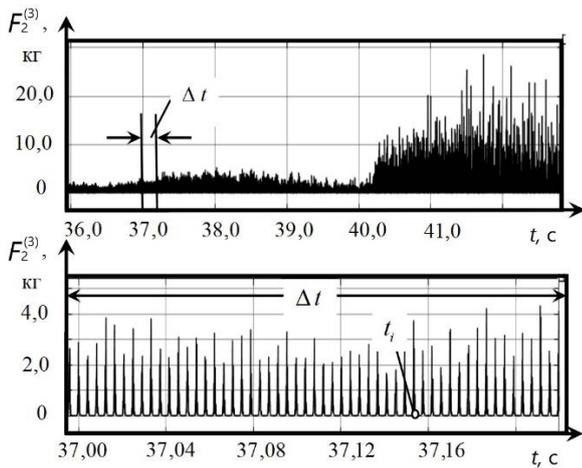


Рис. 4. Изменение сил по задней грани инструмента для системы при  $\rho(0) = 900 \text{ кг/мм}^2$

Fig. 4. Fragment of the change in the applied forces for the back face of the instrument for the system at  $\rho(0) = 900 \text{ kg/mm}^2$

*Синергетический синтез управления.*

Если задана ДСР, выбран инструмент, определена система станок-приспособление-инструмент-деталь (СПИД) и смазка, то единственным фактором управления ДСР является программа ЧПУ. Она определяет ТИЭС и соответствующие ей режимы  $T(L_2) = \{S_p(L_2), t_p(L_2), v_p(L_2)\}^T$ . Совокупность  $T(L_2)$  имеет принципиальное значение для определения программы ЧПУ. При ее определении необходимо согласовать все траектории таким образом, чтобы траектории формообразующих движений удовлетворяли требованию

$$L^{(\Phi)}(L) \subset \aleph^{(\Phi)}(L), \quad (13)$$

где  $\aleph^{(\Phi)}(L)$  – множество допустимых терминальных траекторий. Одним из принципиальных требований (13) является асимптотическая устойчивость всех взаимосвязанных траекторий. Тогда терминальные траектории являются аттракторами, к которым естественным образом притягиваются все траектории пространства состояния. При продольном точении вала неизменного диаметра они могут быть заданы, например, совокупностью  $L_i^{(\Phi)}(L_2) \subset \aleph^{(\Phi)}(L)$ , причем каждому  $i = 1, 2, \dots, n$

соответствует своя скорость резания  $v_3^{(i)}$ . Из множества (13) необходимо выбрать такое, при котором минимизируются приведенные затраты на изготовление. Множество  $\aleph^{(\Phi)}(L)$  может быть пустым, если условия обработки и режущий инструмент не позволяют обеспечить (13), то есть поставленные требования к качеству изготовления деталей не достижимы. При определении  $\aleph^{(\Phi)}(L)$  воспользуемся основными положениями синергетической теории управления [1].

Вначале рассмотрим синергетический синтез не эволюционной «замороженной» системы, для которой параметры динамической связи остаются неизменными. Раскроем процедуру синтеза на примере продольного точения штуцера форсунки (длина  $L_{2,0} = 144 \text{ мм}$ , диаметр  $d = 18 \text{ мм}$ , материал сталь 20X, закрепление заготовки в центрах, станок CNC Metal Masters LS360). Величина припуска, определяющего глубину резания, зафиксирована  $t_p^{(0)} = 2 \text{ мм}$ . Для определения закона изменения жесткости  $c^{(Y)}(L_2)$  можно воспользоваться законами изгибных колебаний стержней. Практика показывает, что такую информацию точнее получать экспериментально (рис. 5, а). Значение формируемого резанием диаметра  $d$  (см. рис. 1, а) можно представить в виде:

$$d = 2\{D/2 - L_2(0) + X_1 + Y_1\}. \quad (14)$$

Терминальной траектории должно соответствовать условие  $\Delta r = X_1 + Y_1 = \text{const}$ . Вначале вычислим  $T(L_2)$ , обеспечивающих (14). Из трех параметров выбираем в качестве управляющего величину подачи  $S_p(L_2)$ . Скорость резания определяется из условия минимизации интенсивности изнашивания. Вариации  $L_1$  затруднены, т. к. при реверсировании  $v_1$  приходится сталкиваться с необходимостью изменения знака напряжений в незатянутых соединениях механической части привода. При управлении терминальной

траекторией по критерию (14) будем опираться на принцип разделения движений и асимптотическую устойчивость траекторий. Тогда из (2), (4) имеем:

$$\begin{cases} X_1 = g_{X_1} \rho(t_p^{(0)} - X_1 - Y_1) S_p(L_2); \\ Y_1 = g_{Y_1}(L_2) \rho(t_p^{(0)} - X_1 - Y_1) S_p(L_2), \end{cases} \quad (15)$$

где  $g_{X_1} = \Delta_{X_1} / \Delta$ ;  $\Delta_{X_1} = \begin{bmatrix} \chi_1 & c_{2,1} & c_{3,1} \\ \chi_2 & c_{2,2} & c_{3,2} \\ \chi_3 & c_{2,3} & c_{3,3} \end{bmatrix}$ ;

$g_{Y_1}(L_2) = \chi_1 [c^{(Y)}(L_2)]^{-1}$ . Причем,  $g_{X_1} = \text{const}$ , а  $g_{Y_1}(L_2)$  является функцией перемещения по оси  $L_2$ . Поставим задачу вычислить  $S_p(L_2)$  т. о., чтобы  $X_1 + Y_1 = \Delta r = \text{const}$ . Из (15) имеем:

$$\Delta r = \frac{\rho S_p(L_2) t_p^{(0)} [g_{X_1} + g_{Y_1}(L_2)]}{1 + \rho S_p(L_2) [g_{X_1} + g_{Y_1}(L_2)]}, \quad (16)$$

или закон изменения  $S_p(L_2)$  вдоль  $L_2$ , обеспечивающий  $\Delta r = \text{const}$ :

$$S_p(L_2) = \frac{\Delta r}{\rho [t_p^{(0)} - \Delta r] [g_{X_1} + g_{Y_1}(L_2)]}. \quad (17)$$

Зависимость (17) позволяет определить  $L_2(t)$ , т. е. программу ЧПУ (векторы управления  $U$  и  $v_U$ ). Проанализируем (16) и (17). На технологические режимы наложим ограничения:

$$T(L_2) \subset \mathfrak{R}_T^{(3)}, \quad (18)$$

где  $\mathfrak{R}_T^{(3)}$  – множество траекторий технологических режимов, удовлетворяющих следующим условиям:

– при этих режимах, входящих в уравнения (4), (7), траектории (17) являются асимптотически устойчивыми. Их устойчивость определяется, прежде всего, обобщенным безразмерным параметром

$k_p = \rho t_p^{(0)} [g_{X_1} + g_{Y_1}(L_2)]$ , характеризующим коэффициент усиления внутрисистемной обратной связи. Поэтому глубина  $t_p^{(0)}$  ограничена сверху предельной шириной срезаемого слоя;

– имеются ограничения на вариации  $S_p(L_2)$ , диктуемые требованиями к формируемой резанием шероховатости поверхности;

– скорость резания выбирается исходя из минимизации интенсивности изнашивания.

Вначале не будем обращать внимание на ограничения. Тогда отметим следующие особенности формирования  $\Delta r$ :

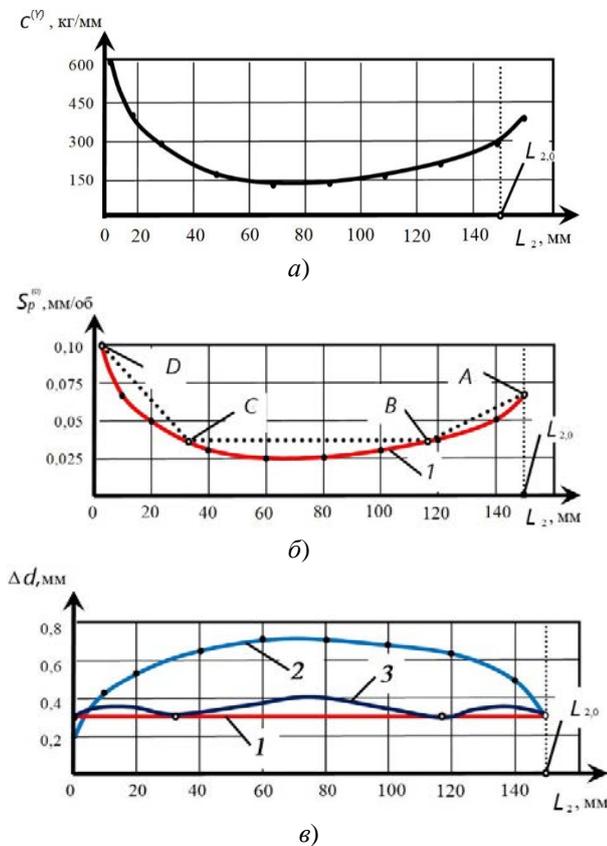
– если задана система, имеющая заданные и неизменные параметры  $\rho$ ,  $g_{X_1}$  и  $g_{Y_1}(L_2)$ , то погрешность возрастает пропорционально увеличению  $S_p$  и  $t_p^{(0)}$ . Поэтому при изготовлении детали выполняется обработка в несколько проходов, и на каждом проходе уменьшаются значения  $S_p$  и  $t_p^{(0)}$ , т. е. переходят от черновой обработки к чистовой;

– при неограниченном увеличении  $k_p$  погрешность приближается к  $t_p^{(0)}$ . Поэтому при заданных параметрах обработку целесообразно осуществлять при малых  $S_p^{(0)}$ . Это известный из практики феномен;

– параметры динамической связи изменяются в ходе эволюции, в том числе  $\rho$  в (16). Поэтому в ходе эволюции изменяется устойчивость, и требуется коррекция  $S_p(L_2)$ .

Определение траектории  $S_p(L_2)$  из (17) выполняется в следующей последовательности. Задаются значения  $t_p(L_2)$ ,  $v_p(L_2)$ , исходя из условий эффективности обработки при минимизации изнашивания [15]. Затем по (17) вычисляется траектория  $S_p(L_2)$  и определяется программа ЧПУ. Для обработки штуцера на рис. 5 приведены траектории изменения диаметра детали  $\Delta d$  для плавного изменения  $S_p(L_2)$  (кривая 1 на рис. 5 б, в), для случая линейной интерполяции функции по четырем

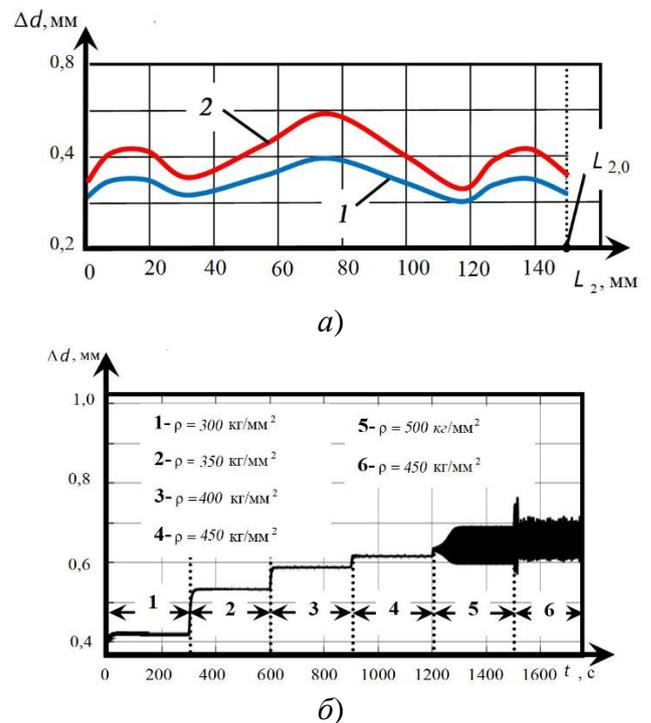
точкам  $A, B, C, D$  (кривая 3), а также при обработке  $S_p(L_2) = \text{const}$  (кривая 2). Как уже отмечено, за счет эволюции изменяются все параметры формируемой резанием динамической связи. В результате равновесие в системе не только может потерять устойчивость, но и изменяются терминальная траектория и формируемый диаметр. На рис. 6, *a* приведен пример изменения погрешности диаметра в функции  $L_2$  для случая рис. 5, *в* (кривая 3), а также примеры изменения траекторий деформаций по мере увеличения износа на участке  $L_2 \in (70...75)$  мм.



**Рис. 5. Пример согласования изменения радиальной жесткости заготовки (а), заготовки с величиной подачи  $S_p(L_2)$  (б) при вариации диаметра (в)**  
1 – полное согласование; 2 – обработка с постоянной подачей; 3 – линейная интерполяция подачи по четырем узловым точкам (A – B – C – D)

**Fig. 5. Example of matching changes in the radial stiffness of the workpiece (a), workpiece with the feed value  $S_p(L_2)$  (b) variations in diameter (c)**  
1 – full alignment; 2 – process work with constant feed; 3 – linear interpolation of feed at four nodal points (A – B – C – D)

По мере развития износа изменяются параметры. Параметр  $\rho$  возрастает с 300 до 500 кг/мм<sup>2</sup>. В результате увеличивается диаметр и нарушается устойчивость. В этом случае в его окрестности образуется устойчивый предельный цикл, а при  $\rho = 550$  кг/мм<sup>2</sup> формируется хаотический аттрактор. Как правило, дополнительные колебания, генерируемые системой, вступают в противоречие с условиями (13). По мере развития износа для  $\Delta r = \text{const}$  необходимо уменьшать  $S_p$ .



**Рис. 6. Эволюционные изменения:**  
*a* – изменение диаметра по мере развития износа: 1 –  $w = 0...0,1$  мм; 2 –  $w = 0,6...0,8$  мм; *б* – изменение траекторий

**Fig. 6. Evolutionary changes:**  
*a* – change in diameter as wear develops: 1 –  $w = 0...0,1$  mm; 2 –  $w = 0,6...0,8$  mm; *b* – change in trajectories

## Результаты

Системный синергетический принцип анализа и управления обработкой на станках с ЧПУ ЭВМ, основанный на расширении – сжатии размерности пространства состояния ДСР, открывает новое направление анализа и синтеза управляемого процесса резания.

Принцип расширения основан на раскрытии ДСР, связывающей ТИЭС и выходные характеристики обработки. Это пространство включает подсистемы инструмента и заготовки, объединенные связью, формируемой резанием. Его анализ позволяет учитывать деформации, силы и мощность необратимых преобразований энергии в отдельных зонах резания. Показано, что в зависимости от траектории мощность работа наблюдается эволюционная перестройка процесса резания, в том числе интенсивности изнашивания инструмента. Здесь необратимые преобразования энергии выступают в качестве генератора изменения свойств, следовательно, выходных характеристик обработки. Отсюда вытекает, например, зависимость интенсивности изнашивания инструмента от параметров динамических подсистем со стороны инструмента, детали, и эволюционно изменяющихся параметров динамической связи. Эволюционные свойства системы также зависят от начальных параметров, а оптимальное значение скорости резания, при которой интенсивность изнашивания минимальна, также зависит от траектории износа.

### Заключение

Одним из перспективных направлений обработки деталей заданного качества при минимизации приведенных затрат на изготовление является использование синергетического принципа согласования внешнего управления (программы ЧПУ) с внутренней динамикой системы. Он открывает новые возможности увеличения эффективности обработки на станках с ЧПУ ЭВМ, в которых принцип управления на основе подчинения заменяется принципом согласования. При этом учитываются естественные свойства системы вплоть до ее эволюционной перестройки. Также приведенные алгоритмы и разработанные программы являются базой для построения нового класса цифровых двойников изготовления деталей на станках с ЧПУ.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Колесников А.А. Синергетика и проблемы теории управления. М.: Физматлит, 2004. 504 с.
2. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Синергетическая концепция при программном управлении процессами обработки на металлорежущих станках // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 5. С. 24–36.
3. Zakovorotny V., Gvindjiliya V. Process control synergetics for metal-cutting machines // Journal of Vibroengineering. 2022. 24(1). P. 177–189. DOI: 10.21595/jve.2021.22087
4. Рыжкин А.А. Синергетика изнашивания инструментальных материалов при лезвийной обработке. Ростов-на-Дону. ДГТУ, 2019. 289 с.
5. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.
6. Plusty J., Polacek A., Danek C., Spacek J. Selbsterregte Schwingungen an Werkzeugmaschinen. – Berlin: Verlag Technik, 1962. 320 p.
7. Altintas Y. Analytical prediction of three dimensional chatter stability in milling // JSME International Journal. Seri C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing. 2001. 44 (3). P. 717–723. DOI: 10.1299/jsmec.44.717
8. Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P. Influence of Tool Flank Forces on Complex Dynamics of Cutting Process // International Journal of Bifurcation and Chaos. 2014. 24(9). P. 189–201. DOI: 10.1142/S0218127414501156
9. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Влияние флуктуаций на устойчивость формообразующих траекторий при точении // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2017. № 2 (194). С. 52–61.
10. Zakovorotnyi V.L., Gvindjiliya V.E. Influence of speeds of forming movements on the properties of geometric topology of the part in longitudinal turning // Journal of Manufacturing Processes. 2024. 28. P. 202–213. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.01.037
11. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Связь самоорганизации динамической системы резания с изнашиванием инструмента // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2020. Т. 28. № 1. С. 46–62. DOI: 10.18500/0869-6632-2020-28-1-46-61
12. Заковоротный В.Л. Моделирование эволюционных преобразований при обработке на металлорежущих станках с помощью интегральных операторов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2004. № 5. С. 26–40.
13. Арнольд В.И. Математические методы классической механики. М.: Наука, 1974. 431 с.
14. Чичинадзе А.В., Буяновский И.А., Гурский Б.Э. Диаграмма переходов и экранирующего

действия смазочного слоя // Трение и износ. 2002. № 3 (23). С. 334–340.

15. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М: Машиностроение, 1976. 278 с.

16. Altintas Y., Kersting P., Biermann D., Budak E., Denkena B. Virtual process systems for part machining operations // CIRP Annals. 2014. 63 (2). P. 585–605. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.007

17. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. UK: Cambridge University Press, 2012. 366 p. DOI:10.1017/CBO9780511843723

## REFERENCES

1. Kolesnikov A.A. Synergetics and problems of management theory. Moscow: Fizmatlit, 2004, 504 p.

2. Zakorotny V.L., Gwindzhilia V.E. Synergetic concept in software control of machining processes on metal-cutting machines // News of higher educational institutions. Mechanical engineering. 2021, no. 5, pp. 24–36.

3. Zakovorotny V., Gvindjiliya V. Process control synergetics for metal-cutting machines // Journal of Vibroengineering. 2022. 24(1). P. 177–189. DOI: 10.21595/jve.2021.22087

4. Ryzhkin A.A. Synergetics of tool materials wear under edge cutting machining. Rostov-on-Don. DSTU, 2019, 289 p.

5. Kudinov V.A. Dynamics of machine tools. Moscow: Mashinostroenie, 1967, 359 p.

6. Tlustý J., Poláček A., Danek C., Spacek J. Selbsterregte Schwingungen an Werkzeugmaschinen. Berlin: Verlag Technik, 1962. 320 p.

7. Altintas Y. Analytical prediction of three dimensional chatter stability in milling // JSME International Journal. Seri C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing. 2001. 44 (3). P. 717–723. DOI: 10.1299/jsmec.44.717

8. Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P. Influence of Tool Flank Forces on Complex Dynamics of Cutting Process // International Journal of Bifurcation and Chaos. 2014. 24 (9). P. 189–201. DOI: 10.1142/S0218127414501156

9. Zakorotny V.L., Gwindzhilia V.E. The influence of fluctuation on the shape-generating trajectories stability with a turning // News of higher educational institutions. The North Caucasus region. Technical sciences. 2017, no. 2 (194), pp. 52–61.

10. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Influence of speeds of forming movements on the properties of geometric topology of the part in longitudinal turning // Journal of Manufacturing Processes. 2024. 28. P. 202–213. DOI:10.1016/j.jmapro.2024.01.037

11. Zakorotny V.L., Gwindzhilia V.E. Link between the self-organization of dynamic cutting system and tool wear // News of higher educational institutions. Applied nonlinear dynamics. 2020, vol. 28, no. 1, pp. 46–62. DOI: 10.18500/0869-6632-2020-28-1-46-61

12. Zakorotny V.L. Modeling of evolutionary transformations in machining on metal-cutting machines using integral operators // News of higher educational institutions. The North Caucasus region. Issue: Natural Sciences. 2004, no. 5. pp. 26–40.

13. Arnold V.I. Mathematical methods of classical mechanics. Moscow: Nauka, 1974, 431p.

14. Chichinadze A.V., Buyanovsky I.A., Gursky B.E. Diagram of transitions and shielding action of the lubricating layer // Friction and wear. 2002, no. 3 (23), pp. 334–340.

15. Makarov A.D. Optimization of cutting processes. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 278 p.

16. Altintas Y., Kersting P., Biermann D., Budak E., Denkena B. Virtual process systems for part machining operations // CIRP Annals. 2014. 63 (2). P. 585–605. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.007

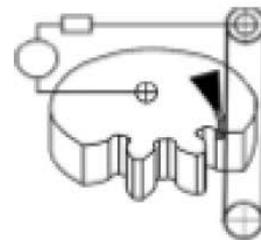
17. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. UK: Cambridge University Press, 2012. 366 p. DOI:10.1017/CBO9780511843723

**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 17.03.2024; одобрена после рецензирования 21.04.2024; принята к публикации 05.06.2024.

The article was submitted 17.03.2024; approved after reviewing 21.04.2024; accepted for publication 05.06.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №9(159). С.14-24.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №9 (159). P. 14-24.

Научная статья  
УДК 621.047; 621.9.048  
doi: 10.30987/2223-4608-2024-14-24

### Пути совершенствования качества наукоемких изделий комбинированными методами

Александр Андреевич Извеков<sup>1</sup>, аспирант  
Владислав Павлович Смоленцев<sup>2</sup>, д.т.н.  
Олег Николаевич Кириллов<sup>3</sup>, д.т.н.

<sup>1, 2, 3</sup> Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

<sup>1</sup> vmzizvekov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>2</sup> vsmolen@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0327-0354>

<sup>3</sup> kirillov.oli@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** Приведены результаты научных и прикладных исследований в области современных методов комбинированной обработки с сочетанием в единой технологии тепловых, магнитных, лучевых, химических постоянных и импульсных воздействий и их сочетаний с механическими процессами. Материалы статьи способствуют созданию и развитию новых путей повышения качества наукоемких изделий, направлены на расширение технологических возможностей при производстве авиационной, космической, транспортной и других отраслей техники. К новым методам совершенствования качества наукоемких изделий комбинированными методами следует отнести их использование в технологических комплексах, создаваемых из оборудования отечественного производства, выпуск которого может успешно преодолеть проблемы импортозамещения. Рассмотрены технологические возможности, целесообразность назначения и оценки их эффективности на повышение качества научно обоснованных сочетаний в едином процессе внешних и внутренних воздействий. Предложен единый подход к проектированию комбинированных технологий с оценкой возможностей каждого назначаемого вида воздействий с учетом уровня их производственной технологичности. Показан новый подход к управлению качеством создаваемых наукоемких изделий путем экономически обоснованного придания им эффективных эксплуатационных свойств за счет применения разработанных многослойных покрытий, технология создания и использования которых внесла весомый научный вклад в технологическую науку.

**Ключевые слова:** качество, комбинированные методы обработки, технологические комплексы, импортозамещение, покрытия

**Для цитирования:** Извеков А.А., Смоленцев В.П., Кириллов О.Н. Пути совершенствования качества наукоемких изделий комбинированными методами // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 9 (159). С. 14–24. doi: 10.30987/2223-4608-2024-14-24

## Ways of quality improvement for high-tech products by combined methods

Alexander A. Izvekov<sup>1</sup>, PhD student

Vladislav P. Smolentsev<sup>2</sup>, D. Eng.

Oleg N. Kirillov<sup>3</sup>, D. Eng.

<sup>1, 2, 3</sup> Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>1</sup>vmzizvekov@gmail.com

<sup>2</sup>vsmolen@inbox.ru

<sup>3</sup>kirillov.olli@yandex.ru

**Abstract.** The results of scientific and applied research in the field of modern methods of combined treatment using the combination of thermal, magnetic, ray, chemical permanent and impulse action accompanied by mechanical processes in a single technology are presented. The materials of the article contribute to the creation and development of new ways to improve the quality of high-tech products, aimed at expanding technological capabilities in the production of aviation, space, transport and other branches of technology. New methods of improving the quality of high-tech products by combined methods include their use in technological complexes created from the equipment of domestic production, which can successfully overcome the problems of import substitution. Technological capabilities, meaningfulness for assigning and evaluating their effectiveness to improve the quality of scientifically based combinations in a single process of external and internal influences are viewed. A unified approach to the design of combined technologies is proposed with an assessment of the capabilities of each assigned type of impact, taking into account the level of their operability. A new approach to high-tech products quality management is shown through feasible conferring of effective operational properties due to the use of developed multilayer coatings, the creation technology and use of which made a significant scientific contribution to technological science.

**Keywords:** quality, combined processing techniques, technological complexes, import substitution, coatings

**For citation:** Izvekov A.A., Smolentsev V.P., Kirillov O.N. Ways of quality improvement for high-tech products by combined methods / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 9 (159). P. 14–24. doi: 10.30987/2223-4608-2024-14-24

### Введение

При создании наукоемких изделий в авиакосмической и в других отраслях машиностроения потребовалось создание научных основ формирования качества перспективных изделий на базе имеющихся и создаваемых комбинированных методов обработки с учетом использования их в современных технологических комплексах, значительная часть которых требовала импортозамещения. Для этого потребовался глубокий анализ возможностей различных видов тепловых, химических, механических воздействий при работе в форме комбинированных технологических процессов. Такой материал многие годы создавался на базе отработки производственной технологичности создаваемых изделий в

ходе многократных усовершенствований конструкции и технологии при подготовке изделий к серийному выпуску, что рассмотрено в работах [1, 2].

Исследования научных школ Воронежа [3 – 5], Брянска [6], других городов страны и зарубежья показали, что имеется реальная перспектива совершенствования качества наукоемких изделий с использованием комбинированных методов обработки.

### Роль и место комбинированных воздействий в проектируемых комплексах

В основе проектируемых технологических комплексов лежат физические связи между воздействиями [2] и показателями качества [3] создаваемых изделий с

использованием установленных закономерностей управления их эксплуатационными показателями, в том числе технологическими методами [2, 6].

В основе всех методов обработки, используемых в технологических комплексах, лежат известные физические явления, которые определяют технологические возможности процессов формообразования. К таким воздействиям относятся: механические, тепловые, химические, магнитные, ядерные. Электрический ток, подаваемый в зону обработки, является источником энергии на технологические цели.

К наиболее изученным и востребованным в технологии машиностроения относится механическое воздействие на объект обработки, которое имеет два вида: постоянное и импульсное.

Постоянное воздействие применяется в большинстве процессов лезвийной обработки. К импульсным методам относят комбинированную обработку с механическим использованием абразивных гранул (шлифование, полирование, притирка и др.), ударные методы (ковка, штамповка, вибрационное упрочнение и др.), а также обработку с наложением вибраций, лучевых импульсов, ультразвуковых колебаний (размерная обработка, интенсификация процессов и др.). Последний приведенный вид занимает более половины трудоемкости при изготовлении деталей машин. Повышение его технологических показателей за счет комбинирования с другими видами воздействий дает значительный выигрыш, в технологических показателях комбинированных технологий и открывает широкие перспективы по расширению технологических возможностей по управлению качеством при создании наукоемкой конкурентоспособной продукции, в том числе отечественного выпуска.

Тепловое воздействие может иметь как самостоятельное технологическое

приложение (например термообработка), но и являться одним из видов воздействий при других процессах (например, для нагрева изделий при механообработке, электроэрозионных процессах, для придания материалам особых свойств и др.). При этом в большинстве известных технологических приемах совершается комбинация нескольких воздействий.

Химическое воздействие используется в том числе для химического воздействия (например, для очистки заготовок [3]), при полировании, формообразовании листовых деталей по фотошаблонам, получении знаков и др., нанесении покрытий химико-термической обработкой (цементация, цианирование и др.). Оно лежит в основе электрохимической размерной и комбинированной обработки, протекающей за счет химических реакций преобразования.

Магнитное и другие виды лучевого воздействия могут являться структурной составляющей процессов, где требуется электрический ток и возникают электромагнитные поля различной интенсивности, которые могут составить часть комбинированного метода обработки с участием магнитного или другого лучевого воздействия. В комбинированных методах обработки самостоятельное магнитное воздействие используется весьма редко, поэтому подробно здесь не рассматривается. Более полную информацию по этому вопросу можно получить из [4].

Ядерное воздействие, как один из видов лучевой обработки, в настоящее время практически не используется, хотя имеются сведения о положительном влиянии облучения на повышение предела усталостной прочности деталей, работающих при знакопеременных нагрузках. Пока неизвестны количественные показатели ядерного облучения, имеются отрывочные сведения по качественным связям показателей процесса с соответствующими технологическими

возможностями, что недостаточно для управления процессом при комбинированной обработке.

Использование известных воздействий в комбинированных методах

обработки, используемых в технологических комплексах приведено на рис. 1.

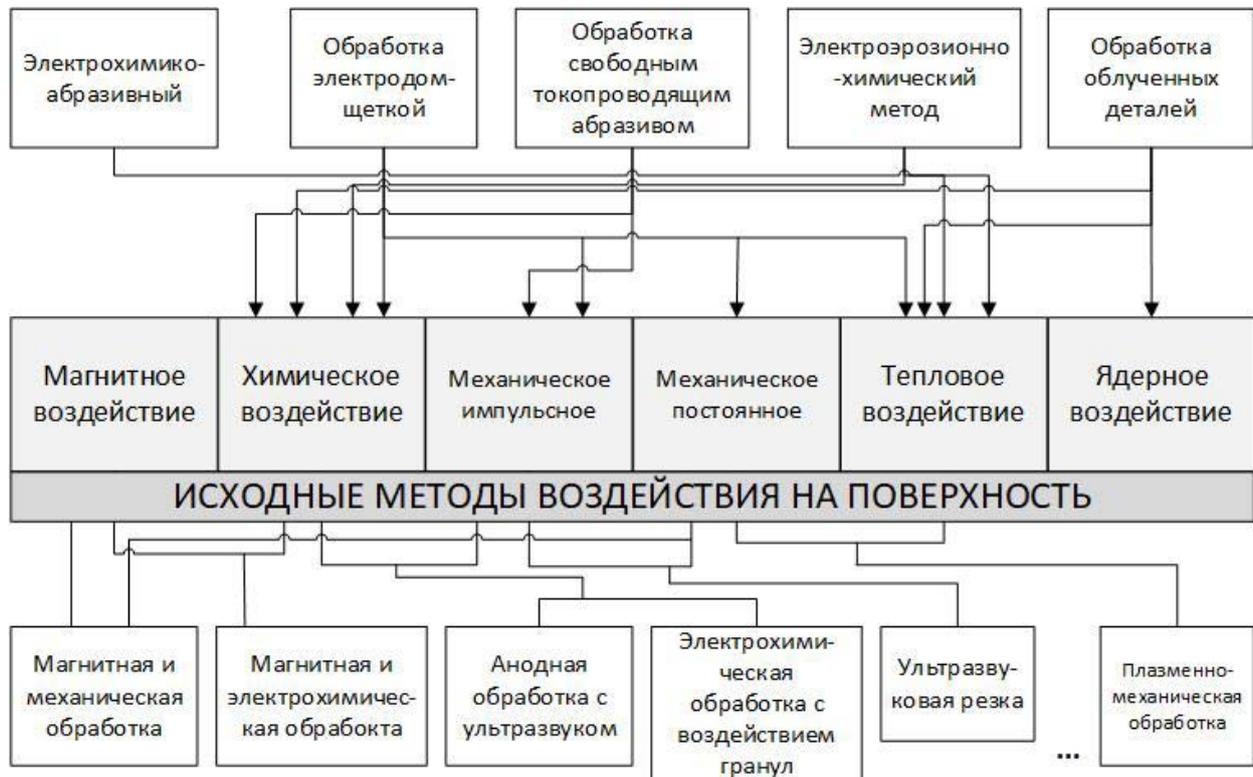


Рис. 1. Классификация воздействий в комбинированных методах обработки, используемых в технологических комплексах

Fig. 1. Classification of impacts in combined processing techniques used in technological complexes

При выполнении операций в комбинации с использованием режущего и абразивного инструментом при обработке механическое действие совмещается с возникающими тепловыми воздействиями на материал заготовки, что может привести к изменениям химического состава сплавов его структуры, а также другим явлениям, вызывающим как положительное, так и негативное влияние на качество и технологические возможности детали. Следовательно, требуется нормировать количество образующейся тепловой энергии, например теплопереносом жидким электролитом. Однако при этом необходимо научно обосновать граничные условия назначения каждого воздействия, при

нарушении которых может снизиться уже достигнутый уровень эксплуатационных показателей проектируемого метода обработки, что количественно обосновывается по методике [2] в процессе отработки технологичности конструкции и служит инструментом для формирования эффективной структуры проектируемого комбинированного процесса.

Анализ возможных сочетаний известных воздействий (см. рис. 1) показывает, что на их базе можно спроектировать не менее 800 новых комбинированных процессов, обладающих существенными полезными свойствами, в том числе в области повышения качества создаваемых наукоемких изделий и для решения задач

импортозамещения. Перспективы в данной области технологической науки впечатляющие, поскольку в настоящее время в мире изучено или практически используется не более 20...30 таких технологических приемов, в основном при прямом подключении постоянного тока, где анодом является заготовка, что составляет не более 2 % от возможного количества требуемых в промышленности комбинированных методов обработки.

### Оптимизация расчета, назначения и выбора структурных составляющих комбинированного процесса при проектировании технологических комплексов

При формировании технологических комплексов необходимо учитывать требуемые, расчетные, достигнутые, научно обоснованные и ожидаемые технологические показатели комбинированного метода. Выбор величины взаимного влияния структурных элементов, при анализе технологичности, может оказаться значительно интенсивнее прямого воздействия на комбинированный процесс и способно нейтрализовать или даже ухудшить достигнутый результат проектирования нового процесса. Базовые виды комбинированных методов обработки, их структура, технологические возможности, область применения рассмотрены в [7]. Эффективность проектируемых процессов зависит не только от сочетания воздействий, но и обоснованности выбора базового варианта, который требуется усовершенствовать за счет комбинации с другими методами воздействия с известными технологическими характеристиками. В зависимости от уровня технологичности проектируемого метода, относительно ранее освоенного, требуется обосновать эффективность присоединения к базовому варианту других видов воздействий с учетом их совместности и возможности реализации в технологических комплексах.

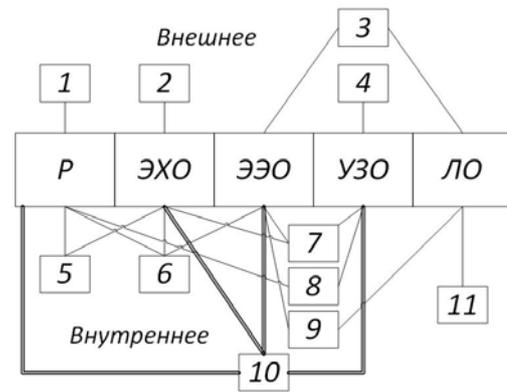


Рис. 2. Факторы, определяющие комбинированное размерное формообразование поверхности при внешнем воздействии:

1 – механическое постоянное; 2 – химическое; 3 – тепловое; 4 – механическое импульсное; при внутреннем воздействии: 5 – наклеп поверхности; 6 – хрупкость материала; 7 – состав; 8 – структура; 9 – температура плавления; 10 – совместимость материалов инструмента и детали; физико-механические характеристики обрабатываемого материала; 11 – отражательная способность

Fig. 2. Factors determining the combined dimensional shaping of the surface under external influence: 1 – mechanical constant; 2 – chemical; 3 – thermal; 4 – mechanical pulse; under internal influence: 5 – surface cleavage; 6 – material brittleness; 7 – composition; 8 – structure; 9 – melting point; 10 – compatibility of tool and part materials; physical and mechanical characteristics of the processed material; 11 – reflectivity

На рис. 2. показаны внешние и внутренние факторы, определяющие показатели практически используемых методов обработки: резания (Р), электрохимической (ЭХО), электроэрозионной (ЭЭО), ультразвуковой (УЗО), лазерной (ЛО), на базе которых можно комбинировать нетрадиционные гибкие технологии технологических комплексов.

При обосновании выбора воздействий для комбинированной обработки учтена та часть, которая оказывает в основном внешнее влияние на исследуемые процессы (см. рис. 2). К внутренним факторам относятся характеристики обрабатываемого материала, большинство которых является неотъемлемыми свойствами детали и в настоящее время не может эффективно использоваться для управления в целях повышения технологических показателей процесса и качества обработки.

Исключением служит наклеп и отражательная способность поверхности, которые можно изменять в довольно широких пределах. Однако такие факторы не достаточны для эффективного управления процессом.

Из сказанного следует, что направленное управление процессом [1, 6], в том числе параметрами, определяющими качественные

показатели изделия в комплексах, практически целесообразнее осуществлять через внешние факторы. Связь между качественными показателями комбинированных методов обработки и внешними воздействиями может быть представлена в виде комплекса, где возможно сочетание различных элементов:

$$\begin{aligned} P_p &\supset (M, X, M_p, M_i, T_p, Y, MX, MM_p, MM_i, MT_p, MY, XM_p, \dots) \\ P_r &\supset (M, X, M_p, M_i, T_p, Y, MX, MM_p, MM_i, MT_p, MY, XM_p, \dots) \\ R_z &\supset (M, X, M_p, M_i, T_p, Y, MX, MM_p, MM_i, MT_p, MY, XM_p, \dots) \\ T &\supset (M, X, M_p, M_i, T_p, Y, MX, MM_p, MM_i, MT_p, MY, XM_p, \dots) \\ G_i &\supset (M, X, M_p, M_i, T_p, Y, MX, MM_p, MM_i, MT_p, MY, XM_p, \dots) \\ U &\supset (M, X, M_p, M_i, T_p, Y, MX, MM_p, MM_i, MT_p, MY, XM_p, \dots) \\ \Xi &\supset (M, X, M_p, M_i, T_p, Y, MX, MM_p, MM_i, MT_p, MY, XM_p, \dots) \end{aligned}$$

где  $P_p$  – производительность;  $P_r$  – погрешность;  $R_z$  (или другой параметр) – шероховатость;  $T$  – глубина измененного слоя;  $G_i$  (или другой показатель) – механические свойства обработанного материала;  $U$  – износ инструмента;  $\Xi$  – удельный расход электроэнергии, которые зависят от магнитного  $M$  (лучевого), химического  $X$ , механического постоянного  $M_p$  и импульсного  $M_i$ , теплового  $T_p$ , ядерного  $Y$  воздействия и их сочетаний.

Построение полной математической модели оптимизации комбинированных процессов затруднено, при ограниченной изученности взаимного влияния внешних воздействий построение в [7]. При этом, оптимизация выбора внешних факторов осуществима при определенных допущениях. В комплексах необходимо сохранить те воздействия, которые значимы для технологического показателя, при этом каждое из них может иметь множество технологических применений.

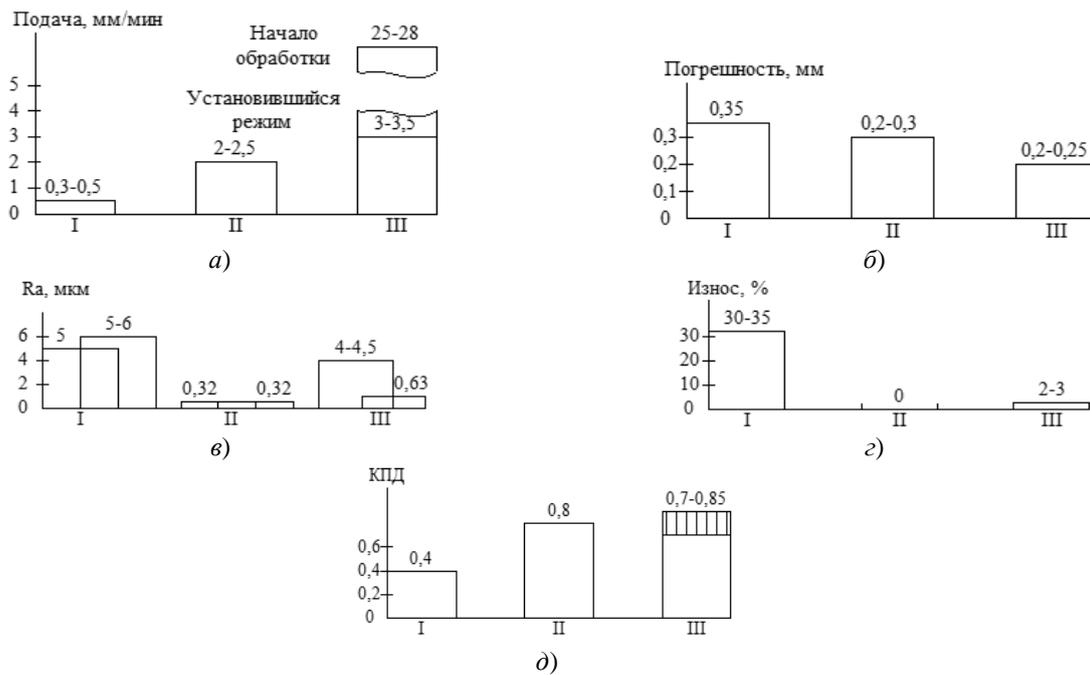
На примере магнитного воздействия  $M$ , которое включает в себя электромагнитные поля от электрического и лучевого влияния на качественные и количественные характеристики объектов исследования, характерно отсутствие моментального непосредственного влияния на показатели, но его присутствие изменяет переменные характеристики, например абразивных гранул

при комбинированном шлифовании, особенно в труднодоступных участках в местах контакта инструмента. Для некоторых воздействий следует учесть неизменность воздействий. Так, тепловые факторы определяют технологические показатели всех видов электроэрозионной и лучевой обработки, которых известно и изучено не менее семи.

Обоснование и выбор структуры взаимных влияний составляющих комбинированного процесса выполняется с учетом взаимовлияния различных факторов, наиболее полно удовлетворяющих требованиям проектировщиков технологических комплексов.

#### **Базовые технологические показатели, достигнутые с использованием комбинированных методов обработки**

На диаграммах (рис. 3) показаны технологические показатели эрозионно-химического прошивания конструкционных сталей, которое в полной мере изучено и получена достоверная информация для адекватной оценки показателей спроектированного процесса [4, 6]. Результаты оцениваются с учетом возможности их эффективного использования в технологических комплексах.



**Рис. 3. Технологические показатели и эффективность освоенных и новых процессов прошивки отверстий в типовых деталях:**

*a* – скорость прошивки (подача инструмента); *б* – погрешность формы и размеров отверстия; *в* – шероховатость торцевой (слева) и боковой поверхности; *г* – износ инструмента; *д* – коэффициент полезного использования технологического тока; I – электроискровая обработка; II – электрохимическая размерная обработка; III – комбинированная обработка

**Fig. 3. Technological indicators and efficiency of mastered and new processes of stitching holes in standard parts:** processing *a* – the speed of the firmware (tool feed); *b* – the error of the shape and size of the hole; *c* – the roughness of the end (left) and side surface; *d* – tool wear; *e* – capacity utilization of technological current; I – electric spark, II – electrochemical dimensional; III – combined

Усредненная величина подачи, для отверстий малой глубины, значительно превышает скорость перемещения инструмента при электроэрозионной и электрохимической обработке.

Шероховатость, погрешность, и параметр использования подводимой энергии эквивалентны параметрам для исходных методов. Износ инструмента (см. рис. 3) по сравнению с электроэрозионной обработкой значительно снизился, при этом в начале процесса он приблизился к показателю безизносной схемы. В отличие от нее, производительность комбинированного метода возросла, а не снизилась, как это свойственно безизносной схеме электроэрозионной обработки.

Изучение экспериментальных результатов и показателей на рис. 3 и показывает, что целевые показатели для комбинированного процесса выполнены: достигнута значительная производительность (наиболее значимо при

малой глубине отверстий), не утрачены приемлемая шероховатость и износ инструмента, усовершенствованы или сохранены на исходном уровне остальные показатели.

Условия, применение которых рационально для обоснования правомерности выбора эрозионно-химической прошивки в качестве оптимального процесса показаны в табл. 1. Представлены расчетные зависимости и наиболее продуктивные режимы обработки, принятые для других сравниваемых методов, проанализированы полученные технологические показатели.

Анализ параметров в табл. 1 доказывает обоснованность [7] назначения электроэрозионно-химической обработки для прошивки неглубоких (до 1...2 мм) качественных отверстий. Рекомендуемые в [4] режимы электроэрозионно-химической прошивки отверстий с глубиной до 5...6 мм приведены в табл. 2.

**1. Анализ результатов выбора воздействий и методов проектирования комбинированных методов обработки при прошивке отверстий в наукоемких изделиях**

**1. Analysis of the results of the selection of impacts and design approaches of combined processing technics for piercing holes in high-tech products**

Наименование метода	Режимы и расчетные технологические показатели [4]	Достиженные показатели
Электрохимическая размерная обработка с наложением ультразвуковых колебаний	Напряжение 10... 15 В; частота колебаний 18... 22 кГц; амплитуда колебаний – до 40 мкм; скорость подачи инструмента: $v_k = v_{\text{эхо}} + v_{\text{узо}}$ , где $v_{\text{узо}}$ – скорость съема за счет ультразвуковой обработки и интенсификации процесса анодного растворения	Скорость прошивки – 2,5...3 мм/мин; шероховатость – 2,5...3 мкм; погрешность – 0,35...0,4 мм; удельный расход энергии – 100...120 кВт·ч/кг
Электрохимическая размерная обработка с наложением низкочастотных колебаний	Напряжение 10...15 В, Частота колебаний 10...100 Гц, Амплитуда (0,3... 0,5) $S_0$ , Скорость прокачки рабочей среды $v_{\text{ж}} > 2$ м/с, Скорость подачи инструмента: $v_k = \frac{\alpha}{\gamma} \eta \frac{\beta \chi (U - \Delta U)}{S},$ где $\beta = (1,2... 1,3)$ – показатель степени, учитывает воздействие колебаний	Скорость прошивки возрастает на 20 %. Остальные показатели соответствуют электрохимической размерной обработке
Электрохимическая размерная обработка с облучением лазером	Напряжение – 6...8 В, Скорость подачи инструмента: $V_L = \frac{\alpha}{\gamma} \eta \frac{\beta \chi (U - \Delta U)}{S},$ где $\beta = 1,5 ... 3,0$ .	Скорость прошивки в начале обработки возрастает до 20 раз

**2. Режимы комбинированной обработки**

**2. Combined processing modes**

Обрабатываемый материал	Состав рабочей среды	Напряжение, В	Скорость прокачки рабочей среды, м/с
Сталь конструкционная	Токопроводящие эмульсии (СОЖ); Слабые растворы: 6...8% $\text{NaNO}_3$ с 0,5...1% $\text{NaNO}_2$	45...65	более 4
Нержавеющие и жаропрочные сплавы	Те же	30...40	4 ÷ 6
Титановые сплавы	Слабые растворы $\text{NaCl}$ (6... 10%)	40...60	5 ÷ 8
Алюминиевые сплавы	Слабые растворы $\text{NaNO}_3$	45...55	3 ÷ 5

### Стабильное обеспечение качества изделий за счет применения комбинированных методов нанесения покрытий

Отработка технологичности [2, 6] выявила, что в технологических комплексах можно обеспечить высокие эксплуатационные показатели с технологическим воздействием на поверхностный слой из однослойных и многослойных покрытий.

Известны [4, 6, 7] освоенные технологии нанесения покрытий комбинированными методами на распространенные конструкционные материалы как стали 20, 45, нержавеющей стали типа 12X18H10T, твердые сплавы. Многослойные покрытия позволяют сформировать на поверхности заготовки слои, отличающиеся повышенной твердостью, износостойкостью, жаростойкостью и коррозионной стойкостью, а также создать антифрикционные слои путем применения в качестве поверхностных слоев материалов металлы, обладающие надежными эксплуатационными качествами. Решена проблема [8] нанесения качественных покрытий из чугуна на легкоплавкий сплав на основе алюминия, что позволило совместить в поверхностном слое высоконагруженных деталей свойства, ранее практически не используемые в изделиях и средствах технологического оснащения. Это, прежде всего, повышение защитных свойств объектов при работе в агрессивных средах, при повышенных температурах, в условиях высокого износа контактных поверхностей. Однако реализация комбинированных методов нанесения качественных, защитных покрытий на алюминиевые сплавы потребовала создания на уровне изобретений новых способов и устройств, преодоления производственных трудностей, вызванных ранее слабоизученных факторов. К ним относятся:

– высокая разность температур плавления и кипения материалов применяемых инструментов, значительно превышающая температуру плавления алюминиевых сплавов,

что может вызывать разрушение уже нанесенного чугунного покрытия за счет интенсивного испарения и выброса жидкой фазы материала катода из зоны разряда;

– наличие на поверхности алюминиевого сплава плотной, жаростойкой оксидной пленки малой электропроводности, приводящей к необходимости проведения обработки при повышенных значениях рабочего тока, которые также могут вызвать эрозию заготовки вследствие интенсивного нагрева, плавления и испарения при протекании рабочих токов большой величины;

– влияние межэлектродной воздушной среды, так как при нанесении покрытий происходит окисление и азотирование мелких капель расплавленного металла электрода-инструмента до их соприкосновения с поверхностью заготовки, которая нагрета до высоких температур, реагирует с элементами окружающей среды. За счет этого покрытия могут получаться дефектными с многочисленными порами, трещинами, наличием несплошностей и с недостаточной адгезией к материалу детали;

– ограничение по толщине чугунных покрытий, где ранее удавалось получать на алюминиевых деталях качественные поверхностные слои толщиной не более  $20 \div 30$  мкм, нередко с измененным химическим составом. В [8] показаны предложенные пути и методы успешного устранения отрицательных факторов за счет научно обоснованного выбора межэлектродной среды. Для этого выбор состава и технологии использования среды базируется на исключении или уменьшении окисления материалов инструмента с управлением и регулированием процессом при нанесении содержащих углерод покрытий за счет его выгорания до 40... 60 %. Здесь для получения качественных защитных, токопроводящих металлических покрытий на поверхности деталей из алюминиевых сплавов перед их нанесением в зону разряда вводят регулируемое количество созданных химически активных флюсов,

снижающих тепловую защиту материала на границе покрытия и, как следствие, препятствующих разрушению поверхностного слоя основы [Пат. РФ № 2405662].

Флюсы (табл. 3) являются многокомпонентными системами с многообразными

интервалами температуры кристаллизации и состоят из смеси солей, окислов, сульфидов и других химических соединений, с добавлением в них небольшого количества фтористых соединений, интенсифицирующих действие флюса.

### 3. Состав флюсов, применяемых для нанесения чугунных покрытий на детали из алюминиевых сплавов

### 3. The composition of fluxes used for applying cast iron coatings to aluminum alloy parts

Марка флюса	Массовая доля элемента, %							
	NaF	TiO <sub>2</sub>	Ti порошок (ПТМ)	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	KCl	NaCl	Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>
ФС-71	6,4	13,6	13,6	9,1	57,3	-	-	-
АН-А1	-	-	-	-	-	50	20	30
ЖА-64	-	-	-	-	3	38	15	44
АНФ-28	CaF 41...49	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0...5	CaO 26...32	MgO 0...6	11...15	-	-	-

Преимуществом флюсов, предлагаемых для нанесения покрытий на алюминиевые сплавы электроэрозионным способом, является использование недефицитных доступных компонентов, применяемых для сварки алюминиевых материалов. Применение таких флюсов обеспечивает возможность использования комбинированных методов для получения технологичных покрытий и создает условия устойчивого протекания процесса нанесения качественных слоев, гарантирующих отсутствие в покрытии пор и трещин, обеспечивающих высокую коррозионную стойкость; электропроводимость и другие полезные свойства объектов с покрытиями.

#### Заключение

Обоснованы и реализованы пути совершенствования качества наукоемких изделий комбинированными методами при их использовании в технологических комплексах.

Показаны пути повышения качества изделий отечественной техники и средств технологического оснащения за счет научно обоснованной оценки уровня технологичности, где в качестве начальных условий при комбинации воздействий используют базовые процессы, выполняемые известными методами или при создании новой (ранее считавшейся неосуществимой) операции с ее технологическими показателями или желаемыми условиями выполнения.

На примерах освоенных комбинированных видах обработки доказана возможность выбора воздействий, отвечающих основным потребностям заказчика, для чего в работе предложены эффективные методы интенсификации желаемых воздействий и купировании отрицательных явлений.

В структуре проектирования перспективных комбинированных методов определен принцип, в котором каждый вид воздействия взаимосвязан с другими, а их сочетание в технологических комплексах способно

интенсифицировать благоприятные результаты суммарного воздействия на технологические показатели.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Бондарь А.В.** Качество и надежность // М. Машиностроение. 2007. 308 с.
2. **Сафонов С.В.** Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик изделий // Воронеж: Издат. дом ВГУ. 2015. 232 с.
3. **Смоленцев В.П., Сафонов С.В., Котуков В.И.** Поддержание качества поверхностного слоя изделий в процессе их очистки от загрязнений // Научно-технические технологии в машиностроении. 2014. № 7. С. 21–23.
4. **Смоленцев Е.В.** Проектирование электрических и комбинированных методов обработки // М: Машиностроение. 2005. 511 с.
5. **Кириллов О.Н.** Технология комбинированной обработки непрофилированным электродом // Воронеж: ВГТУ. 2010. 254 с.
6. **Справочник технолога** / Под ред. А.Г. Сулова // М: Инновационное машиностроение. 2019. 800 с.
7. **Комбинированные методы обработки** / Учебное пособие под ред. В.П. Смоленцева // Воронеж: ВГТУ. 2024. 91 с.
8. **Норман А.В., Смоленцев В.П., Кондратьев М.В.** Повышение качества деталей из легкоплавких материалов путем нанесения покрытий из чугуна // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т.19. № 3. 2023. С. 120–126.

### REFERENCES

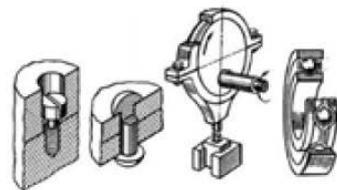
1. Bondar A.V. Quality and reliability. // Moscow: Mashinostroenie, 2007, 308 p.
2. Safonov S.V. Technological support of operational characteristics of products // Voronezh: Publishing house VSU, 2015, 232 p.
3. Smolentsev V.P., Safonov S.V., Kutukov V.I. Maintaining the quality of the surface layer of products in the process of cleaning them from contamination. // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2014, no. 7, pp. 21–23.
4. Smolentsev E.V. Design of electrical and combined processing methods. // Moscow: Mashinostroenie, 2005, 511 p.
5. Kirillov O.N. Technology of combined processing with a non-profiled electrode // Voronezh: VSTU, 2010, 254 p.
6. The technologist's handbook edited by A.G. Suslov, Moscow: Innovative mechanical engineering, 2019, 800 p.
7. Combined processing methods / Textbook edited by V.P. Smolentsev // Voronezh: VSTU, 2024, 91 p.
8. Norman A.V., Smolentsev V.P., Kondratiev M.V. Improving the quality of parts made of low-melting materials by applying cast iron coatings // Bulletin of the Voronezh State Technical University, vol. 19, no. 3, 2023, pp. 120–126.

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

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

Статья поступила в редакцию 08.02.2024; одобрена после рецензирования 13.03.2024; принята к публикации 05.06.2024.

The article was submitted 08.02.2024; approved after reviewing 13.03.2024; accepted for publication 05.06.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №9 (159). С.25-32.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №9 (159). P. 25-32.

Научная статья  
УДК 621.9  
doi: 10.30987/2223-4608-2024-25-32

### Развитие теории и принципов планирования многономенклатурных технологических процессов механообработки и сборки

**Петр Юрьевич Бочкарев**, д.т.н.

Камышинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный  
технический университет», г. Камышин, Россия  
Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии инженерии имени  
Н.И. Вавилова, г. Саратов, Россия  
bpy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0587-6338>

**Аннотация.** Представлены методические принципы создания системы планирования многономенклатурных технологических процессов (ТП), направленных на решение таких существующих в настоящее время проблем технологической подготовки механообрабатывающих производств, как субъективный характер принятия проектных решений, недостаточный уровень автоматизации, отсутствие возможности учета складывающейся производственной ситуации. Объективными причинами в необходимости совершенствования подходов к разработке ТП выступают длительный цикл периода технологической подготовки, невысокое качество разрабатываемых технологических процессов, невозможность корректировки ТП на этапе реализации. Описаны основные структурные элементы системы планирования многономенклатурных ТП. На основе системного подхода объединены все этапы работ по технологическому обеспечению производственных систем, что обеспечивает в короткие временные рамки использование информационных массивов данных о реальном состоянии производственной системы и оперативных сведениях о производственных заданиях. Приведены результаты теоретических работ, позволившие описать процесс создания ТП как системы, объединяющей проектирование и реализацию технологии с учетом влияния изменений производственной ситуации. В процессе апробации и использования представленных методических подходов, определены значимые области исследований, без которых получение в полной мере поставленных результатов является затруднительным, что позволило сформировать пути развития системы. Среди них: установление взаимодействия с конструкторской подготовкой производства; детализация данных о исходных заготовках во взаимосвязи с выбором структуры ТП и назначением рационального комплекта технологической оснастки; определение требований к средствам технологического оснащения, ориентированных на обеспечение гибкости их использования; определение корреляционных связей между многовариантным проектированием ТП изготовления деталей и требованиями, предъявляемыми к точностным показателям при сборке изделий. Разработанные формализованные модели выполнения этапов технологической подготовки механообрабатывающих производств являются предпосылкой полной автоматизации проектирования ТП и обеспечения высокоэффективного функционирования машиностроительных комплексов.

**Ключевые слова:** машиностроительные производства, технологическая подготовка производства, многономенклатурные производственные системы технологические процессы механообработки, системы автоматизированного проектирования

*Для цитирования:* Бочкарев П.Ю. Развитие теории и принципов планирования многономенклатурных технологических процессов механообработки и сборки // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 9 (159). С. 25–32. doi: 10.30987/2223-4608-2023-25-32

## Development of the theory and principles for planning multiproduct manufacturing activity of machining and assembly

Pyotr Yu. Bochkarev, D. Eng.  
Kamyshin Technological Institute of Volgograd State Technical University, Kamyshin, Russia  
Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after  
N.I. Vavilov (Vavilov University), Saratov, Russia  
bpy@mail.ru

**Abstract.** *Instructional guidelines for planning a multiproduct manufacturing activity (MA) for machining and assembly aimed at solving currently existing problems of machining industries process design, i.e. subjectivity of making design decisions, insufficient automation, and inability of the observing of current production situation are presented. The objective reasons for the need to improve approaches to the development of MA are the long cycle of the process design period, the low quality of the processes operation, and the impossibility to adjust MA at the implementation stage. The main structural elements of multiproduct manufacturing activity planning are described. Based on a systematic approach, all stages of work on technological support of production systems are combined, making possible to use the information arrays of data on the real state of the production system and operational information on production tasks in a short time frame. The results of theoretical work provide for the process of making MA as a system that combines the design and implementation of technology, taking into account the impact of changes in the production situation. In the process of approbation and use of the presented methodological approaches, significant areas of research were identified, smoothing away difficulties connected with the performance targets, enabling the development path of the system. Among them: the interaction with the design preparation of production; detailing data on the initial workpieces in connection with the choice of the MA structure and the appointment of a rational set of technological equipment; determining the requirements for technological equipment, focused on ensuring the flexibility of their use; determining the correlations between the multiple-path design of parts manufacturing process and the requirements for accuracy indicators in the assembly of products. The developed formalized models for the implementation of the stages of technological preparation of machining industries are a background for full automation of MA design and highly efficient functionality of machine-building complexes.*

**Keywords:** machine-building industries, technological preparation of production, multiproduct production systems, technological processes of machining, computer-aided design systems

**For citation:** Bochkarev P.Yu. Development of the theory and principles for planning multiproduct manufacturing activity of machining and assembly / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 9 (159). P. 25–32. doi: 10.30987/2223-4608-2024-25-32

### Введение

Усиленное внимание к формированию базовых научных направлений отечественного машиностроения определяется современными задачами в обеспечении перспектив конкурентоспособности мировым производителям, развития и создания фундаментальных положений, обеспечивающих постоянно нарастающие темпы в создании и высокоэффективном изготовлении высококачественной, надежной и удобной в эксплуатации продукции.

Глобальные критерии эффективности работы производственных систем, связаны с удовлетворением потребности и общественной значимостью изготавливаемых изделий, запросами технической и национальной безопасности государства. В настоящее время они напрямую взаимосвязаны с частотой модернизацией и сменяемостью выпускаемой продукции, быстрым переходом на новый вид и расширением номенклатуры, резкому возрастанию потребности гибкости и эффективного использования функциональных возможностей производственных систем.

Другими определяющими критериями являются экономические показатели, позволяющие спрогнозировать и снизить себестоимость изготовления деталей и изделий [1 – 5]. Они не всегда совпадают с глобальными и в отдельных аспектах несообразны им. В качестве причин этого могут рассматриваться отдельные традиционно используемые методологические положения, заложенные в конструкторско-технологической подготовке и организационном функционировании машиностроительных производств. В связи с этим, одним из важных научных направлений в развитии технологии машиностроения, является совершенствование и создание новых принципиальных подходов к технологической подготовке, отличающихся степенью адаптации принимаемых проектных решений к реалиям внешних и внутренних производственных факторов. Принципиально важной является разработка таких подходов к управлению производственными системами, которые позволяли бы создать автоматизированные системы реализации технологических процессов и представляли бы собой единое целое с системами технологической подготовки производства, обеспечивающих резкое сокращение времени на разработку технологий, учитывающих конкретные особенности отдельной механообрабатывающей системы, и эффективное управление реализацией этих технологий.

### **Материалы и методы**

Анализ особенностей и возможностей современных автоматизированных продуктов для технологической подготовки производства с позиций вышеописанных требований [6 – 10] позволил сформулировать их основные недостатки, такие как субъективный характер принятия проектных решений, низкий уровень автоматизации, отсутствие возможности учета складывающейся производственной ситуации, являющиеся причинами длительного периода технологической подготовки производства, невысокого

качества разрабатываемых технологических процессов, невозможность корректировки ТП на этапе реализации. Следует отметить, что в используемых системах автоматизированного проектирования остаются нерешенными задачи преимущественно высокоинтеллектуального характера, в тоже время являющимися определяющими качество проектных решений. Проектировщику свойственен субъективизм, основанный на его опыте и личностных подходах к решению поставленных задач. Кроме этого физиологические особенности, не позволяют человеку конкурировать с вычислительной техникой по быстродействию и объему обрабатываемой информации, что является объективными причинами в острой необходимости создания формализованных моделей проектных процедур для всех этапов технологической подготовки машиностроительных производств, обеспечивающих в короткие временные рамки с использованием больших информационных массивов данных о реальном состоянии производственной системы и оперативных сведениях о производственных заданиях выполнения всего комплекса технологического обеспечения.

В соответствии с обоснованием требований, предъявляемых технологической подготовки механообрабатывающих производств, предложена концепция системы планирования технологических процессов (ТП), объединяющая на основе системного подхода основные этапы работ по технологическому обеспечению многономенклатурных производственных систем. Выполнена разработка системы на всех уровнях с привлечением методологической базы теории многоуровневых иерархических систем, основные теоретические положениями которой включают:

– создание технологии, охватывающей не только этапы проектирования, но и реализацию ТП и определяющей термином «планирование технологических процессов». Проектирование ТП ведется с учетом характера производства и оперативной возможностью корректировки ТП в

зависимости от изменения производственной ситуации, что во многом предопределяет эффективность работы производственной системы;

– технологию изготовления каждой детали, которая строится с учетом ТП всех деталей, изготавливаемых в производственной системе в рассматриваемый интервал времени. Процесс создания ТП протекает параллельно для всех изготавливаемых деталей с обменом информацией между ними и критериальными оценками, характеризующими эффективную работу производственной системы в целом.

Результаты работ по созданию системы наиболее полно в части развития теоретических исследований представлены в ряде диссертационных работ (рис. 1). Проведенные работы позволили развить методы подготовки и принятия решений на всех этапах технологической подготовки механообрабатывающих производств. В соответствии со сформированными концептуальными положениями, включающими учет технологической совместимости деталей и рациональной реализации процесса изготовления на основе ситуационной перестройки ТП на различных этапах, создаются условия для функционирования производственных систем с наивысшими показателями. Основные, отличительные от традиционных подходов, положения системы планирования многономенклатурных ТП, позволяют создать формализованные модели для всех этапов технологической подготовки механообрабатывающих производств. Описание базовых математических моделей и методические решения по выполнению указанных проектных процедур, содержатся в следующих работах [11 – 13].

В процессе апробации и использования представленных методических подходов создания системы планирования многономенклатурных ТП выявились значимые области исследований, без которых получение в полной мере поставленных результатов является затруднительным, что позволило сформировать пути развития системы. Среди них:

– установление взаимодействия с конструкторской подготовкой производства;

– решение вопросов детализации информационного обеспечения сведений об исходных заготовках во взаимосвязи с выбором структуры ТП и назначения рационального комплекта технологической оснастки;

– создание требования к средствам технологического оснащения, ориентированных на обеспечение гибкости их использования;

– определение корреляционных связей между многовариантным проектированием ТП изготовления деталей и требованиями, предъявляемыми к точностным показателям при сборке изделий.

Предъявляемые к условиям функционирования современных машиностроительных комплексов требования напрямую связаны с уровнем установления взаимосвязей между конструктивными особенностями деталей и конкретными условиями производства, основанных на обеспечении производственной технологичности изготавливаемых изделий. Разработаны дополнительные количественные показатели производственной технологичности, позволяющие спрогнозировать технико-экономические показатели реализации ТП [14], отражающие: многовариантность при обработке деталей, уровня загрузки технологического оборудования, степень концентрации при формировании структур операций, соблюдения принципов единства и постоянства баз на этапах разработки ТП, однородности используемого технологического оборудования и др. Предложена методика на основе анализа влияния на производительность установления относительных весовых характеристик количественных показателей технологичности, что позволяет в автоматизируемом режиме дать заключение и рекомендации по совершенствованию конструктивных характеристик деталей, сформированной комплектности производственной программы, соответствию состава выбранного технологического обеспечения.

Бочкарев П.Ю.

«Совершенствование метода проектирования технологических процессов в ГПС на основе построения системы унифицированных технологических элементов» (к.т.н.)

«Теория и принципы создания системы планирования гибких технологических процессов в условиях многономенклатурных производственных систем механообработки» (д.т.н.)

Пластинкин А.В.

«Совершенствование технологической подготовки механообрабатывающих производств на основе создания методики и автоматизированной подсистемы формирования схем обработки поверхностей деталей типа тел вращения в системе планирования многономенклатурных технологических процессов» (к.т.н.)

Кочадаев А.В.

«Повышение качества проектных решений технологической подготовки многономенклатурных производственных систем механообработки на основе разработки моделей и автоматизированной подсистемы формирования последовательностей короткей технологических переходов» (к.т.н.)

Митин С.Г.

«Совершенствование технологической подготовки многономенклатурных механообрабатывающих производств при проектировании операций фрезерной обработки» (к.т.н.)

«Синтез технологических операций со сложной структурой в многономенклатурных системах механообработки» (к.т.н.)

Бокова Л.Г.

«Совершенствование оценивания производственной технологичности в системе планирования многономенклатурных технологических процессов» (к.т.н.)

Назарьев А.В.

«Совершенствование технологической подготовки многономенклатурных механообрабатывающих производств на основе учета требований к сборке высокоточных изделий» (к.т.н.)

Шалунов В.В.

«Разработка методики и автоматизированной подсистемы проектирования технологических операций токарной обработки в системе планирования многономенклатурных технологических процессов» (к.т.н.)

Решетникова Е.П.

«Повышение эффективности изготовления деталей со сложнопольными поверхностями на основе разработки комплекса контрольно-измерительных процедур в системе планирования многономенклатурных технологических процессов» (к.т.н.)



Иванов А.А.

«Разработка моделей и алгоритмов проектных процедур управления производством в системе планирования многономенклатурных технологических процессов механообработки» (к.т.н.)

**Рис. 1. Планирование многономенклатурных ТП механообработки как система принятия решений**

**Fig. 1. Planning of multiproduct machining centers as a decision-making system**

Для обеспечения разработки рациональных ТП в условиях комплексов с быстроменяющейся производственной ситуацией предложено комплексное решение [15 –17], включающее учет реальных, а не усредненных, размерных характеристик заготовок и назначения комплекта контрольно-измерительных средств методом группирования с позиции

Изменение предлагаемой концептуальной ориентации к разработке ТП не может не отразиться на таком аспекте, как исследования вопросов обоснования требований к средствам технического оснащения в условиях функционирования производства по гибкой технологии, оценки уровня принимаемых проектных решений на основе соответствия их свойствам многономенклатурных ТП. Функциональные возможности средств технологического оснащения не должны быть жестко фиксированными, а выбираться в зависимости от обстоятельств.

Разработанные критерии для оценки эффективности вариантов ТП, позволяют определить направления совершенствования технологического оборудования и оснастки, в первую очередь отвечающих характерным особенностям многономенклатурного производства (однородность, устойчивость качества, альтернативность параметров реализации, универсальность, инвариантность и др.). При этом, наиболее актуальным является вопрос поддержки интеллектуальной деятельности проектировщика, особенно в аспекте технического творчества, что обеспечивает нахождение новых, более эффективных технических решений, в том числе на уровне изобретений. Примеры результатов логического построения эволюционных процедур создания новых объектов технического обеспечения ТП, отвечающих условию согласования с критериями используемыми при планировании ТП реализованы в объектах интеллектуальной собственности (патенты № 2059193, 2084327, 1717936, 2210484, 2212979, 2516326, 2807252, 2805690, 2793666, 2801501).

Методологической основой поиска новых технических решений является анализ, который включает процесс изучения структуры, свойств, функций отдельных элементов или объекта в целом с позиций расширения требования гибкости, значение которого в условиях многономенклатурного производства становится преобладающим. Расчет показателей гибкости позволяет дать более объективную и точную оценку. На основе данных о реально действующем производстве показатели обеспечивают выполнение детальных исследований для каждого используемого средства, определение соответствия конструкторской схемы или технологического способа требованиям гибкости и в какой мере.

Для решения проблемы обеспечения качества сборки высокоточных изделий, разработан комплексный подход к технологической подготовке производства, устанавливающей связь между проектными процедурами механообработывающего и сборочного производств на основе выбора из множества ТП обработки деталей варианты, учитывающие требования последующей сборки. На основе конструкторского размерного анализа сборочного узла и входящих в него деталей выполняется расчет размерных цепей в координатных направлениях плоскостей с предельными заданными параметрами замыкающих звеньев [18]. Совмещение полученного графа и графа вариантов ТП позволяет представить геометрическую и созданную на ее основе математическую модель. Обеспечивается проведение выбора рационального ТП методом многокритериальной оптимизации с применением генетического алгоритма для определения весовых коэффициентов критериев. В качестве критериев используются: получение максимально возможного числа сборочных комплектов, однородность используемого технологического оборудования, количество технологических операций и переходов для каждого из ТП.

### Заключение

Описан комплексный подход, базирующийся на единой методологической основе и объединяющий все этапы технологической подготовки механообрабатывающих производств, с позиции обеспечения максимальной производительности и эффективности использования возможностей основного оборудования и средств технологического оснащения.

Представлены принципы и методические решения, заложенные при создании системы планирования многономенклатурных ТП, отличительной чертой которых является наличие возможности учета реально складывающейся производственной ситуации и одновременной разработке ТП для комплекта деталей, входящих в заданную программу выпуска.

Сформированы направления развития исследований, включающих совершенствование моделей информационного обеспечения системы, заключающихся в расширенном представлении конструктивных характеристик деталей, параметров технологического оснащения, требований сборочных процессов, и позволяющих выполнять комплекс проектных процедур, анализируя операционные и межоперационные связи разрабатываемых ТП. Разработанные формализованные модели выполнения всей последовательности этапов технологической подготовки механообрабатывающих производств, включая наиболее трудоемкие и интеллектуально содержательные, открывают перспективу полной автоматизации проектирования ТП с высоким качеством решений и обеспечением высокоэффективного функционирования машиностроительных комплексов.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Справочник** технолога / под общей ред. А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
2. **Базров Б.М.** Базис технологической подготовки машиностроительного производства: монография. М.: КУРС, 2023. 324 с.

3. **Справочник** технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. 6-е изд. М.: Инновационное машиностроение, 2018. 818 с.
4. **Васильев А.С., Дальский А.М., Золотаревский Ю.М., Кондаков А.И.** Направленное формирование свойств изделий машиностроения / под ред. А.И. Кондакова. М.: Машиностроение, 2005. 352 с.
5. **Сулов А.Г., Федонин О.Н., Петрешин Д.И.** Фундаментальные основы обеспечения и повышения качества изделий машиностроения и авиакосмической техники. Вестник Брянского государственного технического университета. 2020; 2(87). С. 4–10.
6. **He В., Bai К.Ж.** Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review // *Adv. Manuf.* 2021. Vol. 9. P. 1–21.
7. **Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В., Фролов Е.М.** Цифровизация машиностроительного производства: технологическая подготовка, производство, прослеживаение // *Научноёмкие технологии в машиностроении.* 2022. № 8 (134). С. 39–48.
8. **Ингеманссон А.Р.** Основные положения методологии технологической подготовки производства и адаптивного управления в цифровых производственных системах для механической обработки // *Известия Волгоградского государственного технического университета.* 2021. № 1 (248). С. 15–18.
9. **Tao F., Zhang M.** Digital twin shop-floor: a new shopfloor paradigm towards smart manufacturing // *IEEE Access.* 2018. Vol.5. P. 20418–20427.
10. **Chakraborty S., Chowdhury R.** Graph-theoretic-approach-assisted Gaussian Process for Nonlinear Stochastic Dynamic Analysis Under Generalized Loading // *Journal of Engineering Mechanics.* 2019. Vol. 145. № 12. P. 04019105.
11. **Бочкарёв П.Ю.** Проектирование маршрутов многономенклатурных технологических процессов механообработки. Саратов: Саратов. гос.техн.ун-т, 1996. 104 с.
12. **Бочкарёв П.Ю., Королёв А.В.** Принципы создания системы планирования гибких технологических процессов // *Доклады Российской академии естественных наук.* 1999. № 1. С. 172–184.
13. **Бочкарёв П.Ю.** Системное представление планирования технологических процессов механообработки // *Технология машиностроения.* 2002. № 1. С. 10–14.
14. **Бочкарев П.Ю., Королев Р.Д., Бокова Л.Г.** Расширение информационного обеспечения оценки производственной технологичности изделий // *Научноёмкие технологии в машиностроении.* 2021. № 9 (123). С. 36–41.
15. **Митин С.Г., Бочкарев П.Ю., Азиков Н.С.** Метод генерации структур технологических операций для оборудования сверлильной группы // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* 2018. № 2. С. 69–74.
16. **Решетникова Е.П., Бочкарев П.Ю.** Принципы формирования комплекса контрольно-измерительных

процедур в системе автоматизированного планирования производства // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2022. № 11 (137). С. 25–31.

17. Иванов А.А., Боцкарев П.Ю. Оперативное планирование в многономенклатурном производстве. Методы и алгоритмы взаимодействия: монография. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2016. 270 с.

18. Nazariyev A.V., Bochkarev P.Y. Technological support of assembly based on the principles of identifying critical requirements for high-precision products // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2024. Т. 24, № 1. С. 66–77.

## REFERENCES

1. Technologist's handbook / under the general editorship of A.G. Suslov. M.: Innovative mechanical engineering, 2019. 800 p.

2. Bazrov B.M. The basis of technological preparation of machine-building production: monograph. M.: COURSE, 2023. 324 p.

3. Handbook of a machine-building technologist. In 2 vols. Vol.2 / Edited by A.S. Vasiliev, A.A. Kutin. 6th ed., reprint. and additional. M.: Innovative mechanical engineering, 2018. 818 p.

4. Vasiliev A.S., Dalsky A.M., Zolotarevsky Y.M., Kondakov A.I. Directional formation of properties of machine-building products / ed. by A.I. Kondakov. - M.: Mashinostroenie, 2005. 352s.

5. Suslov A.G., Fedonin O.N., Petreshin D.I. Fundamental principles of ensuring and improving the quality of mechanical engineering and aerospace engineering products. Bulletin of the Bryansk State Technical University. 2020; 2(87). pp. 4–10.

6. He B., Bai K.J. Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review // Adv. Manuf. 2021. Vol. 9. P. 1–21.

7. Chigirinsky Yu.L., Krainev D.V., Frolov E.M. Digitalization of machine-building production: technological preparation, production, tracing // High-tech technologies in mechanical engineering. 2022. No. 8 (134). pp. 39–48.

8. Ingemansson A.R. The main provisions of the methodology of technological preparation of production and adaptive management in digital production systems for

mechanical processing // Izvestiya Volgograd State Technical University. 2021. No. 1 (248). pp. 15–18.

9. Tao F., Zhang M. Digital twin shop-floor: a new shopfloor paradigm towards smart manufacturing // IEEE Access. 2018. Vol. 5. P. 20418–20427.

10. Chakraborty S., Chowdhury R. Graph-theoretical-approach-assisted Gaussian Process for Nonlinear Stochastic Dynamic Analysis Under Generalized Loading // Journal of Engineering Mechanics. 2019. Vol. 145. No. 12. P. 04019105.

11. Bochkarev P.Yu. Designing routes of multi-nomenclature technological processes of machining. Saratov: Sarat. State Technical University Univ., 1996. 104 p.

12. Bochkarev P.Yu., Korolev A.V. Principles of creating a planning system for flexible technological processes // Reports of the Russian Academy of Natural Sciences. 1999. No. 1. pp.172–184.

13. Bochkarev P.Yu. System representation of planning of technological processes of mechanical processing // Technology of mechanical engineering. 2002. No. 1. pp.10–14.

14. Bochkarev P.Yu., Korolev R.D., Bokova L.G. Expansion of information support for assessing the production manufacturability of products // High-tech technologies in mechanical engineering. 2021. No. 9(123). P. 36–41.

15. Mitin S.G., Bochkarev P.Yu., Azikov N.S. Method of generating structures of technological operations for drilling group equipment // Problems of mechanical engineering and machine reliability. 2018. No. 2. pp. 69–74.

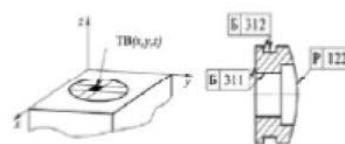
16. Reshetnikova E.P., Bochkarev P.Yu. Principles of formation of a complex of control and measuring procedures in the automated production planning system // High-tech technologies in mechanical engineering. 2022. No. 11 (137). pp. 25–31.

17. Ivanov A.A., Bochkarev P.Y. Operational planning in multi-nomenclature production. Methods and algorithms of interaction: monograph. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2016. 270 p.

18. Nazariyev A.V., Bochkarev P.Y. Technological support of assembly based on the principles of identifying critical requirements for high-precision products // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2024. Vol. 24, No. 1. pp. 66–77.

Статья поступила в редакцию 14.04.2024; одобрена после рецензирования 19.04.2024; принята к публикации 23.04.2024.

The article was submitted 14.04.2024; approved after reviewing 19.04.2024; assepted for publication 23.04.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №9 (159). С.33-41.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №9 (159). P.33-41.

Научная статья  
УДК 658.562  
doi: 10.30987/2223-4608-2024-33-41

## Управление качеством наукоёмких процессов

Виктор Андреевич Васильев<sup>1</sup>, д.т.н.

Светлана Викторовна Александрова<sup>2</sup>, к.т.н.

<sup>1, 2</sup> Московский авиационный институт МАИ (национальный исследовательский университет),  
Москва, Россия

<sup>1</sup> МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

<sup>1</sup> Vasiliev1952va@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9656-3651>

<sup>2</sup> vasil-s@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0007-1717-4612>

**Аннотация.** В статье показана роль информационных (цифровых) технологий в успешном высокотехнологичном предприятии. Проанализированы направления развития средств и методов управления качеством для наукоёмких инновационных процессов и производств на различных этапах жизненного цикла продукции. Наиболее важными методами являются цифровизация сбора, хранения и анализа больших объемов данных, контроль производственных и управленческих процессов, построение системы управления жизненным циклом продукции на основе современных информационных технологий. Для реализации новых подходов к организации производства используется цифровая трансформация – процесс преобразования компании, направленный на формирование единой информационной среды на всем жизненном цикле продукции, сочетающий различные методы и инструменты управления данными на предприятии. Важным шагом в развитии технологии обработки данных является использование искусственного интеллекта и нейронных сетей. Параллельно с развитием информационных технологий растут и возможности аналитики от описательной до предписывающей и когнитивной. На основе анализа передового опыта в управлении качеством, можно сделать вывод о возможности и необходимости цифровизации наукоёмких процессов с переходом к более эффективным методам организации производства и менеджмента качества.

**Ключевые слова:** качество, менеджмент качества, процессный подход, цифровые технологии, жизненный цикл продукции

**Благодарности:** данное исследование было проведено в рамках работы по Соглашению о предоставлении из федерального бюджета гранта на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития № 075-15-2024-527 от «23» апреля 2024 г.

**Для цитирования:** Васильев В.А., Александрова С.В. Управление качеством наукоёмких процессов // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 9 (159). С. 33–41. doi: 10.30987/2223-4608-2024-33-41

## Quality management of knowledge-based processes

Viktor A. Vasiliev<sup>1</sup>, D. Eng.

Svetlana V. Alexandrova<sup>2</sup>, PhD. Eng.

<sup>1,2</sup> Moscow Aviation Institute MAI (National Research University, Moscow, Russia)

<sup>1</sup> MIREA – Russian Technological University) Moscow, Russia

<sup>1</sup> Vasiliev1952va@yandex.ru

<sup>2</sup> vasil-s@yandex.ru

**Abstract.** The article shows the importance of information (digital) technologies in a successful high-tech enterprise. The directions of development of quality management tools and methods for knowledge-based innovative processes and productions at various stages of the product life cycle are analyzed. The most important methods are the digitalization of the collection, storage and analysis of large amounts of data, the control of production and management processes, the construction of a product lifecycle management system based on modern information technologies. To implement new approaches to the manufacturing process management, digital transformation is used - the process of transformation of a company aimed at forming a unified information environment throughout the product lifecycle, combining various methods and tools for data management at the enterprise. An important step in the development of data processing technology is the use of artificial intelligence and neural networks. Alongside with the development of information technology, the possibilities of analytics from descriptive to prescriptive and cognitive are also growing. Based on the analysis of best practices in quality management, it can be concluded that it is possible and necessary to digitalize knowledge-based processes with a transition to more efficient methods of organizing production and quality management.

**Keywords:** quality, quality management, process approach, digital technologies, product lifecycle

**Acknowledgements:** this research was carried out as part of the work under the Agreement on the provision of a grant from the federal budget for large-scale scientific projects in priority areas of scientific and technological development No. 075-15-2024-527 dated April 23, 2024.

**For citation:** Vasiliev V.A., Alexandrova S.V. Quality management of knowledge-based processes / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 9 (159). P. 33–41. doi: 10.30987/2223-4608-2024-33-41

### Введение

Первые идеи в области организации производства относятся к временам египетских фараонов. Труд человека ценился дешево, средства производства были примитивными, и, следовательно, дешевыми, поэтому вопросы организации труда и средств производства не были первоочередными. Основное внимание уделялось вопросам управления как способу воздействия на людей для достижения поставленной цели и контроля их деятельности. Развитие средств труда, методов организации производства и совершенствование управления со времен античности до настоящего времени сопровождало развитие цивилизаций и повышение уровня жизни стран и народов. Совершенствование производства продукции от первых

ремесленников древних времен до современных наукоемких цифровых технологий наших дней привело к созданию Индустрии 4.0, повышению качества жизни.

По мере развития техники, технологий и общественных отношений менялось представление о качестве. Разделение труда, появление машин и механизмов привело к необходимости контроля качества продукции и изделий. Усложнение производственных процессов и массовое промышленное производство потребовало новых подходов. В процессе индустриализации вместе с контролем качества продукции появились методы обеспечения качества и управления качеством, а затем и системы менеджмента качества. Принципиальное преимущество управления качеством над контролем заключается в возможности

предотвращать несоответствия (дефекты), тогда как контроль качества позволяет лишь обнаружить и устранить дефекты. Такой подход обеспечивает повышение выхода годной продукции и снижает издержки производства. Для эффективного управления качеством в двадцатом веке были разработаны инструменты и методы контроля и управления качеством. Достаточно вспомнить работы В. Шухарта, А. Фейгенбаума, Э. Деминга и других ученых двадцатого века. Во многих ситуациях качество стало главной составляющей конкурентоспособности и востребованности продукции. Следующим шагом в направлении повышения качества стало появление систем менеджмента качества (СМК). Сейчас уже не все помнят, но в Советском Союзе многое сделали для создания и совершенствования систем качества. Большую роль сыграли СБТ (система бездефектного труда), БИП (бездефектное изготовление продукции), КАНАРСПИ (качество, надежность, ресурс с первых изделий) и прообраз современных систем на основе международных стандартов серии ИСО 9000 – отечественная КС УКП (комплексная система управления качеством продукции). В дальнейшем СМК развивались в рамках международных стандартов ИСО серии 9000 и смежных серий.

Развитие информатизации производства и переход на следующую стадию развития, которую часто называют «Индустрия 4.0» требует заменить часть устаревших управленческих технологий под управлением человека на цифровые технологии. Переход к Индустрии 4.0 и широкому внедрению цифровых технологий в современную экономику (в том числе в производственные и управленческие процессы) создал предпосылки для нового этапа развития менеджмента качества. На основе цифровых технологий и широкого использования автоматизированных средств сбора и анализа информации создаются новые подходы к управлению процессами. Совсем

недавно для анализа устойчивости и стабильности процессов безальтернативно использовались карты Шухарта, диаграммы Паретто и аналогичные инструменты вековой давности. Эти старые и надежные инструменты имеют серьезный недостаток – они дают информацию с большой задержкой во времени и ее анализ происходит после выпуска части (а иногда и всей партии) продукции. Это дает хорошие результаты при массовом выпуске однородной продукции, но при производстве сложной наукоемкой продукции штучно или небольшими партиями (самолеты, корабли, ракеты и др.) они неэффективны.

Для быстрого реагирования и устранения возникающих в производстве проблем уже созданы предпосылки к широкому использованию цифровых технологий. Замена человеческого труда в управлении производством на машинное автоматическое управление (в том числе и с использованием искусственного интеллекта), автоматизация процессов анализа данных от различных датчиков и разработка алгоритмов принятия решений (на основе предиктивной и предписывающей аналитики) по устранению несоответствий практически без участия человека приводит к повышению качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции. Кроме искусственного интеллекта большой потенциал имеется у других цифровых технологий – облачные решения, интернет вещей, машинное обучение, виртуальная и дополненная реальность и т. п.

Логично сделать вывод о необходимости совершенствовать цифровые методы организации производства и управления качеством. Особенно важно это при проектировании, моделировании и производстве сложной наукоемкой продукции. Жизненный цикл такой продукции состоит из наукоемких процессов, для управления которыми требуется высококвалифицированный персонал и современные цифровые технологии.

## Цифровые технологии и менеджмент качества

Цифровая трансформация является современным трендом каждого предприятия или организации различных областей деятельности [1, 2]. Желаемыми результатами или «перспективой» цифровой трансформации в этой сфере являются улучшение качества продукта или услуги, соответствие требованиям стандартов и других нормативных документов, улучшение и ускорение процесса принятия решений, повышение эффективности производства при одновременном сохранении высокого качества продукции.

Разработаны программные продукты для реализации цифровых технологий в производстве. На современном этапе развития менеджмент качества применяет множество известных информационных технологий, в их числе: электронный документооборот (EDM системы), системы планирования ресурсов предприятия ERP (Enterprise Resource Planning), MES (Manufacturing Execution System), PLM (Product Life-cycle Management), MDM (Master Data Management), системы управления взаимоотношениями с клиентами (CRM Customer Relationship Management), управление бизнес-процессами (BPM) и др. Эти технологии обычно задействуют людей, их знания, интеллект и способности для обеспечения продуктивной работы.

Цифровая трансформация предполагает перевести рутинные операции управления в цифровой формат. В современном производстве и менеджменте качества существует много задач, которые предполагают большие затраты человеческого труда, например, ручной сбор и анализ данных о продукции, производственных процессах и системах, мониторинг процессов, принятие решений на основе фактов, расширение действия системы качества на изменяющиеся во времени и

пространстве процессы, выявление и анализ рисков и пр.

Результатом цифровой трансформации можно считать формирование единой информационной среды на всех этапах жизненного цикла продукции, включая цифровое проектирование и моделирование, цифровое производство, цифровая цепочка поставок, логистика и цифровая адаптация для потребителя продукта или продажах и сервисном обслуживании. В такой цифровой среде возможно формирование цифрового двойника производственных, технологических и бизнес-процессов, а также самого продукта и готового изделия производства. Серьезным вкладом цифровизации является управление процессами в режиме реального времени и дистанционное управление операциями.

Развитие цифровых технологий значительно расширяет возможности по управлению качеством на предприятиях различных сфер деятельности за счет сокращения «человеческого фактора» [3 – 6]. Однако не следует отождествлять цифровую трансформацию с сокращением человеческой деятельности. Цифровая трансформация снимает «рутину» со многих задач менеджмента качества, которую приходится выполнять персоналу любой организации. С приходом цифровых технологий главной задачей становится задача перепроектирования процессов и процедур таким образом, чтобы и люди, и цифровые устройства могли внести свой вклад в улучшение качества.

Влияние цифровизации обуславливает изменение принципов оценки результативности СМК в сторону непрерывного анализа. Непрерывность анализа предполагает постоянный мониторинг всех элементов СМК с целью повышения ее результативности и эффективности [7]. Важно заметить, что в настоящее время непрерывный анализ СМК – вполне реализуемая процедура, поскольку в условиях цифровизации целевые показатели результативности и эффективности становятся

объективными и доступными в интернет-пространстве в виде форумов, рейтингов компаний (например, народного рейтинга, служебного рейтинга и т. д.), что позволяет получать необходимую информацию о компании в реальном времени [8 – 10].

### Цифровой двойник

Цифровой двойник – это виртуальное представление изделия или процесса, которое используется, чтобы оценивать и прогнозировать рабочие характеристики этого изделия или процесса [11]. Цифровые двойники являются сравнительно новым понятием, но их прототипами можно считать конструкторскую и технологическую документацию на основе CAD/CAM/CAE систем и CALS (ИПИ-информационная поддержка изделия) технологии. Конструкторская и технологическая документация в цифровом виде составляет основу цифрового двойника изделия или процесса. Цифровые двойники, также, как и ИПИ-технологии, используются на протяжении всего жизненного цикла изделия. Но в отличие от информационной поддержки, цифровой двойник можно использовать, чтобы проводить инженерный анализ, прогнозировать и оптимизировать работу изделия или производственной системы.

Цифровые двойники могут прогнозировать влияние изменений конструкции, технологических процессов, вариантов использования продукции, факторов окружающей среды и других условий на изделие или процесс и сокращают необходимость изготовления экспериментальных и опытных образцов. Благодаря моделированию, аналитике больших данных, предиктивной аналитике, искусственному интеллекту и машинному обучению можно сократить время разработки конструкций и технологий и повысить качество получившегося в результате изделия или процесса.

Область применения цифрового двойника зависит от того, на каком этапе жизненного цикла изделия происходит моделирование [12, 13]. На протяжении всех этапов жизненного цикла изделия или его производства, цифровые двойники используют данные с датчиков, установленных в достаточном количестве на физических объектах (станки, технологическое оборудование, элементы готового изделия), чтобы фиксировать работу объекта в реальном времени, условия работы и изменения параметров в процессе производства и эксплуатации. Таким образом, цифровые двойники совершенствуются и постоянно обновляются в соответствии с изменениями физического аналога на протяжении жизненного цикла изделия. В результате возникает замкнутая обратная связь в цифровой среде, что позволяет разработчикам и производителям постоянно оптимизировать свои изделия, производство и повышать производительность без потери качества. Цифровой двойник должен быть динамическим и постоянно обновляемым представлением реального физического продукта, устройства или процесса. В таком случае можно проводить виртуальные испытания и получать реальные результаты. Для сложной технической продукции сокращается время испытаний и сертификации, что позволяет ускорить выход продукции на рынок и повышает ее конкурентоспособность. При этом покупатели получают полноценную технологию управления жизненным циклом продукции. Такое изделие может самостоятельно собирать и отправлять разработчикам разнообразные данные и выполнять самодиагностику. Такая концепция уже реализована в авиации, космонавтике, атомной электроэнергетике. Расширяется она и на другие объекты – автомобилестроение, станкостроение и др. Цифровой двойник отразит необходимость ремонта или замены деталей в процессе эксплуатации. Грамотно созданный цифровой двойник позволит заказчику «увидеть» физический объект и получить

о нем полную информацию, в том числе о возможных событиях и проблемах.

Использование цифровых двойников в сочетании с другими цифровыми технологиями позволяет решить следующие задачи:

1. Регистрация и анализ данных. Это одна из задач в системе качества, требующих больших затрат труда. Появление быстродействующих систем хранения и обработки данных способны более эффективно, чем это было раньше, решать задачу измерения и регистрации всевозможных и, что самое главное, нужных данных, которые влияют (или могут повлиять) на качество продукции. Использование «Интернета вещей» для измерения функций процессов, а также продукции, является обязательным условием формирования источников больших данных. Использование датчиков, установленных на продукции, находящейся в пользовании клиентов, обеспечивает передачу производителю на протяжении всего жизненного цикла продукции данных об условиях эксплуатации, функционировании, отказах и т. п. Это позволяет непрерывно улучшать продукцию, предвидеть и предупредить сбои в ее эксплуатации, снижать затраты на техническое обслуживание. Вместе с этим технология Big Data (больших данных) способна анализировать данные массивы информации, поступающие из различных источников. Основными источниками больших данных могут быть: заказчики, поставщики (контрагенты), конкуренты, другие предприятия, партнеры, контролирующие органы – внешние источники; продукция, процессы, материалы, сырье персонал, производственная среда и инфраструктура – внутренние источники;

2. Мониторинг и контроль процессов СМК. Зачастую для управления процессами в системе менеджмента качества применяется такой метод менеджмента качества, как статистическая обработка данных (статистические методы). С появлением алгоритмов обучения нейронных сетей для этих целей стало

возможным применение искусственного интеллекта. Обученная нейронная сеть будет позволять выявлять тренды (тенденции) и изменения в процессах гораздо эффективнее и быстрее, чем человек или автоматизированные комплексы на основе обработки статданных;

3. Принятие решений, основанных на данных (свидетельствах), в условиях неопределенности (неоднозначности). Стандарты на системы менеджмента качества требуют создания достаточно жестких алгоритмизированных процессов исполнения процедур. Алгоритмы устанавливаются в картах процессов или операционных процедурах. В случае, если процесс является сложным и разветвленным, а выполнение операций зависит от меняющихся параметров, то необходимо либо регламентировать (прописывать) всевозможные варианты течения процесса, либо полагаться на экспертное решение исполнителей процесса. Любая неопределенность может привести к нежелательной ситуации в процессе. Цифровая трансформация позволяет решить эту проблему за счет применения предиктивной аналитики. Благодаря инструментам предиктивной аналитики компании могут анализировать и прогнозировать протекающие во времени процессы, выявлять тенденции, предвидеть изменения и, следовательно, более эффективно планировать будущее.

### **Цифровая аналитика больших данных**

Одним из серьезных преимуществ использования цифровых технологий в производстве является возможность быстрой обработки получаемых данных. Современные технологии производства позволяют получать громадное количество информации о процессах, но человек не всегда может использовать эти необработанные данные. На помощь могут прийти различные алгоритмы обработки данных и визуализация результатов, но этого тоже может быть недостаточно. Следующим шагом

в развитии технологии обработки данных является использование искусственного интеллекта и нейронных сетей. Параллельно с развитием информационных технологий растут и возможности аналитики.

Аналитику можно разделить на группы по глубине анализа и значимости результатов [3]. Описательные – это наиболее традиционные показатели для мониторинга известных или предполагаемых корреляций. Качество генерирует описательные показатели (количество открытых событий качества), диагностические показатели (время цикла процесса качества для выявления узких мест) и предсказательные показатели, такие как анализ тенденций.

*Описательная* аналитика предполагает выявление негативных и позитивных событий в прошлом (ответ на вопрос: «что случилось?»). Она использует регистрацию выявленных несоответствий в процессах и продукции с минимальным анализом причин отклонений, что приводит к формальной реализации процессного управления. Такая аналитика может считаться устаревшей и не отвечающей текущим требованиям рынка наукоемкой продукции.

*Оценивающая* или *диагностическая* аналитика обеспечивает не только выявление, но и анализ прошедших событий (ответ на вопрос: «что и почему случилось?»). Она обеспечивает процессное управление, регистрацию и анализ выявленных несоответствий с последующим детальным анализом причин отклонения. На основе такой аналитики можно оценивать соответствие производимой продукции текущим требованиям рынка, но не обеспечивается соответствие новым требованиям в будущем.

Более развитая *предсказывающая* (предиктивная) аналитика реализует предвидение события в будущем (ответ на вопрос: «что, где и почему случится?»). Она предполагает внедрение инструментов мониторинга текущего

состояния процессов и прогнозирования изменений, применение статистических методов управления процессами, реализацию риск-менеджмента в управлении процессами. Такой инструмент анализа позволяет продукции соответствовать текущим требованиям рынка и превосходить их, возможность соответствовать требованиям будущего рынка.

*Предписывающая* аналитика и принятие решений на основе моделирования ситуаций в будущем (аналитическая система, функционирующая на основе Big Data Analytic) имеет способность соответствовать и превосходить текущие требования рынка, быстро следует за трансформациями рынка.

*Когнитивная* аналитика предполагает самообучающееся и полностью автоматизированное предприятие (компьютеризация имитации человеческого мышления и действия по отношению к автономному предприятию). Это автоматизированная, предупреждающая, самокорректирующая, самообучающаяся СМК. Предполагает выполнение сотрудниками в области качества аналитических функций и автоматизированную реализацию менеджмента качества в процессах предприятия.

Компании могут применять аналитику больших данных или ML / AI (машинное обучение / искусственный интеллект) к традиционным данным или большим данным для определения корреляций на основе закономерностей, что приводит к новому пониманию процессов. Эти аналитические данные часто гораздо более конкретны, чем традиционная аналитика, например, прогнозирование отказа каждой конкретной машины искусственный интеллект может идентифицировать, диагностировать и в конечном итоге предсказать закономерность, которая приведет к негативному результату, такому как сбой продукта или процесса. Предписывающая аналитика является более продвинутой; она предсказывает неудачу и указывает, что следует сделать для устранения или изменения

результата, и обычно включают некоторый уровень автономного поведения. Описательная, диагностическая и прогностическая аналитика выполняется с использованием традиционных данных, но новые идеи реализуются с помощью ML / AI. Предписывающая аналитика относится исключительно к области ML / AI.

Наряду с рассмотренными аналитическими возможностями целесообразно использовать и другие цифровые технологии [14]. Например, визуализация развивается вместе с данными и обеспечивает более эффективную интерпретацию человеком. Традиционные визуализации включают отчеты, диаграммы и информационные панели. Компании, стремящиеся к Качеству 4.0, должны строить свою аналитическую стратегию после или одновременно со стратегией обработки данных.

Блокчейн – это еще одна преобразующая технология с будущим потенциалом для повышения качества, особенно в области безопасности и прослеживаемости. Блокчейн представляет собой распределенную систему хранения данных, где каждый блок выступает как запись, содержащую отметку времени и связанную с соответствующими блоками и данными. Блокчейн возник как финансовая технология, но сейчас его пробуют и промышленные компании. Использование Блокчейн в производстве изделий повышенного риска (медицинские изделия и препараты, продукты питания и др.) позволяет повысить доверие потребителя к продукции и в ряде случаев заменить сертификацию.

### Выводы

Цифровизация проникает во многие сферы жизни и деятельности человека, в том числе в систему менеджмента качества предприятий и организаций. На основании вышесказанного, можно сделать вывод, что цифровизация процессов пойдет на пользу любой

организации, в которой она функционирует. Получение в автоматическом режиме неограниченного объема данных о продукции с последующим машинным анализом, принятие решений за минимально возможное время, моделирование на основе цифровых двойников – это цель, которая стоит средств. Несмотря на то, что цифровизация СМК требует больших финансовых затрат на создание и обслуживание цифровой инфраструктуры, баланс преимуществ и недостатков однозначно в пользу цифровизации в части производства наукоемкой, сложной технической продукции. Для реализации этих планов необходимо готовить квалифицированных специалистов по анализу сложных многоуровневых цифровых систем, умеющих работать как с системами менеджмента качества, так и цифровыми технологиями.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Quality 4.0** – важная составная часть концепции Индустрии 4.0 URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Качество\\_4.0\\_\(Quality\\_4.0\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Качество_4.0_(Quality_4.0))
2. **Руководство** по влиянию и стратегии качества 4.0 URL: [https://www.sas.com/content/dam/SAS/en\\_us/doc/whitepaper2/quality-4-0-impact-strategy-109087.pdf](https://www.sas.com/content/dam/SAS/en_us/doc/whitepaper2/quality-4-0-impact-strategy-109087.pdf)
3. **Evgeny A. Kovrigin, Victor A. Vasiliev.** Trends in the development of a digital quality management system in the aerospace industry // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 868 (2020) 012011 doi:10.1088/1757-899X/868/1/012011.
4. **Victor A. Vasiliev, Svetlana V. Aleksandrova, Mark N. Aleksandrov.** Problems of Implementing Information Security Management Systems. Proceedings of the 2020 IEEE (IT&QM&IS) Pp. 78–81.
5. **Vasiliev V.A., Aleksandrova S.V.** The prospects for the creation of a digital quality management system DQMS // Proceedings of the 2020 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies», IT and QM and IS 2020. 2020. Pp. 53–55, 9322890.
6. **Васильев В.А., Александрова С.В., Александров М.Н.** УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ И ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. Монография. Москва: Издательство: МАИ (Москва). 2020. 160 с. ISBN: 978-5-4316-0726-4
7. **Vasiliev V.A., Velmakina Y.V., Mayborodin A.B., Aleksandrova S.V.** Use of Information Technologies for the Integration of an Enterprise Quality Management System with the Requirements of the Related Standards // Russian Metallurgy (Metally). 2020. 2020(13). Pp. 1644–1648.

8. **Рагимова С.** Цифровая Индустрия 4.0 // Forbes. Цифровая трансформация бизнеса. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.forbes.ru/brandvoice/sap/345779-chetyre-nol-v-nashu-polzu>

9. **Васильев В.А., Александрова С.В., Александров М.Н.** Интеграция менеджмента качества и цифровых технологий // Качество. Инновации. Образование. 2017. № 9 (148). С. 14–19.

10. **Козловский В.Н.** Стратегическое планирование конкурентоспособности с точки зрения качества / В.Н. Козловский, Д.И. Панюков, С.А. Шанин // Стандарты и качество. 2017. № 3. С. 76–80.

11. **Рагуткин А.В., Сидоров М.И., Ставровский М.Е.** Некоторые аспекты создания и согласования цифровых двойников изделий и производства // Технология машиностроения. 2020. № 4. С. 54–60.

12. **Рагуткин А.В., Сидоров М.И., Юрцев Е.С.** Модели организации цифрового машиностроительного производства. М.: Издательство «Эко-Пресс», 2021. 289 с.

13. **Development of digital machine-building production in the industry 4.0 concept / A. V. Ragutkin [and ath.].** Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2018. Т. 47. № 4. Pp. 380–385.

14. **Васильев В.А., Александрова С.В.** Цифровые технологии в управлении качеством // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 10. С. 35–41.

## REFERENCES

1. Quality 4.0 is an important component of the Industry 4.0 URL concept: [https://www.tadviser.ru/index.php/Article:Quality\\_4\\_\(Quality\\_4.0\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Article:Quality_4_(Quality_4.0))

2. A guide to the impact and strategy of Quality 4.0 URL: [https://www.sas.com/content/dam/SAS/en\\_us/doc/whitepaper2/quality-4-0-impact-strategy-109087.pdf](https://www.sas.com/content/dam/SAS/en_us/doc/whitepaper2/quality-4-0-impact-strategy-109087.pdf)

3. Evgeny A. Kovrigin, Victor A. Vasiliev. Trends in the development of a digital quality management system in the aerospace industry // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 868 (2020) 012011 doi:10.1088/1757-899X/868/1/012011.

4. Victor A. Vasiliev, Svetlana V. Aleksandrova, Mark N. Aleksandrov. Problems of Implementing Information

Security Management Systems. Proceedings of the 2020 IEEE (IT&QM&IS) Pp.78–81.

5. Vasiliev, V.A., Aleksandrova, S.V. The prospects for the creation of a digital quality management system DQMS // Proceedings of the 2020 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies», IT and QM and IS 2020. 2020. Pp. 53–55, 9322890

6. Vasiliev V.A., Alexandrova S.V., Alexandrov M.N. QUALITY MANAGEMENT AND DIGITAL TECHNOLOGIES. Monograph. Moscow: Publishing House: MAI (Moscow), 2020, 160 p. ISBN: 978-5-4316-0726-4

7. Vasiliev, V.A., Velmakina, Y.V., Mayborodin, A.B., Aleksandrova, S.V. Use of Information Technologies for the Integration of an Enterprise Quality Management System with the Requirements of the Related Standards // Russian Metallurgy (Metally). 2020. 2020(13). Pp. 1644–1648

8. **Rahimova S.** Digital Industry 4.0 // Forbes. Digital business transformation. [electronic resource]. URL: <https://www.forbes.ru/brandvoice/sap/345779-chetyre-nol-v-nashu-polzu>

9. Vasiliev V.A., Alexandrova S.V., Alexandrov M.N. Integration of quality management and digital technologies // Quality. Innovation. Education, 2017, no. 9 (148), pp. 14–19.

10. Kozlovsky, V.N. Strategic planning of competitiveness from the perspectives of quality / V.N. Kozlovsky, D.I. Panjukov, S.A. Shanin // Standards and quality, 2017, no. 3, pp. 76–80.

11. Ragutkin A.V., Sidorov M.I., Stavrovsky M.E. Some aspects of the creation and coordination of digital counterparts of products and production // Technology of machine building, 2020, no. 4, pp. 54–60.

12. Ragutkin A.V., Sidorov M.I., Yurtsev E.S. Models of the organization of digital machine-building production. Moscow: Publishing house «Eco-Press», 2021, 289 p.

13. Development of digital machine-building production in the industry 4.0 concept / A.V. Ragutkin [and ath.]. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2018. Т. 47. № 4. Pp. 380–385.

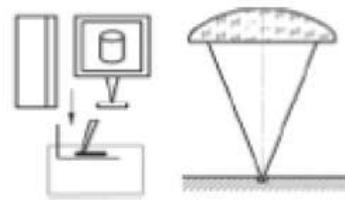
14. Vasiliev V.A., Alexandrova S.V. Digital technologies in quality management // News of the Tula state university. Technical sciences, 2020, no. 10, pp. 35–41.

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

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

Статья поступила в редакцию 04.04.2024; одобрена после рецензирования 17.04.2024; принята к публикации 05.06.2024.

The article was submitted 04.04.2024; approved after reviewing 17.04.2024; assepted for publication 05.06.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №9 (150). С.42-48.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №9 (150). P.42-48.

Научная статья  
УДК 621.791.9  
doi: 10.30987/2223-4608-2024-42-48

## Получение композиционных материалов при аддитивном производстве

Александр Григорьевич Григорьянц, д.т.н.  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
Москва, Россия  
Mt12@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** Представлены основные возможности получения новых композиционных материалов. Благодаря высокой динамике термодформационных процессов в расплавленной ванне тонкого слоя выращиваемой детали получаем новую структуру материала из несмешиваемых компонентов. Другим направлением получения нового композиционного материала в процессе выращивания является армирование матрицы высокопрочными элементами, которые могут присутствовать, в том числе в виде твердой фазы при расплавлении и кристаллизации материала. Это позволяет спрогнозировать заранее новые качественные свойства выращенной детали – повышение прочности, снижения массы и др. Получает развитие аддитивная технология выращивания деталей и изделий из вольфрама, молибдена, тантала, ниобия и других тугоплавких металлов, плохо обрабатываемых механическими методами. При этом применяется подогрев в процессе выращивания. Успешное применение аддитивных технологий используют в медицине при изготовлении имплантов из молибдена, тантала и их сплавов, обладающих высокой биосовместимостью и отсутствием токсичности. Возникает возможность изготовления импланта, выращенного по конкретной модели для данного индивидуума. Основными направлениями развития аддитивного производства являются создание более производительных комплексов и расширение номенклатуры используемых порошков конструкционных материалов с возможностью формирования новых композиционных материалов в процессе выращивания.

**Ключевые слова:** порошки, металлы, интерметаллиды, керамика, композиционный материал, аддитивная технология, селективное плавление

**Для цитирования:** Григорьянц А.Г. Получение композиционных материалов при аддитивном производстве // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 9 (159). С. 42–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-42-48

## Production of composite materials in additive manufacturing

Alexander G. Grigoryants, D. Eng.  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
Mt12@bmstu.ru

**Abstract.** The main possibilities of obtaining new composite materials are presented. Due to the high dynamics of thermal deformation processes in the molten bath of a thin layer of the grown part, we obtain a new material structure from immiscible components. Another direction of obtaining a new composite material in the growing process is the

*reinforcement of the matrix with high-strength elements, which can be present, including in the form of a solid phase under melting and crystallization of the material. This allows predicting in advance new qualitative properties of the grown part - increased strength, weight reduction, etc. Additive technology is being developed for growing parts and products made of tungsten, molybdenum, tantalum, niobium and other hard-melting metals that are poorly treated through mechanical methods. In this case, heating is used within growing process. The successful application of additive technologies is used in medicine in the manufacture of implants made of molybdenum, tantalum and their alloys, which have high biocompatibility and no toxic property. It becomes possible to manufacture an implant grown according to a specific model for a given individual. The main directions of the additive manufacturing development are the creation of more productive complexes and the expansion of construction materials powders range, used when forming new composite materials in the growing process.*

**Keywords:** powders, metals, intermetallides, ceramics, composite material, additive technology, selective melting

**For citation:** Grigoryants A.G. Production of composite materials in additive manufacturing / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 9 (159). P. 42–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-42-48

На кафедре «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана и в «Московском центре лазерных технологий» выполняются исследования по основным технологиям аддитивного производства: селективное лазерное плавление (СЛП), в котором лазерный луч расплавляет нанесенный тонкий слой металлического порошка, и коаксиальное лазерное плавление с подачей металлического порошка соосно лазерному лучу. Наряду с технологическими исследованиями выполняются опытно-конструкторские разработки и выпуск оборудования для аддитивного производства [1].

Большое внимание в научных разработках уделяется изучению термодиффузионных процессов при расплавлении и кристаллизации, управляя которыми можно получать новые свойства материалов в процессе выращивания [2].

Благодаря смешиванию различных порошков во время технологического процесса расплавления удается получать сложные композиции с уникальными эксплуатационными свойствами. Особенность заключается в том, что при лазерном выращивании в процессе аддитивного производства, вследствие высокой динамики термодиффузионных процессов в расплаве не успевает произойти диффузионное перераспределение элементов, и образуется

микроструктура нового типа, обеспечивающая уникальные свойства изделия. Изменение состава и структуры в процессе выращивания позволяет создавать в результате аддитивного производства изделия из инновационного композиционного материала, который в условиях металлургических процессов невозможно получить вследствие отсутствия их смешивания и взаимного растворения в расплавленном состоянии. Разработка этих методов аддитивного производства предусматривает целый комплекс исследований технологических процессов, цифрового металловедения, программного обеспечения и разработки специального оборудования. Этот сложный комплекс исследований и аддитивного производства деталей и изделий сопровождается компьютерной топологической оптимизацией, обеспечивающей высокий практический результат.

В настоящее время выполнено большое количество теоретических и практических разработок, включая использование аддитивных технологий в промышленном производстве сложных и ответственных изделий [3]. Наиболее глубоко проработана технология селективного лазерного плавления основных конструкционных материалов, таких как нержавеющие и инструментальные стали, никелевые, алюминиевые, титановые и медные сплавы.

Выполнены исследования по компьютерному анализу высокочастотных процессов нагрева и охлаждения ванны плавления. Установлен высокий градиент распределения температур в ванне плавления, достигающей порядка  $10^4$  °C/мм и высокая скорость охлаждения при кристаллизации. Благодаря этому формируется мелкозернистая структура и повышается ее химическая однородность. Вследствие этого формируются новые свойства изделия, отличающие от процессов литья,ковки,штамповки, горячей прокатки и других процессов горячей обработки.

Значительные результаты получены при выращивании изделий из порошковых материалов на основе железа Fe. Наиболее распространены порошки из аустенитных и мартенситных сталей с содержанием хрома более 15 %. При оптимизации условий выращивания получены качественные результаты без образования трещин, пор и других дефектов структуры, характеризующиеся высокой прочностью и пластичностью, и обеспечивающие коррозионную стойкость.

Для снижения склонности к образованию трещин при выращивании изделий из порошков на основе никеля разработан процесс с подогревом подложки до высоких температур ниже 700 °C.

Высокие показатели получены при выращивании изделий из кобальтовых сплавов с использованием в качестве упрочнителей карбидов. Это обеспечивает получение композиционных материалов с высоким сопротивлением ударно-абразивному и высокотемпературному износу в коррозионной среде [3].

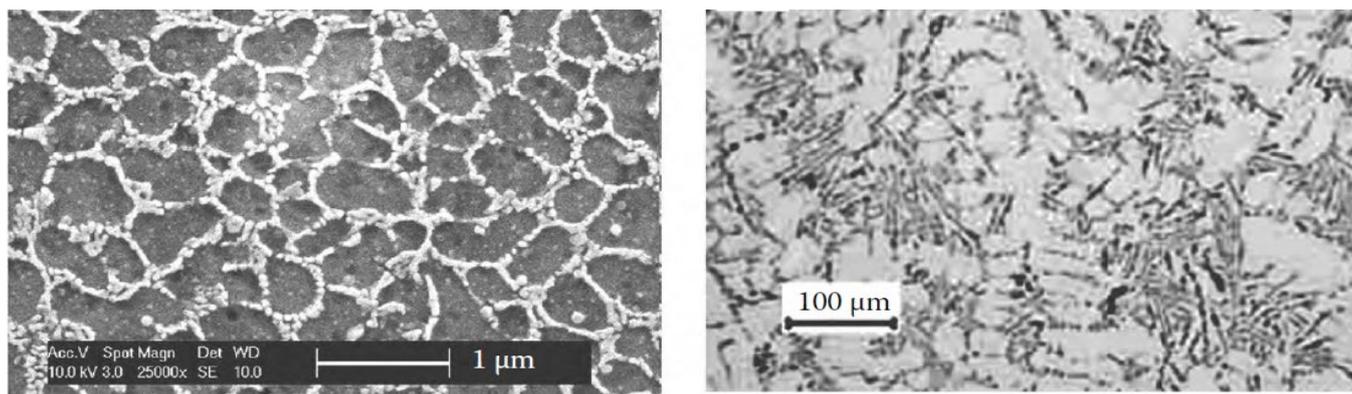
При изготовлении теплообменников аддитивными технологиями используют порошки на основе медных сплавов, обеспечивающих хорошие антифрикционные и высокие антикоррозионные свойства [4, 5].

Практический интерес представляет более сложная технология выращивания изделий,

которые состоят из слоев различного состава. Необходимо получить высококачественные соединения при отсутствии дефектов в контактных участках на стыке разнородных слоев. В качестве примера представлено получение режущего или штампового инструмента с повышенным теплоотводом за счет контакта слоев инструментальной стали и меди при выращивании детали. Прямая наплавка меди на сталь приводит к снижению прочности и износостойкости из-за диффузии меди к границам аустенитного зерна стали. Использование промежуточного слоя из сплава на никелевой основе между инструментальной сталью и медью обеспечивает высокое качество переходных зон, что позволяет получить композиционный материал инструментальная сталь – медь с высокими служебными характеристиками [3].

Наиболее широко используют в аддитивных лазерных технологиях выращивание деталей и изделий из алюминиевых сплавов. Высокое качество обеспечивает применение порошкового материала из отечественного сплава Ak9ч, который является аналогом зарубежного сплава AlSi10Mg. Однако этот порошок, как и другие на основе алюминиевых сплавов, обладает низкой сыпучестью, что препятствует нанесению тонкого слоя порошка. Следует отметить, что алюминиевые сплавы обладают высокой химической активностью. Поэтому процесс выращивания требует тщательной защиты поверхности расплавленного материала, что хорошо обеспечивается осуществлением процесса в камере с аргоном в качестве защитного газа.

Детали и узлы, полученные выращиванием из порошка Ak9ч, показывают высокие свойства. В значительной степени это достигается высокими механическими характеристиками материала, обеспечивающими мелкозернистой структурой благодаря высоким скоростям кристаллизации расплава.



а)

б)

Рис. 1. Микроструктура алюминиевого сплава Ak9ч, полученная СЛП (а) и по литейной технологии (б)

Fig. 1. Microstructure of Ak9ч aluminum alloy obtained by SLM (selective laser melting) (a) and casting technology (b)

На рис. 1, а представлена характерная микроструктура алюминиевого сплава, полученная выращиванием образцов из порошков сплава Ak9ч в сопоставлении со структурой материала, полученного литейной технологией (рис. 1, б) [3]. В результате выращивания образуется мелкозернистая структура алюминия, ячейки которого окружены эвтектикой с фазой силициума Si, тогда как в структуре литого материала крупные частицы эвтектики силициума располагаются между дендритами алюминия. Благодаря этому материал, полученный выращиванием, обладает более высокими механическими свойствами по сравнению с литым материалом.

Для повышения механических свойств предложено армирование алюминиевой основы в процессе выращивания твердыми частицами карбида титана TiC, в результате чего получается новый композиционный материал с повышенной прочностью.

Проведенные испытания композиционных образцов, выращенных из порошковой смеси AK9ч и колотых частиц TiC с размером 1...10 мкм и содержанием в 1, 3, 5, 7 % масс. показывает, что концентрация TiC до 5 % практически не влияет на увеличение пористости, а при дальнейшем увеличении содержания TiC количество пор возрастает. Оптимальная концентрация TiC (5 %)

обеспечивает увеличение предела прочности на 15...20 % по сравнению с матрицей. В дальнейшем при использовании армирующих элементов с более скругленной формой следует ожидать получения еще большей результативности за счет снижения концентрации напряжений в острых углах колотых частиц. Микроструктура выращенных образцов является мелкозернистой, в том числе измельчение зерна происходит также вокруг частиц карбида титана, что связано в первую очередь с высокими скоростями охлаждения при лазерном выращивании.

Большой интерес представляет использование композиций из несмешиваемых материалов. Порошки из стали и карбида титана при их совместном расплавлении и охлаждении со скоростями порядка десятков и сотен градусов в секунду образуют границу раздела между этими двумя материалами, т. е. не удастся получить единую структуру. Однако при существенно более высоких скоростях охлаждения удастся получить единую структуру сплавленного материала. Именно этот эффект является основой для получения нового композиционного материала при лазерном выращивании смеси порошков стали и карбида титана. В качестве металлической матрицы использована сталь 14ХНЗМА (повышенная износостойкость, повышенная усталочная

прочность), в качестве фазы упрочнителя – карбид титана TiC (низкая плотность, высокая твердость, повышенная термическая стабильность, стойкость против окисления). Результаты испытаний представлены в табл. 1 для

случая содержания TiC в материале порядка 50 %, что обеспечило снижение массы детали почти на 20 % при увеличении механических свойств.

## 1. Результаты испытаний

### 1. Test results

Материал	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	E, ГПа	HV	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_{пр}$ , МПа	T <sub>пл</sub> , К
14ХНЗМА	7,85	210	360...440	1150	1350 (растяжение)	1538
TiC	4.94	439	3200	–	2500 (сжатие)	3065
14ХНЗМА + TiC	6.29	320	860...920	1120	–	1726

Создаваемая композиция при выращивании материала из смеси порошков стали и карбида титана TiC не уступает по прочности исходной стали, но обеспечивает значительное

снижение массы композиционного материала, что является актуальной задачей при изготовлении деталей летательных аппаратов (рис. 2).

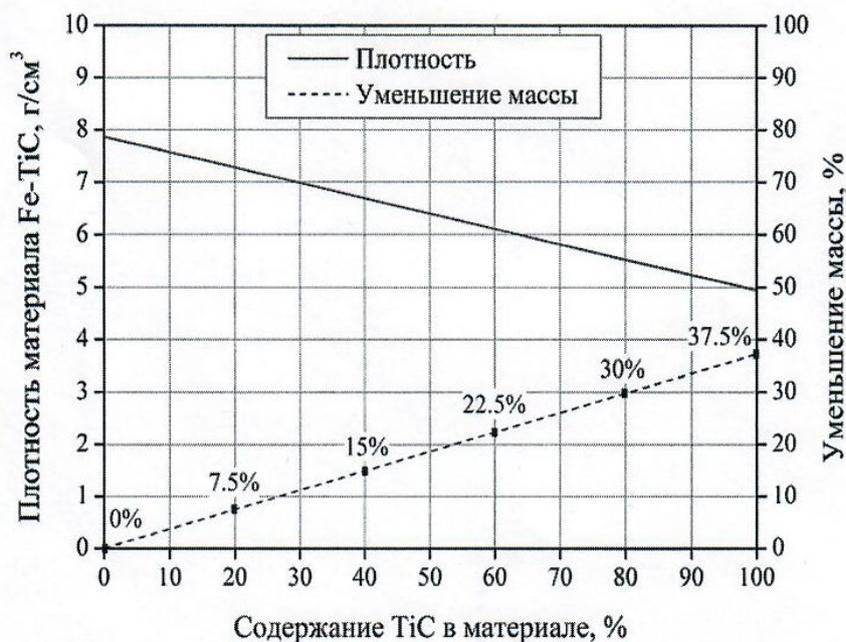


Рис. 2. Зависимость массы и плотности композиционного материала Fe-TiC от содержания TiC

Fig. 2. Dependence of the mass and density of the Fe-TiC composite material on the TiC content

Интересные результаты получены с использованием порошков TiC в сочетании с порошками никелевых сплавов [7]. Применение высокотемпературного подогрева до температуры 900 °С в сочетании с оптимизацией технологических параметров выращивания позволяет получить Ni-WC покрытия с высоким содержанием карбида вольфрама до 35%, что обеспечивает высокую жаростойкость, коррозионную стойкость и износостойкость.

Большую практическую перспективу представляет использование аддитивной технологий для выращивания деталей и изделий из вольфрама, молибдена, тантала, ниобия и других тугоплавких материалов, которые плохо обрабатываются механическими методами. Высокие показатели прочности получены при выращивании образцов из молибденовых сплавов, превышающие на 20...25 % значения, полученные вакуумной электронно-лучевой и вакуумной электродуговой плавкой [6].

Особое значение имеет изготовление имплантов в медицине из молибдена, титана и их сплавов, обладающих высокой биосовместимостью и отсутствием токсичности. В связи с этим возрастает значимость изготовления индивидуальных для каждого случая имплантов, выращиваемых по конкретной модели для каждого индивидуума.

Развитие аддитивного производства наряду с изготовлением более производительных комплексов ориентируется на дальнейшие технологические разработки для выращивания изделий из широкого круга порошков конструкционных материалов, где особое место занимают возможности формирования новых композиционных материалов в процессе выращивания.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: Учебное пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2006. 664 с.

2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И., Третьяков Р.С. Лазерные аддитивные технологии в машиностроении: Учебное пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2018. 278 с.

3. Аддитивные технологии в производстве металлических конструкций: учебник / Щербakov А.В., Гапонова Д.А., Слива А.П. и др.; под ред. А.Г. Григорьянца, В.К. Драгунова. М.: Изд. МЭИ. 2022. 676 с.

4. Kaden L., Matthaus G., Ullsperger T., Seyfarth B. Nolte Selective laser melting of cooper using ultrashort laser pulses // Applied Physics A. 2017. Vol.123. № 9. Pp. 1–6.

5. Григорьянц А.Г., Колчанов Д.С., Дренин А.А., Денежкин А.О. Влияние основных параметров процесса селективного лазерного плавления на стабильность формирования единичных дорожек на выращивании изделий из медных сплавов // Известия вузов. Машиностроение. 2019. № 6 (711). С. 20–28.

6. The Microstructure and Cracking Behaviors of Pure Molybdenum Fabricated by Selective Laser Metting / Yan[etal]. Materials, 2022.15 p.

7. Александрова А.А., Базалеева К.О., Григорьянц А.Г. Прямое лазерное выращивание композиционного материала инконель 625/TiC: влияние структурного состояния исходного порошка // Физика металлов и металловедение. 2019. Т. 120. № 5. С. 498–504.

## REFERENCES

1. Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. Technological processes of laser processing: Textbook for universities / edited by A.G. Grigoryants. Moscow: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University, 2006, 664 p.

2. Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I., Tretyakov R.S. Laser additive technologies in mechanical engineering: textbook for universities / edited by A.G. Grigoryants.-Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2018, 278 p.

3. Additive technologies in the production of metal structures: textbook / Shcherbakov A.V., Gaponova D.A.,

Sliva A.P., et. al; edited by A.G. Grigoryants, V.K. Dragunov. Moscow: Publ. house MEI, 2022, 676 p.

4. Kaden L., Matthaus G., Ullsperger T., Seyfarth B. Nolte Selective laser melting of cooper using ultrashort laser pulses // Applied Physics A. 2017. Vol.123. № 9. pp 1–6.

5. Grigoryants A.G., Kolchanov D.S., Drenin A.A., Denezhkin A.O. The influence of the main parameters of the selective laser melting process on the stability of forming single tracks for growing products made of copper

alloys // Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. (News of high schools. Mechanical Engineering), 2019, no. 6 (711), pp. 20–28.

6. The Microstructure and Cracking Behaviors of Pure Molybdenum Fabricated by Selective Laser Metting/Yan[etal]. Materials, 2022. 15 p.

7. Alexandrova A.A., Bazaleeva K.O., Grigoryants A.G. Direct laser growth of inconel 625/TiC : effect of structural state of initial powder. // Physics of metals and metall science, 2019, vol. 120, no. 5, pp. 498–504.

Статья поступила в редакцию 02.10.2023; одобрена после рецензирования 12.10.2023; принята к публикации 20.10.2023.

The article was submitted 02.10.2023; approved after reviewing 12.10.2023; assepted for publication 20.10.2023.

---

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 17.09.2024. Выход в свет 30.09.2024.

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

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

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

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

12+