



Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский государственный технологический  
университет «СТАНКИН»

# ВЕСТНИК МГТУ «Станкин»

НАУЧНЫЙ РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ ЖУРНАЛ

№ 4 (63) октябрь-декабрь 2022

**ISSN 2072-3172**

**DOI 10.47617/2072-3172**

*Журнал входит в «Перечень рецензируемых научных изданий,  
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты  
диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук,  
на соискание ученой степени доктора наук»*

# ВЕСТНИК МГТУ «Станкин»

№ 4 (63), 2022

Научный рецензируемый журнал  
Журнал основан в 2008 году

---

## Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»)

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия, свидетельство ПИ № ФС77-31574 от 4 апреля 2008 г.

---

**Председатель Редакционного совета научного рецензируемого журнала «Вестник МГТУ «СТАНКИН»,  
Серебряный Владимир Валерьевич – Ректор ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»**

## Редакционный совет

---

- Колодяжный Дмитрий Юрьевич** д-р техн. наук, Проректор по научной деятельности ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», заместитель Председателя редакционного совета
- Гречишников Владимир Андреевич** д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
- Дмитриев Александр Михайлович** чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», (Россия)
- Еленева Юлия Яковлевна** д-р экон. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
- Илюхин Юрий Владимирович** д-р техн. наук, проф., научный редактор, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
- Клейнер Георгий Борисович** чл.-корр. РАН, д-р экон. наук, зам. научного руководителя ЦЭМИ РАН, (Россия)
- Кутин Андрей Анатольевич** д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
- Мартинев Георгий Мартинович** д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
- Подураев Юрий Викторович** д-р техн. наук, проф., главный редактор, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
- Позднеев Борис Михайлович** д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
- Стебулянин Михаил Михайлович** д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
- Телешевский Владимир Ильич** д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
- Уварова Людмила Александровна** д-р физ.-мат. наук, проф., ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
- Бьянки Джакомо** д-р техн. наук, Институт промышленных технологий и автоматизации ITIA-CNR (Италия)
- Вегенер Конрад** д-р техн. наук, проф., Институт машиностроения и технологии ETH Цюрих (Швейцария)
- Заборовский Тадеуш** д-р техн. наук, проф., Познаньский технологический университет (Польша)
- Каталинич Бранко** д-р техн. наук, проф., Венский университет технологий (Австрия)
- Корриат Ханс Иоахим** д-р техн. наук, Фраунгоферовский институт металлорежущих станков и технологий формообразования (Германия)
- Такаш Янош** д-р техн. наук, проф., Будапештский университет технологии и экономики (Венгрия)
- Торресильяс Рамон** д-р техн. наук, проф., Центр исследований наноматериалов и нанотехнологий (Испания)

© ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2022

# VESTNIK MSUT «Stankin»

№ 4 (63), 2022

Scientific peer-reviewed journal  
The magazine was founded in 2008

---

## Founder

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Moscow State University of Technology  
«STANKIN» (MSUT «STANKIN»)

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Compliance with Legislation in the Field of Mass Communications and Protection of Cultural Heritage, certificate PI No. FS77231574 of April 4, 2008.

---

## Chairman of the Editorial Board of «Vestnik MSUT «STANKIN» Journal

**Vladimir.V. Serebrenniy** – Rector of MSUT «STANKIN»

## Editorial Board

---

- Dmitriy Yu. Kolodyazhnyi** Doctor of Science, Vice-rector for scientific activity of MSUT «STANKIN», Deputy Chairman of the Editorial Board
- Vladimir A. Grechishnikov** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN»
- Aleksander M. Dmitriev** Doctor of Science, Professor, Corresponding Member of the RAS, MSUT «STANKIN» (Russia)
- Michail M. Stebulyanin** Doctor of Science, Professor, acting Vice-rector for scientific activity MSUT «STANKIN» (Russia)
- Yulia Y. Eleneva** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN»
- Yury V. Ilyukhin** Doctor of Science, Professor, Scientific editor, MSUT «STANKIN»
- Georgiy B. Kleyner** Doctor of Science, Corresponding Member of the RAS, Vice-director of the Central Economic and Mathematical Institute of the RAS (Russia)
- Andrey A. Kutin** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN»
- Georgi Martinov** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN»
- Yuriy V. Poduraev** Doctor of Science, Professor, Editor-in-Chief, MSUT «STANKIN»
- Boris M. Pozdneeov** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN»
- Michail M. Stebulyanin** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN»
- Vladimir I. Teleshevskiy** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN»
- Lyudmila A. Uvarova** Doctor of Science, Professor, MSUT «STANKIN»
- Giacomo Bianchi** Doctor of Science, Department «Dynamic Analysis Simulation of Machinery» of ITIA-CNR (Italy)
- Konrad Wegener** Doctor of Science, Professor, Inst. Machine Tools Manufacturing, Full Professor at the Department of Mechanical and Process Engineering ETH Zurich (Switzerland)
- Tadeush Zaborovski** Doctor of Science, Professor, Poznan University of Technology (Poland)
- Branko Katalinic** Doctor of Science, Professor, Vienna University of Technology (Austria)
- Hans-Joachim Koriath** Doctor of Science, Department «Machine Tools & Automation» of Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology
- Janos Takacs** Doctor of Science, Professor, Budapest University of Technology and Economics (Hungary)
- Ramon Torrecillas** Doctor of Science, Professor, Nanomaterials and Nanotechnology Research Center (CINN) of the Spanish Council for Scientific Research (CSIC) (Spain)

© MSUT «STANKIN», 2022

---

**2.5.5. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ  
И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

**Стебулянин М.М., Остриков Е.А.**

Мультипликативно-степенные модели термосиловых параметров при точении  
труднообрабатываемых жаропрочных сплавов ..... 8

---

**2.5.6. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

**Перетятко С.Б., Карасева Е.А., Агеев О.В.**

Обобщенная кинематическая структура станков, работающих по схеме копирования  
для шлифования кабошонов ..... 13

**Долгов В.А., Прошкина О.С.**

Анализ технологического цикла сборки изделий в многономенклатурном  
машиностроительном производстве с учетом нестабильной длительности операций .. 17

**Седых М.И., Карташев Д.И.**

Анализ стратегий поиска оптимального технологического решения при изготовлении  
деталей машин..... 23

**Темпель О.А., Темпель Ю.А., Васьков Д.Е.**

Планирование эксперимента выбора оптимальных параметров процесса резания  
труднообрабатываемых материалов ..... 28

---

**2.3.3. АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ  
ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ**

**Барзов А.А., Корнеева В.М., Корнеев С.С., Феофанов А.Н.**

Вероятностная модель экономической эффективности функционально симультанных  
технологических систем ..... 32

**Бровченко А.А., Бровченко О.А., Белов П.С., Шварцбург Л.Э.**

Классификация видов аддитивного производства ..... 37

**Денисов М.С., Петрешин Д.И., Давыдов К.С.**

Согласование режимов наложения давления со скоростью охлаждения металла  
в форме как способ управления процессом литья с кристаллизацией под давлением.... 42

**Пушков Р.Л., Евстафиева С.В., Грубляк В.Я.**

Методика разработки имитационной модели станка для взаимодействия с системой ЧПУ ...50

**Филатов В.В., Чумаева М.В., Афонин К.С.**

Алгоритм составления программы построения фазового пространства управления  
и определения значения управляющего воздействия по заданной фазовой траектории.... 57

---

---

## 2.5.4. РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Смирнов Ю.Н., Каляшина А.В., Евдокимова Т.С.**  
 Моделирование роботизированного процесса лазерной сварки..... 64
- 

## 2.5.5. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

- Мирзомахмудов А.Р., Исаев А.В.**  
 Геометрическая модель сборной фасонной фрезы со сменными режущими пластинами для обработки колесных пар ..... 70

- Исаев А.В., Лядник С.В., Купцов В.Р.**  
 Анализ конструкций приводных инструментальных блоков для прецизионных токарных станков с ЧПУ ..... 75

- Петухов Ю.Е., Домнин П.В.**  
 Модель решения обратной задачи профилирования при обработке фасонных винтовых поверхностей по методу обкатки ..... 81

- Петухов Ю.Е., Домнин П.В., Желтиков С.А.**  
 Математическое моделирование профиля часового зубчатого колеса с помощью средств математического программирования в среде Mathcad ..... 85
- 

## 2.5.7. ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

- Дмитриев А.М., Коробова Н.В.**  
 Влияние технологической наследственности производства стальной заготовки на качество изделия типа стакана, изготовленного холодным выдавливанием ..... 91

- Адаскин А.М., Кубаткин В.С., Сосенушкин Е.Н.**  
 Влияние химического состава на пластичность сплава на основе хрома ..... 96
- 

## СОБЫТИЯ И ДАТЫ

- Ректор ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» Владимир Валерьевич Серебрянный встретился с ректором Белорусского национального технического университета ..... 100

- Молодые ученые представили свои проекты в ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» ..... 101

- Итоги Всероссийских конкурсов по научно-техническому творчеству среди учащихся ФЦТТУ ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (октябрь–декабрь 2022)..... 102

- В ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» прошел Научно-методический семинар «Практика и опыт организации и открытия профиля Национальной технологической олимпиады в образовательной организации высшего образования (школьный трек)»..... 104

- Тематический указатель статей, опубликованных в журнале «Вестник МГТУ «СТАНКИН» в 2022 году ..... 105
-

---

# VESTNIK MSUT «Stankin»

№ 4 (63), 2022

## CONTENTS

---

### 2.5.5. TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF MECHANICAL AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING

**Stebulyanin M.M., Ostrikov E.A.**

Multiplicative-power models of thermal force parameters in turning hard-to-machine heat-resistant alloys..... 8

---

### 2.5.6 TECHNOLOGY OF MACHINE BUILDING

**Peretyatko S.B., Karaseva E.A., Ageev O.V.**

Generalized kinematic structure of machines working according to the copying scheme for grinding cabochons ..... 13

**Dolgov V.A., Proshkina O.S.**

Analysis of the technological cycle of assembly of products in multi-nomenclature machine-building production, taking into account the unstable duration of operations ..... 17

**Sedykh M.I., Kartashev D.I.** The analysis of strategies for finding the optimal technological solution in the manufacture of machine parts..... 23

**Tempel O.A., Tempel Yu.A., Vaskov D.E.**

Planning an experiment for choosing the optimal parameters for the cutting process of hard-to-cut materials..... 28

---

### 2.3.3. AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTIONS

**Barzov A.A., Korneeva V.M., Korneev S.S., Feofanov A.N.**

Probabilistic model of economic efficiency of functionally simultaneous technological systems ..... 32

**Brovchenko A.A., Brovchenko O.A., Belov P.S., Shvartsburg L.E.**

Classification of types of additive production..... 37

**Denisov M.S., Petreshin D.I., Davydov K.S.**

Coordination of pressure application modes with the rate of cooling of the metal in the mold as a way to control the process of casting with crystallization under pressure ..... 42

**Pushkov R.L., Evstafieva S.V., Grublyak V. Ya.** Methodology for developing a simulation model of a machine tool for interaction with a CNC system ..... 50

**Filatov V.V., Chumaeva M.V., Afonin K.S.** Algorithm for drawing up a program for a control phase space constructing and determining the value of the control action for a given phase trajectory ..... 57

---

---

## 2.5.4. ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

<b>Kalyashina A.V., Evdokimova T.S., Smirnov Yu.N.</b> Simulation of a robotic laser welding process .....	64
---	----

---

## 2.5.5. TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF MECHANICAL AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING

<b>Mirzomakhmudov A.R., Isaev A.V.</b> Geometric model of a milling cutter with indexable inserts for machining wheel sets .....	70
<b>Isaev A.V., Lyadnik S.V., Kuptsov V.R.</b> Analysis of designs of driven tools used for high-precision CNC lathe machines .....	75
<b>Petukhov Yu.E., Domnin P.V.</b> Model for solving the inverse problem of profiling in the processing of shaped helical surfaces using the hobbing.....	81
<b>Petukhov Yu.E., Domnin P.V., Zheltikov S.A.</b> Mathematical modeling of the clock wheel's profile using mathematical programming tools in the Mathcad environment.....	85

---

## 2.5.7. TECHNOLOGIES AND MACHINES OF PROCESSING BY PRESSURE

<b>Dmitriev A.M., Korobova N.V.</b> Influence of technological heredity of steel billet production on the quality of a product such as a bushing made by cold extrusion.....	91
<b>Adaskin A.M., Kubatkin V.S., Sosenushkin E.N.</b> Influence of chemical composition on plasticity of alloy based on chromium.....	96

---

## EVENTS AND DATES

Rector of MSUT "STANKIN" Vladimir Valeryevich Serebrenny met with the rector of the Belarusian National Technical University.....	100
Young scientists presented their projects at MSUT "STANKIN" .....	101
Results of the All-Russian competitions in scientific and technical creativity among students of the Federal centre for technical creativity of MSUT "STANKIN" (October-December 2022).....	102
In MSUT "STANKIN" passed the Scientific and methodological seminar "Practice and experience of organizing and opening the profile of the National Technology Olympiad in an educational organization of higher education (school track)" .....	104
Thematic index of articles published in the journal «Vestnik MSUT «Stankin» in 2022 .....	108

---

---

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

---

УДК 621.91.01

М.М. Стебулянин, Е.А. Остриков  
M.M. Stebulyanin, E.A. Ostrikov

## МУЛЬТИПЛИКАТИВНО-СТЕПЕННЫЕ МОДЕЛИ ТЕРМОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ТОЧЕНИИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

## MULTIPLICATIVE-POWER MODELS OF THERMAL FORCE PARAMETERS IN TURNING HARD-TO-MACHINE HEAT-RESISTANT ALLOYS

*В статье на основе планирования эксперимента при обработке жаропрочного сплава рассмотрено построение эмпирических моделей параметров резания на основе модифицированных мультипликативных функций с неконстантными показателями степеней в виде линейных зависимостей от факторов обработки. Моделирование обосновано результатами эксперимента по точению труднообрабатываемого сплава ЭП 670.*

*In the article, based on the planning of an experiment in the processing of a heat-resistant alloy, the construction of empirical models of cutting parameters based on modified multiplicative functions with non-constant exponents in the form of linear dependences on processing factors is considered. The simulation is substantiated by the results of an experiment on turning the hard-to-machine EP 670 alloy.*

**Ключевые слова:** термосиловые параметры, температура резания, жаропрочные сплавы, точение, обработка, инструмент.

**Keywords:** thermal power parameters, cutting temperature, heat-resistant alloys, turning, machining, tools.

### Введение

Механическая обработка лезвийным инструментом составляет значительную долю машиностроительных производств. Подходы к повышению эффективности лезвийной обработки могут быть довольно разнообразны: использование новых подходов к стратегии резания, разработка новых инструментальных материалов, совершенствование инструментальных систем, активное использование СОТС, модификация рабочей поверхности режущего инструмента, разработка и применение новых математических моделей параметров процессов резания, создание методов априорного оценивания рациональных результатов обработки и др.

Стойкость инструмента является одной из важнейших характеристик для условий эффективной и высокопроизводительной лезвийной обработки. Для улучшения этой характеристики применяется множество подходов при создании инструмента: снижение сил резания и величины напряжений на поверхности инструмента, снижение температур резания, сил трения, химической активности материала и т.п. [1, 2].

Одним из основных факторов, влияющих на стойкость инструмента, является вектор сил резания. Для процесса точения характерно разложение этого вектора на три составляющих  $P_z$ ,  $P_x$ ,  $P_y$ . Составляющая силы  $P_x$  представляет собой проекцию на направление подачи, составляющая  $P_z$  направлена по вектору скорости резания, а составляющая  $P_y$  перпендикулярна первым двум. Каждая из этих величин способна по-своему характеризовать различные процессы, происходящие в ходе обработки. При этом  $P_z$ , как правило, превосходит по величине другие составляющие, и её часто называют главной составляющей силы резания. Именно эта составляющая преобладающим образом связана с мощностью резания.

Другим параметром, позволяющим оценить характер протекания процесса обработки, является температура резания, под которой понимают усреднённую температуру в зоне контакта инструмента с обрабатываемым материалом [3].

Температура резания оказывает сильное влияние на свойства материалов. Как правило, при ее увеличении материалы меняют свою твердость, пластичность, коэффициент трения, химическую активность и т.п. По-



этому температура резания часто может являться определяющим параметром, указывающим на ограничения процесса обработки и его эффективности. Так, например, интенсивность и производительность обработки часто упирается в предел температуры, при превышении которого механические свойства материала инструмента начинают сильно ухудшаться и, как следствие, значительно усиливаются процессы его разрушения.

Таким образом, можно отметить, что параметры тангенциальной силы и температуры резания могут быть определяющими при изучении прочности и износостойкости инструмента. Поэтому очень важны наиболее адекватные модели термосиловых параметров, особенно при обработке труднообрабатываемых материалов, таких как, например, железоникелевые сплавы.

### Моделирование параметров резания

Сложившаяся практика построения эмпирических моделей для параметров резания предлагает использовать для моделирования мультипликативную зависимость исследуемого параметра, например, силы  $P_z$ , через режимы обработки вида:

$$P_z = CV^{q_1} S^{q_2} t^{q_3} \quad (1)$$

где  $t$  — глубина резания,  $S$  — подача на оборот,  $V$  — скорость резания,  $C$  — коэффициент, учитывающий особенности материалов,  $q_{1,2,3}$  — постоянные.

Альтернативной является модель, где показатели степеней являются функциями факторов резания:

$$P_z = CV^{\alpha_1(S,t)} S^{\alpha_2(S,t)} t^{\alpha_3(S,t)} \quad (2)$$

Прологарифмировав данное выражение, и приведя зависимость к сумме функций логарифмических аргументов, получим:

$$\begin{aligned} \ln(P_z) &= \ln(C) + \alpha_1(\ln(S), \ln(t)) \ln(V) + \\ &+ \alpha_2(\ln(S), \ln(t)) \ln(S) + \alpha_3(\ln(S), \ln(t)) \ln(t) = \\ &= f(\ln(V), \ln(S), \ln(t)) \end{aligned} \quad (3)$$

Данную неизвестную функцию зависимости от логарифмов факторов обработки можно представить в виде полинома, ограничившись вторым порядком

нелинейности и постоянством показателя степени скорости резания  $\alpha_1(S, t) = a_1$ :

$$\begin{aligned} \ln(P_z) &= \ln(C) + a_1 \ln(V) + a_2 \ln(S) + \\ &+ a_3 \ln(t) + a_4 \ln^2(S) + \\ &+ a_5 \ln^2(t) + a_6 \ln(V) \ln(S) + \\ &+ a_7 \ln(V) \ln(t) + a_8 \ln(S) \ln(t) \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, произведя вычисление коэффициентов данного выражения с помощью регрессионного анализа, мы сможем получить аналитическую зависимость логарифма силы резания от логарифмов режимов обработки, а производя потенцирование, получим модель самой силы резания в виде:

$$P_z = CV^{a_1} S^{(a_2+a_4 \ln(S)+a_6 \ln(V)+a_8 \ln(t))} \times t^{(a_3+a_5 \ln(t)+a_7 \ln(V))} \quad (5)$$

Аналогичную модель можно получить и для температуры резания:

$$\theta = CV^{b_1} S^{(b_2+b_4 \ln(S)+b_6 \ln(V)+b_8 \ln(t))} \times t^{(b_3+b_5 \ln(t)+b_7 \ln(V))}$$

В итоге мы получаем модели термосиловых параметров, которые позволяют учесть зависимости степенных коэффициентов от факторов резания.

### Экспериментальные результаты

Сравнение моделей тангенциальной силы резания (1) и (5) проводилось в процессе эксперимента по точению жаропрочного сплава ЭП 670. Данный сплав относится к труднообрабатываемым материалам, имеет низкую теплопроводность, провоцирующую повышенные температуры резания. Высокая прочность и механическая упрочняемость в процессе обработки затрудняют процесс резания и вызывают повышенный износ инструмента. Также при резании данного материала имеют место значительные процессы адгезии и наростообразования, способствующие дополнительному износу [4]. Все это сильно затрудняет моделирование факторов его лезвийной обработки.

Матрица комбинаций режимов обработки и полученные значения в эксперименте по измерению тангенциальной силы резания представлены ниже:

Таблица 1

№	$V$ , м/мин	$\Pi_0$ , мм/об	$t$ , мм	$P_z$ , Н	$\ln(P_z)$
1	2	3	4	5	6
1	17	0,1	0,3	193,3	5,264243
2	17	0,1	0,4	234,9	5,45916
3	17	0,1	0,5	353	5,866468
4	17	0,125	0,3	226,6	5,423186

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6
5	17	0,125	0,4	297,7	5,696086
6	17	0,125	0,5	422,1	6,045242
7	17	0,15	0,3	281,1	5,63871
8	17	0,15	0,4	327	5,78996
9	17	0,15	0,5	476,4	6,166258
10	27	0,1	0,3	181	5,198497
11	27	0,1	0,4	279,3	5,632286
12	27	0,1	0,5	450	6,109248
13	27	0,125	0,3	200	5,298317
14	27	0,125	0,4	335,6	5,81592
15	27	0,125	0,5	520	6,253829
16	27	0,15	0,3	223,9	5,4112
17	27	0,15	0,4	380	5,940171
18	27	0,15	0,5	600	6,39693

Кодирование переменных проводилось по формуле:

$$\ln(x_i) = \frac{\ln(X_i) - \frac{\ln(X_{i\min}) + \ln(X_{i\max})}{2}}{\frac{\ln(X_{i\max}) - \ln(X_{i\min})}{2}}, i = 1, 2, 3$$

Таблица 2

$X_1 = V, \text{ м/мин}$	$\ln(X_1)$	$\ln(x_1)$
27	3,296	1
17	2,833	-1
$X_2 = S, \text{ мм/об}$	$\ln(X_2)$	$\ln(x_2)$
0,15	-1,897	1
0,125	-2,079	0,1
0,1	-2,303	-1
$X_3 = t, \text{ мм}$	$\ln(X_3)$	$\ln(x_3)$
0,5	-0,693	1
0,4	-0,916	0,126
0,3	-1,204	-1

№	К	$\ln(x_1)$	$\ln(x_2)$	$\ln(x_3)$
1	1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	0,126
3	1	-1	-1	1
4	1	-1	0,1	-1
5	1	-1	0,1	0,126
6	1	-1	0,1	1
7	1	-1	1	-1
8	1	-1	1	0,126
9	1	-1	1	1
10	1	1	-1	-1
11	1	1	-1	0,126
12	1	1	-1	1
13	1	1	0,1	-1
14	1	1	0,1	0,126
15	1	1	0,1	1
16	1	1	1	-1
17	1	1	1	0,126
18	1	1	1	1

Вид матрицы плана эксперимента  $F$  для модели с постоянными показателями степеней задается в таблице 2.

Вектор коэффициентов  $A_F$  получаем по формуле метода наименьших квадратов (МНК) [5]:

$$A_F = (F^T F)^{-1} F^T Y = (5,724, 0,039, 0,151, 0,38)^T \quad (6)$$

Величина  $Y = \ln(P_2)$  получена в результате измерений тангенциальной силы (табл. 1).

Таким образом, модель для логарифма силы резания с учётом только постоянной составляющей показателей степеней в кодированных переменных примет вид:

$$\ln(P_2) = 5,724 + 0,039 \ln(x_1) + 0,151 \ln(x_2) + 0,38 \ln(x_3) \quad (7)$$

Далее проверим вариант модели на основе зависимости (4).

В данном случае матрица плана эксперимента  $\mathbf{G}$  с учётом кодирования переменных будет следующей:

№	K	$\ln(x_1)$	$\ln(x_2)$	$\ln(x_3)$	$\ln^2(x_2)$	$\ln^2(x_3)$	$\ln(x_1) \ln(x_2)$	$\ln(x_1) \ln(x_3)$	$\ln(x_2) \ln(x_3)$
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1
2	1	-1	-1	0,126	1	0,016	1	-0,126	-0,126
3	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1
4	1	-1	0,1	-1	0,01	1	-0,1	1	-0,1
5	1	-1	0,1	0,126	0,01	0,016	-0,1	-0,126	0,013
6	1	-1	0,1	1	0,01	1	-0,1	-1	0,1
7	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
8	1	-1	1	0,126	1	0,016	-1	-0,126	0,126
9	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1
10	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
11	1	1	-1	0,126	1	0,016	-1	0,126	-0,126
12	1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1
13	1	1	0,1	-1	0,01	1	0,1	-1	-0,1
14	1	1	0,1	0,126	0,01	0,016	0,1	0,126	0,013
15	1	1	0,1	1	0,01	1	0,1	1	0,1
16	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1
17	1	1	1	0,126	1	0,016	1	0,126	0,126
18	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Как следствие, получим вектор  $A_G$  коэффициентов модели логарифма тангенциальной силы резания, вычисленный при данной матрице  $\mathbf{G}$  в МНК:

$$A_G = (0.0355, 0.151, 0.384, -0.0008, 0.0835, -0.017, 0.093, 0.0012)^T$$

В соответствии с этими коэффициентами вариант модели в кодированных переменных запишется в виде:

$$\begin{aligned} \ln(P_z) = & 5.668 + 0,0355 \ln(x_1) + 0,151 \ln(x_2) + \\ & + 0,384 \ln(x_3) - 0,0008 \ln^2(x_2) + 0,0835 \ln^2(x_3) \\ & - 0,017 \ln(x_1) \ln(x_2) + 0,093 \ln(x_1) \ln(x_3) \\ & + 0,0012 \ln(x_2) \ln(x_3) \end{aligned} \quad (8)$$

Сравним среднеквадратичные отклонения моделей (7) и (8). Для варианта (7) получим:

$$\sigma = \frac{(Y - FA_F)^T (Y - FA_F)}{17} = 8,88 * 10^{-3} \quad (9)$$

Для расширенной модели (8) значение отклонения составит:

$$\sigma = \frac{(Y - GA_F)^T (Y - GA_F)}{17} = 8,45 * 10^{-4} \quad (10)$$

Таким образом, для (8) имеем почти на порядок меньшее отклонение.

### Заключение

В эксперименте по точению труднообрабатываемого жаропрочного сплава показана недостаточная адекватность моделирования факторов резания «традиционными» эмпирическими мультипликативно-степенными функциями. Значительную адекватность имеют моделирующие функции с показателями степеней множителей в виде линейных зависимостей от величин подачи и глубины резания.

**Библиографический список**

1. Ze W., Jianxin D., Yang C., Youqiang X., Jun Z. Performance of the self-lubricating textured tools in dry cutting of Ti-6Al-4V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2012; 62(9–12): 943–951.

2. Sharma V., Pandey P.M. Recent advances in turning with textured cutting tools: A review. *Journal of Cleaner Production* 2016; 137: 701–715.

3. Артамонов Е.В. Резание металлов и температурный фактор: учебное пособие / Е.В. Артамонов, Д.В. Васильев, М.Х. Утешев. — Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. — 150 с.

4. Макаров А.Д. Износ твердосплавного инструмента при резании жаропрочных сплавов / А.Д. Макаров, В.С. Мухин, Н.В. Воронин // *Станки и инструмент*. 1974. № 2. С. 26–28.

5. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер и др. // «Мир», Москва. 1977. 552 с.

**Стебулянин Михаил Михайлович** — д-р техн. наук, доц., профессор кафедры высокоэффективных технологий обработки ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*mmsteb@rambler.ru*

**Остриков Евгений Анатольевич** — младший научный сотрудник лаборатории трехмерного структурно-функционального конструирования Центра новых металлов и технологий ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*e.ostrikov@stankin.ru*

**Stebulyanin Mikhail Mikhailovich** — D.Sc. of Engineering, docent, Professor at the sub-department of “High-effective machining technologies” of MSUT “STANKIN”

*mmsteb@rambler.ru*

**Ostrikov Evgeniy Anatolievich** — Junior Researcher, Laboratory of 3D Structural and Functional Design, Center for New Metals and Technologies of MSUT “STANKIN”

*e.ostrikov@stankin.ru*

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflicts of Interest Statement:** The authors have no conflicts of interest to declare.

---

## ОБОБЩЁННАЯ КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА СТАНКОВ, РАБОТАЮЩИХ ПО СХЕМЕ КОПИРОВАНИЯ ДЛЯ ШЛИФОВАНИЯ КАБОШОНОВ

## GENERALIZED KINEMATIC STRUCTURE OF MACHINES WORKING ACCORDING TO THE COPYING SCHEME FOR GRINDING CABOCHONS

*Представлены две схемы обработки кабошонов из янтаря и станки для их реализации. Приведена обобщённая кинематическая структура, разработанная на основании анализа существующего парка станков, и определены задачи по её усовершенствованию.*

*Two schemes of processing of amber cabochons and machines for their implementation are presented. The generalized kinematic structure is presented, which is developed on the basis of an analysis of the existing machine park and tasks for its improvement are identified.*

**Ключевые слова:** кинематическая структура, кабошон, янтарь, копирование, станок, профиль.

**Keywords:** kinematic structure, cabochon, amber, copying, machine, profile.

При всем многообразии оборудования для шлифования деталей из янтаря для задания формы кабошонов используют две схемы обработки [1].

Первая схема: одна из формообразующих линий (образующая) получается методом копирования, т. е. профиль считывается с инструмента, например, абразивного круга с периферией сложного профиля, а направляющая получается методом касания и считывается с некоторого устройства (копира).

Вторая схема: обе линии — как образующая, так и направляющая — получаются методом касания.

Для изготовления кабошонов из янтаря регулярной формы используются станки польской фирмы Avalon, работающие по принципу копирования (рис. 1).

Конструкция такого устройства довольно проста: на платформе крепится блок шпинделя и блок качалки. Блок шпинделя представляет собой двигатель, который через ременную передачу приводит во вращение шпиндель, на котором закреплен шлифовальный круг с фасонной наружной частью. Маятниковый механизм представляет собой качалку, на которой в левой части крепится заготовка на специальной оправке, а в правой крепится копир, который упирается в роликовый упор (рис. 2).

Указанная выше фирма поставляет на территорию Российской Федерации практически все станки для обработки кабошонов из янтаря.

Несмотря на простоту конструкции, в данном станке есть особенность расчета размеров копира в зависимости от параметров станка. Для того, чтобы получить

определенный, заранее заданный профиль направляющей кабошона, необходимо рассчитать и изготовить копир определенного профиля. Форма копира зависит от формы профиля направляющей кабошона и от ряда геометрических параметров конкретного станка.

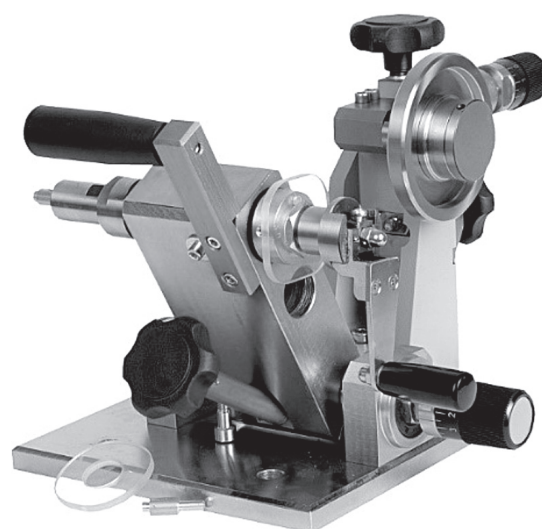
Если имеется два станка с разными геометрическими параметрами (размерами) деталей и узлов станка, то нет возможности использовать тот же инструмент (фасонный шлифовальный круг) и те же копиры для получения изделия с теми же размерами. Получается, что существующие инструмент, оснастка и оборудование жестко связаны друг с другом геометрическими параметрами и поставляются на территорию Российской Федерации одной польской фирмой.

Несмотря на ряд сложностей в работе станков, работающих по схеме копирования, такие станки получили широкое распространение и хорошо себя зарекомендовали как по производительности, так и по качеству обработки деталей, поэтому в ближайшие годы они останутся как основной вид оборудования для получения заготовок с формой кабошона.

Т.к. геометрия шлифовальных кругов, копиров и самого станка определена одним производителем, соответственно, и жестко определена номенклатура деталей (размеры и формы), которые можно выпускать на данном оборудовании. Однако производители изделий из янтаря в РФ постоянно ищут новые формы для получения конкурентных преимуществ перед производителями из других стран.



**Рис. 1.** Станок польской фирмы Avalon, работающий по принципу копирования



**Рис. 2.** Блок качалки

В ряде работ были описаны зависимости геометрии заданного профиля направляющей кабошона от профиля копира [2–5]. В работе [6] предложен способ получения копира по имеющемуся кабошону, когда кабошон приклеивают на оправку, оправку вставляют в цангу станка и обкатывают кабошон по неподвижному шлифовальному кругу, а в это время заготовка для копира шлифуется шлифовальным кругом, установленным вместо ролика, по которому должен обкатываться копира. При применении такого метода точность копира невысока и, как правило, это приводит к увеличению припуска на заготовку, что ведет к увеличению веса заготовки и, как следствие, к удорожанию изделия.

При этом почти все работы по формообразованию кабошонов описывают частные случаи геометрических параметров станков для производства кабошонов, преимущественно для описанного выше станка польской фирмы.

Кроме того, почти все работы, посвященные формообразованию кабошонов из янтаря, описывают изготовление кабошонов с выпуклым профилем направляющей. Хотя даже имеющиеся станки для шлифования кабошонов позволяют изготавливать изделия с вогнутым профилем направляющей в пределах кривизны шлифовального круга 150 мм.

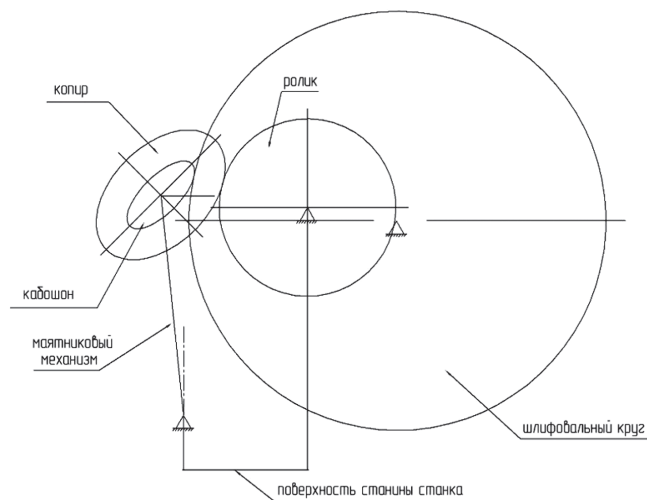
Очевидно, что при применении шлифовальных кругов с меньшим наружным диаметром можно сильно увеличить номенклатуру кабошонов с вогнутым профилем направляющей кабошона. Для решения этих и других задач по отношению к указанному оборудованию необходимо проведение расчета геометрических параметров станка.

Поэтому стоит вопрос об описании обобщенной кинематической структуры станков, работающих по схеме копирования для шлифования кабошонов из

янтаря и последующим выбором оптимальных геометрических параметров станка в зависимости от поставленной задачи.

Проанализировав существующий парк станков для обработки кабошонов из янтаря, работающих по схеме копирования, обобщенную кинематическую структуру данных станков можно представить в виде, изображенном на рис. 3.

На данной схеме оси копира, инструмента, кабошона не совпадают ни по вертикали, ни по горизонтали. Также кабошон имеет произвольную форму, т.е. это не круг, не овал и никакая другая форма, которую можно описать простой формулой. Таким образом, зависимость формы копира от формы профиля направляющей кабошона будет иметь самый общий характер.



**Рис. 3.** Обобщённая кинематическая структура станков, работающих по принципу копирования

Анализируя такую схему, можно сразу сказать, что идеальное совпадение формы копира и формы кабошона будет при условиях, что размер ролика, по которому обкатывается копир, будет совпадать с размером шлифовального круга, и что они будут крутиться вокруг одной оси — в этом случае размеры копира и кабошона одинаковы.

Однако, поскольку кабошоны на подобном станке изготавливают тысячами штук за одну рабочую смену, будет происходить быстрый износ копира, т.к. его размер будет довольно мал и при этом создаст трудности с ручным вращением заготовки кабошона вокруг своей оси, т.к. рукоятка вращения кабошона находится на той же оси, что и копир.

На рис. 4 показана схема для расчета формы копира в зависимости от формы профиля направляющей кабошона с использованием уравнения

$$F_1(r, a_1) = F_2(R, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, r_1, r_2, L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6) \quad (1)$$

где  $r$  — расстояние от центра кабошона до точки касания кабошона со шлифовальным кругом;  $a_1$  — угол между горизонтальной осью кабошона и отрезком от центра кабошона до точки касания кабошона со шлифовальным кругом;  $R$  — расстояние от центра копира до точки касания копира с роликом;  $a_2$  — угол между горизонтальной осью копира и отрезком от центра копира до точки касания копира до ролика;  $a_3$  — угол между горизонтальной линией, проходящей через ось вращения кабошона и отрезком от центра кабошона до точки касания кабошона со шлифовальным кругом;  $a_4$  — угол между горизонтальной линией, проходящей через ось вращения копира и отрезком от центра копира до точки касания копира до ролика;  $a_5$  — угол между горизонтальной линией, проходящей через центр ро-

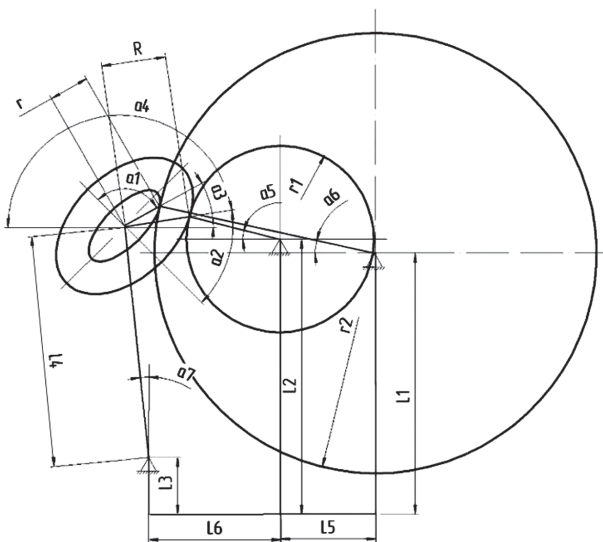


Рис. 4. Схема для расчета формы копира в зависимости от формы профиля направляющей кабошона

лика и отрезком от центра ролика до точки касания ролика до копира;  $a_6$  — угол между горизонтальной линией, проходящей через центр шлифовального круга до отрезка от центра шлифовального круга до точки касания шлифовального круга до кабошона;  $a_7$  — угол между вертикальной линией, проходящей через центр оси вращения маятникового механизма и самим маятниковым механизмом;  $r_1$  — радиус ролика;  $r_2$  — радиус шлифовального круга;  $L_1$  — расстояние от поверхности станины станка до оси вращения шлифовального круга;  $L_2$  — расстояние от поверхности станины станка до оси вращения ролика;  $L_3$  — расстояние от поверхности станины станка до оси вращения маятникового механизма;  $L_4$  — расстояние от оси вращения маятникового механизма до оси вращения кабошона;  $L_5$  — расстояние по горизонтали от оси вращения ролика до оси вращения шлифовального круга;  $L_6$  — расстояние по горизонтали от оси вращения маятникового механизма до оси вращения ролика.

Расчёт на основании такой зависимости позволяет изготовить копир для любой формы кабошона для любого станка, работающего по методу копирования.

Получение такой зависимости необходимо для решения еще двух задач. Первая задача — автоматизация процесса, можно будет полностью отказаться от копира и ролика и перейти на автоматизированный привод вращения и качания заготовки кабошона. Можно будет отказаться и от качательного движения, что упростит станок и повысит его точность. Вторая задача — проанализировав полученную зависимость по каждому из параметров, которые в нее входят, можно будет найти схему станка с оптимальной геометрией, т.к. можно будет выявить параметры, которые принципиально влияют на точность готового изделия.

#### Библиографический список

1. Тилипалов В.Н. Перспективные технологии и оборудования обработки янтаря / В.Н. Тилипалов, С.Б. Перетятко, В.В. Алешкевич. — Калининград. 2003. — 318 с.
2. Борисов Б.П. Анализ геометрических характеристик кабошонов из янтаря и методика расчета копиров для их производства / Б.П. Борисов, М.В. Жданова // Известия КГТУ. — 2005. — № 5. — С. 207–213.
3. Борисов Б.П. Формообразование кабошонов из янтаря / Б.П. Борисов, М.В. Жданова // Прогрессивные технологии, машины и механизмы в машиностроении: международная научно-техническая конференция (20–23 июня): сборник докладов / КГТУ. — Калининград, 2006. — С. 66–71.
4. Борисов Б.П. Исследование формообразования кабошонов из янтаря на кинематической модели / Б.П. Борисов, М.В. Смирнова, К.С. Новиков, А.О. Балашов // Известия Калининградского государственного технического университета. — 2010. — № 17. — С. 156–160.

5. Борисов Б.П., Карасева Е.А. Методы формообразования и кинематическая структура специализированных станков при шлифовании янтарных кабашонов / Б.П. Борисов, Е.А. Карасева // V Международный Балтийский морской форум. III Международная научная конференция «Прогрессивные технологии, машины и механизмы в машиностроении и строительстве» (21–27 мая): тезисы докладов. Часть 5. — Калининград: Изд-во БГАРФ, 2017. — С. 10–12.

6. Пат. 48865 Российская Федерация МПК В28D5/02(2000.01). Устройство для изготовления кулачков для обработки кабашонов / Борисов Б.П., Правдин Ю.Ф., Перетятко С.Б., Жданова М.В., заявитель и патентообладатель Калининградский государственный технический университет. № 2005109652/22; заявл. 04.04.05; опубл. 10.11.05, бюл. № 31 (П.ч.). — 4 с.: ил. 1.

### References

1. Tilipalov V.N. Perspektivnye tekhnologii i oborudovaniya obrabotki yantarya / V.N. Tilipalov, S.B. Peretyatko, V.V. Aleshkevich. — Kaliningrad. 2003. — 318 p.

2. Borisov, B.P. Analiz geometricheskikh kharakteristik kaboshonov iz yantarya i metodika rascheta kopirov dlya ikh proizvodstva / B.P. Borisov, M.V. Zhdanova // Izvestiya KGTU. — 2005. — № 5. — P. 207 — 213.

3. Borisov, B.P. Formoobrazovanie kaboshonov iz yantarya / B. P. Borisov, M. V. Zhdanova // Progressivnye tekhnologii, mashiny i mekhanizmy v mashinostroenii: mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya (20–23 iyunya): sbornik dokladov / KGTU. — Kaliningrad, 2006. — P. 66–71.

4. Borisov, B.P. Issledovanie formoobrazovaniya kaboshonov iz yantarya na kinematicheskoi modeli / B.P. Borisov, M.V. Smirnova, K.S. Novikov, A.O. Balashov // Izvestiya Kaliningradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. — 2010. — № 17. — P. 156–160.

5. Borisov, B.P., Karaseva, E.A. Metody formoobrazovaniya i kinematicheskaya struktura spetsializirovannykh stankov pri shlifovanii yantarnykh kaboshonov / B.P. Borisov, E.A. Karaseva // V Mezhdunarodny i Baltiiskii morskoi forum. III Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Progressivnye tekhnologii, mashiny i mekhanizmy v mashinostroenii i stroitel'stvE» (21–27 maya): tezisy dokladov. Chast' 5. — Kaliningrad: Izd-vo BGARF, 2017. — P. 10–12.

6. Пат. 48865 Rossiiskaya Federatsiya MPK V28D 5/02 (2000.01). Ustroistvo dlya izgotovleniya kulachkov dlya obrabotki kaboshonov / Borisov B.P., Pravdin YU.F., Peretyatko S.B., Zhdanova M.V., zayavitel' i patentobladatel' Kaliningradskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. № 2005109652/22; zayavl. 04.04.05; opubl. 10.11.05, Byul. № 31 (P.ch.). — 4 s.: il. 1.

**Перетятко Сергей Борисович** — канд. техн. наук, доц. кафедры инжиниринга технологического оборудования Калининградского государственного технического университета

*peretyatko\_s@mail.ru*

**Карасёва Екатерина Александровна** — аспирант кафедры автоматизированного машиностроения Калининградского государственного технического университета

*ekaterinakaraseva39@gmail.com*

**Агеев Олег Вячеславович** — д-р техн. наук, доц. кафедры инжиниринга технологического оборудования Калининградского государственного технического университета

*oleg.ageev@klgtu.ru*

**Peretyatko Sergey Borisovich** — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Engineering of Technological Equipment” of Kaliningrad State Technical University

*peretyatko\_s@mail.ru*

**Karaseva Ekaterina Alexandrovna** — postgraduate student at the sub-department of “Automated engineering” of Kaliningrad state technical university

*ekaterinakaraseva39@gmail.com*

**Ageev Oleg Vyacheslavovich** — D.Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Engineering of Technological Equipment” of Kaliningrad State Technical University

*oleg.ageev@klgtu.ru*

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflicts of Interest Statement:** The authors have no conflicts of interest to declare.



## АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА СБОРКИ ИЗДЕЛИЙ В МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОМ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ С УЧЕТОМ НЕСТАБИЛЬНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАЦИЙ

## ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL CYCLE OF ASSEMBLY OF PRODUCTS IN MULTI-NOMENCLATURE MACHINE-BUILDING PRODUCTION, TAKING INTO ACCOUNT THE UNSTABLE DURATION OF OPERATIONS

*В статье показано, что в технологическом процессе сборки изделия можно выделить типы операций с постоянными и переменными значениями циклов. Технологический цикл сборки изделий следует определять как сумму постоянных и случайных значений длительностей операций сборки.*

*На стабильность циклов операций процесса сборки влияет не только «человеческий фактор», но и выбранный метод обеспечения требуемой точности.*

*В работе предложены три степени технологически обоснованной стабильности, являющиеся универсальными для различных операций сборки. Задание степени стабильности циклов операций сборки позволит при технологической подготовке производства и производственном планировании повысить эффективность управления технологическим циклом сборки изделий.*

*The paper shows the possibility of highlighting the types of operations with constant and variable cycle values in the technological process of product assembly.*

*The stability of the operations cycles of the assembly process is affected not only by the «human factor», but also by the chosen method of ensuring the required accuracy.*

*The paper proposes three degrees of technologically reasonable stability, which are universal for various assembly operations. Setting the degree stability of the cycles of assembly operations will allow for technological preparation of production and production planning to increase the efficiency of managing the technological cycle of assembly of products.*

**Ключевые слова:** сборка изделий, технологический цикл, нестабильность циклов, сборочные операции, многономенклатурное машиностроительное производство.

**Keywords:** assembly of products, technological cycle, instability of cycles, assembly operations, multi-nomenclature machine-building production.

### Введение

В условиях современного многономенклатурного машиностроительного производства возрастает роль процесса определения и управления технологическим циклом сборки изделий при технологической подготовке производства и производственном планировании, который определяет минимально возможное время его сборки в рамках принятых организационно-технологических решений.

Существующие методы расчета технологического цикла сборки изделия основаны на построении сетевых графов и определении критического пути [1, 2]. При этом циклы технологических операций рассматриваются как постоянные величины. Выявленный

критический путь сборки изделия также рассматривается как постоянная величина.

Результаты анализа статистики фактических значений технологических циклов сборки изделий на многономенклатурных предприятиях свидетельствуют, что циклы технологических операций сборки нередко являются переменными величинами. Сочетания фактических значений циклов технологических операций сборки различных комплектующих изделий могут приводить к изменению критического пути изготовления конкретного изделия при неизменных организационно-технологических решениях. Причем, такие изменения носят случайный характер и могут приводить к срывам сроков исполнения контрактов [3].

В настоящее время отсутствуют эффективные механизмы определения и управления технологическим циклом сборки изделий при технологической подготовке производства и производственном планировании с учетом нестабильности циклов операций.

**Анализ стабильности циклов операций технологического процесса сборки**

В многономенклатурном машиностроительном производстве технологические процессы сборки характеризуются значительным количеством слесарных, монтажных, регулировочных, сварочных и других технологических операций, выполняемых вручную с применением средств механизации. Средства автоматизации сборочных операций в таких производственных системах применяются незначительно [4, 5].

Анализ причин нестабильности циклов операций технологических процессов сборки изделий в многономенклатурном машиностроительном производстве позволил выявить следующие основные их группы:

- организационно-технологические;
- «человеческий фактор».

Качество и длительность технологических операций сборки в многономенклатурном производстве во многом определяется квалификацией исполнителей.

Также на стабильность циклов операций технологического процесса сборки оказывают существенное влияние организационно-технологические решения обеспечения требуемой точности замыкающего звена размерной цепи.

В настоящей работе предметом исследования нестабильности циклов операций сборки являются организационно-технологические решения.

С точки зрения организационно-технологических решений достижения требуемой точности выделяют пять основных методов [1, 2, 6]:

- метод полной взаимозаменяемости;
- метод неполной взаимозаменяемости;
- метод групповой взаимозаменяемости;
- метод регулировки;
- метод пригонки.

Рассмотрим методы обеспечения требуемой точности замыкающего звена с точки зрения стабильности циклов операций (табл. 1).

*Таблица 1. Характеристика стабильности циклов технологических операций сборки, обусловленных принятым методом обеспечения требуемой точности*

Наименование метода	Описание	Хар-ка стабильности
Метод полной взаимозаменяемости	Требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается у всех изделий путем включения в нее составляющих звеньев без выбора, подбора или изменения их значений.	Высокая стабильность циклов операций.
Метод неполной взаимозаменяемости (вероятностный метод)	Требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается у части изделий путем включения в нее составляющих звеньев без выбора, подбора или изменения их значений.	Циклы операций не стабильны. Цикл операции может увеличиваться из-за необходимости разборки и повторной сборки изделия.
Метод групповой взаимозаменяемости (селективная сборка)	Детали, которые поступают на сборку, сортируются по их действительным размерам на несколько групп. Требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается у всех изделий в группе путем включения в нее составляющих звеньев без выбора, подбора или изменения их значений.	Высокая стабильность циклов операций.
Метод регулировки	Требуемая точность замыкающего звена достигается изменением размера или положения компенсирующего звена без удаления материала с компенсатора. Компенсатор может быть подвижным или неподвижным.	Циклы операций могут отличаться в несколько раз. Нестабильность возникает из-за необходимости регулировки положения или размера звена-компенсатора, а также частичной разборки и повторной сборки.
Метод пригонки	Требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается изменением размера компенсирующего звена путем удаления определенного слоя материала.	Циклы операций могут отличаться в несколько раз. Нестабильность возникает из-за необходимости подгонки размера звена-компенсатора, а также частичной разборки и повторной сборки.

С точки зрения влияния рабочего на качество собираемого изделия выделяют две группы методов: пассивные и активные [7].

К пассивным методам сборки относят следующие методы обеспечения требуемой точности: полная, неполная и групповая взаимозаменяемость. Активные методы сборки включают методы обеспечения требуемой точности: регулировка и пригонка. Циклы операций сборки, реализующих пассивные методы, являются наиболее стабильными. Наименее стабильными циклами операций сборки являются операции, реализующие активные методы сборки.

### Анализ технологического цикла изготовления изделия шкаф управления

Рассмотрим технологический процесс сборки изделия шкаф управления и его составных частей первого уровня входимости.

Нормативный технологический цикл изготовления шкафа управления ( $T_{цн}$ ), включая сборку комплектующих изделий первого уровня входимости и сборку самого шкафа управления, приведен на рис. 1.

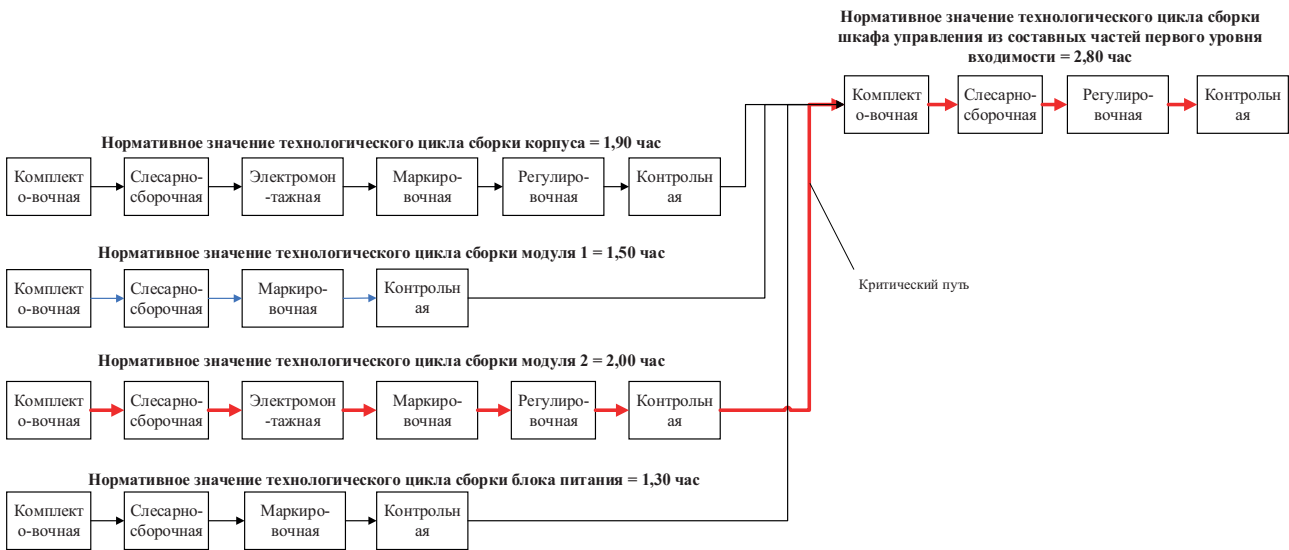


Рис. 1. Нормативный технологический цикл изготовления шкафа управления

Нормативное значение технологического цикла сборки  $i$ -того комплектующего изделия ( $T_{цнi}$ ) при последовательном выполнении сборочных операций определяется по формуле:

$$T_{цнi} = \sum_{j=1}^m T_{цнj}, \text{ ч}, \tag{1}$$

где  $m$  — количество технологических операций сборки,  $T_{цнj}$  — технологический цикл  $j$ -той операции сборки, ч.

Нормативное значение технологического цикла изготовления шкафа управления ( $T_{ц(ШУ)н}$ ) определяется как сумма нормативного значения технологического цикла сборки составной части, имеющего наибольшее значение, и нормативного значения технологического цикла сборки шкафа управления ( $T_{ц(ШУсб)н}$ ), которые образуют критический путь изготовления шкафа управления (рис. 1).

В соответствии с исходными данными, наибольшее нормативное значение технологического цикла сборки составных частей имеет изделие модуль 2 (рис. 1).

Таким образом, нормативное значение технологического цикла изготовления шкафа управления определяется по формуле:

$$T_{ц(ШУ)н} = T_{ц(Модуль2)н} + T_{ц(ШУсб)н} = 2,00 + 2,80 = 4,80 \text{ ч}.$$

При изготовлении партии шкафов управления были зафиксированы фактические значения технологических циклов ( $T_{цф}$ ) сборки шкафа управления и его составных частей первого уровня входимости. Определены минимальные ( $\min$ ), максимальные ( $\max$ ) и среднеарифметические ( $\text{ср}$ ) значения циклов, которые приведены в таблице 2.

Таким образом, при изготовлении рассматриваемой партии изделий на критическом пути оказывались технологические процессы сборки модуля 2 и корпуса.

Наибольшее значение технологического цикла изготовления шкафа управления было получено при изготовлении изделия № 6 в партии (рис. 2).

Таблица 2. Значения циклов сборки шкафа управления и его составных частей, полученные при изготовлении 7 изделий

Наименов. изделия	Наименов. операции	Т <sub>ци</sub> операции, ч.	Т <sub>ци</sub> операции, ч.			Т <sub>ци</sub> сборки, ч	Т <sub>ци</sub> сборки, ч		
			min	max	t <sub>ср</sub>		min	max	t <sub>ср</sub>
Шкаф управления	Комплектовочная	0,10	0,10	0,10	0,10	2,80	2,80	3,25	3,02
	Слесарно-сборочная	0,85	0,85	1,10	0,98				
	Маркировочная	1,30	1,30	1,30	1,30				
	Контрольная	0,50	0,50	0,75	0,64				
Корпус	Комплектовочная	0,10	0,10	0,10	0,10	1,90	1,90	2,40	2,14
	Слесарно-сборочная	0,75	0,75	0,95	0,82				
	Электромонтажная	0,30	0,30	0,4	0,36				
	Маркировочная	0,10	0,10	0,10	0,10				
	Регулировочная	0,45	0,40	0,60	0,50				
Модуль 1	Комплектовочная	0,10	0,10	0,10	0,10	1,50	1,45	1,65	1,57
	Слесарно-сборочная	0,70	0,65	0,80	0,72				
	Маркировочная	0,20	0,20	0,20	0,20				
	Контрольная	0,50	0,45	0,65	0,55				
Модуль 2	Комплектовочная	0,10	0,10	0,10	0,10	2,00	1,95	2,45	2,16
	Слесарно-сборочная	0,50	0,50	0,70	0,59				
	Электромонтажная	0,35	0,30	0,45	0,39				
	Маркировочная	0,10	0,10	0,10	0,10				
	Регулировочная	0,55	0,50	0,70	0,59				
Блок питания	Комплектовочная	0,10	0,10	0,10	0,10	1,30	1,20	1,60	1,36
	Слесарно-сборочная	0,80	0,75	0,95	0,83				
	Маркировочная	0,10	0,10	0,10	0,10				
	Контрольная	0,30	0,25	0,45	0,33				

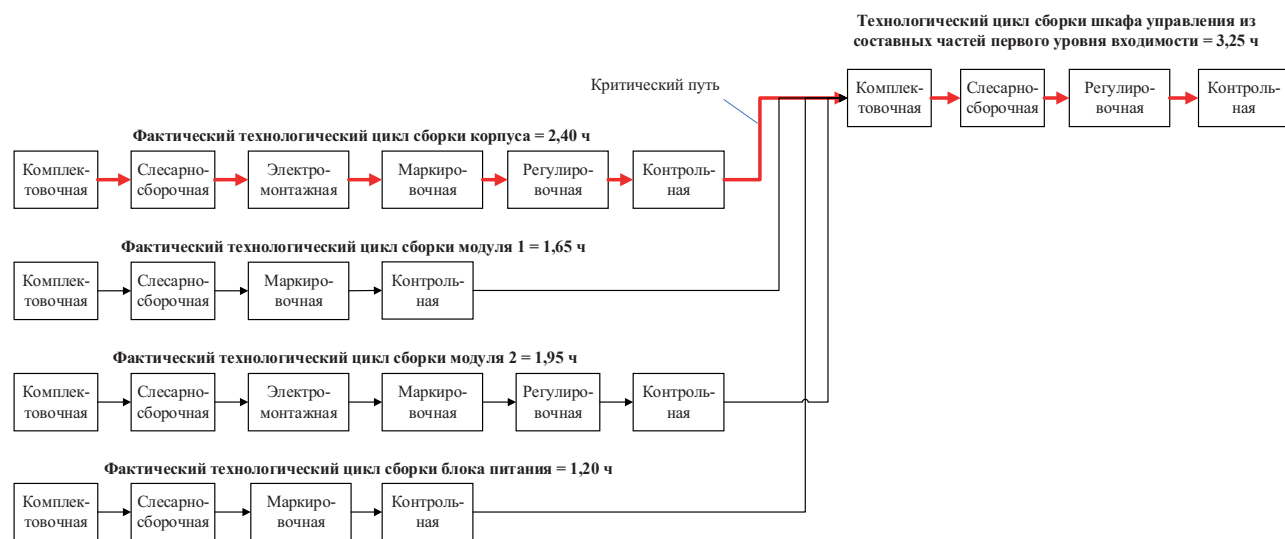


Рис. 2. Фактическое значение технологического цикла изготовления шкафа управления № 6 в партии

Фактическое значение технологического цикла изготовления шкафа управления № 6 в партии определяется по формуле:

$$T_{ц(ШУ)max} = T_{ц(Корпус)6} + T_{ц(ШУсб)6} = 2,40 + 3,25 = 5,65 \text{ ч.}$$

Из вышесказанного следует, что значения технологических циклов изготовления партии изделий нестабильны.

Анализ циклов операций сборки комплектующих изделий и шкафа управления (табл. 2) показал, что можно выделить типы операций с постоянными и переменными значениями циклов. Детальный анализ технологических переходов сборочных операций показал, что технологические операции, имеющие стабильное значение цикла, используют пассивный метод сборки, а операции с нестабильным циклом преимущественно используют активный метод сборки.

В работе предложено переменную величину цикла операции рассматривать как непрерывную случайную величину, определенную в диапазоне  $[t1, t2]$  с заданной функцией распределения  $F(T_{ц})$ .

Таким образом, значение  $T_{ц}$  операций сборки, основанных на активном методе, задается как вероятность попадания в заданный диапазон:

$$P(t1 \leq T_{ц} \leq t2) = F(t2) - F(t1)$$

Преобразуем формулу (1) и технологический цикл сборки изделий с последовательным выполнением операций будем определять по следующей формуле:

$$T_{цни} = \sum_{j=1}^k T_{цнj} + \sum_{j=1}^{m-k} F(T_{ц})_j, \text{ ч.}$$

где  $k$  — количество операций сборки, цикл которых определяется постоянной величиной.

### Коэффициент стабильности циклов операций сборки

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что для каждой операции сборки можно задать технологически обоснованную степень стабильности.

В работе предложены два критерия, определяющие технологически обоснованную степень стабильности циклов операций: метод сборки и характеристика стабильности цикла. В соответствии с этими критериями выделены три степени стабильности (табл. 3), каждой из которых соответствует свой коэффициент стабильности ( $K_{см}$ ).

Не для всех операций сборки и их переходов можно явно задать замыкающее звено и размерную цепь (например, герметизация швов, монтаж электропроводки и др.). Однако, предложенные критерии являются универсальными и могут использоваться для определения технологически обоснованной степени стабильности циклов различных операций сборки и их переходов.

Таблица 3. Степень стабильности цикла сборочных операций

Метод сборки	Хар-ка стабильности цикла	Метод обеспечения точности	$K_{см}$
пассивный	стабильный	полная взаимозаменяемость, групповая взаимозаменяемость	1
пассивный	нестабильный	неполная взаимозаменяемость	2
активный	нестабильный	регулировка пригонка	3

В таблице 4 в качестве примера приведены технологические переходы слесарно-сборочных операций и соответствующие им значения коэффициента стабильности.

Таблица 4. Степень стабильности переходов слесарно-сборочных операций

Переход	$K_{см}$	Примечание
Базирование	1 или 3	Без выверки ( $K_{см} = 1$ ). Базирование с выверкой ( $K_{см} = 3$ ).
Балансировка	2 или 3	Определяется начальное состояние, выполняется установка дополнительных грузов или снятие материала. $K_{см}$ определяется техническими возможностями оборудования.
Герметизация	1 или 2	Без контроля и корректировки ( $K_{см} = 1$ ). Контроль и последующая корректировка герметизируемого соединения ( $K_{см} = 2$ ).

### Заключение

В технологическом процессе сборки изделия можно выделить типы операций с постоянными и переменными значениями циклов. Переменную величину цикла операции предлагается рассматривать как непрерывную случайную величину с заданной функцией распределения  $F(T_{ц})$ . Технологический цикл сборки изделий следует определять как сумму постоянных и случайных значений длительностей операций сборки.

Технологические операции, имеющие стабильное значение цикла, используют пассивный метод сборки, а операции с нестабильным циклом преимущественно используют активный метод сборки.

Определены три степени технологически обоснованной стабильности, являющиеся универсальными для различных операций сборки. Задание степени стабильности циклов операций сборки позволит при технологической подготовке производства и производственном планировании повысить эффективность управления технологическим циклом сборки изделий.

*Исследования проведены с использованием оборудования Центра коллективного пользования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (номер соглашения 075-15-2021-695).*

### Библиографический список

1. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. — М.: Машиностроение. Технология сборки в машиностроении. Т. III-5 / А.А. Гусев, В.В. Павлов; под ред. Ю.М. Соломенцева. — М.: Машиностроение, 2001. — 640 с.

2. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина; 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Инновационное машиностроение, 2018. — 818 с.

3. Grigoriev S.N., Dolgov V.A. and Rakhmievich E.G. Evaluation of Production Processability of Products Based on Application of Semantic Models of Production and Technological Capabilities. In: 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (Far East Con), Vladivostok, 2020, pp. 1–6, DOI: 10.1109/FarEast-Con50210.2020.9271490.

4. Григорьев С.Н., Долгов В.А., Умнов П.И., Фокин Н.Н., Прошкина О.С. Оценка станкостроительности изготовления изделий гражданской продукции на машиностроительных предприятиях ОПК // Автоматизация. Современные технологии. 2021. № 7. DOI: 10.36652/0869-4931-75-2021-75-7-291-295.

5. Grigoriev S.N., Dolgov V.A., Nikishechkin P.A., and Dolgov N.V. Information model of production and logistics systems of machine-building enterprises as the basis for the development and maintenance of their digital twins In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 971, pp. 032094, Materials Science (2020). DOI:10.1088/1757-899X/971/3/032094.

6. Колесов И.М. Основы технологии машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов. — М.: Машиностроение, 1997. — 592 с.: ил.

7. Варганов М.В., Чан Чунг Та. Сборочное производство: проблемы и решения // Станкоинструмент. 2020, № 2 (019). — С. 22–29.

**Долгов Виталий Анатольевич** — д-р техн. наук, доц., генеральный директор ООО «Фабрика цифровых систем», профессор кафедры высокоэффективных технологий обработки ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
v-dolgov@yandex.ru

**Прошкина Ольга Сергеевна** — ведущий инженер-технолог ПАО «НПО «АЛМАЗ»  
oproshkina123@gmail.com

**Dolgov Vitaliy Anatolievich** — D.Sc. of Engineering, docent, CEO LLC “Factory of digital systems”, Professor at the sub-department of “Highly efficient processing technologies” of MSUT “STANKIN”  
v-dolgov@yandex.ru

**Proshkina Olga Sergeevna** — leading process engineer PJSC “NPO “ALMAZ”  
oproshkina123@gmail.com

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflicts of Interest Statement:** The authors have no conflicts of interest to declare.

## АНАЛИЗ СТРАТЕГИЙ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

## THE ANALYSIS OF STRATEGIES FOR FINDING THE OPTIMAL TECHNOLOGICAL SOLUTION IN THE MANUFACTURE OF MACHINE PARTS

*Статья посвящена анализу стратегий поиска оптимального проектного решения, которые лежат в основе проектирования эффективного технологического маршрута. Проведен анализ недостатков и ограничений различных стратегий проектирования. Выявлены основные отрицательные стороны каждой из них.*

*This article is devoted to the analysis strategies for finding the optimal technological solution, which are at the core of the effective technological flow design. The analysis of different design strategy disadvantages and limitations was conducted. The main negative sides of each one are revealed.*

**Ключевые слова:** стратегии проектирования, анализ эффективности, анализ стратегий, основные недостатки стратегий, автоматизация.

**Keywords:** design strategies, efficiency analysis, strategy analysis, major disadvantages of strategies, automation.

Анализируя существующие методы поиска оптимального технологического решения при изготовлении деталей машин, можно сделать вывод, что не все они одинаково эффективны. Всего существует 6 основных стратегий поиска оптимального решения [1, 2, 4]:

- Линейная стратегия;
- Циклическая стратегия;
- Разветвленная стратегия;
- Адаптивная стратегия;
- Стратегия приращений;
- Стратегия случайного поиска.

Каждая из них имеет как положительные, так и отрицательные стороны.

### Схожие по принципу проектирования стратегии

Из вышеперечисленных стратегий можно выделить группу схожих по основному негативному признаку. А именно перебор множества значений с целью получения лучшего результата. К этой группе относятся:

- Линейная стратегия (рис. 1);
- Циклическая стратегия (рис. 2);
- Разветвленная стратегия (рис. 3);

Вышеперечисленные стратегии объединяет общий недостаток — перебор огромного множества переменных с целью получения наиболее подходящего

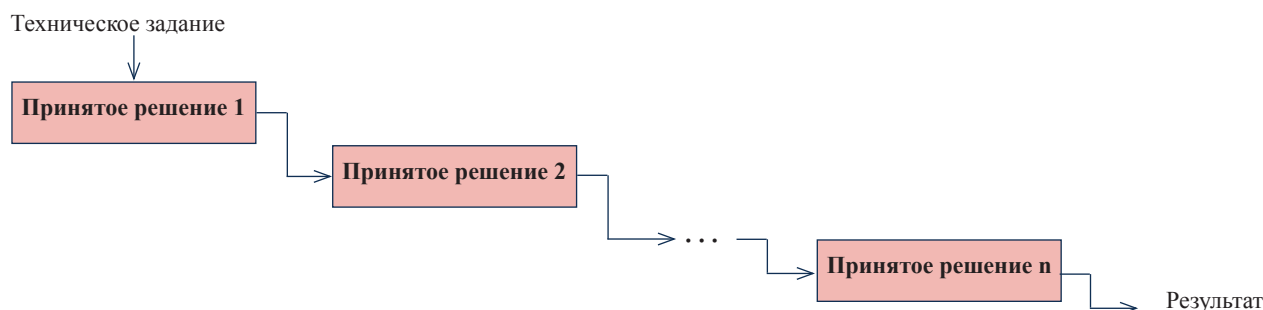


Рис. 1. Линейная стратегия

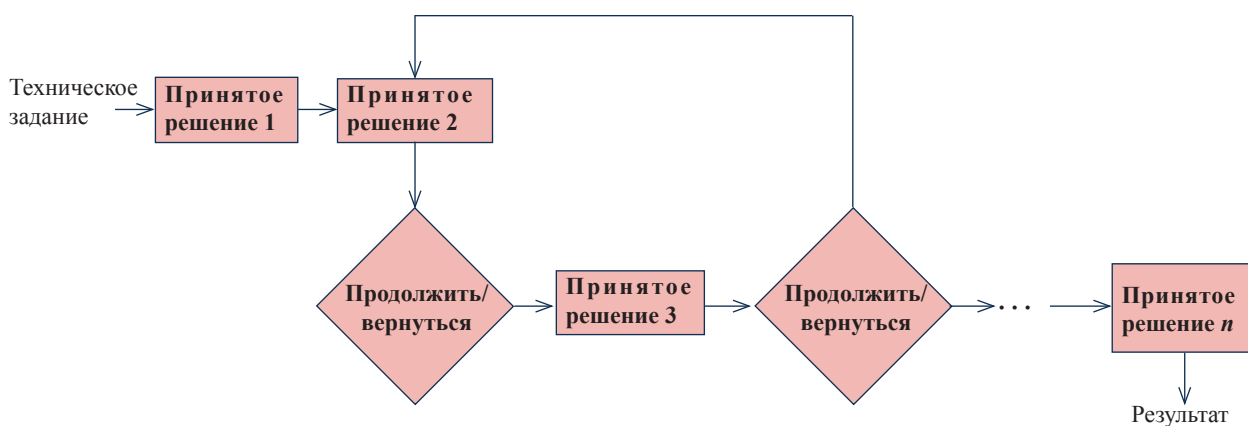


Рис. 2. Циклическая стратегия

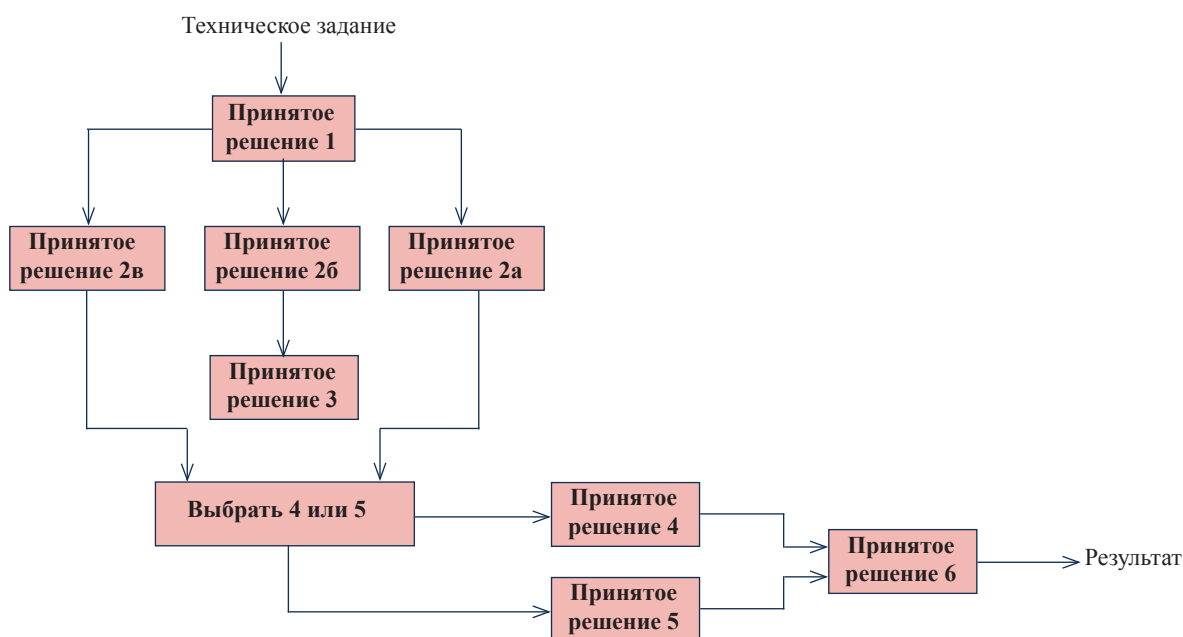


Рис. 3. Разветвленная стратегия

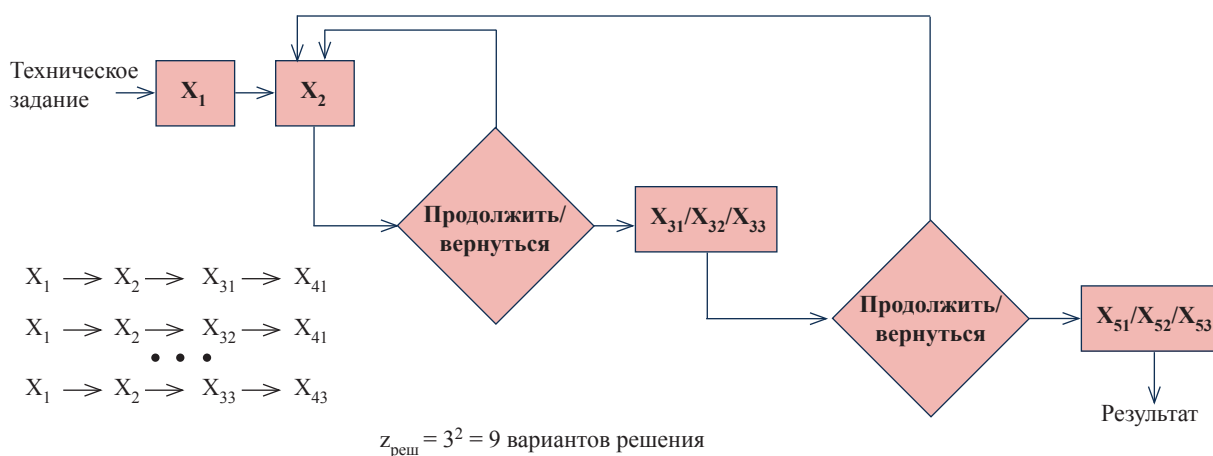


Рис. 4. Циклическая стратегия (4 блока принятия решения)



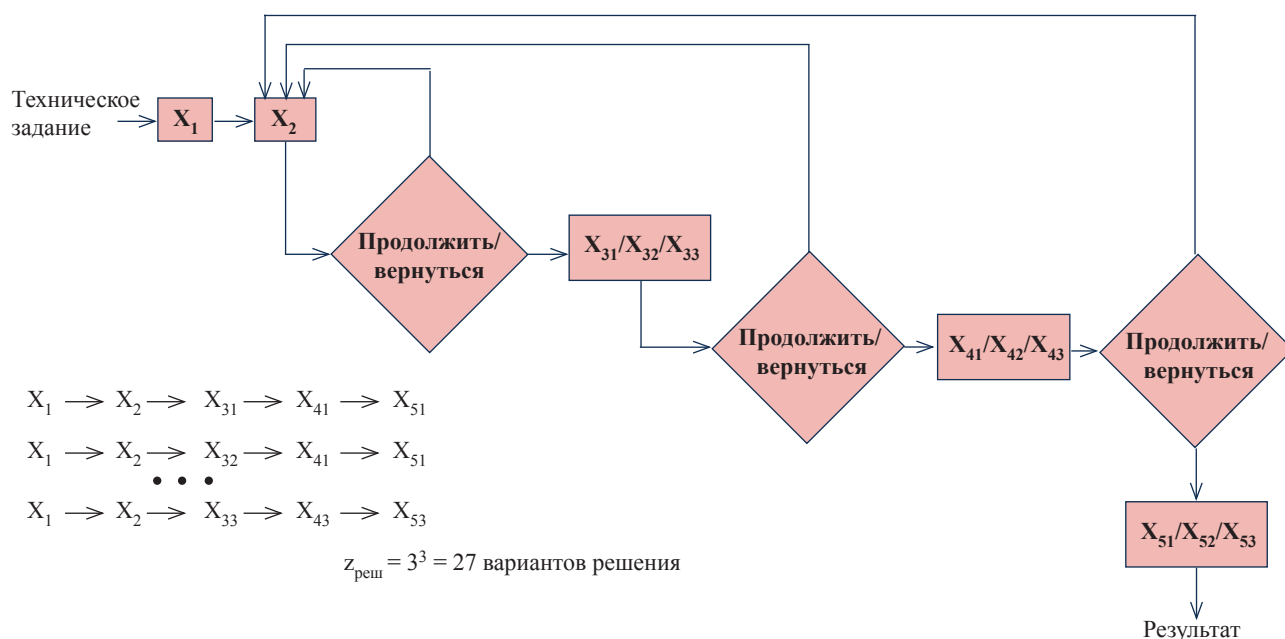


Рис. 5. Циклическая стратегия (5 блоков принятия решения)

результата [3]. Этот процесс требует очень большого количества времени, которое приходится затрачивать на перебор не подходящих или неэффективных вариантов технологического маршрута. А с увеличением длины цепочки, количество времени, которое требуется для перебора различных вариантов, будет увеличиваться в геометрической прогрессии. Так, например, используя циклическую стратегию поиска и имея цепочку, состоящую из 4 блоков принятия решения и 2 блоков проверки, а также по 3 различных варианта решения для каждого блока, в результате получится 9 различных вариантов решения (рис. 4).

Цепочка из 5 блоков принятия решения и 3 блоков проверки при таких же условиях позволяет получить 27 различных вариантов решения (рис. 5).

Помимо этого, данные стратегии не дают конкретной информации, что делать на каждом этапе. Имеется только последовательность действий при проектировании, а также общие правила и рекомендации, но отсутствует конкретика этих действий [1].

Наряду с общими недостатками стоит обратить внимание на частные недостатки каждой стратегии из этой группы.

### Линейная стратегия

Данный вариант стратегии не предполагает оценку промежуточных действий, рассматривается только полученный результат. Подобный подход к проектированию технологического маршрута приводит к потере времени в случае неудовлетворительного результата, особенно, когда неверное решение было принято на изначальном этапе проектирования. Данная стратегия может применяться для разработки маршрутов на про-

стые типовые детали, когда маршрут «лежит на поверхности», но крайне неэффективна для проектирования маршрутов для сложных деталей машин.

### Циклическая стратегия

В отличие от предыдущей, такая стратегия позволяет выявить неверное решение в процессе проектирования, не дожидаясь получения конечного результата, что позволяет экономить время. Но также, как и линейная, является перебором значений, что требует большого количества времени. Помимо этого, в качестве недостатка можно выделить тот факт, что производится оценка действий после их выполнения, но не производится оценка решений, которые требуется принять на текущем этапе.

### Разветвленная стратегия

Такая стратегия, с одной стороны, позволяет экономить время за счет продумывания сразу нескольких вариантов технологического маршрута, но при этом, как и вышеупомянутые стратегии, является перебором множества значений. Равно как и линейная стратегия, данный вариант не предполагает оценку промежуточных действий, а рассматривается только полученный результат.

Подводя промежуточные итоги, можно сделать вывод, что при проектировании оптимального технологического маршрута использование вышеперечисленных стратегий требует затрачивания большого количества времени. Кроме того, помимо времени, которое необходимо затратить на проектирование самого маршрута, оно также требуется для проведения оценки полученного решения (насколько оно удовлетворяет заданным требованиям).

**Различные по принципу проектирования стратегии**

Оставшиеся варианты стратегий (рис. 6, 7, 8), в противоположность первой группе, не являются простым перебором множества значений. Но они также не разъясняют действия, которые необходимо выполнять, и какие решения для получения оптимального технологического маршрута требуется принимать. Как и для стратегий из первой группы, имеются только общие правила и рекомендации [1], что является существенным недостатком. Помимо этого, не разъясняется, на каких основаниях и по какому принципу необходимо производить проверку правильности полученного решения.

В отличие от первой группы, данные стратегии не получается так же сгруппировать, так как они не схожи между собой по принципу подхода к поиску оптимального решения. Для выявления недостатков, рассмотрим каждую в отдельности.

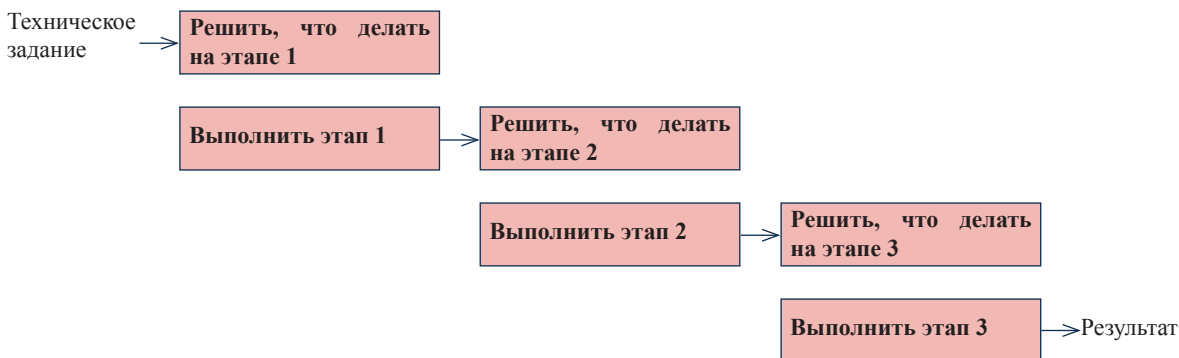


Рис. 6. Адаптивная стратегия

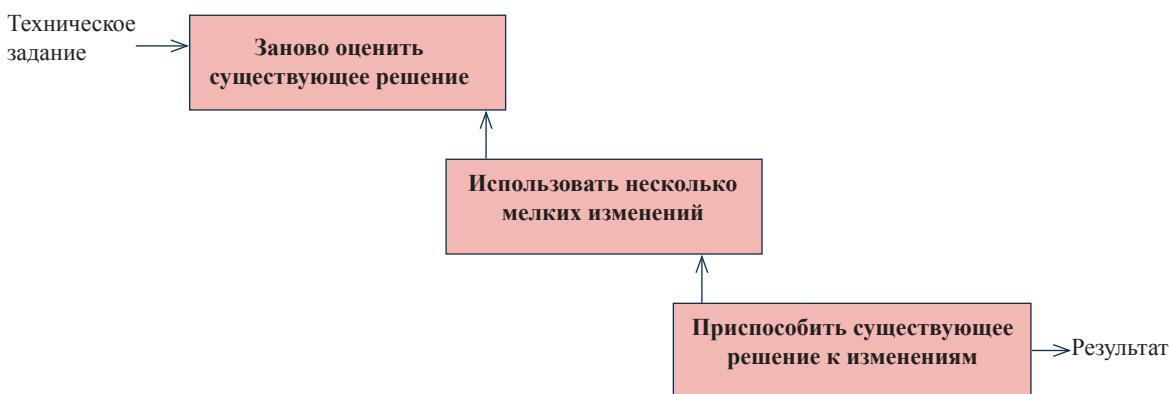


Рис. 7. Стратегия приращений



Рис. 8. Стратегия случайного поиска

**Адаптивная стратегия**

По сравнению с вышеописанными методами, адаптивная стратегия позволяет отсекал неподходящие варианты в процессе проектирования. Достигается это за счет анализа каждого этапа принятия технологического решения до принятия самого решения, что позволяет снизить количество непригодных вариантов. Из недостатков можно выделить отсутствие разъяснения, по какому принципу необходимо принимать решения между этапами выполнения действий. Также данная стратегия не подразумевает возврат к предыдущим этапам, что одновременно является как положительным (экономия времени), так и отрицательным фактором, так как в случае неверно принятых решений, а следовательно, и получившегося неэффективного технологического маршрута, необходимо начинать проектирование заново.

Необходимо отметить, что адаптивная стратегия считается наиболее подходящей для проектирования.

### Стратегия приращений

Суть стратегии приращения заключается в получении оптимального технологического маршрута за счет постоянного его совершенствования. Недостатком такого метода проектирования является отсутствие последовательности действий, которые необходимо выполнить для получения результата. Имеется только принцип улучшения существующего. То есть, по сути, необходимо вначале разработать неправильный технологический маршрут, чтобы в итоге превратить его в правильный. Все это приводит к «долгому пути» к получению оптимальной технологии. Считаем важным отметить, что данная стратегия хорошо поддается автоматизации. Это реализуемо за счет ее структуры, которая схожа с процессом обучения нейросетей.

### Стратегия случайного поиска

Стратегия случайного поиска используется, когда требуется спроектировать принципиально новый технологический маршрут и необходимо принимать во внимание все идеи и варианты проектирования. Недостатком же данной стратегии является отсутствие самого алгоритма проектирования. А также эта стратегия тяжело поддается автоматизации. Случайный поиск предназначен именно для поиска решения в условиях принципиально нового проектирования, когда еще ничего не известно, и не является стратегией для создания оптимального технологического маршрута.

Помимо всех вышеперечисленных недостатков необходимо выделить еще один. Оценка эффективности получившегося в результате проектирования по одной из стратегии технологического маршрута производится только после полного его составления. Анализ эффективности в процессе проектирования не проводится.

Подводя итоги, хотим отметить, что все рассмотренные выше стратегии поиска оптимального проектного решения имеют свои недостатки и ограничения.

Некоторые из таких недостатков обуславливаются спецификой применения такой стратегии (как, например, стратегия случайного поиска), другие являются следствием недостаточной проработанности самих стратегий. Помимо частных, из всех вышеприведенных стратегий можно выделить следующие основные недостатки, которые, так или иначе, присущи каждой:

- Отсутствие четкого алгоритма действий для создания оптимального технологического маршрута;
- Процесс получения оптимального технологического маршрута основан на проектировании нескольких маршрутов и их последующим сравнением между собой, что требует больших временных затрат;
- Отсутствие принципа оценки эффективности получившегося технологического маршрута;
- Отсутствие принципа оценки промежуточных действий;
- Отсутствие описания области применимости той или иной стратегии (т.е. в каких случаях и какую стратегию наиболее целесообразно использовать).

Исходя из этого, можно сделать вывод, что для создания стратегии, которая позволит сразу проектировать оптимальный технологический маршрут без необходимости сравнения их между собой, требуется найти способ устранить эти недостатки и снять имеющиеся ограничения.

### Библиографический список

1. Моргунов Ю.А., Панов Д.В., Саушкин Б.П., Саушкин С.Б. Научно-технические технологии машиностроительного производства, Москва: Форум, 2013 г. — С. 888–925.
2. Соломенцев Ю.М., Митрофанов В.Г., Прохоров А.Ф. и др. Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении, Москва: Машиностроение, 1986 г. — С. 7–50.
3. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества, Москва: Машиностроение, 1988 г. — С. 29–40.
4. Джонс Дж. Методы проектирования: пер. с англ. Москва: Мир, 1986 г. — С. 99–130.

**Седых Михаил Иванович** — доц. кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
sedykhmi@mail.ru

**Карташев Дмитрий Игоревич** — инженер-технолог ПАО «РКК «Энергия»  
pro100dimonn@gmail.com

**Sedykh Mikhail Ivanovich** — associate professor at the sub-department of «Mechanical engineering technology» of MSUT «STANKIN»  
sedykhmi@mail.ru

**Kartashev Dmitry Igorevich** — manufacturing engineer RSC “Energia”  
pro100dimonn@gmail.com

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflicts of Interest Statement:** The authors have no conflicts of interest to declare.

## ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

### PLANNING AN EXPERIMENT FOR CHOOSING THE OPTIMAL PARAMETERS FOR THE CUTTING PROCESS OF HARD-TO-CUT MATERIALS

*В настоящий момент времени для поддержания работоспособности изделия при износе определенных участков широко применяются наплавка на пораженные участки твердого материала, например стеллита. Однако тема обработки сверхтвердых материалов до сих пор является актуальной. При обработке данного вида материала возникают определённые трудности. Любое отклонение от оптимальных параметров может привести к снижению производительности, срока службы оборудования и установок, быстрому износу и снижению работоспособности режущего инструмента, а также ухудшению качества обрабатываемой поверхности и многому другому.*

*В статье приведены результаты планирования и реализации полного факторного эксперимента  $2^2$  по выявлению оптимальных параметров процесса резания труднообрабатываемых материалов. Результаты анализа позволяют сделать выводы о диапазоне оптимальных параметров процесса резания. Определение оптимальной температуры при найденных режимах резания в процессе обработки труднообрабатываемого материала позволит сохранить геометрические параметры инструмента, предотвратить снижение режущих свойств.*

*At the present time, in order to maintain the performance of the product when certain areas are worn, surfacing on the affected areas of hard material, such as stellite, is widely used. However, the topic of processing superhard materials is still relevant. Since, when processing this type of material, certain difficulties arise. Therefore, any deviation from the optimal parameters can lead to a decrease in productivity, service life of equipment and installations, rapid wear and decrease in the performance of the cutting tool, as well as deterioration in the quality of the machined surface, and much more.*

*The article presents the results of planning and implementation of a full factorial experiment  $2^2$  to identify the optimal parameters of the cutting process of hard-to-cut materials. The results of the analysis allow us to draw conclusions about the range of optimal parameters of the cutting process. Determining the optimal temperature at the found cutting conditions in the process of processing a hard-to-cut material will allow maintaining the geometric parameters of the tool and preventing a decrease in cutting properties.*

**Ключевые слова:** труднообрабатываемые материалы, производительность, оптимизация, планирование эксперимента, матрица планирования, эксперимент.

**Keywords:** hard-to-cut materials, productivity, optimization, experiment planning, planning matrix, experiment.

#### Введение

В настоящее время машиностроительная отрасль развивается быстрыми темпами в различных направлениях, одним из которых является оптимизация параметров резания при обработке труднообрабатываемых материалов. Тема актуальна, поскольку данные виды материалов широко используются в качестве наплавки на пораженные участки объектов или крупногабаритных деталей, что позволяет сократить трудовые и иные ресурсные затраты.

Многие работы исследователей [1–8] направлены на решение проблем, возникающих при решении вопроса оптимизации процесса резания. Основными направлениями развития являются совершенствование

режущего инструмента, оборудования и смазочно-охлаждающих жидкостей.

А для достижения наиболее точных результатов при минимальном количестве проведенных опытов и сохранения статистической достоверности результатов, в работе применялось планирование эксперимента.

#### Материал и методы исследования

В исследовании применялись методы анализа, обобщения, а также программный продукт Deform 2.0, ANSYS для проведения модельного эксперимента, MS Excel для статистической обработки полученной информации.

### Результаты исследования и их обсуждение

В настоящее время в машиностроении широко используются новые материалы, обладающие высокопрочностными характеристиками.

Доля токарной обработки при реализации технологических процессов изготовления деталей из труднообрабатываемых сплавов по трудоемкости и производственным затратам составляет 40...60% общих затрат.

Обработка резанием данных видов материалов осуществляется с большими трудностями. Высокая температура, образуемая в зоне контакта с обрабатываемым материалом, вызывает разупрочнение стандартных твердых сплавов и, как следствие, снижение стойкости инструмента и скорости резания.

В связи с вышесказанным, целью работы является оптимизация режимов резания при точении труднообрабатываемых сплавов для достижения максимальной производительности и стойкости режущего

инструмента за счет обеспечения оптимальной температуры в зоне резания.

Оптимальная температура максимальной работоспособности находится в пределах от 700–800 градусов в соответствии с трудами [1–3]. Поэтому опираясь на результаты уже имеющихся оптимальных температур, определялись параметры режимов резания, а именно скорость и число оборотов шпинделя.

По результатам теоретического обзора предлагается способ охлаждения зоны резания, включающий подачу в зону резания потока охлажденного воздуха.

Технический результат предлагаемого устройства выражается в повышении размерной стойкости режущего инструмента.

В программе была смоделирована среда для определения оптимальных температур при обработке материала.

Основные условия проведения эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1. Условия проведения эксперимента

Характеристика эксперимента	Описание характеристики
Объект	Пораженные участки пальца ковша экскаватора, на которые наплавлен труднообрабатываемый материал (стеллит)
Вид эксперимента	Модельный
Программный продукт	Deform 2.0 и ANSYS
Входные параметры эксперимента (факторы)	Скорость резания (м/мин) и число оборотов шпинделя (об/мин)
Выходные параметры эксперимента (отклик)	Температура
Дополнительные условия	Тепловой поток $q = 10$ (Вт/м <sup>2</sup> ); Теплоемкость твердого материала 460 (Дж/кг·К); Коэффициент конвективной теплоотдачи 50 (Вт/м <sup>2</sup> ·К); Коэффициент теплопроводности $K = 0,18$ (Вт/м <sup>2</sup> )

Была построена матрица полного факторного эксперимента  $2^2$  и определены его характеристики, представленные в таблицах 2 и 3. Выходным параметром в процессе обработки детали из труднообрабатываемого

материала будет являться температура ( $Y$ ), которая зависит от скорости ( $X_1$ ) и числа оборотов шпинделя ( $X_2$ ).

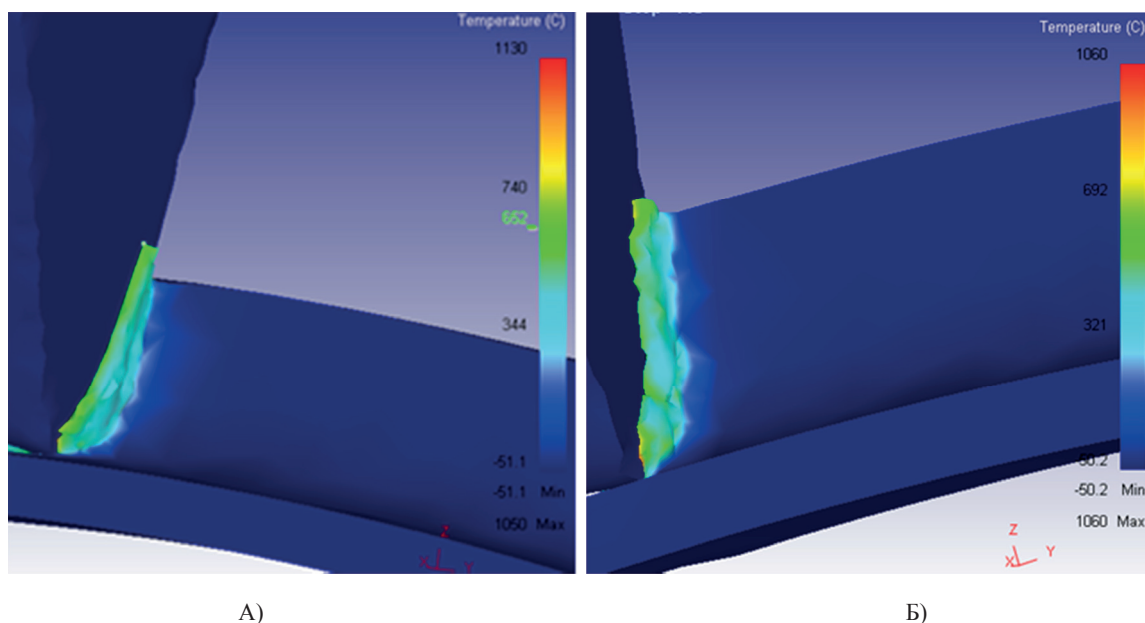
При проведении эксперимента  $2^2$  математическая модель имеет вид:  $y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2$ .

Таблица 2. Характеристики проведения эксперимента

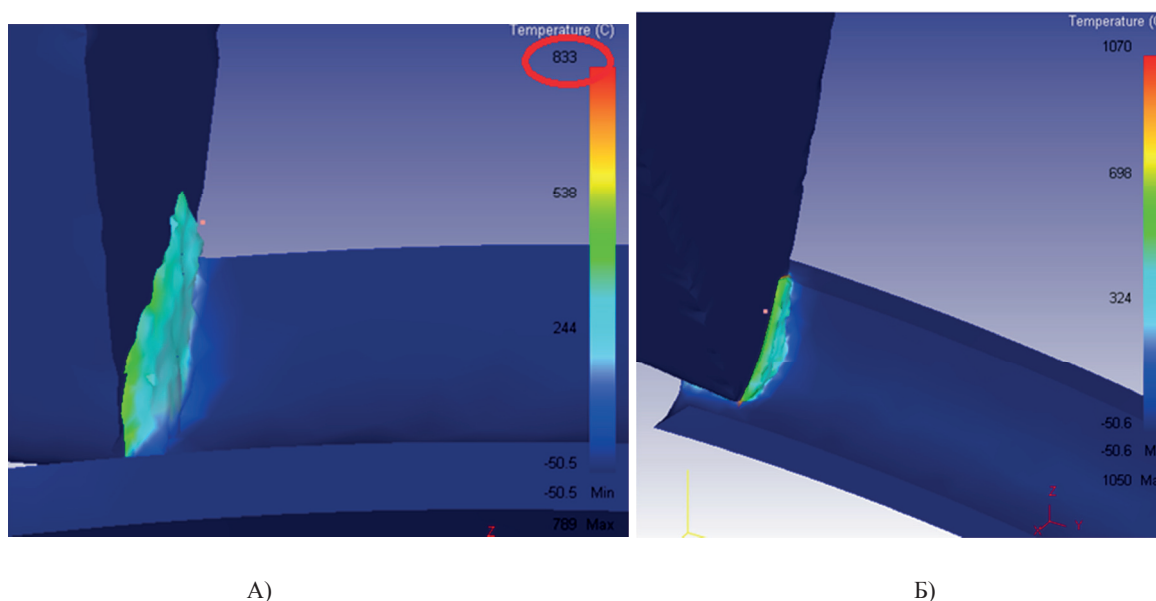
Характеристика	$X_1$ , м/мин	$X_2$ , об/мин
Основной уровень	200	550
Интервал варьирования	50	50
Верхний уровень	250	600
Нижний уровень	150	500

Таблица 3. Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_1$ , м/мин	$X_2$ , об/мин	$Y$
1	+	+	+	150	500	1130
2	+	–	+	250	500	1060
3	+	+	–	150	600	833
4	+	–	–	250	600	1070



**Рис. 1.** Результаты анализа по предлагаемой методике обработки труднообрабатываемого материала (предварительное охлаждение внешней среды, инструмента и заготовки)  
 А) Условие:  $V = 150$  м/мин;  $N = 500$  об/мин; Б) Условие:  $V = 250$  м/мин;  $N = 500$  об/мин



**Рис. 2.** Результаты анализа по предлагаемой методике обработки труднообрабатываемого материала (предварительное охлаждение внешней среды, инструмента и заготовки)  
 А) Условие:  $V = 150$  м/мин;  $N = 600$  об/мин Б) Условие:  $V = 250$  м/мин;  $N = 600$  об/мин

Значения температур ( $T$ ), представленные в таблице 3, были получены в ходе проведения модельного эксперимента в программном продукте.

Результаты проведенного эксперимента по четырем опытам представлены на рис. 1 и 2.

В результате анализа данных было определено, что при охлаждении одновременно внешней среды, заготовки и инструмента, происходит снижение температуры.

По предлагаемой методике (внешняя среда, температура заготовки и инструмента перед началом обработки составила  $-50$  градусов), было определено, что максимальная температура в зоне резания на шаге расчета № 112 при  $V = 150$  м/мин и  $N = 500$  об/мин составила 1130 градусов (табл. 3). А минимальная температура в зоне резания на шаге расчета № 112 при  $V = 150$  м/мин и  $N = 600$  об/мин составила 833 градуса (табл. 3 и рис. 2А).

### Выводы

Установлено, что определение оптимальной температуры при найденных режимах резания в процессе обработки труднообрабатываемого материала:

1) позволит сохранить геометрические параметры инструмента, предотвратить снижение режущих свойств и износостойкости;

2) обеспечит сокращение вспомогательного времени на смену режущих пластинок и повысит производительность за счет сокращения основного времени при найденных параметрах режимов резания.

### Библиографический список

1. Артамонов Е.В. Механика разрушения и прочность сменных режущих пластин из твердых сплавов: учебное пособие / Е.В. Артамонов, Т.Е. Помигалова, А.М. Тверяков, М.Х. Утешев // Тюмень: ТюмГНГУ, 2013. — с. 148.

2. Артамонов Е.В. Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов: учебное пособие / Е.В. Артамонов // Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. — с. 192.

3. Артамонов Е.В. Резание металлов и температурный фактор: учебное пособие / Е.В. Артамонов, Д.В. Васильев, М.Х. Утешев // Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. — с. 150.

4. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. Москва, Машиностроение, 1990, 288 с.

5. Зантур Сахби, Богуславский В.А., Ивченко Т.Г. Оптимизация режимов резания при точении труднообрабатываемых материалов с учетом температурных ограничений [Электронный ресурс] — режим доступа: <http://masters.donntu.org/2011/fimm/okulik/library/article2.pdf> (дата обращения: 02.09.2022).

6. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания [Электронный ресурс]: <http://stanok-online.ru/literatura/rezka-metallov/6214-optimizaciya-processov-rezaniya.html> (дата обращения: 02.09.2022).

7. Верещака А.С. Обработка труднообрабатываемых материалов инструментом из твердого сплава с ReCo-связкой повышенной теплостойкости и наноструктурированным износостойким покрытием [Электронный ресурс] / А.С. Верещака и др. // Материалы МНТК ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». — Режим доступа: [http://mospolytech.ru/science/mami145/scientific/article/s08/s08\\_04.pdf](http://mospolytech.ru/science/mami145/scientific/article/s08/s08_04.pdf).

8. Верещака А.С., Дачева А.В., Аникеев А.И. Повышение работоспособности режущего инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов путем комплексного применения наноструктурированного износостойкого покрытия и твердого сплава оптимального состава // Известия МГТУ «МАМИ». 2010. № 1 (9). С. 99–105.

**Темпель Ольга Александровна** — старший преподаватель кафедры технологии машиностроения Тюменского индустриального университета

[tempel\\_o@mail.ru](mailto:tempel_o@mail.ru)

**Темпель Юлия Александровна** — канд. техн. наук, доц. кафедры технологии машиностроения Тюменского индустриального университета

[Tempelja@tyuiu.ru](mailto:Tempelja@tyuiu.ru)

**Васьков Данил Евгеньевич** — обучающийся кафедры технологии машиностроения Тюменского индустриального университета

[vaskovde@tyuiu.ru](mailto:vaskovde@tyuiu.ru)

**Tempel Olga Alexandrovna** — senior lecturer at the department of “Mechanical Engineering Technology” of Tyumen Industrial University

[tempel\\_o@mail.ru](mailto:tempel_o@mail.ru)

**Tempel Yulia Aleksandrovna** — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the department of “Mechanical Engineering Technology” of Tyumen Industrial University

[Tempelja@tyuiu.ru](mailto:Tempelja@tyuiu.ru)

**Vaskov Danil Evgenievich** — student at the Department of “Mechanical Engineering Technology” of Tyumen Industrial University

[vaskovde@tyuiu.ru](mailto:vaskovde@tyuiu.ru)

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflicts of Interest Statement:** The authors have no conflicts of interest to declare.

---

# АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

---

УДК 544.35; 621.9.048.7

А.А. Барзов, В.М. Корнеева, С.С. Корнеев, А.Н. Феофанов  
A.A. Barzov, V.M. Korneeva, S.S. Korneev, A.N. Feofanov

## ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНО СИМУЛЬТАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## PROBABILISTIC MODEL OF ECONOMIC EFFICIENCY OF FUNCTIONALLY SIMULTANEOUS TECHNOLOGICAL SYSTEMS

*Предложена модель, позволяющая с вероятностных позиций оценивать экономическую эффективность дополнительно-симультантных физических воздействий на основную операционную технологию. Показано наличие экономически оптимальной соотносительности между стоимостными и функциональными параметрами в симультантных технологических системах.*

*A model is proposed that allows to assess the economic efficiency of additionally simultaneous physical impacts on the main operating technology from a probabilistic position. The presence of economically optimal correlation between cost and functional parameters in simultaneous technological systems is shown.*

**Ключевые слова:** симультантные технологические системы, конструкторско-технологическое решение, физико-технологическое воздействие.

**Keywords:** simultaneous technological systems, design and technological solution, physical and technological impact.

### Введение

Вопрос об использовании какого-либо физически реального симультанного<sup>1</sup> дополнения — additionality к основному функционалу структурно сложных технологических систем не может быть решен без экономического анализа такой модернизации. Поэтому разработка модели оценки технико-экономической эффективности дополнительных или комплементарных элементов к таким системам является актуальной и практически значимой задачей будущей прикладной теории физико-технологической симультанности.

Многообразие факторов влияния на функционально-экономическую эффективность симультантных систем, а также трудно формализуемый характер взаимодействия их комплементарных структурных элементов предопределяет использование на данном этапе построения и анализа соответствующей модели

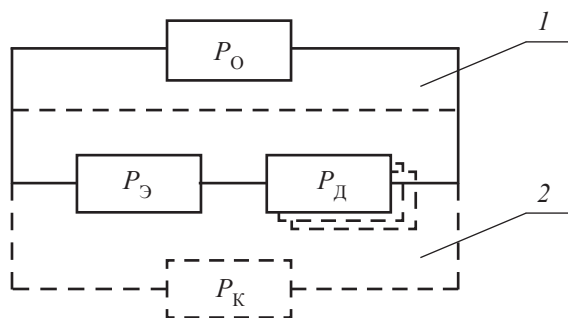
структурно-вероятностного подхода [1, 2]. Этот подход, используя вполне реалистичную феноменологию взаимодействия слагаемых элементов симультантных технологических систем (СТС), позволяет представить функционально-обобщенный результат их комплементарного воздействия на объект анализа (ОА) в целом в виде наглядной структурной схемы, представленной на *рис. 1*.

Отличительной особенностью данного расположения элементов при экономическом анализе симультантных технологических систем (СТС) является наличие элемента ( $P_{\Sigma}$ ), обусловленного необходимостью экспертного или иного обоснования использования дополнительного воздействия ( $P_{Д}$ ) на функциональность основного или доминантного элемента ( $P_{О}$ ). Кроме того, общий контроль качества функционирования всей СТС можно осуществлять с использованием контрольного блока, функциональная надежность которого определяется вероятностью безотказной работы  $P_{К}$ . Причем вероятностно-функциональные значения:  $P_{О}$ ,  $P_{\Sigma}$ ,  $P_{Д}$  и  $P_{К}$  по сути представляют собой отношения

---

<sup>1</sup> Симультаннизм [фр. simultannisme < лат. simul] — в одно и то же время





**Рис. 1.** Структурная схема функционально-вероятностного взаимодействия основного ( $P_O$ ) и дополнительного ( $P_Д$ ) видов физико-технологического симультанного воздействия на объект анализа. 1 — блок основного физико-технологического воздействия; 2 — блок симультанного дополнительного воздействия с учетом его вероятностной эффективности ( $P_Э$ ) и возможного контроля функциональной надежности ( $P_К$ ) всей системы взаимодействия

реальных, статистически обоснованных значений соответствующих параметров анализируемой СТС к их неким максимально достижимым и/или номинально-абсолютным характеристикам. Причём в случае невозможности достоверного определения данных вероятностных параметров СТС производится их экспертное оценивание по стандартным методикам, адаптированным к условиям решаемой задачи [3].

### Вероятностная модель экономической эффективности

Для СТС наличие дополнительного, квазиизбыточного структурного элемента, например, экспертного  $P_Э$  обоснования применяемого варианта  $P_Э$  является необходимым условием функционального симультанизма системы. Причем выбранное на этой основе его конкретное воплощение в виде определенного конструкторско-технологического решения (КТР) представляет собой достаточное условие для возможной практической реализации потенциала результативности дополнительного воздействия  $P_Д$ . В соответствии с этим, используя известные положения прикладной теории надежности [1], итоговую вероятностную эффективность функционирования СТС, схематично показанную на рис. 1, можно представить как:

$$P_{И} = P_O + P_Э \cdot P_Д - P_O \cdot P_Э \cdot P_Д \quad (1)$$

где  $P_{И}$  — фактическая вероятностно-итоговая оценка эффективности функционирования всех элементов рассматриваемой СТС;  $P_O$ ,  $P_Э$ , и  $P_Д$  — соответственно вероятностные характеристики достаточно надежного выполнения своих функций определенных выше элементов СТС.

Переходя непосредственно к экономическому анализу СТС, сделаем вполне реалистичное предположение, которое состоит в следующем. Пусть, для определенности, возможные материально-экономические потери при функциональном отказе рассматриваемой СТС будут прямо пропорциональны вероятности наступления этого события. Тогда в исходном приближении вероятностная оценка общей затратности эксплуатации такой системы будет определяться зависимостью вида:

$$C_{об} = (1 - P_{И})C_{П} + \sum_{i=1}^3 C(P_i), \quad (2)$$

где  $C_{об}$  — общие, суммарно-возможные потери в случае отказа СТС;  $C(P_i)$  — соответственно затраты на формирование и реализацию процессов функционирования определенных элементов структуры рассматриваемой сложной системы;  $i = O, Э$  и  $Д$ ;  $C_{П}$  — квазипостоянный коэффициент, характеризующий экономические потери в случае отказа СТС.

Заметим, что в (2) выражение  $(1 - P_{И})$  с вероятностных позиций фактически определяет экономический риск при отказе СТС, и как следствие, является основным предметом технико-стоимостного анализа. Причем уравнение (2), по сути является экономической моделью ожидаемой затратности функционирования СТС, а минимизация  $C_{об}$  позволяет обосновать наиболее эффективное КТР по критерию его стоимости.

Для дальнейшего анализа модели (2) необходима конкретизация соотношений типа  $C(P_i)$ , которую можно осуществить, например, полагая справедливыми зависимости вида:

$$C(P_i) = C_i P_i^{k_i}; i = O, Э, Д, \quad (3)$$

где  $C_i$  и  $k_i$  — коэффициенты, характеризующие затратность достижения определенного уровня вероятностной функциональной надежности  $P_i$  анализируемого элемента СТС.

Таким образом, с учётом вполне адекватной конкретизации  $C(P_i)$  в виде (3), базовую экономическую модель затратности СТС типа (2) следует рассматривать как целевую функцию, которая позволяет осуществить поиск оптимального (min) значения  $C_{об}$  по соответствующему варьируемому параметру.

Необходимо подчеркнуть, что предложенная экономическая модель СТС имеет две отличительные черты:

- вероятностно-экономическое представление риска материальных потерь в случае возможного отказа анализируемой системы, как основы для оценки затратности её функционирования;
- наличие вероятностного взаимодействия между необходимыми и достаточными условиями для осуществления процессов функционирования дополнительных структурных элементов в СТС.

Феноменологическая общность и ситуационная гибкость этих отличий позволяет их результативно использовать при построении более адекватных моделей при технико-экономическом анализе других, не связанных с СТС, процессов и структур. Поэтому данное обстоятельство имеет определенное прикладное значение для принятия экономически обоснованных управленческих решений в самых различных областях знаний, в том числе не физико-технологического профиля.

Оптимизация экономически симультанного воздействия и технико-экономическая содержательность предлагаемой вероятностной модели оценки ожидаемого функционального качества с учетом роли СТС позволяют анализировать и получать конкретные результаты, необходимые для принятия взвешенных управленческих решений как по новым проектируемым технологиям, так и по уже действующим системам, с целью обеспечения их более высокой результативности в эксплуатации. При этом алгоритмированная методика вычислений будет состоять из подготовительного и аналитического этапов. На первом определяются значения всех ключевых параметров, входящих в исходную модель (2) или её адаптированные модификации, а на втором этапе производится сравнительный анализ потенциала результативности рассматриваемых вариантов дополнений к базовой функциональной системе, в частности, оценивается предиктивная технико-экономическая эффективность инновативно-различных КТР.

Проиллюстрируем вышеизложенное наглядным примером поиска экономически оптимального значения функциональной эффективности СТС путем использования базовой вероятно-стоимостной модели (2). Для определенности рассуждений воспользуемся модифицированным для нашего случая известным принципом равных влияний, т. е. положим, что:

$$P = P_0 = P_э = P_д, \quad (4)$$

$$k = k_0 = k_э = k_д, \quad (5)$$

где  $P$  — вероятностная эффективность функционирования рассматриваемого элемента СТС;  $k$  — как и ранее, соответствующий коэффициент, характеризующий нелинейность соотношений типа (3).

Фактически, (4) и (5) означает в данном примере расчёта равенство функционально-вероятностной эффективности всех структурных элементов анализируемой СТС, представленной на рис. 1, с позиций их экономичности. Тогда исходное вероятно-стоимостное соотношение (2) с учётом допущений (4) и (5) примет вид:

$$C_{об} = (1 - P_и)C_{п} + C_c \cdot P^k, \quad (6)$$

$$C_c = C_0 + C_э + C_д. \quad (7)$$

Последнее соотношение определяет суммарные затраты  $C_c$  на обеспечение вероятностной эффективности в её стоимостном выражении при  $i$ -ом уровне надежного функционирования любого структурного элемента анализируемой СТС. Найдем экстремум (min) по параметру  $P$  целевой функции (6) с учётом (1) и выше сформулированных допущений и получим:

$$\frac{dC_{об}}{dP} = (1 - 2P + 3P^2)C_{п} + kC_c P^{k-1} = 0 \rightarrow P_{opt}. \quad (8)$$

Из последнего соотношения при известных значениях  $C$ ,  $C_c$  и  $k$  однозначно определяется уровень экономически оптимальной вероятностной эффективности  $P_{opt}$  структурных элементов анализируемой СТС. Это значение  $P_{opt}$  при прочих равных условиях обеспечивает наименее затратную возможность функционирования СТС с учетом стоимости этапа экспертно-аналитического обоснования рационального варианта КТР по конкретному воплощению дополнительного симультанного элемента в её структуре. Причем численные значения параметров модели (2) и её упрощенной модификации (6) можно получить из анализа имеющихся статистических данных экономического характера и/или экспертно-аналитическим путем [4]. В дальнейшем будет весьма полезным провести верификацию численных значений параметров, входящих в данную модель, на основе подробного анализа уже функционирующих СТС.

В целях получения наглядного результата анализа функциональных возможностей предлагаемой вероятно-экономической модели (2) и её оптимизационной модификации (допустим примерное равенство стоимостных характеристик  $C_{п}$  функционирующей СТС и возможных затрат на её создание, определяемых по (7):

$$C_{п} \sim C_c \quad (9)$$

Тогда, полагая для примера значения  $k$  в (8) равными 1,0 и 2,0, получим следующие экономически оптимальные параметры функциональности условной СТС:

$$P_1 = 2/3 \text{ (~}0,68) \text{ при } k = 1,0, \quad (10)$$

$$P_2 = \sqrt{1/3} \text{ или } \sim 0,57 \text{ при } k = 2. \quad (11)$$

Полученные данные свидетельствуют, что при резком удорожании процесса создания дополнительных элементов СТС их общая экономически обусловленная эффективность снижается. Это обстоятельство в целом весьма негативно сказывается на возможностях в достижении итоговой результативности функционирования таких СТС.

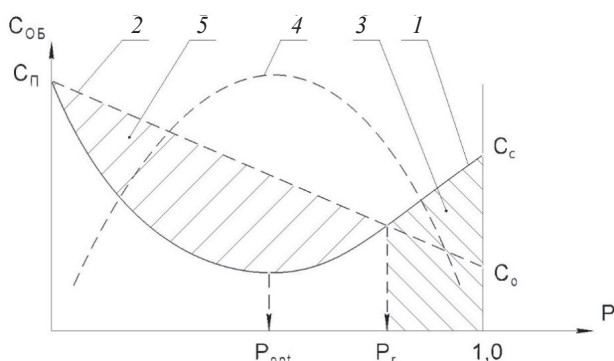
Вторым значимым следствием анализа предложенной модели (2) и варианта её расчетной модификации (8) является реалистичность определения

границы экономически эффективного применения симультанно-дополнительных физико-технологических воздействий (ФТВ). Для этого необходимо соотносить ожидаемые затраты, рассчитанные по модели (2) с симультанным использованием и без применения дополнительных ФТВ. В частности, в соответствии с принятыми обозначениями, верхняя граница экономически целесообразного применения симультанных ФТВ, в том числе соответствующих технологий  $P_{\Gamma}$ , будет определяться из решения следующего уравнения:

$$(1 - P)C_{\Pi} = (1 - P_{\text{и}})C_{\Pi} + C_{\text{с}}P^k \rightarrow P_{\Gamma}, \quad (12)$$

где  $P_{\text{и}}$  — определяется согласно (1);  $C_{\text{с}}$  — по (7) с учетом (4) и (5);  $P_{\Gamma}$  — граничное значение эффективности применения дополнительного ФТВ, ниже которого экономически не целесообразно использовать комбинированный элемент  $P_{\text{д}}$  (рис. 1).

Таким образом, из (12) следует, что чем ниже эффективность основного или базового функционально-технологического элемента  $P_{\text{о}}$ , тем большую технико-экономическую значимость имеет его симультанно-физическое дополнение в виде  $P_{\text{д}}$ . Характерными примерами этого положения можно считать: литьё под давлением, размерную электрохимическую обработку, вибрационное резание и другие СТС формо- и структурообразования деталей.



**Рис. 2.** Графическая иллюстрация вероятной затратности физико-технологического воздействия (ФТВ) с учетом стоимости обоснования и реализации симультанно-дополнительного фактора влияния. 1 — характер изменения стоимости ФТВ (основного и симультанно-дополнительного); 2 — стоимость основного ФТВ, как функции от его вероятностной эффективности реализации  $P$ ; 3 — зона экономически не рационального использования дополнительного ФТВ; 4 — изменение ожидаемой симультанной результативности основного и дополнительного ФТВ; 5 — зона, характеризующая экономическую эффективность применения дополнительного ФТВ

Схематично вышеизложенное в графическом виде представлено на рис. 2, который наглядно иллюстрирует не только возможность минимизации затрат на функционирование СТС, но и позволяет определить саму необходимость симультанного применения дополнительных элементов. Причем эта необходимость обосновывается аналитически формализуемым оцениванием по критерию её экономически-функциональной целесообразности. Например, использование симультанно-дополнительных вибраций заготовки и сверла существенно повышает результативность процесса сверления глубоких отверстий в нержавеющей и жаропрочных сталях. Поэтому данные модели и зависимости после численной верификации путем анализа конкретных аналогов, следует использовать в качестве информационно-методической поддержки процедуры принятия соответствующих управленческих решений.

### Заключение

Представленные на рис. 2 зависимости наглядно показывают зону экономически целесообразного применения симультанно-дополнительных функциональных элементов, причём эта зона будет расширяться по мере возрастания относительной стоимости базовых технологий с исходной эффективностью  $P_{\text{о}}$ . Кроме того, общие затраты на реализацию симультанного комплекса конструкторско-технологической поддержки могут быть достаточно эффективно минимизированы путём применения соответствующих ФТВ с определенным уровнем соотносительности: цена — качество. Поэтому в дальнейшем, помимо непосредственного анализа зависимости вида (2), можно рекомендовать использование более информационно-полных моделей, связывающих определенный уровень ожидаемой эффективности симультанного применения дополнительных технологий с суммарными затратами на его достижение.

Подчеркнем, что изменение экономичности СТС, как функции от ожидаемой эффективности её структурных элементов, представленное на рис. 2 зависимостью 4, в данном случае имеет четко выраженный экстремум (max). Это обстоятельство наглядно иллюстрирует прикладную значимость предлагаемого, по сути, вероятностного подхода к экономическому моделированию роли симультанно-дополнительных ФТВ в различных технических и технологических системах.

### Библиографический список

1. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надёжности. — 2-е изд., переработанное — СПб.: БХВ — Петербург, 2006. — 704 с.
2. Масштабный фактор (феноменология и физико-технологические применения)/ А.А. Барзов, А.И. Денчик, М.А. Прохорова, Н.Н. Сысоев. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова. Физический факультет, 2021. — 194 с.

3. Барзов А.А., Корнеева В.М., Феофанов А.Н. Вероятностный анализ результативности экспертизы ранних этапов жизненного цикла высокотехнологической продукции // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2020. №2(53). С. 30–35.

4. Барзов А.А., Корнеева В.М., Феофанов А.Н. Вероятностное моделирование процедуры экспертно-аналитического анализа качества инноваций // Технология машиностроения. 2018. № 10 (196). С. 63–69.

**Барзов Александр Александрович** — д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник Центра гидрофизических исследований Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

*a.a.barzov@gmail.com*

**Корнеева Вера Михайловна** — д-р техн. наук, доц., профессор кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н.Э. Баумана

*v\_korneeva@list.ru*

**Корнеев Сергей Сергеевич** — канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана

*corneev.sergei2014@yandex.ru*

**Феофанов Александр Николаевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры инженерной графики ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*feofanov.fan1@yandex.ru*

**Barzov Aleksandr Aleksandrovich** — D.Sc. of Engineering, Full Professor, senior researcher of the center for hydrophysical research of the Faculty of Physics of Moscow State University named after M.V. Lomonosov

*a.a.barzov@gmail.com*

**Korneeva Vera Mihajlovna** — D.Sc. of Engineering, docent, Professor at the department of “Metrology and interchangeability” of Bauman Moscow State Technical University

*v\_korneeva@list.ru*

**Korneev Sergey Sergeevich** — candidate Sc. of Engineering, docent, associate professor at the department of “Rocket and space technologies engineering” of Bauman Moscow State Technical University

*corneev.sergei2014@yandex.ru*

**Feofanov Alexander Nikolaevich** — D.Sc. of Engineering, Professor at the sub-department of “Engineering graphics” of MSUT “STANKIN”

*feofanov.fan1@yandex.ru*

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflicts of Interest Statement:** The authors have no conflicts of interest to declare.

---

---

## КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА CLASSIFICATION OF TYPES OF ADDITIVE PRODUCTION

*В статье приведены основные определения, которые целесообразно применять в такой области машиностроения, как аддитивное производство изделий. Опираясь на данные термины, а также ASTM и Pham классификации, было предложено собственное разделение видов производства деталей путём 3D-печати.*

*The article presents the main definitions that it is advisable to apply in such an area of mechanical engineering as additive manufacturing of products. Based on these terms, as well as the ASTM and Pham classifications, it was proposed to separate the types of production of parts by 3D printing.*

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, классификация, стандарт ASTM, Pham.

**Keywords:** additive technologies, classification, ASTM standard, Pham.

Аддитивные технологии получают всё более широкое распространение при изготовлении сложных изделий машиностроительного производства. А также являются неотъемлемой частью индустрии 4.0 и направлены не только на изготовление изделий без участия человека, но и на производство по безопасной экологически чистой технологии. Но, к сожалению, полностью чистого предприятия добиться невозможно, следовательно, необходимо контролировать процесс, происходящий при производстве изделий, выявлять необходимые факторы этого процесса и вовремя их предупреждать.

Под «вычитающими» технологиями подразумевается механообработка — удаление («вычитание») материала из массива заготовки. Таким образом, сообщество американских инженеров прибегло к понятию (subtractive) «вычитание», чтобы определить новое понятие (additive) «добавление», т. е. в самом определении «аддитивные технологии» трактуются как противоположность технологиям механообработки. Но не все технологии соединения материала, а только те, которые создают объект по данным 3D-модели или из CAD-данных, т. е. на основе трёхмерной компьютерной модели. Это второе ключевое слово — CAD. Третье ключевое слово здесь —

«послойно». Можно отметить, что американцы используют в определении термина слово «usually» (обычно), по-видимому, допуская, по меньшей мере, теоретическую возможность и непослойного построения [7].

В профессиональной сфере часто используются два основных термина — Additive Manufacturing (AM), Additive Fabrication (AF), а также равнозначные по смыслу — Additive Processes, Additive Techniques, Additive Layer Manufacturing, Layer Manufacturing и Free-form Fabrication. Все они могут быть переведены как «аддитивные технологии», их также можно называть технологиями послойного синтеза [9].

На данном этапе развития аддитивных технологий известно множество классификаций, но они не полноценно описывают все имеющиеся способы получения изделий. Целью статьи является анализ классификаций и структурирование общей схемы.

Производство изготовления изделий методом аддитивных технологий на данный момент широко развивается. Для систематизации видов данной отрасли в США компанией ASTM International было разработано глобальное разбиение 3D-печати на следующие виды [3–5] (рис. 1).

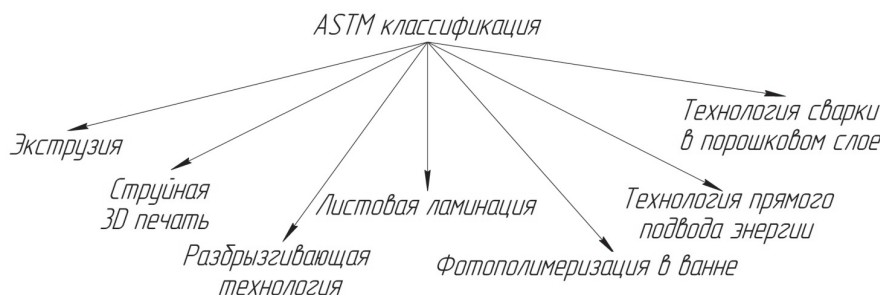


Рис. 1. ASTM – классификация

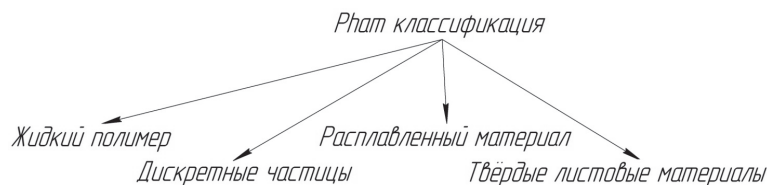


Рис. 2. Pham-классификация

Документом ASTM F2792 изучается 7 категорий аддитивных технологий, которые рассматриваются по нескольким признакам: технология, исходный материал, источник энергии и различные особенности [10] (табл. 1).

Комплексный метод классификации предложил и Pham, использовавший двумерную классификацию (рис. 2).

Pham проводит классификацию не только по вышперечисленным параметрам, но и включает в неё одновременно используемые источники энергии, применяемые в формировании детали. Классификация

согласно данным параметрам представлена ниже. На заре 3D-моделирования использовался только один источник энергии. С развитием данной технологии для повышения производительности данного процесса стали применять несколько источников подачи материала в зону обработки [7].

В классификации по большому числу параметров Pham использовал четыре отдельных вида материалов (табл. 2), таких как жидкий полимер, частицы порошка, расплавленный материал и ламинированные листовые материалы.

Таблица 1. Классификация аддитивных технологий согласно стандарту ASTM F2792

Группа	Технология	Исходный материал	Источник энергии	Особенности
Экструзия (Material Extrusion)	Fused Deposition Modeling (FDM)	Термопластики, керамические суспензии, металлические пасты	Термическая энергия	Невысокая стоимость установок; использование нескольких материалов; ограниченная точность; невысокое качество поверхности
	Contour Crafting			
Струйная 3D-печать (Material Jetting)	Polyjet/ Inkjet Printing	Фотополимеры, воск	Термическая энергия/ фотоотверждение	Печать из различных материалов; высокое качество поверхности
Разбрызгивающая технология (Binder Jetting)	Indirect Inkjet Printing (Binder 3DP)	Полимерные порошки, керамические порошки, металлические порошки	Термическая энергия	Необходимость пропитки изделий после их построения; широкий выбор материалов; высокая пористость изделий
Листовая ламинация (Sheet Lamination)	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Металлические листы, полимерные пленки, керамические ленты	Лазерный луч	Высокое качество поверхности; необходимость удаления остатков материала
Фотополимеризация в ванне (Vat Photopolymerization)	Stereolithography (SLA)	Фотополимеры, керамики (оксиды Al, Zr, пьезокерамики)	Ультрафиолетовый лазер	Высокая скорость построения; высокая точность изготовления; высокая стоимость исходных материалов
Технология прямого подвода энергии (Directed Energy Deposition)	Laser Engineered Net Shaping (LENS) Electron-Beam Welding (EBW)	Металлические порошки и проволоки	Лазерный луч, электронный луч	Возможность ремонта изделий; создание функционально-градиентных изделий; низкое качество поверхности
Технология сварки в порошковом слое (Powder Bed Fusion)	Selective Laser Sintering (SLS)	Полиамиды, полимеры	Лазерный луч	
	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Металлические и керамические порошки		
	Selective Laser Melting (SLM)			
	Electron-Beam Melting (EBM)		электронный луч	

Таблица 2. Классификация технологий послойного синтеза, предложенная Pham

Материалы	Одномерный проход	Двухмерный проход	Массив одномерных проходов	Двухмерный проход
Жидкий полимер	SLA (3D Sys)	Двойной луч SLA (3D Sys)	Object	Envisiontech MicroTEC
Дискретные частицы	SLA (3D Sys), LST (EOS), LENS, Phenix, SDM	LST (EOS)	3D-печать	DPS
Расплавленный материал	FDM, Solidscape	–	TermoJet	–
Твердые листовые материалы	Solido PLT (KIRA)	–	–	–

Анализируя два выше представленных способа классифицирования методов производства изделий аддитивными технологиями, мы ясно видим, что в этих классификациях отсутствует часть разновидностей. Поэтому они не полностью отражают современную тенденцию развития аддитивных методов. На основании классификаций ASTM F2792 и Pham нами было предложено следующее разделение видов производства деталей путём 3D-печати. Основными составляющими данной классификации являются два способа построения изделий: послойный синтез (Bed Deposition) и прямое осаждение материала (Direct Deposition). Рассмотрим их.

Во время применения послойного синтеза сначала формируется слой путём насыпания на рабочую платформу определённого количества порошкового материала и разравнивания порошка посредством ролика или

«ножа». При этом должен быть сформирован слой материала определенной толщины с ровной поверхностью. Затем в образованном слое с использованием селективного выбора точек происходит воздействие лазером или иным объектом на поверхность сформированного слоя порошка. В этот момент частички порошка скрепляются (сплавляются или склеиваются) в соответствии с текущим сечением исходной CAD-модели, при этом часть строительного материала (в данном случае — порошка) остается в созданном слое нетронутой [1].

Расшифровывая название данной технологии (Bed Deposition), обнаруживается обязательное наличие поверхности (bed), на которой сначала формируют слой, а затем в этом слое выборочно отверждают (deposition) строительный материал. Указанной технологии достаточно точно соответствует термин «селективный синтез» или «селективное лазерное спекание» (SLS),

Виды получения изделий методом аддитивных технологий

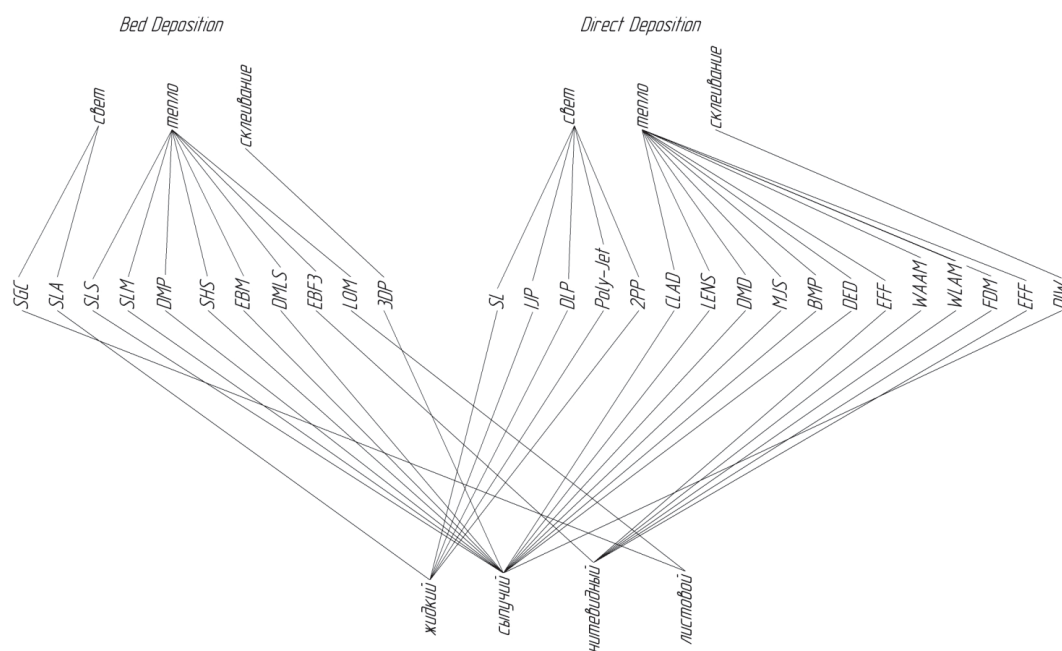


Рис. 3. Классификация аддитивных производств

если «отверждающим» инструментом является лазер, который здесь, в отличие от лазерной стереолитографии (SLA-технологии), применяется в качестве источника тепла, а не ультрафиолетового излучения. После завершения построения платформа «bed» перемещается в вертикальном направлении на величину шага построения, на ней формируют новый слой, и процесс повторяется до полного построения модели [8].

Термин Direct Deposition на русский можно перевести как «прямое или непосредственное осаждение материала», т.е. направление энергии и осаждение материала в конкретную точку построения. Иными словами, в отличие от предыдущего вида построения деталей, здесь не образуется слоя строительного материала на платформе (bed), а материал подается в конкретное место, куда в данный момент времени подводится энергия и где идет процесс формирования детали. Это происходит подобно тому, как сварщик подводит электрод к месту, где за счет электрической дуги формируется зона расплава [6] (рис. 3).

При изготовлении изделий по технологиям Bed Deposition и Direct Deposition не используются такие методы фиксации слоя, как фотополимеризация «свет», сплавление «тепло» и склеивание «связывающее». Исходя из этого, классификация ныне существующих методов изготовлений при помощи аддитивных технологий будет иметь вид, представленный на рис. 3.

#### Библиографический список

1. Аддитивные технологии в машиностроении // М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина. — Санкт-Петербург, 2013. — 222 с.: ил.
2. Белов П.С., Махов С.Л. Анализ дефектов изделий, получаемых методами аддитивных технологий // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 1 (91). С. 8–13.
3. Белов П.С. Влияние параметров постобработки на шероховатость поверхности изделий, получаемых методами аддитивных технологий // Вестник МГТУ «СТАНКИН». Издательство: Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» — М. — 2019. № 1 (48). — С. 57–61.
4. Белов П.С., Драгина О.Г., Никифоров Д.Ю. Исследование изотропности изделий, изготовленных методами аддитивных технологий // Вестник МГТУ «СТАНКИН». Издательство: Московский государственный технологический университет «СТАНКИН». — М.: — 2019. № 4 (51). С. 47–50.
5. Белов П.С., Драгина О.Г., Никифоров Д.Ю. Технология создания 3D-моделей и изготовления опытных образцов с помощью быстрого прототипирования // Технология машиностроения. 2014. № 6. С. 34–36.

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

7. История и классификация аддитивных технологий. Режим доступа: <https://extxe.com/3698/istorija-i-klassifikacija-additivnyh-tehnologij/> (дата обращения 14.10.2021).

8. Результаты исследований естественных и точных наук: междисциплинарный подход и сверхаддитивный эффект: монография / Абзалов А.А., Асеева М.А., Атабаев М.М. и др.; Под ред. В.В. Ерохина, Л.П. Тереховой, О.А. Подкопаева — Самара: ООО «ПНК», 2018. — 261 с.

9. Стандарт ASTM F2792.1549323-1 Standard. Режим доступа: [file:///C:/Users/vushi/Downloads/Possibilities\\_and\\_limitations\\_of\\_titanium\\_alloy\\_ad.pdf](file:///C:/Users/vushi/Downloads/Possibilities_and_limitations_of_titanium_alloy_ad.pdf) (дата обращения 14.10.2021).

10. ASTM—классификация. Режим доступа: <https://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/AdditiveManufacturingTerminology.pdf> (дата обращения 14.10.2021).

#### References

1. Additive technologies in mechanical engineering // M.A. Zlenko, A.A. Popovich, I.N. Mutylyna. — St. Petersburg, 2013. — 222 p.: ill.
2. Belov P.S., Makhov S.L. Analysis of defects of products obtained by methods of additive technologies // Science and business: ways of development. 2019. № 1 (91). pp. 8–13.
3. Belov P.S. The influence of post-processing parameters on the surface roughness of products obtained by methods of additive technologies // Vestnik MSUT «STANKIN». Publishing house: Moscow State Technological University «STANKIN» — M. — 2019. № 1 (48). — pp. 57–61.
4. Belov P.S., Dragina O.G., Nikiforov D.Yu. Investigation of isotropy of products manufactured by methods of additive technologies // Vestnik MSUT «STANKIN». Publishing house: Moscow State Technological University «STANKIN» — M. — 2019. № 4 (51). pp. 47–50.
5. Belov P.S., Dragina O.G., Nikiforov D.Yu. Technology for creating 3D-models and manufacturing prototypes using rapid prototyping // Technology of mechanical engineering. 2014. № 6. pp. 34–36.
6. Zlenko M.A. Additive technologies in mechanical engineering / M.V. Nagaytsev, V.M. Dovbysh // handbook for engineers. — M. SSC RF FSUE «NAMI» 2015 — 220 p.
7. History and classification of additive technologies. Access mode: <https://extxe.com/3698/istorija-i-klassifikacija-additivnyh-tehnologij/> (accessed 14.10.2021)
8. Research results of natural and exact sciences: interdisciplinary approach and superadditive effect: monograph / [Abzalov A.A., Aseeva M.A., Atabaev M.M., etc.]; Edited by V.V. Erokhin, L.P. Terekhova, O.A. Podkopayeva — Samara: LLC «PNK», 2018. — 261 p.



9. ASTM F2792.1549323-1 Standard. Access Mode: file:///C:/Users/vushi/Downloads/Possibilities\_and\_limitations\_of\_titanium\_alloy\_ad.pdf (accessed 14.10.2021)

10. ASTM–classification. Access mode: <https://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/AdditiveManufacturingTerminology.pdf> (accessed 14.10.2021)

**Бровченко Анастасия Александровна** — лаборант-исследователь, преподаватель кафедры технологий автоматизированного производства Егорьевского технологического института (ЕТИ) ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*vushival@yandex.ru*

**Бровченко Ольга Александровна** — старший преподаватель кафедры технологий автоматизированного производства Егорьевского технологического института (ЕТИ) ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*brovchenkoolga2811@mail.ru*

**Белов Павел Сергеевич** — доц., доц. кафедры технологии, оборудования и автоматизации машиностроительных производств Егорьевского технологического института (ЕТИ) ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*beliy3000@ya.ru*

**Шварцбург Леонид Эфраимович** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной экологии и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*lesh@stankin.ru*

**Brovchenko Anastasia Alexandrovna** — research assistant, lecturer at the sub-department of “Automated Production Technologies” of Egorievsk Technological Institute (ETI) MSUT “STANKIN”  
*vushival@yandex.ru*

**Brovchenko Olga Alexandrovna** — senior lecturer at the sub-department of “Automated Production Technologies” of Egorievsk Technological Institute (ETI) MSUT “STANKIN”  
*brovchenkoolga2811@mail.ru*

**Belov Pavel Sergeevich** — docent, associate professor at the sub-department of “Technology, Equipment and Automation of Machine-Building Industries” of Egorievsk Technological Institute (ETI) MSUT “STANKIN”  
*beliy3000@ya.ru*

**Shvartsburg Leonid Efraimovich** — D.Sc. of Engineering, Full Professor, Head of the sub-department of “Environmental Engineering and Life Safety” of MSUT “STANKIN”  
*lesh@stankin.ru*

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflicts of Interest Statement:** The authors have no conflicts of interest to declare.

УДК 681.5

М.С. Денисов, Д.И. Петрешин, К.С. Давыдов  
M.S. Denisov, D.I. Petreshin, K.S. Davydov

## СОГЛАСОВАНИЕ РЕЖИМОВ НАЛОЖЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ СО СКОРОСТЬЮ ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛА В ФОРМЕ КАК СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЛИТЬЯ С КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

## COORDINATION OF PRESSURE APPLICATION MODES WITH THE RATE OF COOLING OF THE METAL IN THE MOLD AS A WAY TO CONTROL THE PROCESS OF CASTING WITH CRYSTALLIZATION UNDER PRESSURE

*Изложена связь теории кристаллизации с тепловой теорией литья в процессе литья с кристаллизацией под давлением. Предложена последовательность расчетно-проектных и технологических процедур, связанных с автоматизацией процесса литья с кристаллизацией под давлением. Установлено и обосновано с теоретической точки зрения, что при согласовании режимов охлаждения и режимов наложения давления на кристаллизующийся металл становится возможным контролировать и управлять процессом формирования свойств алюминиевых сплавов и деталей из них.*

*The connection of the theory of crystallization with the thermal theory of casting in the process of casting with crystallization under pressure is described. The structure of the control system for the casting process with crystallization under pressure is proposed. It is established and justified from a theoretical point of view that when the cooling modes and the modes of applying pressure on the crystallizing metal are coordinated, it becomes possible to control and control the process of forming the properties of aluminum alloys and parts made of them.*

**Ключевые слова:** система управления, давление, теория кристаллизации, тепловая теория литья, охлаждение, температура, алюминиевые сплавы, механические свойства.

**Keywords:** control system, pressure, crystallization theory, thermal casting theory, cooling, temperature, aluminum alloys, mechanical properties.

### Введение

Необходимо признать, что по мере развития конкурентных рыночных отношений, одной из главных целей научных исследований в сфере высокотехнологичных производств становится обеспечение высокого качества выпускаемой продукции. Так, например, в литейном производстве, являющемся важнейшей подотраслью заготовительного производства машиностроения, качество отливок — это, прежде всего, отсутствие таких характерных дефектов, как усадочная пористость, рыхлота, грубая поверхность, отклонения размеров.

При всем многообразии литейных процессов принципиальным в отношении качества отливок является процесс фазового перехода, когда жидкий расплав превращается в одну или несколько фаз. В зависимости от скорости охлаждения, накладываемого давления, частоты электрических, магнитных, акустических полей и других факторов в момент фазового перехода возникает бесчисленное множество возможных сце-

нариев формирования кристаллического строения. К сожалению, состояние теории кристаллизации на сегодняшний день таково, что предсказать развитие процесса и тем более управлять им в нужном направлении не представляется возможным.

Теория кристаллизации расплавов в том виде, в каком она сформировалась и используется в литейном производстве, в лучшем случае может быть использована как инструмент исследования процессов, протекающих в зависимости от температуры и времени. Но даже этих двух параметров в отношении сложных многокомпонентных металлических систем достаточно, чтобы столкнуться с таким нагромождением эмпирического материала, из которого невозможно построить сколько-нибудь стройную систему представлений. Поэтому использование дополнительных внешних факторов воздействия на процесс кристаллизации — давления, электромагнитных полей и других — конечно же, привносит в существующую теорию кристаллизации новые факты, информацию, требующие осмысления, изучения и обобщения.

### Основная часть

Возможности теории кристаллизации в значительной степени связаны с тепловой теорией литья, основы которой заложены в работах А.И. Вейника, Г.Ф. Баландина, Б.Б. Гуляева [1–3].

В то же время исследования И.И. Новикова [4], который впервые обратил внимание на неравновесные (реальные) состояния металлических систем и установил качественно новые взаимосвязи между свойствами металлов и сплавов с одной стороны, и условиями формирования кристаллического строения с другой, как раз и подводят к тому, чтобы от созерцания диаграмм состояния и термодинамических расчетов и оценок общего направления развития процессов перейти к активному управлению сложными динамическими процессами.

Выражаясь другими словами, на данном этапе, когда общие фундаментально-теоретические основы поведения металлических систем известны, задачей теории все больше становится создание высоких наукоемких технологий, распространение которых в промышленности позволило бы в комплексе решать такие перспективные задачи, как качество выпускаемой продукции, производительность и т.д.

Примером такой технологии является процесс литья с наложением давления на кристаллизующийся металл, при осуществлении которого, в отличие от известных процессов литья под давлением и жидкой штамповки, давление накладывается изнутри, из-под корки закристаллизовавшегося металла, причем со временем изменение величины давления отрабатывается с учетом развития процесса кристаллизации, свойств сплава, конфигурации отливки, требований, предъявляемых к ней по точности, шероховатости поверхности, плотности, герметичности, прочности, пластичности и т.д.

В то же время развитие техники и необходимость освоения производства сложных изделий из сплавов с низкими технологическими свойствами выдвигает целый ряд новых задач. Это прежде всего формирование однородной структуры, повышение производительности процесса, возможность получения изделий сложной конфигурации больших размеров с переменной толщиной стенки, включая и изделия из сплавов с высокой усадкой, склонных к образованию трещин и других дефектов.

Создание основ теории процесса литья с наложением давления связано с решением широкого спектра проблем, но наиболее актуальными остаются вопросы теоретического описания феноменологического поведения кристаллизующегося металла в условиях отвода теплоты, вакуумирования и наложения давления. Такое описание не может быть построено на сравнении отдельных фактов или анализе частных закономерностей. Необходима обширная и достоверная

информация. Поэтому в направлении дальнейшего развития теории процесса в отличие от традиционных методов экспериментальных и теоретических исследований предложен новый подход, суть которого заключается в том, что изучение процесса осуществляется в составе автоматизированной системы управления. Такая система оснащена средствами сбора, обработки, хранения и представления информации об изменении тех параметров, от которых зависит качество продукции. Оригинальность здесь в том, что человек с его знаниями и опытом, находясь в контуре управления, имеет возможность, изменяя программу, активно влиять и воздействовать на ход процесса. Это позволяет направить вычислительные возможности системы на производство новых знаний о технологическом объекте. Использование такой системы особенно эффективно при освоении производства новых изделий, когда параметров много, а их воздействие на ход процесса в силу влияния внешних возмущений и переменных факторов имеет сложный характер.

Для дальнейшего развития теории процесса важное значение приобретают такие явления, как сжимаемость жидкого металла, фильтрационная пропитка междендритных пространств, усадка при переходе из жидкого в кристаллическое состояние и др. Качественные и количественные закономерности названных явлений установлены в результате проведенных ранее исследований [5]. Доказано, что относительное изменение объема при переходе из жидкого состояния в твердое достигает 10 % [6]. Здесь теоретические расчеты хорошо согласуются с экспериментальными данными. Нужно сказать, что такие меры, как установка прибулей, направленная кристаллизация и др. не обеспечивают полной компенсации усадки. Под влиянием давления, накладываемого изнутри, легкоплавкая часть расплава проникает в пустоты между ветвями дендритов, причем относительный объем металла, запрессовываемого в кристаллический остов, может составлять 1–3 %.

Проблема обеспечения равномерной плотной структуры особенно актуальна при производстве деталей ответственного назначения, например, заготовок поршней ДВС из алюминиевых сплавов для последующей изотермической штамповки, когда толщина отливки варьируется от 80 до 160 мм. За счет исправления грубой литейной структуры алюминиевых сплавов, в том числе высокопрочных, путем наложения давления на кристаллизующийся металл, как показано в работе [7], получены заготовки поршней ДВС для последующей изотермической штамповки, твердость и прочность которых оказалась выше, чем у серийных из того же сплава в деформированном состоянии. Подробно формирование структуры отливок изучено и представлено в работе [8]. В качестве теоретической основы формирования структур в условиях наложения давления на программном уровне в указанных работах

использовались современные представления о строении жидких расплавов, а также основные положения теории сложных динамических систем.

Не разрешенными остаются вопросы, связанные с переходом из бесструктурного жидкого в твердое кристаллическое состояние металлов и сплавов. И только тщательное изучение поведения расплавов под давлением в адиабатических условиях и (или) в условиях контролируемого охлаждения может пролить свет на исключительно сложный феномен природы. Несостоятельность существующих теорий жидкого состояния, кристаллизации, наследственности, затвердевания, ликвации и др. как раз в том и состоит, что они не связаны друг с другом, а пренебрежение взаимным влиянием неизбежно приводит к ошибкам. В этом случае теория не выполняет возложенных на нее функций. Необходимость существенного расширения представлений о поведении расплавов в условиях наложения давления обусловлена также тем, что и в развитии смежных наук наметились качественные изменения.

В то время как тепловая теория литья оперирует исключительно законом сохранения энергии, физика неравновесных состояний обращается также к законам сохранения импульса и момента импульса [9], что может быть использовано при разработке уравнения состояния расплава в условиях наложения давления.

Значительно большими ресурсами располагает кристаллизация из жидкого состояния. Кристаллизация в неравновесных условиях, например, в условиях быстрого охлаждения, обычно рассматривается с чисто металлургических позиций — формирование структуры связывают с числом центров кристаллизации и степенью переохлаждения [10].

Идея управления формированием структуры отливок возможно еще достаточно длительное время оставалась невостребованной, если бы, по меньшей мере, не два обстоятельства, которые настоятельно подталкивают к конкретным действиям.

Первое из них заключается в том, что на рынке металлопродукции появились прецизионные сплавы для спецтехники, медицины, приборостроения, которые по традиционной технологии, включающей выплавку, получение слитка, прокатку, ковку, штамповку, механическую обработку, получить невозможно. Причина здесь в том, что в структуре слитков наряду с явными дефектами — ликвацией, усадочной пористостью и т.д. — обнаруживаются грубые столбчатые кристаллы. Такой слиток в процессековки или прокатки рассыпается, или расслаивается. Очевидно, что в отношении таких сплавов единственным выходом является формирование бездефектной плотной и однородной структуры непосредственно в процессе кристаллизации. Выполненные исследования [11] показали, что процесс литья с программным наложением давления обеспечивает формирование структуры, отвечающей

современным требованиям, без дополнительной обработки методами пластического деформирования. Но эта задача решена по отношению к изделиям сравнительно большой массы, для которых неоднородность состава и свойств в объемах, соизмеримых с объемом дендритной ячейки, не имеет принципиального значения. Но если из полученной заготовки предполагается вытягивать волокна диаметром 0,1 ... 0,5 мм, то нетрудно представить, что присутствие в структуре даже незначительных сегрегаций неметаллических включений может привести к целому ряду нежелательных последствий.

Второе обстоятельство связано с тем, что в физике неравновесных фазовых превращений при описании «динамического хаоса» оказалось возможным перейти от гидродинамических моделей к дифференциальным уравнениям [12]. Это открывает возможность при создании систем автоматизированного управления формированием структуры в условиях программного наложения давления для описания поведения расплавов вблизи точки фазового превращения и оптимизации процесса в целом использовать сравнительно простые математические модели.

Представления о расплавленном металле как о сложной самоорганизующейся системе, в которой наложение давления, по предположениям, основанным на кластерной теории строения расплавов, сближение атомов или их группировок позволит направить подготовительные процессы разделительной диффузии и изменения концентраций и масс реагирующих фаз в другое русло, могут быть положены в основу при разработке новых технологических процессов производства металлопродукции.

Наложение давления на перегретый металл представляет собой сложный и малоизученный физический процесс. Для накопления знаний и изучения закономерностей поведения жидкого металла под давлением в создаваемой системе управления необходимо предусмотреть достаточно полное информационное обеспечение, а также вычислительные возможности для обработки информации и принятия решений в реальном режиме времени.

В настоящее время достоверно установлено, что если давление создавать изнутри на не закристаллизовавшийся металл, то отливка, по внешней поверхности которой образовалась оболочка из твердых кристаллов, ведет себя как сосуд, нагруженный внутренним давлением. Осциллограммы, свидетельствующие о растяжении корки и возникновении контактного давления на стенку формы, приведены в работе [13]. Эта начальная точка в изучении поведения расплава под давлением создает обманчивое впечатление, что жидкий металл и под давлением сохраняет свойства жидкости. В действительности же, судя не по результатам замеров, а по тем экспериментам, которые были отнесены в разряд неудачных, создать давление

и при этом компенсировать полностью усадку отливки практически никогда не удается. Статистика следующая: если прессующий плунжер подает в отливку достаточный для компенсации усадки объем металла, то это достигается при сравнительно невысоком давлении — примерно 100–200 МПа. Но в тех случаях, когда компенсировать усадку не удавалось, давление на прессующем плунжере было достаточно высоким при прочих одинаковых условиях. Эта противоречивость усугубляется тем, что при давлении 100–200 МПа относительное уменьшение объема достигает 10–12 %, что наводит на предположение о сжатии растворенных газов и межкластерных пространств.

Одной из причин возникших затруднений в понимании зафиксированных фактов является отсутствие информации о температурных полях в отливках, хотя заведомо неизвестно, можно ли такие хрестоматийные понятия, как двухфазная зона, фронт кристаллизации, температуры ликвидуса, солидуса, распространить на металл, который находится в условиях всестороннего сжатия. Можно лишь с осторожностью предполагать, что в одном диапазоне величин накладываемого давления металл ведет себя как жидкость, при дальнейшем же нарастании давления металл останавливается как вода под давлением, превращаясь в лед, теряет присущую ей подвижность. Но это мгновенное состояние. При наличии перегрева и скрытой теплоты кристаллизации в следующий момент после остановки на удалении от прессующего плунжера при переходе из жидкого состояния в твердое объем уменьшится, давление снизится, и дальнейшая кристаллизация будет происходить без влияния давления. Поэтому освоение техники и технологии наложения давления целесообразно проводить в два этапа: на первом этапе оперировать обычными представлениями с учетом зависимости температуры начала кристаллизации от давления; на следующем этапе, который в отличие от первого в большей степени представляет собой физический эксперимент, осуществить необходимое нагружение, замерить параметры состояния и таким образом выявить границу, при достижении которой поведение системы не укладывается в рамках сформировавшихся представлений.

Возможно, наложение давления при температуре на 30–50 К выше температуры ликвидус способствует повышению равновесной температуры начала кристаллизации, и в то же время переводит металл как термодинамическую систему в стационарное состояние, удаленное от равновесного. Действительно, сближение атомов не способствует протеканию подготовительных процессов перед фазовым превращением. Тогда отвод теплоты приведет к изменению параметров, и система окажется неустойчивой. При этом, чем больше система удалена от состояния устойчивого равновесия, тем больше вероятность перехода в новые стационарные состояния с меньшей энтропией и со-

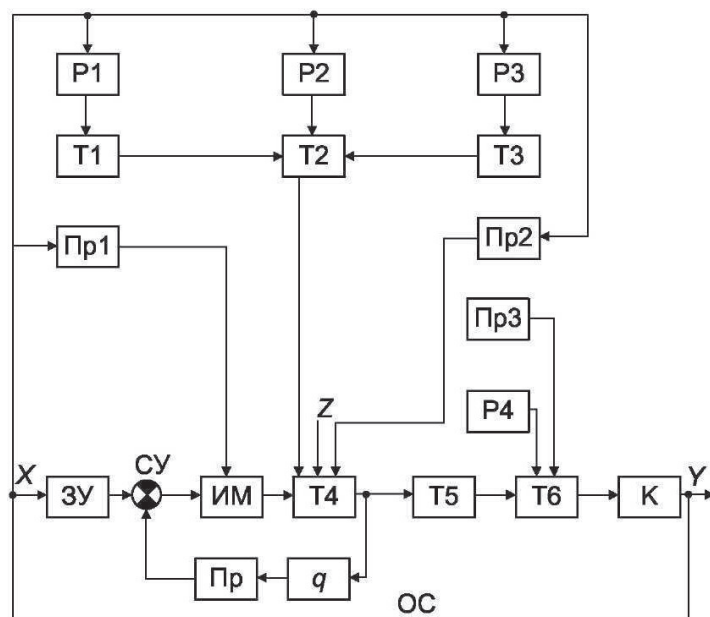
ответственно с большей структурной сложностью. Но в своем стремлении к сложности, как об этом заявлено в работе [14], природа не стремится к некоторому принципу глобальной оптимизации, а занимает более «прагматическую» позицию, в которой существенную роль играет поиск устойчивости.

Приведенные здесь примеры, когда, казалось бы, все условия для наложения давления и опрессовки металла выполнены, и тем не менее результат может быть достигнут и положительный, и отрицательный, наводят на предположение, что кристаллизацию под давлением следует рассматривать как объект, находящийся в переходном процессе. При отработке одних режимов управления система перейдет в новое состояние, в то же время, например, отсутствие отвода теплоты приведет к остановке процесса. Наконец, быстрое нарастание давления опасно в смысле потери устойчивости управления, когда колебательный характер процесса выражается в том, что кристаллизация будет идти рывками и влияние давления непредсказуемо.

Тем не менее, сильно неравновесное состояние, по Пригожину [15], в отличие от равновесного, с одной стороны, более предрасположено к изменениям и прогрессивному развитию, с другой стороны, требует учитывать нелинейные эффекты и оперировать парадигмами нелинейной термодинамики необратимых процессов.

Следовательно, систему управления наложением давления по структуре и функциональным возможностям следует ориентировать на отработку устойчивых режимов функционирования, когда критические значения параметров, определяющие роль флуктуаций на переход системы в новое состояние с меньшей энтропией, отслеживаются в реальном масштабе времени, а управляющие воздействия обеспечивают развитие системы как последовательное прохождение неустойчивостей в направлении формирования структур с более высоким уровнем организации.

При проектировании системы управления процессом литья с кристаллизацией под давлением для расчета исполнительных механизмов во внимание принимаются экспериментально установленные значения коэффициента сжимаемости жидкого металла [6]. Для определения продолжительности охлаждения отливки в интервале  $\{t^p, - [t_s - (100... 150) \text{ K}]\}$  по показаниям термопар, установленных на разном удалении в стенке формы от поверхности контакта с отливкой, рассчитываются тепловой поток  $q$  и общее количество теплоты  $Q$ , отведенной от отливки. По результатам исследования свойств отливок вносятся соответствующие коррективы в управляющую программу и в расчеты; эти же результаты учитываются на этапах проектирования оборудования и оснастки. Подробно последовательность расчетно-проектных и технологических процедур, связанных с автоматизацией процесса представлена на *рис. 1*.



**Рис. 1.** Последовательность расчетно-проектных и технологических процедур, связанных с автоматизацией процесса:

T1 — выплавка металла; T2 — заполнение формы металлом; T3 — вакуумирование; T4 — наложение давления; T5 — выдержка; T6 — раскрытие формы; P1 — расчет перегрева металла; P2 — расчет режимов заполнения формы; P3 — расчет режимов вакуумирования; P4 — расчет времени выдержки; Пр1 — проектирование оборудования; Пр2 — проектирование технологической оснастки; Пр3 — проектирование приспособлений; К — контроль свойств изделий; ОС — обратная связь; ЗУ — управляющая программа; СУ — сравнивающее устройство; ИМ — исполнительный механизм; q — тепловой поток; Пр — преобразователь; z — внешние возмущения

Приведенная на рис. 1 схема позволяет также определить основные требования, которым должна отвечать система управления процессом.

Положение равновесных температур ликвидуса и солидуса может изменяться в зависимости от внешних условий, в частности от скорости охлаждения. Для определения неравновесных величин введена специальная величина — степень метастабильности  $M$ , характеризующая величину переохлаждения, на которую можно изменить равновесные ликвидус и солидус.

Необходимую для образования кристалла степень переохлаждения создают за счет соответствующей организации отвода тепла. Но при производстве изделий с достаточно массивными сечениями по мере роста и увеличения толщины закристаллизовавшейся корочки темп охлаждения замедляется, направленный рост кристаллов прекращается, в окрестности зародышевых центров формируется грубая кристаллическая структура, развивается ликвация, в результате усадки возникают полости и раковины. В этих условиях наложение внешнего давления позволяет чисто механически сблизить кристаллы, уплотнить структуру. Но если давление накладывается на не закристаллизовавшийся металл, то может произойти повышение температуры кристаллизации, что равносильно повышению скорости охлажде-

ния. Таким образом, степень переохлаждения  $M$  можно рассматривать как функцию двух переменных: скорости охлаждения  $V_{\text{охл}}$  и давления  $p$ :

$$M = f(V_{\text{охл}}, p) \quad (1)$$

После дифференцирования имеем:

$$dM = \frac{\partial M}{\partial V} dV_{\text{охл}} + \frac{\partial M}{\partial p} dp = A dV_{\text{охл}} + B dp \quad (2)$$

Что касается частной производной  $A$ , то при  $p = 0$ :

$$A = \Delta t = \frac{L}{c} \quad (3)$$

где  $L$  — скрытая теплота кристаллизации,  $c$  — теплоемкость. То есть  $A$  соответствует минимальному переохлаждению, при котором образовавшийся кристалл аккумулирует  $L$ . Физический смысл константы  $B$  может быть связан с функцией  $\Delta t = F(p)$ . При  $V_{\text{охл}} = 0$ ,  $B = k_p$ , где  $k_p$  — эмпирический коэффициент, который, в частности, для алюминия составляет 0,633 К/МПа [16].

Таким образом, изменение давления может быть связано со скоростью охлаждения зависимостью:

$$dp = \frac{M - A dV_{\text{охл}}}{B} \quad (4)$$

Однако определение скорости охлаждения на фронте, разделяющем твердую и жидкую фазы, связано со значительными математическими трудностями. Стенку слитка или отливку следует рассматривать как систему, состоящую из трех зон: жидкой, двухфазной и твердой, распределение температур в которых в соответствии с гипотезой Фурье аппроксимирует системой дифференциальных уравнений в частных производных с нелинейным условием Стефана. Однако корректность такой интерпретации по отношению к металлу, который находится под давлением, должна быть доказана теоретически или иметь экспериментальное подтверждение. Поэтому все последующие рассуждения выполнены без поправок на влияние давления.

По опытным данным величина давления, накладываемого на кристаллизующийся металл, составляет 350...400 МПа, с учетом площади плунжера  $\varnothing 30$  мм требуемое усилие достигает 0,3 МН, к тому же привод должен быть достаточно динамичным, особенно при производстве тонкостенных отливок. Поэтому в качестве исполнительного механизма используется гидропривод, который вместе с кристаллизующимся металлом и технологической оснасткой рассматривается как единая система.

Скорость охлаждения металла может быть определена по изменению температуры формы, а давление на металл  $p$  можно определить либо измеряя давление непосредственно в полости формы, либо косвенно как разность давлений в напорных полостях прессующих гидроцилиндров, или как функцию перемещения плунжера.

Для согласования закона наложения давления со скоростью охлаждения отливки на рис. 2 схематически представлены кривые 1, 2, 3, 4, характеризующие охлаждение отливки, причем кривая 1 — это изменение температуры непосредственно у поверхности; кривая 4 — в центре сечения отливки; кривые 2, 3 — в промежутке между 1 и 3.

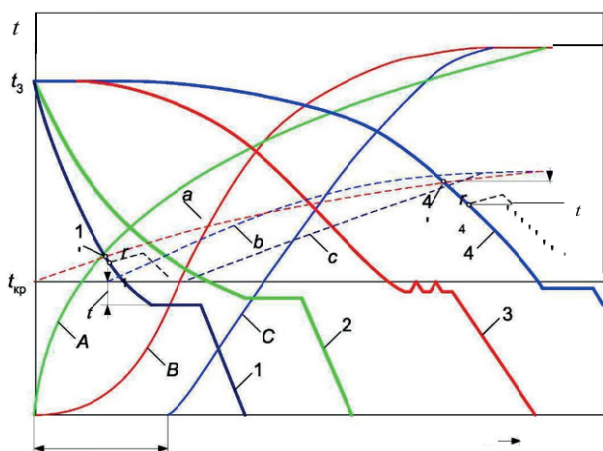


Рис. 2. Согласование режимов охлаждения и наложения давления

С уменьшением скорости охлаждения степень переохлаждения  $\Delta t$  при обычной кристаллизации уменьшается. На кривой 3 показан процесс, в котором за счет скрытой теплоты кристаллизации система возвращается в равновесное состояние. Кривые, обозначенные A, B, C соответствуют различным вариантам наложения давления, в том числе и с запаздыванием  $\tau_3$  (кривая C). Пунктирными линиями a, b, c представлены функции зависимости температуры кристаллизации от давления —  $t(p)$ . Если давление изменяется по закону A, то пересечение кривых охлаждения, например 1 и 4 с  $t_{kp}(p)$  — кривая a, происходит в точках 1' и 4', а кристаллизация начинается при температурах, обозначенных соответственно  $r_1$  и  $r_4$ , смещенных относительно точек пересечения на величину переохлаждения.

Позднее наложение давления (кривая c) не оказывает влияния на кристаллизацию в сечениях 1 и 2, и его влияние будет распространяться лишь на ту часть стенки отливки, которая располагается ближе к сердцевине. Вышеупомянутые случаи потери устойчивости управления можно прокомментировать следующим образом.

Охлаждение слоев отливки, контактирующих с относительно холодной стенкой формы в первые моменты времени после заливки, происходит с высокой скоростью, о чем свидетельствуют осциллограммы прогрева формы [8]. Поэтому, естественно, в управляющую программу закладывается быстрое включение плунжера. Быстрое нарастание давления вызывает повышение  $t_L^*$ . Текущая температура в слое 1 снижается, а температура  $t_L^*$  движется навстречу. Если плунжер сечения 1 пройдет, когда  $t_1(\tau) > t_L^*$ , он будет взаимодействовать с жидким металлом, сопротивление которого преодолевает, а далее на его пути будет металл с еще более высокой температурой, так что управление его движением и наложением давления будет проходить в устойчивом режиме. Если же  $t_1(\tau) < t_L^*$ , то плунжер столкнется с твердой коркой, сопротивление которой будет возрастать пропорционально увеличивающейся толщине корки. В этом случае причиной потери устойчивости управления будет недостаточное быстрдействие гидропривода. Однако прорыв сопротивления твердой корки в условиях быстрого нарастания давления может привести к повторной потере устойчивости, если давление высокое и при этом  $t_L^* = t(p) \geq t_3$ , т.е. фиксируется неравновесное состояние, варианты управления в котором пока неизвестны.

### Заключение

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что опресовку кристаллизующегося металла следует осуществлять по заранее заданной программе управления, учитывающей скорость охлаждения отливки в форме

и значения давления в гидросистеме пресса. При этом, для эффективного управления процессом, величина давления, накладываемого на кристаллизующийся металл, должна быть не менее 350 МПа, а в качестве привода необходимо использовать гидропривод, для обеспечения необходимой устойчивости.

Наряду с повышением плотности и герметичности, достигаемыми при наложении давления за счет, в основном, механической опрессовки кристаллизующегося металла, значительное внимание необходимо уделять и перспективным проблемам, в частности, основам управления фазовыми превращениями и формированием более однородных и бездефектных структур из сильно неравновесных состояний. Для создания таких состояний требуются специальное оборудование, приборы, технологическое оснащение, программно-алгоритмическое обеспечение, средства автоматизированного управления, которым планируется посвятить дальнейшие исследования.

*Работа выполнена частично на средства гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук (номер гранта — МК-181.2021.4).*

#### Библиографический список

1. Вейник А.И. Метод приложения термодинамики необратимых процессов к решению задач литейного производства. Сборник «Теплообмен между отливкой и формой». Под ред. А.И. Вейника. — Минск: Высшая школа. 1967. С. 5–17.
2. Баландин Г.Ф. Теория формирования отливки: Основы тепловой теории. Затвердевание и охлаждение отливки. Учебник для вузов. — М.: Изд-во МГТУ, 1998. — 359 с.
3. Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов. Учебное пособие для вузов. — Л.: Машиностроение, 1976. — 216 с.: ил.
4. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. Учебник (изд. 3-е). М.: Metallurgy, 1978. — 391 с.
5. Korostelev V.F., Denisov M.S. Crystallization and rheological properties of alloys. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 919. 022019. 10.1088/1757-899X/919/2/022019.
6. Денисов М.С., Котов Г.А. Влияние давления на сжимаемость алюминиевых сплавов. Автоматизация. Современные технологии. — 2019. — № 3. С. 102–107.
7. Денисов М.С. Повышение физико-механических свойств поршней ДВС на основе автоматизации управления процессом наложения давления на кристаллизующийся металл. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2018. — № 4–2. — С. 124–134.
8. Денисов М.С., Коростелев В.Ф. Исследование возможности управления формированием свойств отливки в процессе регулируемого наложения давления на жидкий металл. Технология металлов. — 2017. — № 8. С. 25–32.
9. Ягодкин Ю.Д., Свиридова Т.А. Атомное строение фаз. М.: МИСиС, 2007. 107 с.
10. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: Учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. — М.: МИСиС, 1999. — 416 с.
11. Денисов М.С. Автоматизированная система программного управления процессом наложения давления на жидкий и кристаллизующийся металл. Автоматизация. Современные технологии. — 2020. — № 5. С. 234–240.
12. Трубецков Д.И., Мчедлова Е.С., Красичков Л.В. Введение в теорию самоорганизации открытых систем. — М.: Изд-во физико-математической литературы, 2002. — 200 с.
13. Коростелев В.Ф., Хромова Л.П. Исследование межатомных взаимодействий с использованием данных об изменениях физико-механических свойств сплавов // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 2. С. 8–13.
14. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Современные проблемы нелинейной динамики. М.: Эдиториал УРСС, 2000. — 336 с.
15. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. М.: Издательство иностранной литературы, 1960. — 128 с.
16. Галдин Н.М. Цветное литье: Справочник Н.М. Галдин, Д.Ф. Чернега, Д.Ф. Иванчук и др.: Под общ. ред. Н.М. Галдина. — М.: Машиностроение, 1989. 528 с.

#### References

1. Veinik A.I. A method for applying the thermodynamics of irreversible processes to solving foundry problems. Collection «Heat transfer between casting and mold». Ed. A.I. Veinik. — Minsk: The Highest School. 1967. pp. 5–17.
2. Balandin G.F. Theory of Casting Formation: Fundamentals of Thermal Theory. Solidification and cooling of the casting. Textbook for high schools. — M.: Publishing house of MSTU, 1998. — 359 p.
3. Gulyaev B.B. Theory of foundry processes. Textbook for universities. — L.: Mashinostroenie, 1976. — 216 p.: ill.
4. Novikov I.I. Theory of heat treatment of metals. Textbook (3rd ed.). Moscow: Metallurgy, 1978. 391 p.
5. Korostelev V.F., Denisov M.S. (2020). Crystallization and rheological properties of alloys. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 919. 022019. 10.1088/1757-899X/919/2/022019.
6. Denisov M.S., Kotov G.A. Effect of pressure on the compressibility of aluminum alloys. Automation. Modern technologies. — 2019. — №. 3. P. 102–107.



7. Denisov M.S. Improving the physical and mechanical properties of ICE pistons based on automation of the control of the process of applying pressure to a crystallizing metal. *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. — 2018. — №. 4–2. — S. 124–134.
8. Denisov M.S., Korostelev V.F. Investigation of the possibility of controlling the formation of casting properties in the process of controlled pressure application on liquid metal. *Metal technology*. — 2017. — №. 8. S. 25–32.
9. Yagodkin Yu.D., Sviridova T.A. Atomic structure of phases. — M.: MISiS, 2007. 107 p.
10. Kolachev B.A., V. I. Elagin, and V. A. Livanov, *Metal Science and Heat Treatment of Nonferrous Metals and Alloys: Proc. for universities*. 3rd ed., revised. and additional — M.: MISiS, 1999. — 416 p.
11. Denisov M.S. Automated system for program control of the process of applying pressure to liquid and crystallizing metal. *Automation. Modern technologies*. — 2020. — №. 5. P. 234–240.
12. Trubetskov D.I., Mchedlova E.S., Krasichkov L.V. Introduction to the theory of self-organization of open systems. — M.: Publishing house of physical and mathematical literature, 2002. — 200 p.
13. Korostelev V.F., Khromova L.P. Investigation of interatomic interactions using data on changes in the physical and mechanical properties of alloys // *Nano- and microsystem technology*. 2010. №2. pp. 8–13.
14. Malinetsky G.G., Potapov A.B. Modern problems of nonlinear dynamics. M.: Editorial URSS, 2000. — 336 p.
15. Prigogine I. Introduction to thermodynamics of irreversible processes. M.: Publishing house of foreign literature, 1960. — 128 p.
16. Galdin N.M. Non-ferrous casting: Reference book N.M. Galdin, D.F. Chernega, D.F. Ivanchuk and others: Under the general. ed. N.M. Galdin. — M.: Mashinostroenie, 1989. 528 p.

**Денисов Максим Сергеевич** — канд. техн. наук, доц. кафедры «Автоматизация, мехатроника и робототехника» Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

*denisovmaxim90@mail.ru*

**Петрешин Дмитрий Иванович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Автоматизированные технологические системы» ФГБОУ ВО «БГТУ»

*dipetreshin@yandex.ru*

**Давыдов Кирилл Евгеньевич** — студент кафедры «Автоматизация, мехатроника и робототехника» Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

*k.davidov0@yandex.ru*

**Denisov Maxim Sergeevich** — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the department of “Automation, Mechatronics and Robotics” of Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov

*denisovmaxim90@mail.ru*

**Petreshin Dmitry Ivanovich** — D.Sc. of Engineering, Professor at the department of “Automated Technological Systems” of BSTU

*dipetreshin@yandex.ru*

**Davydov Kirill Evgenievich** — student at the department of “Automation, Mechatronics and Robotics” of Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov

*k.davidov0@yandex.ru*

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflicts of Interest Statement:** The authors have no conflicts of interest to declare.

## МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СТАНКА ДЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С СИСТЕМОЙ ЧПУ

## METHODOLOGY FOR DEVELOPING A SIMULATION MODEL OF A MACHINE TOOL FOR INTERACTION WITH A CNC SYSTEM

*В статье рассматриваются методика разработки имитационной модели станка и реализация данной методики. Результатом реализации методики является модель станка, интегрированная в программный комплекс на базе библиотеки Unity, который может подключаться к системе ЧПУ для получения текущих координат осей, технологических данных, состояния управляющей программы и программы электроавтоматики. В дальнейшем планируется применение полученного программного комплекса для отладки и тестирования управляющих программ и программ электроавтоматики, а также для обучения специалистов.*

*The article discusses the technique for developing a simulation model of a machine tool and the implementation of this technique. The result of the implementation of the methodology is a machine model integrated into the software based on the Unity library, which can be connected to the CNC system to obtain the current coordinates of the axes, technological data, the state of the control program and the electric automation program. In the future, it is planned to use the resulting software package for debugging and testing part programs and programs for automation, as well as for training specialists.*

**Ключевые слова:** управляющая программа, имитационная модель, система ЧПУ, станок, язык высокого уровня, Unity.

**Keywords:** part-program, simulation model, CNC system, machine-tool, high-level language, Unity.

### Введение

При отладке управляющих программ (УП) [1] в современных системах ЧПУ моделируется последовательность выполняемых операций над заготовкой различными инструментами для получения нужной формы и размеров. При этом объектами моделирования даже в системах ЧПУ High-end класса являются заготовка и инструмент. В данном случае разработчик управляющей программы может оценить соответствие модели конечной детали. Величины перемещений по осям задаются машинными параметрами внутри системы ЧПУ для каждого станка индивидуально. Отдельно настраиваются ограничения на рабочую зону станка. Соответственно, если при тестовой отработке УП произойдет выход за пределы обрабатываемой зоны, система ЧПУ останавливает свою работу и выдает ошибку. Но при данном подходе не представляется возможным отследить коллизии: столкновения исполнительных органов станка друг с другом, с приспособлениями, инструментами, заготовкой и т.п. Для отслеживания подобных ситуаций используется тестовая отработка УП на станке.

Станок с ЧПУ также содержит большое количество оборудования электроавтоматики [2, 3] — это могут быть датчики различных типов, концевики, насосы, устройства подачи СОЖ, системы безопасности и т.п. Для работы этих устройств также составляются программы. Отладка этих программ выполняется на реальном конкретном оборудовании. В случае ошибок в программе, системы электроавтоматики могут быть повреждены.

Отладка программ значительно усложняется, если речь идет об оборудовании с динамически изменяющейся кинематикой. В процессе выполнения управляющей программы отдельные узлы оборудования могут взаимозаменяться, что приводит к необходимости отключения/подключения новых устройств электроавтоматики, управления новым составом приводов, переключению режимов работы осей, изменению размеров рабочей зоны и т.п.

Подготовка специалистов, работающих с определенным технологическим оборудованием, представляется довольно сложной задачей. Особенно это касается обучения специфике работы с конкретным станком. В настоящее время это обучение происходит непосредственно на рабочем месте и требует как

временных, так и материальных затрат. При этом рядом с обучающимся должен находиться наставник, который на время обучения отрывается от своих основных трудовых обязанностей. Также не исключены случаи некорректного использования оборудования вследствие малого опыта начинающего специалиста.

Решение вышеперечисленных задач может быть упрощено при использовании модели технологического оборудования. Модель будет представлять собой совокупность неподвижных и подвижных узлов станка, инструмента, устройств электроавтоматики. Модель будет связана непосредственно с системой ЧПУ, будет получать данные из УП о положении приводов, состоянии устройств электроавтоматики и обрабатывать эти перемещения. Таким образом, задачи отладки программ, обучения работе с конкретным станком значительно упрощаются.

### Методика разработки имитационной модели станка

Под имитационной моделью станка в данной работе понимается совокупность описаний узлов станка, как неподвижных, так и подвижных, вспомогательных устройств. Подвижные узлы станка — шпиндельный узел, стол — должны иметь такие же возможности перемещения, как и у реального оборудования. Физические аспекты перемещающихся узлов (жесткости, демпфирования, моменты инерции, люфты в передачах, погрешности изготовления, установки и т.п.) не учитываются (рис. 1).

Методика разработки имитационной модели заключается в следующем (рис. 2):

1. Сбор данных и геометрических параметров о моделируемом оборудовании. Данные об оборудовании могут быть получены из чертежей, готовых трехмерных моделей узлов или сборки станка (при их наличии), реального оборудования, документации на оборудование. На данном этапе сложность состоит в том, что возможно использование различных источников данных, а также их совокупности.

2. Декомпозиция станка на составные части, определение минимального набора моделей компонентов. Станок разбивается на основные узлы, строится «дерево» станка. Узлы могут быть неподвижными или подвижными. Сложность данного этапа заключается в том, чтобы смоделировать все возможные перемещения исполнительных органов станка, а также вспомогательных механизмов (магазинов инструментов и т.п.). Сложность подобного разбиения повышается, если речь идет о станках с динамической кинематикой. Кинематика станка может меняться в процессе выполнения УП, соответственно меняется состав исполнительных узлов. Количество и наименования исполнительных узлов подобного станка заранее четко определены, в машинных параметрах системы ЧПУ заданы их описания. Сменные узлы также должны входить в построенное «дерево». При этом важно отметить следующее: недостаточная точность разбиения не позволит судить о возможных перемещениях на станке. Избыточная детализация же приведет к существенному усложнению моделирования и, следовательно, повышению времени на разработку.

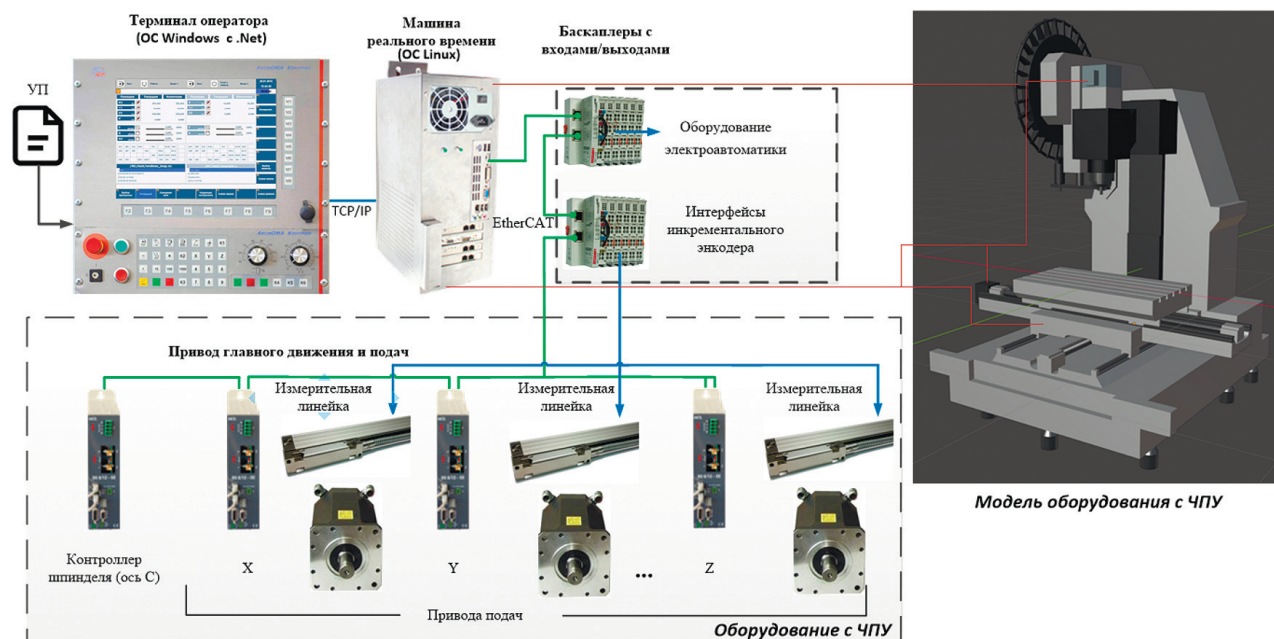


Рис. 1. Модель вертикально-фрезерного станка с ЧПУ и ее связь с системой управления



Рис. 2. Методика разработки имитационной модели станка

3. Задание геометрических параметров отдельных деталей и узлов, построение моделей отдельных узлов, сборка отдельных узлов в общую модель, определение геометрических ограничений при взаимных перемещениях. На данном этапе необходимо корректно собрать разработанные узлы в станок и задать возможные ограничения на перемещения по осям — размеры рабочей зоны, определить возможные направления перемещений.

4. Экспорт модели в среду, пригодную для программирования. Существует большое количество разнообразного ПО, в котором можно строить модели и создавать сборки. Однако помимо этих функций должна присутствовать возможность связи с системой ЧПУ для получения от нее информации о перемещениях в УП.

### Практическое применение методики

Применение методики рассмотрим на примере вертикально-фрезерного станка Quaser MV184P/15C.

Согласно первому шагу методики необходимо проанализировать компоновку станка, возможные перемещения по осям, наличие вспомогательных механизмов.

Станок оснащен приводом главного движения — шпиндельным узлом, в котором закрепляется инструмент, обеспечивается вращение инструмента. Приводы подачи осуществляют перемещение стола и вертикальное перемещение шпиндельного узла.

Характеристики станка:

- Перемещение по оси  $X/Y/Z$  — 1020/610/610 мм;
- Скорость подачи по осям  $X/Y/Z$  — 40/40/36 м/мин;
- Диаметр и шаг шарико-винтовой передачи (ШВП) —  $\varnothing 45/P = 16/16/12$ ;
- Частота вращения шпинделя (макс.) — 15000 об/мин;
- Система автоматической смены инструмента — магазин на 30 позиций, опционально 48/60 позиций);
- Установочные размеры (при магазине на 30 инструментов) — 2515x2625x3060 мм;
- Потребляемая мощность — 30 кВт.

### Декомпозиция станка и моделирование отдельных его частей

В качестве инструмента для построения имитационной модели может быть использован Blender — профессиональное свободное и открытое программное обеспечение для создания трёхмерной

компьютерной графики, а в качестве инструмента для интеграции в программную систему симуляции — межплатформенная среда разработки, графический движок Unity [4].

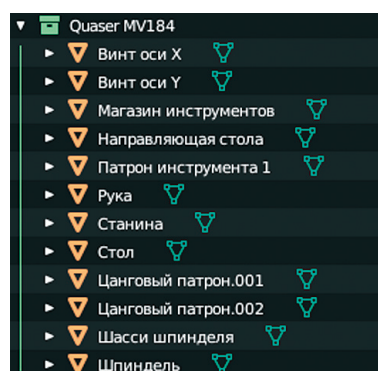


Рис. 3. Элементы будущей сборки в интерфейсе программы Blender

На этапе декомпозиции станок разбивается на отдельные узлы. Необходимо выделить подвижные и неподвижные узлы и исполнительные устройства. Для станка Quaser MV184P/15C целесообразно использовать разбиение, показанное на рис. 3.

### Создание моделей, узлов, сборки

При разработке моделей деталей, узлов станка необходимо обращать внимание на способы соединения отдельных деталей в узлы, их габариты. Все модели разработаны в Blender.

Фрезерный стол имеет установочные пазы для закрепления заготовки и дополнительной оснастки. Габариты стола 1200x600 (ДxШ). Модель стола представлена на рис. 4. Для крепления ШВП и направляющих внизу стола предусмотрены каретки.

Для перемещения стола в направлении оси  $X$  используются направляющие и ШВП. С помощью ШВП движение передается от двигателя стола, при этом преобразуется вращение в поступательное перемещение. Шаг винта ШВП 16 мм. Модель направляющих и ШВП показана на рис. 5.

Модель станины объединена с направляющими и ШВП оси  $Y$ , по которым перемещается направляющая стола и сам стол, а также направляющими и ШВП для перемещения шпиндельного узла по оси  $Z$ . Также модель станины, крепление для магазина инструментов и руки для смены инструмента (рис. 6).

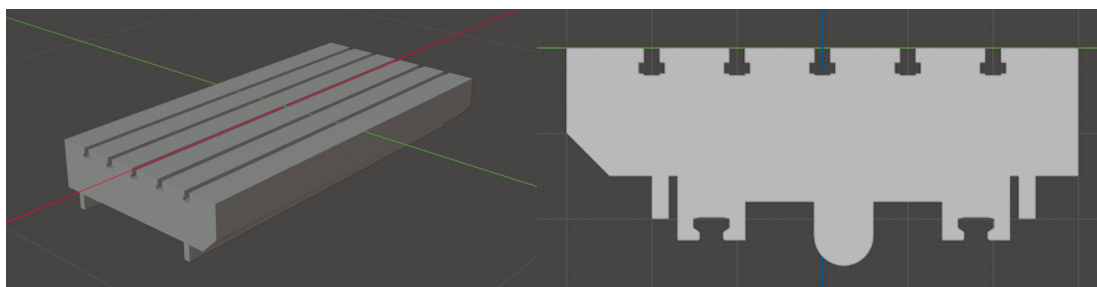


Рис. 4. Модель фрезерного стола

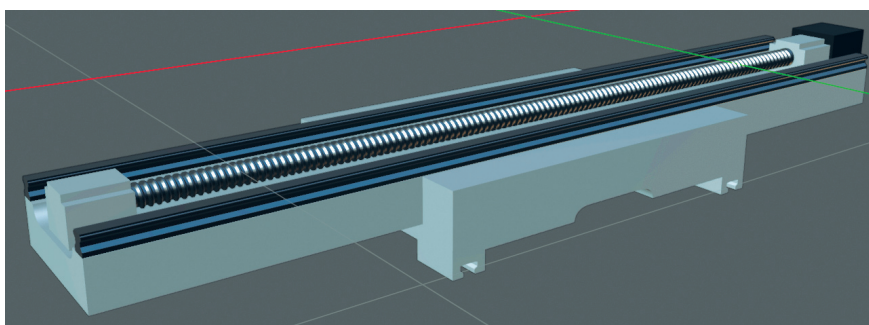


Рис. 5. Пространственный вид модели направляющей стола и винта оси X

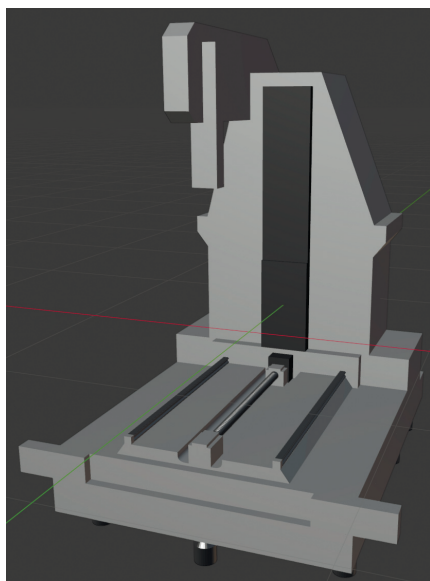


Рис. 6. Пространственный вид модели станины и винта оси Y

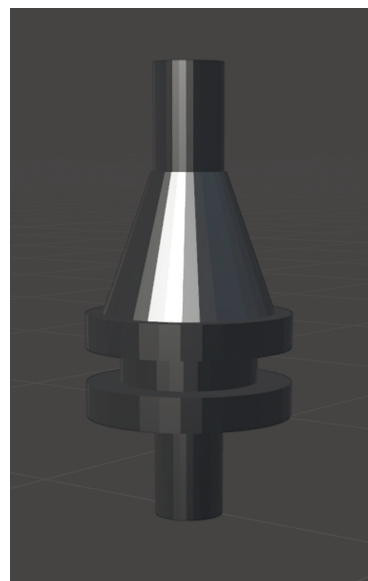


Рис. 7. Пространственный вид модели инструмента, совмещенного с цанговым патроном

Магазин инструментов на станке представлен в барабанном исполнении на 30 позиций. Патроны позиций барабана имеют возможность выдвигаться и поворачиваться на 90 градусов для обеспечения доступа к инструменту.

Для заполнения магазина инструментов и их использования в моделировании создается модель цангового патрона вместе с точкой крепления инструмента. В дальнейшем возможна реализация редактора для

создания инструментов параметрически и заполнения ими магазина. Цанговый патрон и инструмент объединены в одной модели (рис. 7), так как законы движения у них идентичны и дополнительное разбиение на подобъекты повлечет за собой только увеличение сложности модели без получения явных преимуществ в моделировании процесса.

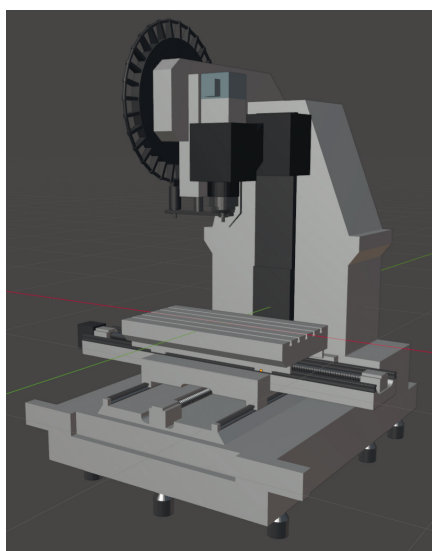
Последний этап создания модели — задание материала для лучшего отображения свойств.

### Создание сборки и её интеграция в проект Unity

В результате моделирования были получены модели, которые необходимо экспортировать в общую сборку (рис. 8).

Экспорт сборки выполняется частями в формате .obj, в котором хранится геометрия, а также генерируется файл формата .mtl, в котором хранятся файлы настроек текстур для материала 3D-объекта. Таким образом, каждый элемент хранит в себе информацию о своей геометрии, параметрах своего материала и расположении этих материалов на объекте (рис. 9).

Далее модели добавляются в сцену (рис. 10). Преимуществом использования среды Unity является ее кроссплатформенность, что позволяет ей взаимодействовать с ПО широкого спектра. Также в среде Unity возможно «обойти» модель во время непосредственной работы, т.е. рассмотреть процесс обработки детали под разными углами, в том числе с совместно установленными приспособлениями. Можно отследить величины перемещений исполнительных узлов станка, проверить отсутствие коллизий во время тестовой отработки управляющей программы. В случае использования станка с дина-



<input type="checkbox"/> Винт оси X.mtl	<input checked="" type="checkbox"/> Винт оси X.obj
<input type="checkbox"/> Винт оси Y.mtl	<input checked="" type="checkbox"/> Винт оси Y.obj
<input type="checkbox"/> Магазин инструментов в центре НСК.mtl	<input checked="" type="checkbox"/> Магазин инструментов в центре НСК.obj
<input type="checkbox"/> Магазин инструментов.mtl	<input checked="" type="checkbox"/> Магазин инструментов.obj
<input type="checkbox"/> Направляющая стола.mtl	<input checked="" type="checkbox"/> Направляющая стола.obj
<input type="checkbox"/> Патрон инструмента 1.mtl	<input checked="" type="checkbox"/> Патрон инструмента 1.obj
<input type="checkbox"/> Рука.mtl	<input checked="" type="checkbox"/> Рука.obj
<input type="checkbox"/> Станина.mtl	<input checked="" type="checkbox"/> Станина.obj
<input type="checkbox"/> Стол.mtl	<input checked="" type="checkbox"/> Стол.obj
<input type="checkbox"/> Цанговый патрон.001.mtl	<input checked="" type="checkbox"/> Цанговый патрон.001.obj
<input type="checkbox"/> Цанговый патрон.002.mtl	<input checked="" type="checkbox"/> Цанговый патрон.002.obj
<input type="checkbox"/> Шасси шпинделя.mtl	<input checked="" type="checkbox"/> Шасси шпинделя.obj
<input type="checkbox"/> Шпиндель.mtl	<input checked="" type="checkbox"/> Шпиндель.obj

Рис. 8. Сборка модели станка QuaserMV184 для экспорта в проект Unity

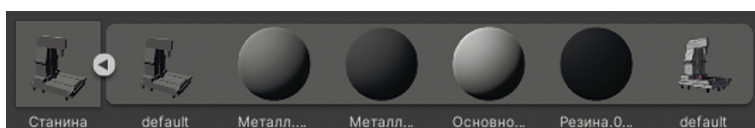


Рис. 9. Импортированная модель «Станина»

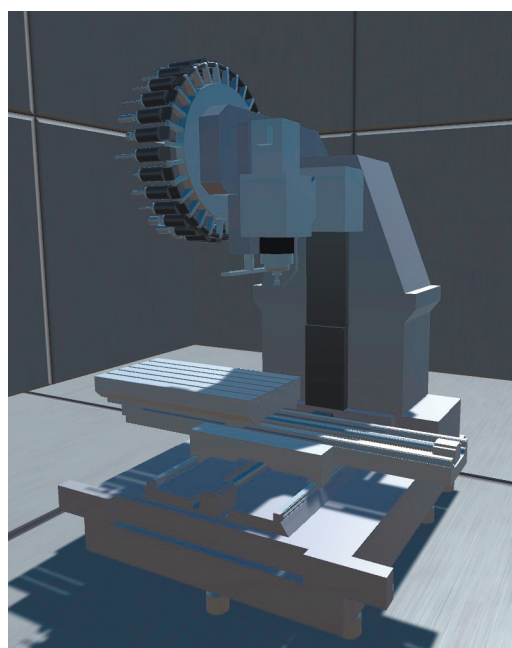


Рис. 10. Готовая сборка модели станка QuaserMV184 в среде Unity

мически изменяемой кинематикой убедиться, что произошла смена модулей и продолжилась обработка детали на станке. Возможна наработка базы стандартных узлов и компоновка на их основе новых моделей станков, что позволит значительно ускорить процесс подготовки моделей.

### Заключение

Предложенная методика позволяет получить трехмерную модель станка с выделением отдельных подвижных узлов, компоновкой узлов и наложением текстур. Полученная модель интегрируется в программный комплекс на базе трёхмерной библиотеки Unity, получающий данные в реальном времени от системы ЧПУ.

Разработка библиотеки узлов станков позволит ускорить создание моделей оборудования, что также будет актуально при разработке моделей станков с динамически изменяющейся кинематикой [5–9].

Программный комплекс можно применять в технологиях виртуальной и дополненной реальности для обучения специалистов без риска испортить дорогостоящее оборудование.

Расширение возможностей программного комплекса за счёт обработки геометрических коллизий перемещающихся узлов, а также установка координат виртуальных датчиков позволит использовать модель для разработки и отладки управляющих программ и программ электроавтоматики без их запуска на реальном оборудовании.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00305/20 с использованием оборудования центра коллективного пользования «Государственный инженеринговый центр» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2021-695 от 26.07.2021, уникальный идентификатор проекта RF-2296.61321X0013).*

### Библиографический список

1. Мартинов Г.М., Пушков Р.Л. Построение инструментария отладки управляющих программ систем ЧПУ на языках высокого уровня // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2008. № 11. с. 19–24.
2. Нежметдинов Р.А., Никишечкин П.А., Пушков Р.Л., Евстафиева С.В. Практические аспекты применения программно-реализованного контроллера для управления электроавтоматикой вертикально-фрезерных станков Quaser MV184 // Автоматизация в промышленности, № 5. 2016. с. 14–17.
3. Козак Н.В., Пушков Р.Л., Евстафиева С.В. Реализация задач управления электроавтоматикой на основе внешних вычислительных модулей SoftPLC в системе ЧПУ «АксиОМА Контроль» // Промышленные АСУ и контроллеры. № 7, 2016. с. 3–9.
4. Unity. Официальный сайт [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://unity.com/ru>.
5. Мартинов Г.М., Пушков Р.Л., Соколов С.В., Обухов А.И., Евстафиева С.В. Числовое программное управление станками с динамически изменяющейся кинематикой // Автоматизация в промышленности, № 5. 2020. с. 12–17.
6. Martinov G., Pushkov R., Martinova L., Kozak N. and Evstafieva S. Approach to development of HMI screens for CNC with dynamic kinematics. ICMTMTE 2020, MATEC Web of Conferences 329, 03026. p. 1–6.
7. Любимов А.Б., Мартинов Г.М., Мартинова Л.И., Пушков Р.Л. Построение цифровой управляющей платформы для технологического оборудования с динамически изменяющейся кинематикой // Автоматизация в промышленности, № 5. 2021. с. 3–7.
8. Martinov G.M., Sokolov S.V., Pushkov R.L. et al. Control of the machine tools with variable kinematics. Int J AdvManufTechnol 117, 2331–2339 (2021).
9. Martinov G., Kozak N. and Evstafieva S. Implementation of Dynamic Changes in Machine Kinematics in the Electroautomatic Subsystem of the CNC System. 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2021, pp. 596–601.

### References

1. Martinov G.M., Pushkov R.L. Building debug instruments for debugging CNC part programs with high-level languages // Pribory i sistemy. Upravlenije, control, diagnostica. 2008. № 11. p. 19–24.
2. Nezhmetdinov R.A., Nikishechkin P.A., Pushkov R.L., Evstafieva S.V. Practical aspects of using program-realized controller for controlling electroautomatic software Quaser MV184 Machines // Avtomatizacija v promyshlennosti, № 5. 2016. p. 14–17.
3. Kozak N.V., Pushkov R.L., Evstafieva S.V. Developing tasks for control electro automatic using outer computing SoftPLC modules with CNC “AxiOMA Control” // Promyshlennye ASUI kontrollery. № 7, 2016. p. 3–9.
4. Unity. Official site [Electronic version]. — Available at: <https://unity.com/ru>.
5. Martinov G.M., Pushkov R.L., Sokolov S.V., Obukhov A.I., Evstafieva S.V. Computer numeric control of machines with dynamic variable kinematics // Avtomatizacija v promyshlennosti, № 5. 2020. p. 12–17.
6. Martinov G., Pushkov R., Martinova L., Kozak N. and Evstafieva S., 2020. Approach to development of HMI screens for CNC with dynamic kinematics. ICMTMTE 2020, MATEC Web of Conferences 329, 03026. p. 1–6.

7. Ljubimov A.B., Martinov G.M., Martinova L.I., Pushkov R.L. Building digital control platform for technological equipment with dynamic variable kinematics // *Avtomatizacija v promyshlennosti*, № 5. 2021. p. 3–7.

8. Martinov, G.M., Sokolov, S.V., Pushkov, R.L. et al. Control of the machine tools with variable kinematics. *Int J Ad v Manuf Technol* 117, 2331–2339 (2021).

9. Martinov G., Kozak N. and Evstafieva S. Implementation of Dynamic Changes in Machine Kinematics in the Electroautomatic Subsystem of the CNC System. 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2021, pp. 596–601.

**Пушков Роман Львович** — канд. техн. наук, доц. кафедры компьютерных систем управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*pushkov@ncsystems.ru*

**Евстафиева Светлана Владимировна** — старший преподаватель кафедры компьютерных систем управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*svetlana.evstafieva@gmail.com*

**Грубляк Владислав Ярославович** — студент кафедры компьютерных систем управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*vinograd2702@gmail.com*

**Pushkov Roman Lvovich** — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Computer-Architecture Control Systems” of MSUT “STANKIN”

*pushkov@ncsystems.ru*

**Evstafieva Svetlana Vladimirovna** — lecturer at the sub-department of “Computer-Architecture Control Systems” of MSUT “STANKIN”

*svetlana.evstafieva@gmail.com*

**Grublyak Vladislav Yaroslavovich** — student at the sub-department of “Computer-Architecture Control Systems” of MSUT “STANKIN”

*vinograd2702@gmail.com*

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflicts of Interest Statement:** The authors have no conflicts of interest to declare.

---

---



## АЛГОРИТМ СОСТАВЛЕНИЯ ПРОГРАММЫ ПОСТРОЕНИЯ ФАЗОВОГО ПРОСТРАНСТВА УПРАВЛЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПО ЗАДАННОЙ ФАЗОВОЙ ТРАЕКТОРИИ

## ALGORITHM FOR DRAWING UP A PROGRAM FOR A CONTROL PHASE SPACE CONSTRUCTING AND DETERMINING THE VALUE OF THE CONTROL ACTION FOR A GIVEN PHASE TRAJECTORY

*В статье приведен алгоритм автоматизации построения фазового пространства управления исполнительным двигателем постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов ( $U_a$ ,  $n$ ,  $M_3$ ) с использованием средств моделирования и программирования MultiSim, Microsoft Excel и MathCAD. А также решена задача определения значения управляющего напряжения  $U_{a0}$  по заданной фазовой траектории ( $n_0$ ,  $M_{30}$ ).*

*The article presents an algorithm for automating the construction of a phase space for controlling a DC executive motor with permanent magnet excitation ( $U_a$ ,  $n$ ,  $M_3$ ) using the MultiSim, Microsoft Excel and MathCAD modeling and programming tools. And also the problem of determining the value of the control voltage  $U_{a0}$  for a given phase trajectory ( $n_0$ ,  $M_{30}$ ) is solved.*

**Ключевые слова:** алгоритм автоматизации, двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов, имитационная компьютерная модель, фазовое пространство управления, фазовая траектория, нахождение управляющего воздействия.

**Keywords:** automation algorithm, DC motor with permanent magnet excitation, simulation computer model, control phase space, phase trajectory, control action finding.

Рассматриваемый в статье алгоритм решения задачи управления исполнительным двигателем постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов (ДПТМ) в составе станочного электропривода представляет собой цифровое программное определение управляющего сигнала для реализации функции станка [1].

В ДПТМ управление может вестись только по цепи якоря напряжением  $U_a$ . Для достижения цели управления необходимо определять значение управляющего воздействия  $U_a$  по заданным значениям электромагнитного момента на валу двигателя  $M_3$  и скорости вращения ротора  $n$ . Отсюда вытекает постановка задачи управления, которая в современных условиях может быть решена на основе компьютерной имитационной модели с использованием современных программных продуктов.

При моделировании процесса управления величины  $M_3$  и  $n$  рассматриваются в качестве переменных состояния электродвигателя. Добавлением управляющей переменной  $U_a$  формируется фазовое пространство управления ( $U_a$ ,  $n$ ,  $M_3$ ). В этом пространстве фор-

мулируется и решается задача определения значения управляющего воздействия  $U_a$  по заданным значениям  $M_3$  и  $n$ . Для автоматизации решения задачи разработан алгоритм компьютерной реализации решения, который является основой цифровой модели управления электродвигателем.

Алгоритм решения поставленной задачи построен базе имитационной модели двигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов, реализованной в программном пакете *Multi Sim* [2]. В процессе решения задачи использованы программы *Microsoft Excel* и *MathCAD*. Организовать такой алгоритм можно благодаря возможности сквозной трансляции промежуточных результатов из одной программы в другую (*рис. 1*).

Необходимость автоматизации промежуточных процедур решения поставленной задачи объясняется тем, что процесс решения весьма трудоемкий и требует множества логических операций. Таким образом, автоматизация промежуточных этапов представляет собой самостоятельную задачу.

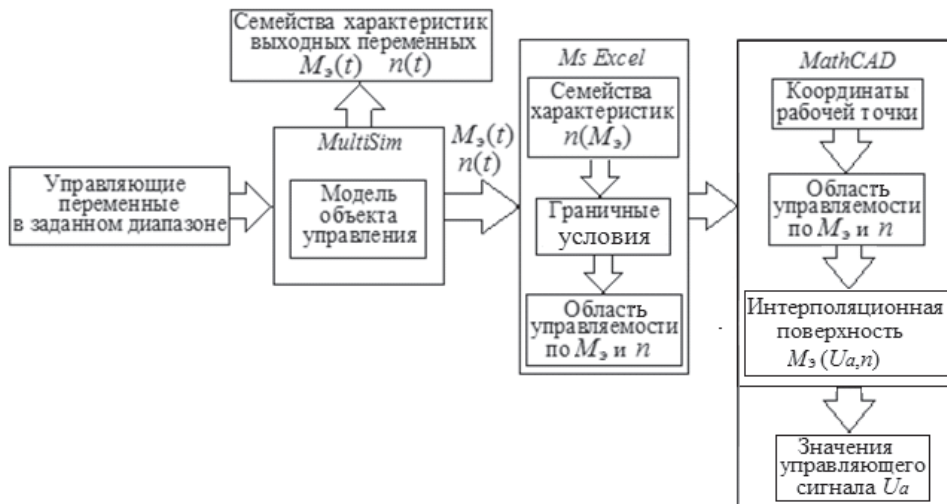


Рис. 1. Алгоритм построения цифровой модели определения значений сигнала управления в области управляемости исполнительного двигателя

На первом этапе решения задачи автоматизации процедур определения управляющего сигнала  $U_a$ , осуществляется вычислительный эксперимент построения семейств временных характеристик  $M_3(t)$  и  $n(t)$  ДПТМ в возможном диапазоне изменения управляющего напряжения  $U_a$  [3].

В данной работе в качестве примера приведены результаты вычислительного эксперимента ДПТМ типа УПС6 в диапазоне изменения управляющего напряжения  $U_a$  от 24 В до 40 В [5]. В вычислительном эксперименте использовалась имитационная модель ДПТМ.

Временные характеристики  $M_3(t)$  и  $n(t)$ , полученные в результате численного моделирования в *MultiSim*, приведены на *рис. 2*.

Второй этап заключается в трансляция серий временных характеристик  $n(t)$  и  $M_3(t)$  из программы *MultiSim* в программу *Excel*:

1) На первом шаге трансляции по цепочке *Tools* → *Export to Excel* осуществляется экспорт координат точек характеристик из *MultiSim* в *Ms Excel* в два массива: массив на листе  $M_3(t, U_a)$  и массив на листе  $n(t, U_a)$ .

2) На втором шаге массивы  $M_3(t, U_a)$  и  $n(t, U_a)$  преобразуются в массив на листе  $(U_a, n, M_3)$ . В этом массиве в первой строке прописываются значения:  $U_a (U_a = 24, 26, 28...40)$ ;  $n(U_a)$ ;  $M_3(U_a)$ . В столбцы перекачиваются соответствующие значения  $U_a, n, M_3$  из массивов  $M_3(t, U_a)$  и  $n(t, U_a)$  построчно в соответствии с моментами времени (*рис. 3*).

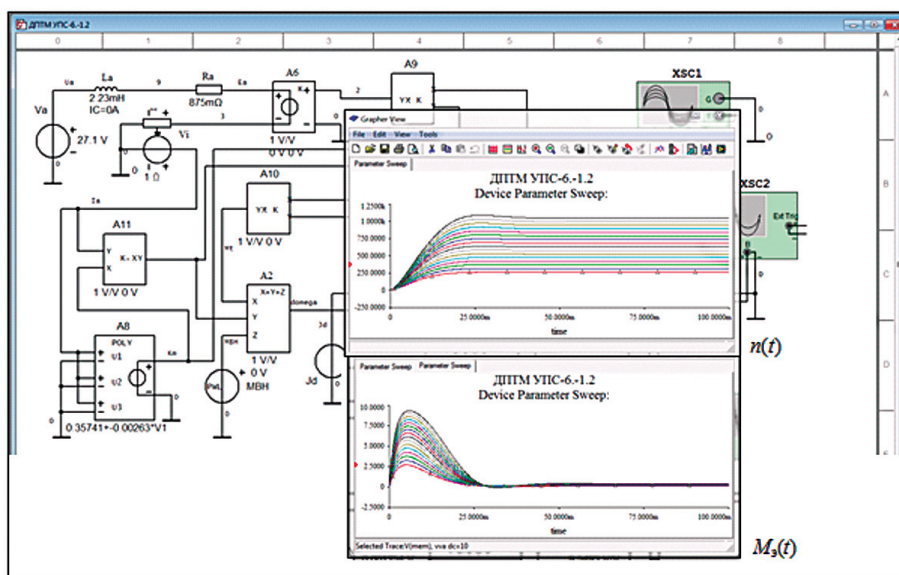


Рис. 2. Семейства временных характеристик  $M_3(t)$  и  $n(t)$  ДПТМ типа УПС6

$f_x$		Ua=24				
V	W	X	Y	Z	AA	
Ua=24	n(24)	Me(24)	Ua=26	n(26)	Me(26)	
24	0	0	26	0	0	
24	9.549302	0.003788	26	9.549304	0.004108	
24	9.549333	0.007573	26	9.54934	0.008213	
24	9.54951	0.015139	26	9.549537	0.016419	
24	9.550324	0.030247	26	9.550429	0.032803	
24	9.553787	0.060362	26	9.554202	0.065462	

Рис. 3. Структура массива ( $U_a, n, M_3$ )

Третий этап представляет собственно создание тела цифровой модели управления двигателем — построение поверхности управления в фазовом пространстве ( $n, M_3, u_a$ ) в программе *Math CAD*.

Для этого необходимо сначала сформировать в *Excel* матрицу, задающую эту поверхность. Процесс формирования осуществляется по следующему алгоритму:

1. Матрица формируется на новом листе  $M_3(U_a, n)$ . Первая строка заполняется значениями  $U_a$ , которые определяют количество столбцов в результирующей матрице. Первый столбец заполняется установившимися значениями скоростей вращения  $n_\infty = n_{уст} = \lim_{t \rightarrow +\infty} n(t)$  при заданных значениях  $U_a$ . Эти значения выбираются из последней строки столбцов  $n$  массива ( $U_a, n, M_3$ ) и копируются на лист  $M_3(U_a, n)$  в первый столбец  $n_\infty$  (табл. 1).

Таблица 1

$n_\infty \backslash U_a$	26	28	30	32	34	36	38	40
681,7031								
734,4259								
787,1901								
839,9958								
892,8432								
945,7324								
998,6638								
1051,638								

2. Далее из строки массива ( $U_a, n, M_3$ ) с помощью функции *Excel* МАКС выбираются наибольшие значения электромагнитных моментов  $M_e$  для всех  $U_a$ . Они умножаются на 0,9, чтобы ввести дополнительное ограничение значений максимального электромагнитного момента  $0,9M_{эмакс}$  для обеспечения устойчивой работы двигателя (табл. 2).

Таблица 2

$U_a \rightarrow$	26	28	30	32	34	36	38	40
$M_{эмакс}$	6.597301	7.028534	7.446375	7.850004	8.239043	8.613428	8.972262	9.315123
$0,9M_{эмакс}$	5.937571	6.325681	6.701737	7.065004	7.415139	7.752085	8.075036	8.383611

3. Для полученных значений  $0,9M_{эмакс}$  в массиве ( $U_a, n, M_3$ ) выбираются наиболее близкие значения в диапазоне  $0,9M_{эмакс} \pm 0.02 * 0,9M_{эмакс}$  для каждого  $U_a = 24, 26, 28 \dots 40$ . В результате получается строка реальных моментов из семейства, ближайших к значениям  $0,9M_{эмакс}$ , которые размещаются по главной диагонали матрицы  $M_3(U_a, n)$  (табл. 3).

Таблица 3

$n_x \setminus U_a$	26	28	30	32	34	36	38	40
681,7031	5.937571							
734,4259		6.325681						
787,1901			6.701737					
839,9958				7.048774				
892,8432					7.415139			
945,7324						7.752085		
998,6638							8.075036	
1051,638								8.383621

4. Далее из массива  $(U_a, n, M_3)$  выбираются значения  $n (n1, \dots, n8)$  для каждого  $U_a$  и соответствующего  $M_3 = 0,9M_{\text{эмах}} \pm 0.02 * 0,9M_{\text{эмах}}$  и формируется новая матрица со столбцом  $n \downarrow$  (табл. 4).

Таблица 4

$n \downarrow U_a$	26	28	30	32	34	36	38	40
372.9649	5.937571							
405.3		6.325681						
434.7			6.701737					
450				7.048774				
505.5					7.415139			
541.0183						7.752085		
577.0753							8.075036	
614.8926								8.383621

5. Затем заполняются оставшиеся ячейки матрицы по Алгоритму создания матрицы  $M_3(U_a, n)$ , который определяет процесс подбора определенном диапазоне каждой паре  $(n, U_a)$  соответствующего значения электромагнитного момента  $M_3$ .

Таблица 5

$n \downarrow U_a$	26	28	30	32	34	36	38	40
372.9649	5.937571	6.5592	7.100396	7.61	8.083	8.518785	8.9205	9.292
405.3	5.668	6.325681	6.9182	7.46316	7.966	8.4322	8.850896	9.24272
434.7	5.398	6.08	6.701737	7.301445	7.8298	8.318125	8.765174	9.177454
450	4.987332	5.672141	6.432484	7.048774	7.625027	8.146851	8.624811	9.06394
505.5	4.58	5.39739	6.123	6.81036	7.415139	7.9712	8.478478	8.942665
541.0183	4.0706	4.97	5.784888	6.518	7.2135	7.752085	8.293695	8.78777
577.0753	3.465	4.49908	5.37	6.16	6.8431	7.499	8.075036	8.60515
614.8926	2.76	3.902	4.891163	5.74	6.511	7.2026	7.820767	8.383621

- 6. Результаты вычислений заносятся в таблицы 4 и 5.
- 7. В итоге получается искомая матрица вида (табл. 6).

Таблица 6

$n_{\infty} \setminus U_a$	26	28	30	32	34	36	38	40
681,7031	5.937571	6.5592	7.100396	7.61	8.083	8.518785	8.9205	9.292
734,4259	5.668	6.325681	6.9182	7.46316	7.966	8.4322	8.850896	9.24272
787,1901	5.398	6.08	6.701737	7.301445	7.8298	8.318125	8.765174	9.177454
839,9958	4.987332	5.672141	6.432484	7.048774	7.625027	8.146851	8.624811	9.06394
892,8432	4.58	5.39739	6.123	6.81036	7.415139	7.9712	8.478478	8.942665
945,7324	4.0706	4.97	5.784888	6.518	7.2135	7.752085	8.293695	8.78777
998,6638	3.465	4.49908	5.37	6.16	6.8431	7.499	8.075036	8.60515
1051,638	2.76	3.902	4.891163	5.74	6.511	7.2026	7.820767	8.383621

8. Графическое изображение таблицы 6 представляет собой поверхность в фазовом пространстве управления ( $U_a, n, M_3$ ). Для построения поверхности и решения задачи управления [4] требуется перенести сформированный массив из *Excel* в *MathCAD*. Результат переноса и построенная поверхность приведены на *рис. 4*.

Задача нахождения управляющего сигнала  $U_a$  решается через аналитическое описание построенной поверхности  $M_{ij}$ . Интерполирование поверхности электромагнитного момента  $M_3(U_a, n)$  осуществляется функцией *MathCAD* *regress* ( $Q, V, p$ ), которая приближает поверхность наилучшим способом. С помощью функции *regress* ( $Q, V, n$ ) получается таблица коэффициентов аппроксимирующего полинома R1 (*рис. 5*).

$i := 0..7$   
 $j := 0..7$

$$M_{i,j} := \begin{pmatrix} 5.93757091 & 6.5592 & 7.100396108 & 7.61 & 8.083 & 8.518785 & 8.9205 & 9.292 \\ 5.668 & 6.325680615 & 6.9182 & 7.46316 & 7.966 & 8.4322 & 8.850896 & 9.24272 \\ 5.398 & 6.08 & 6.701737243 & 7.301445 & 7.8298 & 8.318125 & 8.765174 & 9.177454 \\ 4.98733245 & 5.672141 & 6.4324838 & 7.0487744 & 7.6250265 & 8.14685076 & 8.62481074 & 9.06394048 \\ 4.58 & 5.397389906 & 6.123 & 6.81036 & 7.415138863 & 7.9712 & 8.47847831 & 8.942665 \\ 4.0706 & 4.97 & 5.78488806 & 6.518 & 7.2135 & 7.752085048 & 8.293695 & 8.78777 \\ 3.465 & 4.499079973 & 5.37 & 6.16 & 6.8431 & 7.499 & 8.075035635 & 8.60515 \\ 2.76 & 3.902 & 4.891163136 & 5.74 & 6.511 & 7.2026 & 7.820767 & 8.383620778 \end{pmatrix}$$

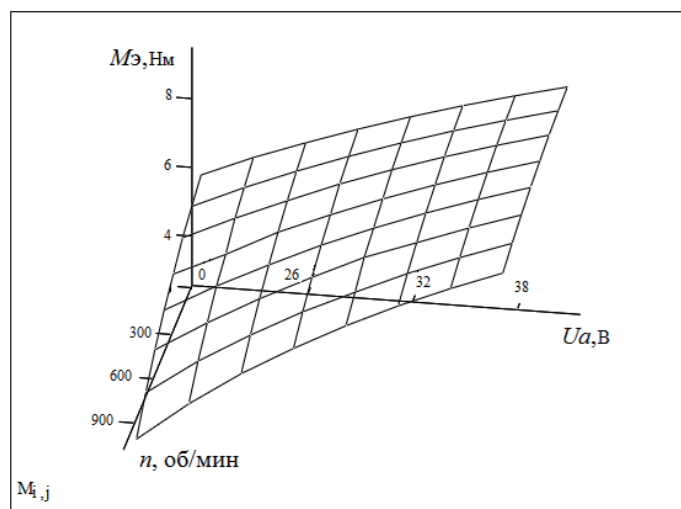
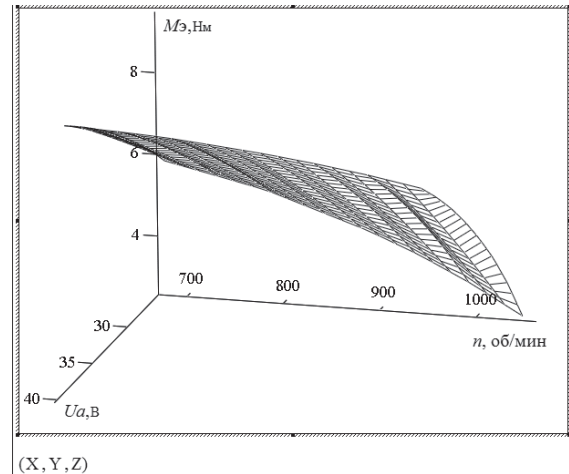


Рис. 4. Матрица  $M_{i,j}$  и соответствующая ей поверхность  $M_3(U_a, n)$  *MathCAD*

$X_k =$	$Y_k =$	$Z_k =$	
26	681.703	5.938	
26	734.426	5.668	
26	787.19	5.398	
26	839.996	4.987	
26	892.843	4.58	
26	945.732	4.071	
26	998.664	3.465	
26	1.052·10 <sup>3</sup>	2.76	
28	681.703	6.559	
28	734.426	6.326	
28	787.19	6.08	
...	...	...	

	0	
0		3
1		3
2		9
3		0
4		0
5		0
6	-8.827·10 <sup>-14</sup>	
7		0
8		0
9	2.02·10 <sup>-10</sup>	
10	-1.797·10 <sup>-12</sup>	
11		...



Q := augment(X, Y)

V := Z

n := 9

R1 := regress(Q, V, n)

Рис. 5. Программа получения полинома R1, аппроксимирующего поверхность  $M_3(U_a, n)$

Функция poly(x, y) позволяет записать полином  $R1(x, y) = R1(U_a, n_0)$  в явном виде.

$$\begin{aligned}
 R1(x,y) = & R157x^9 + R156x^8 + R155x^7 + R154x^6 + R153x^5 + R152x^4 + R151x^3 + R150x^2 + \\
 & + R149x + R148 + R147x^8 \cdot y + R146x^7 \cdot y + R145x^6 \cdot y + R144x^5 \cdot y + R143x^4 \cdot y + R142x^3 \cdot y + R141x^2 \cdot y + R140x \cdot y + \\
 & + R139y + R138x^7 \cdot y^2 + R137x^6 \cdot y^2 + R136x^5 \cdot y^2 + R135x^4 \cdot y^2 + R134x^3 \cdot y^2 + R133x^2 \cdot y^2 + R132x \cdot y^2 + R131y^2 + R130x^6 \cdot y^3 + \\
 & + R129x^5 \cdot y^3 + R128x^4 \cdot y^3 + R127x^3 \cdot y^3 + R126x^2 \cdot y^3 + R125x \cdot y^3 + R124y^3 + R123x^5 \cdot y^4 + R122x^4 \cdot y^4 + R121x^3 \cdot y^4 + R120x^2 \cdot y^4 + \\
 & + R119x \cdot y^4 + R118y^4 + R117x^4 \cdot y^5 + R116x^3 \cdot y^5 + R115x^2 \cdot y^5 + R114x \cdot y^5 + R113y^5 + R112x^3 \cdot y^6 + R111x^2 \cdot y^6 + R110x \cdot y^6 + \\
 & + R19y^6 + R18x^2 \cdot y^7 + R17x \cdot y^7 + R16y^7 + R15y^8 + R14y^9 + R13x \cdot y^8
 \end{aligned}$$

Таким образом, цифровая модель конкретного объекта управления, в нашем случае ДПТМ, будет представлять собой нелинейное уравнение  $R1(U_a, n) = M_3$ . Нахождение значений управляющего сигнала  $U_{a0}$ , по заданной фазовой траектории  $Out = (M_{30}, n_0)$ , осуществляется функцией Minerr(x, y) с высокой точностью при верном выборе

требуемых данной функцией начальных значений  $(x, y) = (U_{a0}, n_0)$ .

Из всех значений матрицы экспериментальных данных  $M_{ij}$  выбирается пара, которая минимально отличается от заданных  $n_0$  и  $M_{30}$  соответственно. Это и есть начальные условия, с учётом которых и применяется  $Minerr(x, y) = Minerr(U_{a0}, n_0)$ .

x := 32      y := 1050

Given

$$\begin{aligned}
 & R157x^9 + R156x^8 + R155x^7 + R154x^6 + R153x^5 + R152x^4 + R151x^3 + R150x^2 + \\
 & + R149x + R148 + R147x^8 \cdot y + R146x^7 \cdot y + R145x^6 \cdot y + R144x^5 \cdot y + R143x^4 \cdot y + R142x^3 \cdot y + R141x^2 \cdot y + R140x \cdot y + \\
 & + R139y + R138x^7 \cdot y^2 + R137x^6 \cdot y^2 + R136x^5 \cdot y^2 + R135x^4 \cdot y^2 + R134x^3 \cdot y^2 + R133x^2 \cdot y^2 + R132x \cdot y^2 + R131y^2 + R130x^6 \cdot y^3 + \\
 & + R129x^5 \cdot y^3 + R128x^4 \cdot y^3 + R127x^3 \cdot y^3 + R126x^2 \cdot y^3 + R125x \cdot y^3 + R124y^3 + R123x^5 \cdot y^4 + R122x^4 \cdot y^4 + R121x^3 \cdot y^4 + R120x^2 \cdot y^4 + \\
 & + R119x \cdot y^4 + R118y^4 + R117x^4 \cdot y^5 + R116x^3 \cdot y^5 + R115x^2 \cdot y^5 + R114x \cdot y^5 + R113y^5 + R112x^3 \cdot y^6 + R111x^2 \cdot y^6 + R110x \cdot y^6 + \\
 & + R19y^6 + R18x^2 \cdot y^7 + R17x \cdot y^7 + R16y^7 + R15y^8 + R14y^9 + R13x \cdot y^8 = 7.61
 \end{aligned}$$

x > 0      y > 0

z := Minerr(x, y)

$$z = \begin{pmatrix} 37.278 \\ 1.05 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

x = 37.278

В результате определено значение управляющего напряжения  $U_{a0} = 37.278$  В при  $M_{30} = 7.61$  Нм и скорости вращения вала двигателя  $n_0 = 1050$  об/мин. Таким

образом решена задача нахождения управляющего сигнала  $U_{a0}$  по заданной фазовой траектории  $(M_{30}, n_0)$  в фазовом пространстве  $(U_a, M_3, n)$ .

**Библиографический список**

1. Филатов В.В., Чумаева М.В., Сорокин В.О. Задача создания цифровой модели управления исполнительным двигателем электропривода станочного оборудования // Вестник МГТУ «СТАНКИН». — М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». № 3(50). 2019. С. 25–29.

2. Чумаева М.В. Имитационное моделирование исполнительных двигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. — Материалы XV международной научно-практической конференции «Академическая наука — проблемы и достижения». Март 2018. Nortoh Charleston, USA. Том 2. — С. 34–37. ISBN 978-1987637250.

3. Филатов В.В., Чумаева М.В. Разработка методики вычислительного эксперимента в моделировании исполнительного двигателя станочного электропривода в программной среде NI MULTISIM. Евразийский союз ученых (ЕСУ) / Технические науки, 2015, № 6(15). С. 26–29.

4. Филатов В.В., Чумаева М.В. Метод виртуальных пространств управления двигателем постоянного тока привода станка // Вестник МГТУ «СТАНКИН», научный рецензируемый журнал. — М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», № 3 (38), 2016. — С. 70–77.

5. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / С74. Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Т. 1. — М.: Энергоатомиздат. 1988. — 456 с.

**Филатов Владимир Витальевич** — канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой промышленной электроники и интеллектуальных цифровых систем ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*vfilatov45@mail.ru*

**Чумаева Марина Вячеславовна** — канд. техн. наук, доц. кафедры промышленной электроники и интеллектуальных цифровых систем ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*mvcvmvc@yandex.ru*

**Афонин Кирилл Сергеевич** — аспирант кафедры промышленной электроники и интеллектуальных цифровых систем ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*kirik312@mail.ru*

**Filatov Vladimir Vitalyevich** — candidate Sc. of Engineering, docent, Head of the sub-department of “Industrial electronics and intelligent digital systems” of MSUT “STANKIN”

*vfilatov45@mail.ru*

**Chumaeva Marina Vyacheslavovna** — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Industrial electronics and intelligent digital systems” of MSUT “STANKIN”

*mvcvmvc@yandex.ru*

**Afonin Kirill Sergeevich** — postgraduate student at the sub-department of “Industrial electronics and intelligent digital systems” of MSUT “STANKIN”

*kirik312@mail.ru*

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflicts of Interest Statement:** The authors have no conflicts of interest to declare.

---

# РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

---

УДК 004.942

А.В. Каляшина, Т.С. Евдокимова, Ю.Н. Смирнов  
A.V. Kalyashina, T.S. Evdokimova, Yu.N. Smirnov

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОГО ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

## SIMULATION OF A ROBOTIC LASER WELDING PROCESS

*В данной статье рассмотрена возможность добавления динамического изменения параметров лазерного излучения в процессе лазерной сварки. Цель данного исследования — разработка модели адаптивного процесса лазерной сварки. Для достижения поставленной цели необходимо выбрать источник лазерного излучения, робототехнический комплекс, разработать решение по измерению толщины материала, установить зависимости параметров лазерного излучения от глубины проплавления, составить базу данных констант для различных материалов, разработать и реализовать алгоритм работы программы. Подобная технология обеспечит возможность использовать сварки заготовок разной толщины, что в теории может существенно расширить возможности процесса.*

*This article considers the possibility of adding a dynamic change in the parameters of laser radiation in the process of laser welding. The purpose of this study is to develop a model of adaptive laser welding process. To achieve this goal, it is necessary to select a laser radiation source, a robotic complex, develop a solution for measuring the thickness of the material, establish the dependence of laser radiation parameters on the depth of penetration, compile a database of constants for various materials, develop and implement the algorithm of the program. This article presents the results of the study. Such technology will make it possible to use welding of workpieces of different thicknesses, which in theory can significantly expand the capabilities of this process.*

**Ключевые слова:** лазерная сварка, робототехнический комплекс, адаптивный процесс, алгоритм, математическое моделирование.

**Keywords:** laser welding, robotic complex, adaptive process, algorithm, mathematical modeling.

### **Введение, актуальность и постановка задачи**

Лазерная сварка изделий все чаще применяется в машиностроении. Эта технология имеет свои достоинства и недостатки [1, 2]. Для того, чтобы осуществить качественную сварку изделия, необходимо установить параметры лазерного излучения, которые определяются оператором перед началом процесса и остаются постоянными при его выполнении. Но, как известно, на практике различные детали имеют различные погрешности, например, могут присутствовать перепады толщины по траектории будущего сварного соединения [3]. Получается, что при заданных постоянных параметрах лазерного излучения и переменной толщине возможно появление дефектов готовых изделий.

Данную проблему можно устранить путем разработки адаптивного процесса с применением робототехнического комплекса. Разработка такой системы несет в себе большую ценность для перспективы использования лазерного оборудования в промышленности.

Цель данного исследования — разработка модели адаптивного процесса лазерной сварки. Для достижения поставленной цели необходимо выбрать источник лазерного излучения, робототехнический комплекс, разработать решение по измерению толщины материала, установить зависимости параметров лазерного излучения от глубины проплавления, составить базу данных констант для различных материалов, разработать и реализовать алгоритм работы программы. В данной статье приведены результаты исследования.



### Теоретическая часть

Лазерная сварка, по сравнению с другими видами сварочных процессов, имеет ряд особенностей. В процессе лазерной сварки получим гораздо меньшее пятно контакта из-за того, что лазерный луч способен концентрировать свою энергию и выдавать большую плотность мощности [4, 5]. Это несет за собой ряд весомых положительных качеств, таких как уменьшение зоны термического влияния в 3–5 раз, расширение числа возможных для изготовления деталей, так как элементы могут стоять гораздо ближе к детали [6]. Уменьшение сварочной ванны позволяет применять лазерную сварку при изготовлении прецизионных конструкций. Лазерная сварка требует меньшего объема последующей механической обработки. Результирующие деформации свариваемой конструкции снижаются до 10 раз, общая прочность детали повышается [7, 8, 9].

Большая плотность мощности в совокупности с маленьким диаметром лазерного луча и технологической особенностью передачи лазерного излучения по воздуху дают такое преимущество, как сварка труднодоступных мест (углубления, полости) [10, 12].

Применение современных волоконных лазеров обеспечивает передачу лазерного излучения по оптоволокну, что позволяет автоматизировать процесс сварки с помощью роботов-манипуляторов, установив на них оптическую головку [11, 12].

Все основные параметры лазерной сварки взаимосвязаны между собой и влияют на качество получаемого изделия. Эффективность лазерного излучения тем выше, чем большую плотность мощности имеет лазерный луч. С повышением мощности растут и диаметр канала, и глубина, на которую передается лазерное воздействие. [3, 5].

Конкретные значения получаемой геометрии сварного соединения привязаны к материалу, который используется для осуществления процесса лазерной сварки, а также к самому источнику излучения. Например, если сравнивать волоконные лазеры с газовыми, то у первых значение глубины шва окажется более высоким. [6, 9].

Во время выполнения процесса лазерной сварки следует внимательно следить за положением фокуса лазерного луча, так как даже незначительное отклонение может привести к образованию различных дефектов [13]. Это может произойти по многим причинам, например из-за некорректного размещения линз, либо из-за колебаний по толщине у детали. [14, 15].

В данной работе проведено исследование процесса образования сварного соединения при лазерной сварке с глубоким проплавлением (deepmelting). Чтобы осуществить процесс лазерной сварки металла, толщина которого выходит за пределы одного миллиметра, нужно потратить гораздо больше сфокусированной энергии, чем для изделий малой толщины. Этот факт должен учитываться при составлении математического описания процесса.

Технология лазерной сварки материалов с глубоким проплавлением отличается от сварки материалов малой толщины, так как определяется совершенно другими физическими процессами. При использовании данного метода возрастает толщина проплавления свариваемого металла: она начинает варьироваться от одного миллиметра до 30–40 миллиметров при условии, что лазерный луч совершил один проход. Данная ширина существенно влияет на области применения технологии глубокого проплавления.

Во время проведения процесса лазерной сварки необходимо учитывать множество различных параметров. Основные параметры, от которых зависит качество процесса, следующие:

- мощность, с которой происходит лазерное излучение;
- скорость сварки, влияющая на момент времени, оказывающий воздействие на элементарную часть площади;
- фокусное расстояние, определяющее площадь, на которую рассеивается передаваемая энергия;
- перетяжка фокуса, оказывающая существенное воздействие на выбранный режим сварки.

### Экспериментальная часть

Задача данного исследования состояла в разработке модели адаптивного процесса лазерной сварки, которая позволит применять технологию для материала с переменной толщиной. Для выполнения задачи необходимо:

- автоматизировать измерение толщины свариваемого металла;
- рассчитать параметры лазерного луча;
- динамически изменять (адаптировать) параметры в процессе сварки.

В качестве объекта использована труба из листового горячекатаного металла диаметром 50 мм, толщиной 3 мм. Сварка выполнялась в непрерывном режиме. Толщина трубы неидеальна и имеет перепады в  $\pm 0,5$  мм. Моделирование проводилось в среде интеллектуальной трехмерной симуляции Roboguide.

Технологический процесс разделен на 4 этапа:

- 1) подача труб на конвейере и их установка на держатель (доп. ось вращения);
- 2) измерение толщины труб по траектории сварки;
- 3) сварка с адаптивным управлением лазерным лучом;
- 4) отвод готового изделия далее по конвейерной линии.

Для разработки модели требовалось: выбрать источник лазерного излучения; выбрать робототехнический комплекс; разработать решение по измерению толщины материала; установить зависимости параметров лазерного излучения от глубины проплавления; составить базу данных констант для различных материалов; разработать, реализовать и объяснить алгоритм работы программы.

### Результаты моделирования

В качестве источника лазерного излучения был выбран волоконный лазер, так как именно этот тип лазеров наиболее эффективно используется для сварки материалов большой толщины. Преимущества волоконных лазеров:

- отсутствие локальных энергетически высоконагруженных мест;
- низкое напряжение (не более 24 В);
- нет оптического тракта передачи излучения к рабочей головке, излучение передается по оптическому кабелю;
- высокий КПД (до 45%);
- высокое качество излучения.

В качестве инструмента управления перемещением лазерного луча был использован робот фирмы FANUC, модель FANUC ARC Mate 100iD. Достижимость, максимальная нагрузка на кисть и другие параметры робота удовлетворяют требованиям, но не являются избыточными, что вело бы за собой удорожание. Среди своих аналогов и моделей с похожими характеристиками ARC Mate 100iD выигрывает за счет своей новизны. Для управления роботом использован контроллер R-30iB Plus, который обеспечивает связь по сети Ethernet роботов, удаленных компьютеров и другого оборудования (рис. 1).



Рис. 1. Робототехнический комплекс FANUC ARC Mate 100iD

Моделирование процесса происходит в специальной среде FANUC Roboguide (рис. 2).

Данное приложение способно реализовывать моделирование передвижения робота-манипулятора, а также различных команд, относящихся к разным сферам применения, позволяя тем самым не тратить эффективность оператора на рутинные операции. Оно разработано для

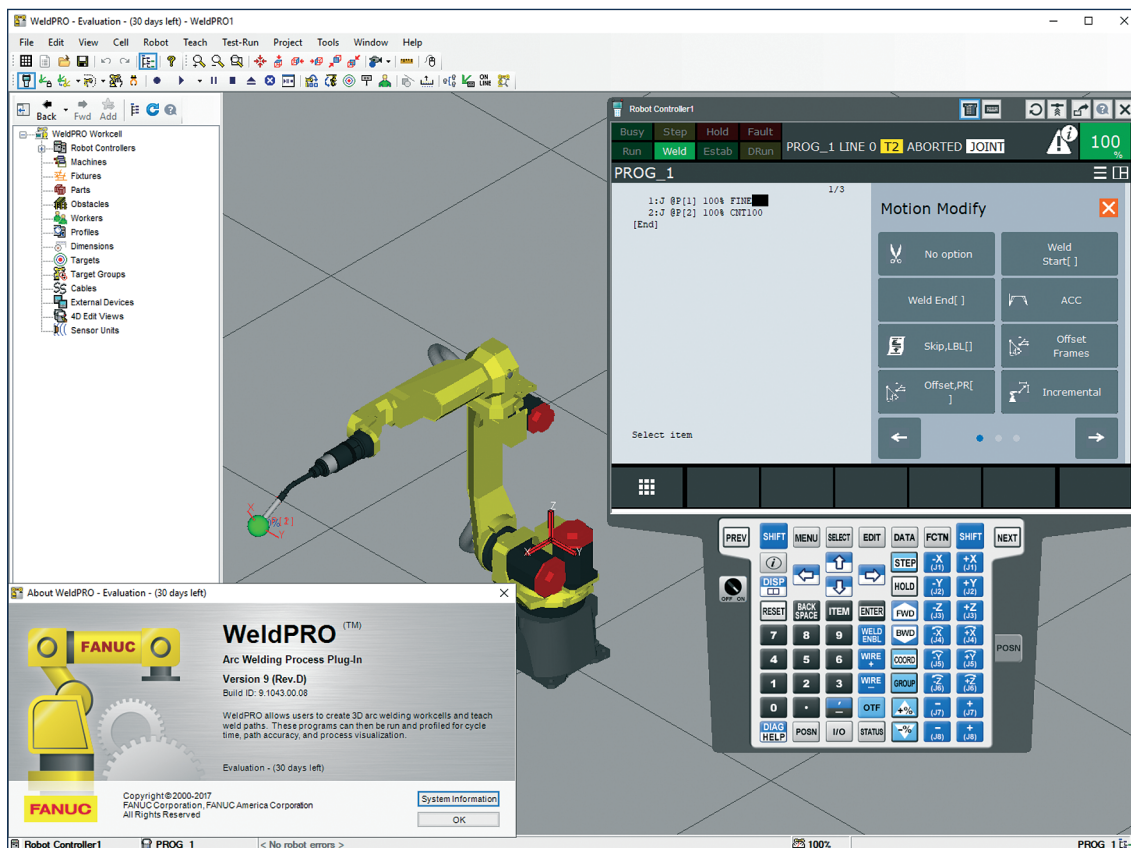


Рис. 2. Среда моделирования промышленных роботов FANUC Roboguide

того, чтобы упростить процесс отладки производства и разрабатывать конкретные узлы и ячейки, используя для этого персональный компьютер. Приложение полностью автономно и не требует наличия подключения к действующим роботам-манипуляторам, а также другим элементам разрабатываемых ячеек. Также в среде разработки уже заложены базовые модели популярных робототехнических систем, а при желании их можно всегда импортировать из сторонних программ, используя для этого заранее спроектированные CAD-модели.

Для измерения толщины металла был использован ультразвуковой датчик. Выбор основан на таких факторах,

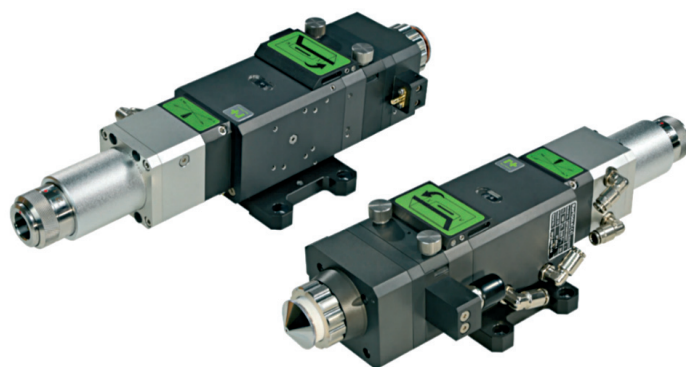


Рис. 3. Оптическая головка BT240

На основе изученных источников установлена формула зависимости глубины проплавления от параметров лазерного излучения:

$$h = \frac{P}{2\pi\lambda_T T_K} \ln \frac{r_l + \alpha/v_{св}}{r_l}, \quad (1)$$

где  $h$  — глубина проплавления,  $P$  — мощность лазера,  $\lambda_T$  — коэффициент теплопроводности материала,  $T_K$  — температура кипения,  $\alpha$  — коэффициент температуропроводности материала,  $v_{св}$  — скорость сварки,  $r_l$  — радиус луча.

как практичность, простота конструкции, примитивность метода измерения. Датчик был закреплен на оптической головке лазера. Такое решение позволяет не задействовать для перемещения датчика дополнительные ресурсы, например в виде еще одного робота-манипулятора, а воспользоваться уже имеющимися. Для реализации подобной конструкции была разработана собственная CAD-модель оснастки. За основу для построения CAD-модели взята оптическая головка BT240 компании Pure Logic (рис. 3).

Результат реверс-инжиниринга и восстановления 3D-модели оптической головки можно увидеть на рис. 4.

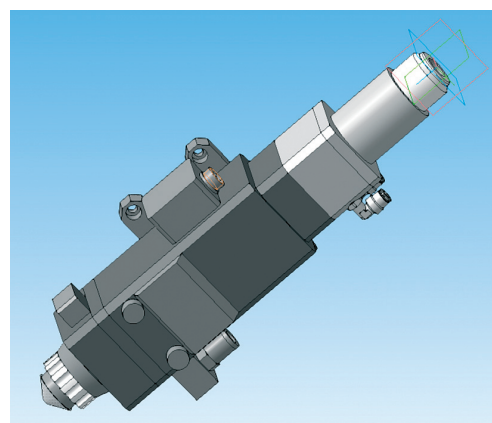


Рис. 4. 3D-модель оптической головки BT240

Таким образом, скорость процесса зависит от глубины проплавления, которая измеряется с помощью ультразвукового датчика.

В разработанном алгоритме сварки кругового сечения трубы, с учетом глубины проплавления и адаптивного расчета скорости запускается цикл для измерения толщины  $h$  в текущей точке для левой и правой трубы. Затем сравниваются толщины левой и правой труб, выбирается меньшее измерение, на основе которого рассчитывается скорость лазера. Таким образом, скорость адаптируется в зависимости от измеряемой толщины трубы. Лазер включается только после того, как рассчитаны скорости во всех точках.

Таблица. Тепловые константы некоторых материалов

Материал	$\lambda_T$ , Вт/(см <sup>2</sup> ·°C)	$T_K$ , °C	$\alpha$ , см <sup>2</sup> /с
Серебро	4,2	2162	1,7
Технический алюминий	2,5	2519	0,850
Алюминиевый сплав 2024	1,34	2412	0,706
Электролитическая медь	4,01	2562	1,14
Фосфористая бронза	1,11	2345	0,213
Технически чистое железо	0,8	2862	0,202
Нержавеющая сталь	0,16	2685	0,056
Углеродистая сталь	0,7	2754	0,119
Технически чистый никель	3,9	2732	0,220
Монель	0,22	2456	0,055
Инконель	0,11	2487	0,039

Для расчета параметров лазерного излучения требуются некоторые константы используемых конструкционных материалов. В таблице выше приведены некоторые популярные материалы, используемые для изготовления изделий сваркой плавлением и их температурные и другие параметры.

### Заключение

В результате исследования изучены физические процессы образования сварного соединения при сварке материалов малых толщин и при сварке с глубоким проплавлением. Изучены методики и технологии, определяющие технологический процесс лазерной сварки. Разработана модель адаптивной лазерной сварки. Для этого были установлены зависимости параметров лазерного излучения от глубины проплавления, разработана собственная оснастка для робота-манипулятора, составлены алгоритмы работы программы. В результате повышена точность сварки и ее качество. Появилась возможность использовать данный технологический процесс для сварки швов переменной толщины.

### Библиографический список

1. Sproesser G., Ya-Ju, Pittner C.A., Finkbeiner M., Rethmeier M. Life Cycle Assessment of welding technologies for thick metal plate welds, *J. Cleaner Prod.* 108 (2015). P. 46–53.
2. Buddu R.K., Chauhan N.L., Raole P.M. Investigations of microstructure and mechanical properties of 60-mm-thick type 316L stainless steel welded plates by multipass tungsten inert gas welding and electron beam welding for fusion reactor applications, *Fusion Sci. Technol.* 65 (2014). P. 248–254.
3. Реди Дж. Промышленные применения лазеров: Пер. с англ. — М.: Мир, 1981.
4. Технологические лазеры: Справочник: В 2 т. Т 1: Расчет, проектирование и эксплуатация / Г.А. Абильтитов, В.С. Голубев, В.Г. Гонтарь и др.; Под общ. ред. Г.А. Абильтитова. — М.: Машиностроение, 1991.
5. Bachmann M., Gumenyuk A., Rethmeier M. Welding with high-power lasers: trends and developments, *Phys. Proc.* 83 (2016). P. 15–25.
6. Balakrishnan J., Vasileiou A.N., Francis J.A., Smith M.C., Roy M.J., Callaghan M.D., Irvine N.M. Residual stress distributions in arc, laser and electron-beam welds in 30 mm thick SA508 steel: a cross-process comparison, *Int. J. Press. Vessels Pip.* (2018).
7. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора. — М.: Машиностроение, 1985.
8. Zhu Z., Ma X., Wang C., Mi G. Modification of droplet morphology and arc oscillation by magnetic field in laser-MIG hybrid welding, *Opt. Lasers Eng.* 131 (2020). P. 106–138.

9. Zhang Y.M., Kovacevic R., Li L. Adaptive control of full penetration gas tungsten arc welding. *IEEE Trans. Control Syst Technol.* 1996. 4 (4). P. 394–403. <https://doi.org/10.1109/87.508887>.

10. Сварка. Резка. Контроль: Справочник: В 2 т. / Под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышева. — М.: Машиностроение, 2004.

11. Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций / С.А. Куркин, В.М. Ховов, Ю.Н. Аксенов и др.; Под ред. С.А. Куркина, В.М. Ховова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.

12. Мощные газоразрядные СО<sub>2</sub>-лазеры и их применение в технологии / Г.А. Абильтитов, Е.П. Велихов, А.Г. Григорьянц и др. — М.: Наука, 1984.

13. Каляшина А.В., Андрияшин В.А., Сатдаров Т.Р. Роботизированный комплекс третьего поколения по обработке металлов // *Вестник КНИТУ им. А.Н. Туполева.* № 4. 2015.

14. Каляшина А.В., Сатдаров Т.Р. Комплексное решение интеграции волоконного лазера и роботизированного комплекса третьего поколения // *Фундаментальные исследования*, 2016, № 22(4), С. 730–735.

15. Каляшина А.В., Горунов А.И., Габитов А.А. Математическое обоснование экспериментально подобранной технологии лазерного упрочнения с применением роботизированного комплекса // *Вестник Машиностроения*, 2019, № 4.

### References

1. Sproesser G., Ya-Ju C., Pittner A., Finkbeiner M., Rethmeier M., Life Cycle Assessment of welding technologies for thick metal plate welds, *J. Cleaner Prod.* 108 (2015) 46–53.
2. Buddu R.K., Chauhan N.L., Raole P.M., Investigations of microstructure and mechanical properties of 60-mm-thick type 316L stainless steel welded plates by multipass tungsten inert gas welding and electron beam welding for fusion reactor applications, *Fusion Sci. Technol.* 65 (2014) 248–254.
3. Redi J. Industrial applications of lasers: Trans. from English — М.: Mir, 1981.
4. Technological lasers: Reference book: В 2 т. Т 1: Calculation, design and operation / G.A. Abilsitov, V.S. Golubev, V.G. Gontar, etc.; Under the general editorship of G.A. Abilsitov. — М.: Mechanical Engineering, 1991.
5. Bachmann M., Gumenyuk A., Rethmeier M., Welding with high-power lasers: trends and developments, *Phys. Proc.* 83 (2016) 15–25.
6. Balakrishnan J., Vasileiou A.N., Francis J.A., Smith M.C., Roy M.J., Callaghan M.D., Irvine N.M., Residual stress distributions in arc, laser and electronbeam welds in 30 mm thick SA508 steel: a cross-process comparison, *Int. J. Press. Vessels Pip.* (2018).
7. Laser and electron beam processing of materials: Handbook / N.N. Rykalin, A.A. Uglov, I.V. Zuev, A.N. Kokora. — М.: Mechanical Engineering, 1985.

8. Zhu Z., Ma X., Wang C., Mi G., Modification of droplet morphology and arc oscillation by magnetic field in laser-MIG hybrid welding, *Opt. Lasers Eng.* 131 (2020), 106138.

9. Zhang YM, Kovacevic R, Li L. Adaptive control of full penetration gas tungsten arc welding. *IEEE Trans Control Syst Technol* 1996;4(4):394–403. <https://doi.org/10.1109/87.508887>.

10. Welding. Cutting. Control: Reference book: In 2 volumes / Under the general editorship of N.P. Aleshin, G.G. Chernyshev. — M.: Mechanical Engineering, 2004.

11. Computer design and preparation of production of welded structures / S.A. Kurkin, V.M. Khovov, Yu.N. Aksenov, etc.; Under the editorship of S.A. Kurkin, V.M. Khovova. — M.: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2002.

12. Powerful gas-discharge CO<sub>2</sub> lasers and their application in technology / G.A. Abilsitov, E.P. Velikhov, A.G. Grigoryants et al. — M.: Nauka, 1984.

13. Kalyashina A.V., Andryashin V.A., Satdarov T.R., Robotic complex of the third generation for metal processing // *Bulletin of the A.N. Tupolev KNITU No. 4*, 2015

14. Kalyashina A.V., Satdarov T.R. A complex solution for the integration of a fiber laser and a third-generation robotic complex // *Fundamental Research*, 2016, No. 22(4), pp. 730–735

15. Kalyashina A.V., Gorunov A.I., Gabitov A.A. Mathematical substantiation of experimentally selected laser hardening technology using a robotic complex // *Bulletin of Mechanical Engineering*, 2019, No. 4.

**Каляшина Анна Викторовна** — канд. техн. наук, профессор, доц. кафедры «Лазерные технологии» Казанского национального исследовательского технического университета — КАИ им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ)  
*anna\_vik@mail.ru*

**Евдокимова Татьяна Сергеевна** — преподаватель кафедры «Инженерная кибернетика» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
*evdokimovats97@gmail.com*

**Смирнов Юрий Николаевич** — доц., заведующий кафедрой «Инженерная кибернетика», проректор по информатизации ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»  
*mmite@inbox.ru*

**Kalyashina Anna Victorovna** — candidateSc. Of Engineering, professor, associate professor th edepartmentof “Laser Technologies” of KNRTU KAI  
*anna\_vik@mail.ru*

**Evdokimova Tatyana Sergeevna** — lecturer at the department of “Engineering Cybernetics”of Kazan State Power Engineering University  
*evdokimovats97@gmail.com*

**Smirnov Yuri Nikolaevich** — docent, Head of the department of “Engineering Cybernetics”, Vice-Rector for Informatization of Kazan State Power Engineering University  
*mmite@inbox.ru*

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflicts of Interest Statement:** The authors have no conflicts of interest to declare.

---

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

---

УДК 621.9.025.7

А.Р. Мирзوماхмудов, А.В. Исаев  
A.R. Mirzomakhmudov, A.V. Isaev

## ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СБОРНОЙ ФАСОННОЙ ФРЕЗЫ СО СМЕННЫМИ РЕЖУЩИМИ ПЛАСТИНАМИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОЛЕСНЫХ ПАР

### GEOMETRIC MODEL OF A MILLING CUTTER WITH INDEXABLE INSERTS FOR MACHINING WHEEL SETS

*В статье приведен порядок расчета положения сменных режущих пластин в ноже сборной фасонной фрезы и определение ориентации опорной плоскости под пластины в системе координат станка, на котором производится обработка ножа рассматриваемого инструмента.*

*In present paper the position of indexable inserts in the cartridge of form milling cutter is calculated. Orientation of the reference plane for the insert in the coordinate system of the machine tools used for processing the cartridge is determined.*

**Ключевые слова:** сборные фасонные фрезы, проектирование режущего инструмента, восстановление колесных пар, ремонт железнодорожного подвижного состава.

**Keywords:** milling cutters with indexable inserts, form milling cutters, design of cutting tools, railway wheelsets, repair of railway rolling stock.

#### Введение

Сборные фасонные фрезы со сменными многогранными пластинами (СМП) применяются в железнодорожной промышленности для обработки таких деталей как головки рельсов, боковые бочкообразные профили рельсов, профили острижков стрелочных переводов, бандажи колесных пар и т.д. Вопросы проектирования, изготовления и разработки эксплуатационных характеристик сборных фасонных фрез представляют актуальную научно-техническую задачу. Общий алгоритм расчета конструктивных элементов сборной фасонной фрезы со СМП известен [1, 3, 6].

Технологический аспект задачи расчета положения СМП в ноже сборной фасонной фрезы заключается в определении ориентации опорной плоскости под пластину в системе координат станка, на котором производится обработка ножа рассматриваемого инструмента. Это достигается путем последовательных поворотов заготовки ножа на станке, что обеспечивает возможность обработки пазов под пластины, а также требуемые геометрические параметры режущей части фрезы в соответствующих точках фасонного профиля ножа в сборе.

#### Основная часть

Для решения поставленной задачи следует, в соответствии с рисунком 1, определить систему координат инструмента  $X_{ри} Y_{ри} Z_{ри}$ , ножа  $X_n Y_n Z_n$  и систему координат режущей пластины  $X_{рп} Y_{рп} Z_{рп}$ .

Геометрическая модель представлена в виде совокупности систем координат объектов, формирующих технологические системы 1-го и 2-го порядков. В технологической системе 1-го порядка проектируемая фреза является режущим инструментом (РИ), закрепленным на станке (С) с помощью оправки (Опр) и обрабатываемой деталью (Д), установленную в приспособлении (Пр). При проектировании необходимо обеспечить точность расположения режущих (РП) и опорных (ОП) пластин в ноже (Н), который фиксируется в корпусе фрезы с помощью двух колец ( $K_1$  и  $K_2$  соответственно).

В технологической системе 2-го порядка происходит обработка корпуса или других составных частей проектируемой фрезы, которые выступают в ней в качестве детали 2-го порядка (Х). Остальные элементы технологической системы 2-го порядка обозначены аналогичным образом ( $C^2$  и  $Pr^2$  соответственно).

Общая структура геометрической модели сборной фасонной фрезы рассматриваемой конструкции представлена в виде графа  $\Gamma_1 = (X, E)$ , где каждой вершине соответствует локальная система координат элемента технологической системы или элемента конструкции фрезы:  $O_c$  — станка;  $O_{пр}$  — приспособления;  $O_{ви}$  — вспомогательного инструмента;  $O_d$  — обрабатываемой детали (поверхности);  $O_{рпi}$  —  $i$ -ой режущей пластины;  $O_{опi}$  —  $i$ -ой опорной пластины;  $O_{ни}$  —  $i$ -ого ножа;  $O_{рпi}$  — корпуса сборной фрезы (инструмента);  $O_{к1}$  — левого кольца;  $O_{к2}$  — правого кольца;  $O_{опр}$  — оправки;  $O_d^2$  — заготовки корпуса фрезы или другие заготовки составных частей фасонной фрезы;  $O_{пр}^2$  — приспособления, в котором закрепляется заготовка корпуса фрезы или другие заготовки составных частей фасонной фрезы;  $O_c^2$  — станка, на котором ведется обработка заготовки корпуса фрезы или другие заготовки составных частей фасонной

фрезы;  $O_{ви}^2$  — вспомогательного инструмента второго порядка;  $O_{рпi}^2$  — инструмента второго порядка для обработки заготовки корпуса фрезы или заготовок других составных частей фасонной фрезы.

Дуги графа определяют матрицы перехода между обозначенными системами координат:

$$M_1 = [M]_{O_c O_{пр}} \cdot [M]_{O_{пр} O_{ви}} \cdot [M]_{O_{ви} O_{рпi}} \times \\ \times [M]_{O_{рпi} O_{опi}} \cdot [M]_{O_{опi} O_{ни}} \cdot [M]_{O_{ни} O_{рпi}} \cdot [M]_{O_{к1} O_{рпi}} \times \\ \times [M]_{O_{к2} O_{рпi}} \cdot [M]_{O_{опр} O_{рпi}}; \quad (1)$$

$$M_2 = [M]_{O_d^2 O_{пр}^2} \cdot [M]_{O_{пр}^2 O_c^2} \cdot [M]_{O_c^2 O_{ви}^2} \cdot [M]_{O_{ви}^2 O_{рпi}^2}; \quad (2)$$

Здесь  $M_1$  и  $M_2$  — матрицы глобальной системы координат технологической системы;  $[M]$  — матрицы перехода между системами координат (рис. 1).

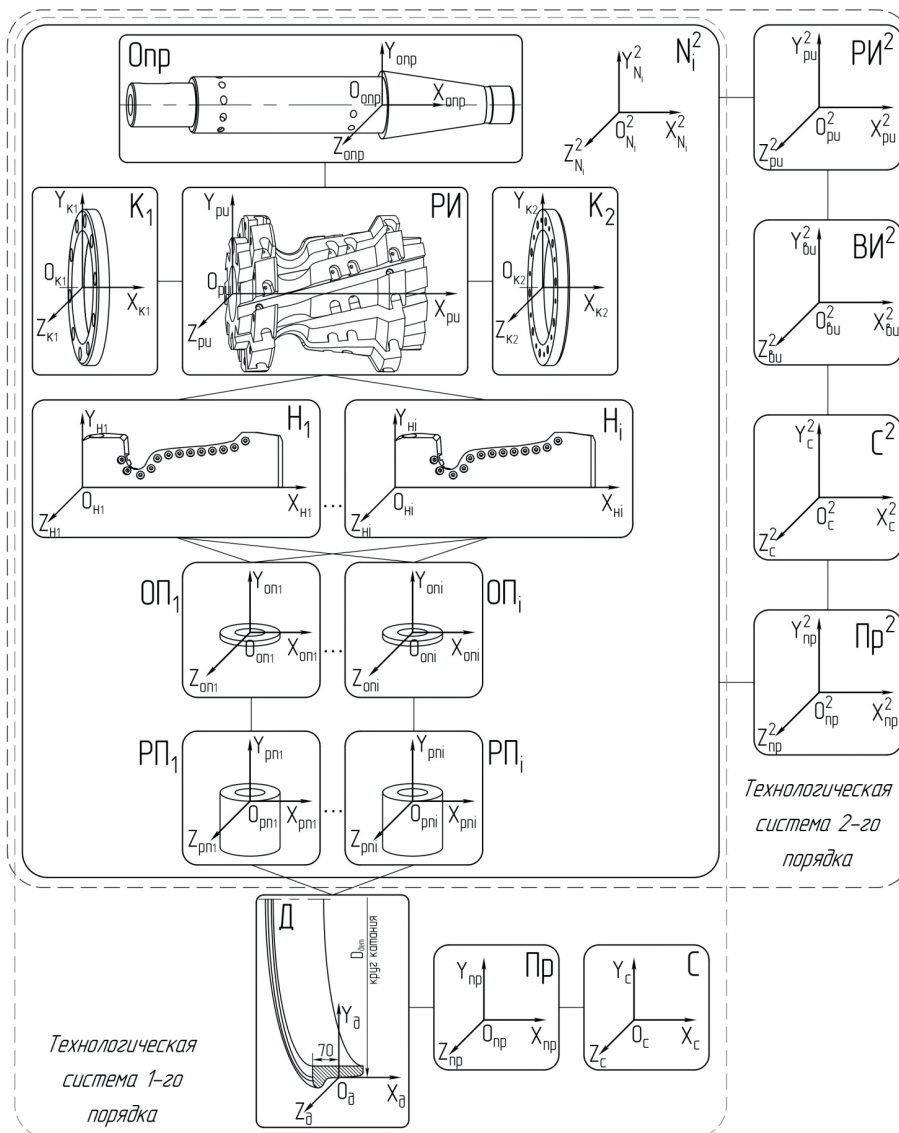


Рис. 1. Технологическая система 1-го и 2-го порядков

Координаты точек задаются вектором-столбцом размерностью 4. В общем виде он выглядит следующим образом:

$$\{R_i\} = \begin{bmatrix} x_{Ri} \\ y_{Ri} \\ z_{Ri} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

где,  $x_{Ri}, y_{Ri}, z_{Ri}$  — координаты точки  $R$  в системе координат  $O_i$ .

Геометрическая модель устанавливает функциональные зависимости между относительными поворотами и перемещениями координатных систем и описывает положение конструктивных элементов в выбранной системе координат. Данная модель дает наглядное представление о переходах между системами координат различных конструктивных элементов.

Выбор направления осей систем координат каждого из элементов геометрической модели сборной фа-

сонной фрезы со сменными многогранными пластинами для обработки бандажей колесных пар обусловлен удобством обработки корпуса и/или других составных частей фасонной фрезы на станке 2-го порядка.

Ориентация пластины осуществляется в несколько этапов. На первом этапе проектирования положения СМП на ноже производится переход от системы координат детали к системе координат корпуса инструмента. Параметрами, определяющими положение режущей пластины в данном случае, являются координаты начальных точек  $O_{рпш}$  режущих пластин в ноже, которые не совпадают с центром оси режущих пластин  $O_{рпш}$ . На рис. 2 представлены координаты  $O_{рпш}$  на ноже № 1 по оси  $X$  и  $Y$ . Для рассматриваемого примера был выбран профиль бандажа колесной пары ДМетИ с гребнем толщиной 33 мм для МВПС (контроль — шаблоном И737.00.01). В таблице 1 представлены координаты центра оси  $O_{рпш}$  режущих пластин № 1–13 с учетом всех произведенных поворотов.

Таблица 1. Координаты центра оси режущих пластин  $O_{рпш}$  на ноже № 1 по оси  $X$  и  $Y$

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$X \pm 0.05$ , мм	47.5	61.5	75.7	89.7	103.7	117.8	131.9	145.9	160	168.1	181.8	193.4	200.7
$Y \pm 0.05$ , мм	61.7	53.6	50.6	49	47.9	46.8	45.6	43.9	39.3	26.9	18.5	24.1	37.8

Положение пластины на ноже по оси  $Z$ , а также необходимая точность расположения главной базовой точки  $K_i$ , которое является начальной точкой  $O_{рпш}$  режущей пластины 1, определяется при настройке инструмента вне станка, перед эксплуатацией, путем подбора толщины опорных пластин 2, которые устанавливаются под режущими пластинами 1 (рис. 3). На нож 3 устанавливаются опорная 2 и режущая 1 пластины. Фиксируются с помощью винта 4 и гайки 5. Между винтом 4 и гайкой 5 устанавливается пружинная шайба 6, которая препятствует самоотвинчиванию гайки 5 во время работы сборной фасонной фрезы.

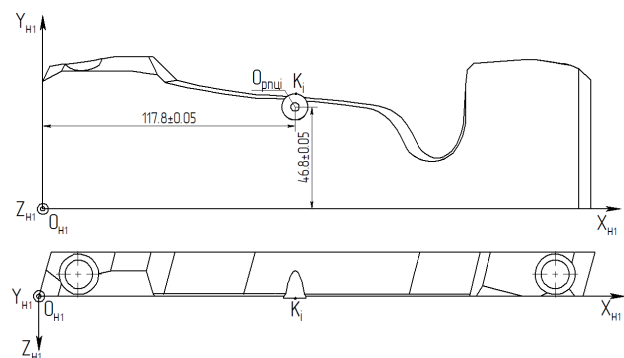


Рис. 2. Координаты центра оси режущих пластин  $O_{рпш}$  на ноже № 1 по оси  $X$  и  $Y$

Схема определения системы координат режущей пластины в ноже производится поворотом режущей пластины вокруг оси  $O_{рпш}Z_{рпш}$  на угол  $\omega_z$ , равный углу  $\varphi$ . После этого поворота вспомогательная система координат имеет положение  $X_{рпш}Y_{рпш}Z_{рпш}$  (рис. 4, а). Матрица  $[P_z]$  поворота на угол  $\omega_z$  имеет вид:

$$[P_z] = \begin{bmatrix} \cos\omega_z & -\sin\omega_z & 0 & 0 \\ \sin\omega_z & \cos\omega_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

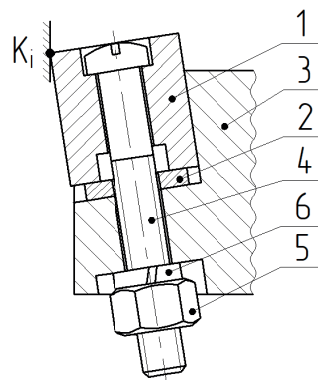


Рис. 3. Способ настройки главной базовой точки  $K_i$  режущей пластины



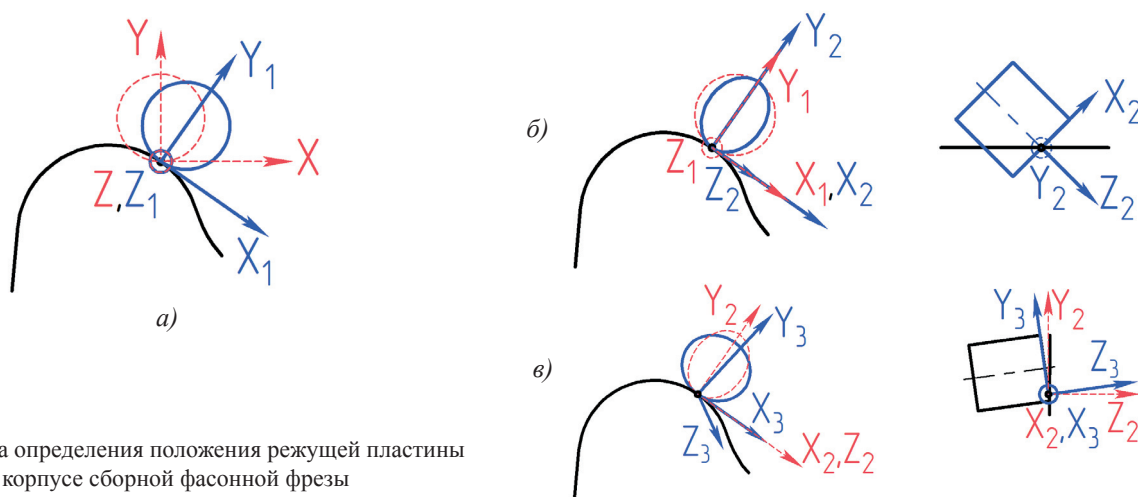


Рис. 4. Схема определения положения режущей пластины в корпусе сборной фасонной фрезы

Затем осуществляется поворот пластины вокруг оси  $O_{pn1}Y_{pn1}$  на угол  $\omega_y$ , равный углу наклона зуба  $\lambda_{pn}$ , который равен углу наклона стружечной канавки  $\omega$ . После этого поворота вспомогательная система координат имеет положение  $X_{pn2}Y_{pn2}Z_{pn2}$  (рис. 4, б). Матрица  $[P_y]$  поворота на угол  $\omega_y$  имеет вид:

$$[P_y] = \begin{bmatrix} \cos\omega_y & 0 & \sin\omega_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\omega_y & 0 & \cos\omega_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

В заключение выполняется поворот пластины на угол  $\omega_x$  относительно оси  $O_{pn2}X_{pn2}$  (рис. 4, в). По-

скольку режущая пластина выполнена в форме цилиндра, угол  $\lambda_{pn}$  полученный в предыдущем повороте, не меняет свое значение. Этот поворот окончательно определяет главный и вспомогательный задние углы ( $\alpha$  и  $\alpha_1$ , соответственно) и передний угол  $\gamma$ . А главный и вспомогательный углы в плане  $\phi$  и  $\phi_1$  зависят от глубины снимаемого слоя. Матрица  $[P_x]$  поворота на угол  $\omega_x$  имеет вид:

$$[P_x] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega_x & -\sin\omega_x & 0 \\ 0 & \sin\omega_x & \cos\omega_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

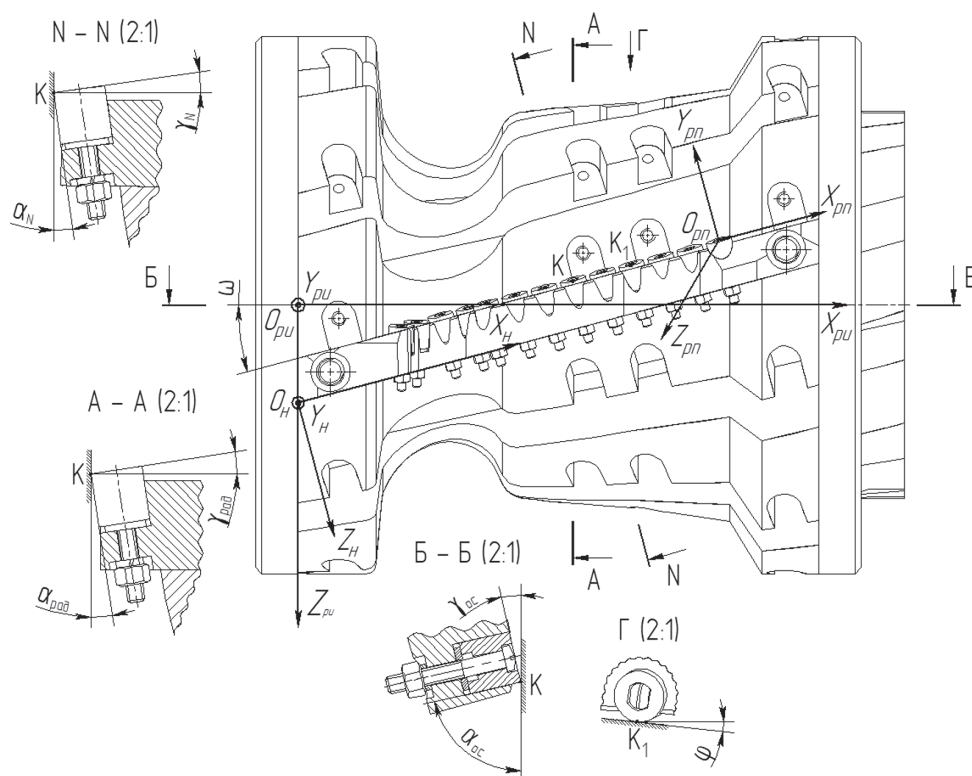


Рис. 5. Система координат инструмента, ножа и режущей пластины

Таким образом, координаты базовых точек пластины после ориентации в системе координат  $X_{rp} Y_{rp} Z_{rp}$  определяются по выражению:

$$[A_{pni}] = [P_x] \cdot [P_y] \cdot [P_z] \cdot \{R_i\}. \quad (7)$$

После завершения ориентации пластины в системе  $X_{rp} Y_{rp} Z_{rp}$  может быть осуществлен переход к системе координат инструмента  $X_{ри} Y_{ри} Z_{ри}$ :

$$\{A_{ui}\} = [M]_{rp-i} \cdot \{A_{pni}\}, \quad (8)$$

где  $[M]_{rp-i}$  представляет собой матрицу перехода от системы координат режущей пластины к системе координат режущего инструмента:

$$[M]_{rp-i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{Aui} \\ 0 & 1 & 0 & y_{Aui} \\ 0 & 0 & 1 & z_{Aui} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

На основе проведенных выше расчетов, строим положение ножа в сборке в корпусе сборной фасонной фрезы. Таким образом, координаты базовых точек пластины после ориентации в системе координат и конечное положение ножа с режущими пластинами в корпусе фасонной фрезы показано на *рис. 5*.

### Выводы

Разработана геометрическая модель, учитывающая особенности проектирования конструкции сборной фасонной фрезы как сборного инструмента, состоящего из множества взаимодействующих элементов. Определены положения и ориентация режущих и опорных пластин в корпусе фасонной фрезы с учетом их расположения в пазах ножа; параметры установки заготовки корпуса фасонной фрезы на станке для пазов под ножи и сухари.

**Мирзомахмудов Азимжон Рустамович** — аспирант кафедры инструментальной техники и технологий формообразования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*mirzoazim97@mail.ru*

**Исаев Александр Вячеславович** — канд. техн. наук, доц. кафедры инструментальной техники и технологий формообразования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*avisz@yandex.ru*

**Mirzomakhmudov Azimzhon Rustamovich** — postgraduate student at the sub-department of “Cutting Tools and Form-Generation Technologies” of MSUT “STANKIN”

*mirzoazim97@mail.ru*

**Isaev Alexander Vyacheslavovich** — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Cutting Tools and Form-Generation Technologies” of MSUT “STANKIN”

*avisz@yandex.ru*

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflicts of Interest Statement:** The authors have no conflicts of interest to declare.

Разработанная модель позволит в дальнейшем определить параметры установки корпуса фасонной фрезы при его изготовлении на станке второго порядка.

### Библиографический список

1. Гречишников В.А., Исаев А.В. Проектирование сборных фасонных фрез со сменными многогранными пластинами, расположенными вдоль винтовой стружечной канавки — М.: ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2014. — 158 с.: ил.

2. Гречишников В.А., Чулин И.В. Сборные фасонные фрезы со сменными режущими элементами, расположенными в осевой плоскости — М.: ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2014. — 121 с.: ил.

3. Исаев А.В. Проектирование сборных фасонных фрез с круглыми сменными многогранными пластинами, расположенными на винтовой поверхности / Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2011. № 1 (13). С. 61–66.

4. Кожевников Д.В., Гречишников В.А., Кирсанов С.В., Кокарев В.И., Схиртладзе А.Г. Режущий инструмент: Учебник для вузов / Под ред. С.В. Кирсанова. М.: Машиностроение, 2004. 512 с.: ил.

5. Коротков И.А., Схиртладзе А.Г., Борискин В.П. Фрезерный инструмент: учебное пособие. — Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2006. — 248 с.

6. Мирзомахмудов А.Р., Исаев А.В. Сборные фасонные фрезы для обработки деталей железнодорожной отрасли / Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2021. № 2 (57). С. 48–54.

7. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещеринова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1985. 496 с., ил.

8. Фрезерный инструмент: учебное пособие / В.В. Морозов, Владим. гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. — Владимир: Изд-во ВлГУ, 2014. — 214 с.

## АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ПРИВОДНЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ БЛОКОВ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ

### ANALYSIS OF DESIGNS OF DRIVEN TOOL SUSED FOR HIGH-PRECISION CNC LATHE MACHINES

*В условиях санкций задача исключения зависимости российских предприятий от импортных технологий встает особенно остро. Поэтому разработка и создание отечественной инновационной инструментальной оснастки для современного металлообрабатывающего оборудования является актуальной задачей. В статье приведен всесторонний анализ современных конструкций приводных инструментальных блоков для прецизионных токарных станков с ЧПУ и сформирована система исходных данных для проектирования новых конструкций таких блоков.*

*In the context of sanctions, the task of eliminating the dependence of Russian industrial enterprises on imported technologies is particularly acute. Therefore, the development and creation of domestic innovative tooling for modern metalworking equipment is an urgent task. The paper presents a comprehensive analysis of modern designs of driven tools used for high-precision CNC lathe machines and describes a system of initial data for creating new designs of these units.*

**Ключевые слова:** станочная оснастка, приводные инструментальные блоки, проектирование инструментальной оснастки.

**Keywords:** machine tooling, driven tools, tooling design.

#### Введение

В современном машиностроении по меньшей мере 40 % деталей машин изготавливаются на оборудовании токарной группы, причем большинство из них (до 75 %) имеют поверхности, не являющиеся поверхностями вращения (пазы, плоскости, карманы, шлицы, отверстия и др.), и которые требуют дополнительных видов механообработки: фрезерования, сверления отверстий, расположенных не на оси изделия, нарезание резьбы метчиком и т. д. [5]. В целях сокращения времени цикла обработки, повышения качества и снижения себестоимости изготовления продукции целесообразно вести механообработку на одном станке. Расширение технологических возможностей токарного станка с ЧПУ, в том числе прецизионного, возможно за счет установки в револьверную головку помимо неподвижных также и вращающихся режущих инструментов, закрепленных в приводных инструментальных блоках, конструкция которых предусматривает передачу вращения от привода станка к инструменту.

На рынке представлено большое количество моделей приводных инструментальных блоков (ПИБ) в основном зарубежных фирм-производителей, таких как

Alberti, Baruffaldi, EWS Tool, Heimtec, D'ANDREA, Mimatic Tool Systems, WTO, Sauter и пр.

Приводные инструментальные блоки являются частью технологической системы «станок — приспособление — инструмент — заготовка». Поэтому при проектировании ПИБ, как и любых других технических систем, целесообразно составить представление как о структуре самого объекта, так и о характере функциональных взаимосвязей с элементами и процессами окружающей среды [1, 2, 7]. Для этого удобно использовать схему в виде графовой модели (рис. 1). На данном рисунке совмещены два графа (вернее, гиперграфа):  $\Gamma_1$  — графовая модель функциональных взаимосвязей отдельных конструктивных элементов ПИБ с внешней средой и технико-экономическими показателями процесса обработки резанием и  $\Gamma_2$  — графовая модель внутренней структуры ПИБ. Вершины гиперграфа  $\Gamma_1 = \{1...6\} \vee (\{01...04\} + \{001...004\})$  соответствуют конструктивным элементам ПИБ (вершины 1...6), элементам технологической системы (вершины 01...04) и показателям технологического процесса обработки изделия (вершины 001...004), а вершины гиперграфа  $\Gamma_2 = \{1...6\} \cup (\{1_1 \dots 1_i\}, \dots, \{6_1 \dots 6_i\})$  — конструктивным параметрам ПИБ и их отдельным конструктивным параметрам.

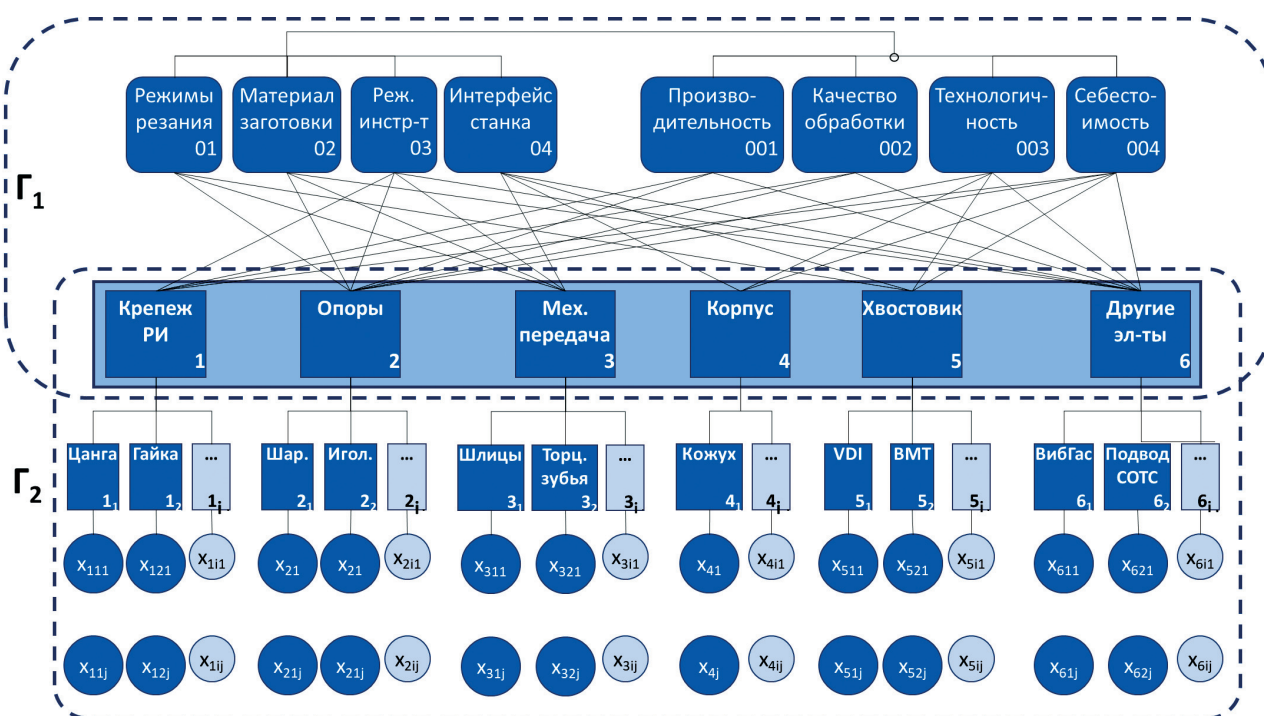


Рис. 1. Графовая модель приводного инструментального блока ( $\Gamma_1$ ) и технологической среды ( $\Gamma_2$ )

Конструктивные исполнения приводных инструментальных блоков весьма разнообразны. В общем случае в состав ПИБ входят хвостовик, механическая передача, подшипниковый узел, узел крепления режущего инструмента, корпус и другие элементы.

### Общая компоновка приводных инструментальных блоков

По направлению выходного шпинделя инструментальных головок различают: осевые (аксиальные), в которых ось режущего инструмента совпадает с осью входного вала (рис. 2, а) или параллельна ей

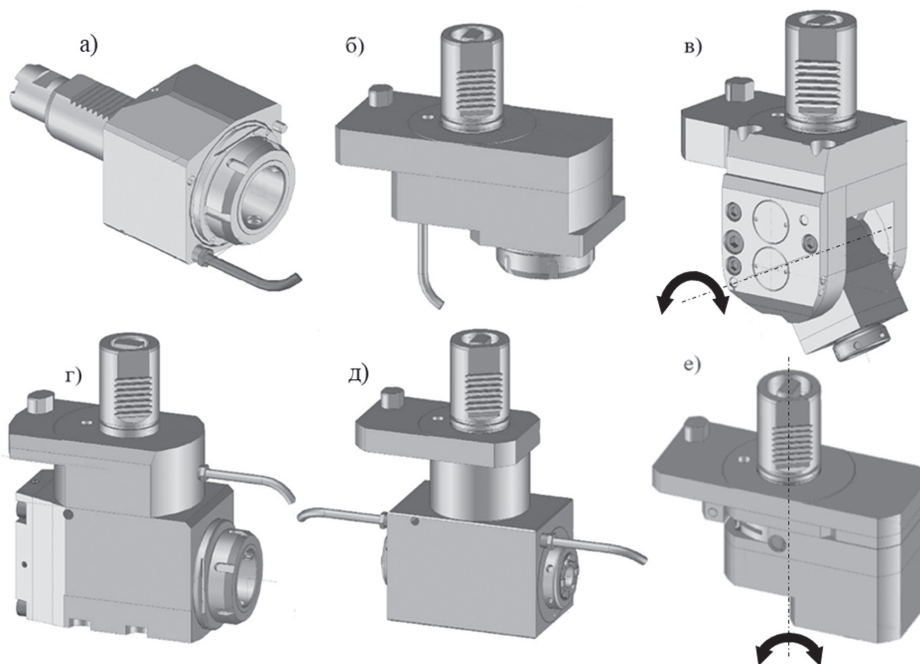


Рис. 2. Варианты компоновок приводных инструментальных блоков: а — осевой; б — осевой со смещенной осью; в — поворотный, 0–100°; г — радиальный; д — радиальный двухпозиционный двухсторонний; е — поворотный по оси Y, ±90°

(т. н. ПИБ со смещенной осью, *рис. 2, б*); поворотные, угол ориентации оси инструмента может регулироваться (*рис. 2, в, е*); радиальные (угловые), в которых ось инструмента направлена перпендикулярно оси входного вала (*рис. 2, з*); универсальные.

Кроме того, по направлению обработки различают правые и левые исполнения ПИБ. По количеству рабочих позиций выделяют однопозиционные и многопозиционные. Многопозиционные ПИБ могут быть односторонними либо двусторонними (*рис. 2, д*).

Приводные блоки могут быть совместимы с револьверными головками дискового типа или типа «звезда».

### Структурные составляющие приводных инструментальных блоков

Система крепления режущего инструмента (узел 1 на *рис. 1*) в большинстве современных ПИБ реализована в виде цангового патрона. Кроме того, используются различные элементы, включая фрезерные оправки, термопатроны, гидравлические патроны и др., для установки в них торцевых, дисковых, отрезных, зуборезных и прочих фрез, дисковых пил, метчиков, долбежных резцов и других инструментов. Система крепления инструмента, отличная от цангового патрона, может иметь интерфейс для присоединения к ПИБ в виде цилиндрических либо конических хвостовиков (с конусом 7:24, HSK и др.). На высоких частотах вращения инструмента на оснастку действуют большие центробежные силы. Поэтому в составе ПИБ должны использоваться только соответствующим образом отбалансированные инструментальные системы. Проектируя новые конструкции ПИБ необходимо учитывать существенный вклад системы крепления инструмента в общую жесткость технологической системы.

Подшипниковые опоры (узел 2 на *рис. 1*) вращающихся валов воспринимают нагрузки, возникающие в процессе обработки резанием, и вносят существенный вклад в показатели качества обработки. Современные технологии высокоскоростной, высокопроизводительной обработки и микрообработки требуют для своей полноценной реализации высокой жесткости всей технологической системы [4, 10]. Поэтому в общем случае критерием выбора подшипников являются параметры точности, жесткости и частоты вращения шпинделя.

Для валов шпиндельных узлов, которыми, по сути, являются ПИБ, в ряде случаев используют роликовые подшипники из-за их высокой нагрузочной способности и жесткости. Однако такое решение не обеспечивает необходимой скорости вращения. Поэтому наиболее распространенным типом подшипников для ПИБ являются высокоточные шариковые радиально-упорные, а также игольчатые подшипники [6].

Общие технические условия на подшипники качения должны соответствовать требованиям рос-

сийского стандарта ГОСТ 520-2002, международных стандартов ISO-492 или DIN 620 и американского регламента ABEC. Шпиндельные подшипники должны иметь точность по специальному классу ISO P4S (прецизионные), который, при необходимости, может быть повышен до P2 (сверхпрецизионные).

Под механической передачей (узел 3 на *рис. 1*) понимается система валов и зубчатых колес, используемых для передачи вращения от вала револьверной головки станка на приводной вал инструментального блока. Собственно передача крутящего момента реализуется посредством приводной муфты на торце входного вала. Наиболее широко применяются муфты со следующими видами соединений: торцовое шпоночное соединение (по DIN 1809), шлицевые соединения по DIN 5480 или DIN 5482, одноуровневые или двухуровневые торцовые зубчатые соединения (кулачки) типа TOEM или OKUMA, конические шестерни. Также встречаются торцевые шлицевые соединения типа BIGLIA NAKAMURA и MORI SEIKI (*рис. 3*).

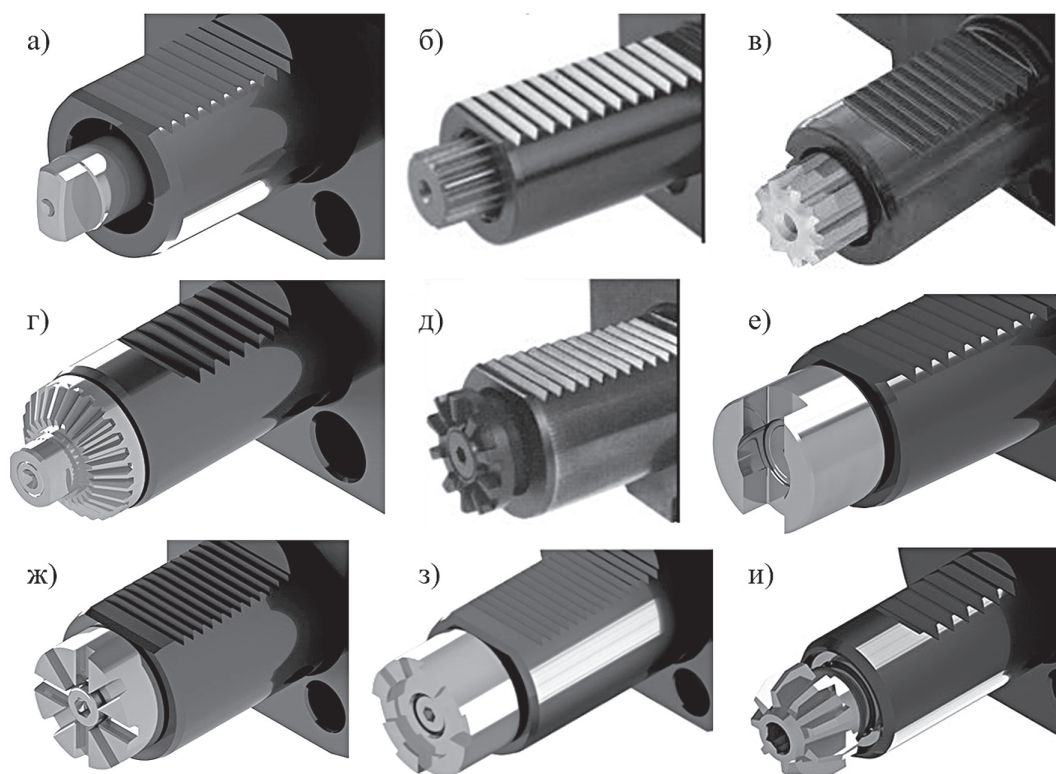
Корпус (узел 4 на *рис. 1*) должен обладать достаточной прочностью и износостойкостью, обеспечивая при этом компактность, технологичность и жесткость всей конструкции ПИБ.

Хвостовики (узел 5 на *рис. 1*) резцедержателей и приводного вспомогательного инструмента изготавливают в соответствии с ГОСТ 24900-81, а также стандартами DIN 69880 и ISO 10889, что обеспечивает совместимость с большинством современных станков с ЧПУ, в том числе прецизионных [3].

В современных токарных обрабатывающих центрах наиболее широко распространены две системы крепления стационарных и приводных инструментальных блоков — VDI (соответствует исполнению 3 по ГОСТ 24900-81) и BMT [8, 9]. Тип хвостовика выбирается в зависимости от типа посадочного гнезда револьверной головки станка.

В системе VDI (от нем. Verein Deutscher Ingenieure, Ассоциация немецких инженеров) крепление инструментального блока происходит с помощью клина с зубьями на хвостовике. Регулировка соосности инструмента инструментального блока осуществляется по шпонке или базовой поверхности. Инструментальные позиции могут устанавливаться параллельно оси револьверной головки либо перпендикулярно ей. Система обладает относительно низким осевым усилием зажима. Размеры хвостовиков VDI варьируются от VDI 16 до VDI 80.

Система BMT (от англ. Base-Mounted-Tool, закрепленный на основании инструмент) предусматривает зажим инструментальной державки на 4 болта с базированием по двум направляющим шпонкам, что дает относительно высокое усилие зажима. Соосность блока и инструмента не регулируется. Инструментальные позиции расположены радиально. Размеры хвостовиков BMT варьируются от BMT 45 до BMT 85.



**Рис. 3.** Муфты приводных инструментальных блоков: а — торцевая шпонка по DIN 1809; б — шлицевой вал по DIN 5480; в — шлицевой вал по DIN 5482; г — коническая шестерня; д — E IT Index; е — торцевой индексный паз; ж — MT TOEM; з — торцевой одноуровневый кулачок OKUMA; и — ABC Index

Система VDI имеет преимущество в скорости замены одного инструментального блока на другой, а система BMT — в более высокой жесткости крепления блока к револьверной головке станка, что позволяет достичь большей точности и повторяемости при обра-

ботке приводным инструментом. Предельная нагрузка на изгиб, кручение, а также точность позиционирования у системы BMT выше по сравнению с VDI до нескольких раз. Сравнительные характеристики систем крепления VDI и BMT приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Сравнительные характеристики систем крепления инструментальных блоков VDI и BMT

Характеристика	BMT	VDI
Жесткость крепления инструментального блока	Выше	Ниже
Передаваемый крутящий момент	Выше	Ниже
Производительность	Выше	Ниже
Настраиваемая высота центра	Нет	Да
Осевое усилие зажима инструментального блока	Выше	Ниже
Расположение инструментального блока	Радиальное	Радиальное/осевое
Быстрая переналадка	Ниже	Выше
Ассортимент инструментов	Меньше	Больше
Продолжительное фрезерование	Возможно	Не рекомендуется

Также имеет некоторое распространение система крепления CDI (англ. Coromant DiscInterface) фирмы Sandvik Coromant. За счет оригинальной конструкции крепежного узла, совместимого с хвостовиками инструментов Coromant Capto, эта система обеспечи-

вает относительно меньший вылет закрепляемого инструмента и, как следствие, повышенную жесткость. Система CDI обладает еще более высокой быстротой по сравнению с VDI, что при правильном использовании увеличивает производительность и ка-

чество обработки. Однако ассортимент инструмента для этой системы существенно беднее, чем для VDI и BMT, что, с учетом ухода с российского рынка фирмы Sandvik Coromant, ставит под сомнение целесообразность ее использования в нынешних условиях.

В зависимости от исполнения, в конструкции приводного блока могут быть предусмотрены и другие элементы (узел 6 на рис. 1), например, уплотнения и элементы для подвода смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС), диагностические датчики, датчики контроля включения инструмента, виброгасящие элементы и т. д.

Для более наглядного представления наиболее типичных характеристик приводных инструментальных блоков, в таблице 2 приведены обобщенные данные, полученные путем анализа каталогов известных производителей. Анализ проводился для однопозиционных ПБИ разных компоновок (осевая, радиальная, поворотная), имеющих хвостовик VDI различных размеров, оснащенных цанговым патроном ER. Представлены три варианта исполнения: 1) общего назначения с передаточным числом 1:1; 2) высокоскоростной (BC) с передаточным отношением меньше 1; 3) высокомоментный (BM) с передаточным отношением больше 1.

Таблица 2. Типичные характеристики приводных инструментальных блоков с хвостовиками VDI

Характеристика	VDI 25			VDI 30			VDI 40		
	BC	Общ.	BM	BC	Общ.	BM	BC	Общ.	BM
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	10000–25000	4000–6500	2000–4000	8000–18000	4000–6500	2000–4000	8000–15000	4000–6500	2000–6000
Крутящий момент, Нм	4–18	12–32	25–40	5–25	16–50	32–80	5–50	25–80	85–120
Передаточное отношение	1:5–1:2	1:1	2:1–3:1	1:5–1:2	1:1	2:1–3:1	1:1,5–1:4	1:1	2:1–3:1

Характер функциональных взаимосвязей конструктивных элементов ПИБ с параметрами технологической системы показан на графе  $\Gamma_1$  (рис. 1). На основании анализа графа  $\Gamma_2$  и данных для таблицы 2 выявлено, что исходными данными для проектирования новых ПИБ являются: характер обработки; типоразмер инструментальной оправки; мощность привода шпинделя (пиковая и непрерывная); максимальная нагрузка на шпиндель (осевая и радиальная); максимально допустимая скорость вращения шпинделя; вид привода (ременной привод, интегрированный мотор-шпиндель и т. д.). При этом важнейшим требованием к ПИБ вне зависимости от их конструктивного исполнения является обеспечение достаточной точности и жесткости, как статической, так и динамической. Таким образом, при разработке ПИБ целесообразно использовать методики, применяемые при расчете на жесткость переднего конца высокоскоростного станочного шпинделя.

### Заключение

Разработка новых конструкций приводных инструментальных блоков с повышенной жесткостью является актуальной задачей отечественной промышленности. Выявленные функциональные взаимосвязи между структурными частями такой оснастки и элементами технологической системы вместе с проведенным анализом современных решений ведущих фирм-производителей позволили определить

систему исходных данных, которая будет использована для дальнейших разработок собственных конструкций приводных инструментальных блоков с повышенными эксплуатационными характеристиками, предназначенных для прецизионных токарных станков с ЧПУ.

### Библиографический список

1. Гречишников В.А., Домнин П.В., Исаев А.В. и др. Формообразование и контроль режущих инструментов: учеб. пособие. М.: 2015. 151 с.
2. Гречишников В.А., Петухов Ю.Е., Косарев В.А., Домнин П.В. и др. Инструментальная техника, технология изготовления и САПР РИ: учеб. пособие. — М.: МГТУ «СТАНКИН». 2015. 351 с.
3. Инструментальная оснастка станков с ЧПУ: Библиотека инструментальщика / С.Н. Григорьев, М.В. Кохомский, А.Р. Маслов; под общ. ред. А.Р. Маслова. — М., 2006. — 544 с.
4. Исаев А.В., Козочкин М.П., Купцов В.Р. Особенности встречного и попутного фрезерования при обработке тонкостенных деталей // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2013. № 1 (24). С. 11–17.
5. Маслов А.Р. Приспособления для металлообрабатывающего инструмента — 3-е изд., испр. и доп. — М.: Машиностроение, 2008. — 319 с.
6. Металлорежущие станки: учебник: в 2 т. / под ред. В.В. Бушуева. — М.: Машиностроение, 2011. — Т. 1. — 608 с.

7. Наука и искусство системного моделирования инструментального обеспечения машиностроительных производств: монография / В.А. Гречишников. — М.: КУРС, 2016. — 373 с.

8. Преимущества револьверных головок с приводным инструментом [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.perytone.ru/about/stati/2947/>

9. Приводной инструмент для токарных станков с ЧПУ: разновидности [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://vseochpu.ru/privodnoj-instrument-dlya-tokarnyh-stankov-s-chpu/>

10. Шварцбург Л.Э., Иванова Н.А., Рябов С.А., Кулизаде Д.И. и др. Исследование параметров вибрации при реализации технологических процессов механической обработки // СТИН. 2020. № 9. С. 37–40.

**Исаев Александр Вячеславович** — канд. техн. наук, доц. кафедры инструментальной техники и технологий формообразования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*avisz@yandex.ru*

**Лядник Сергей Владимирович** — инженер 1 категории ИЦ «ЦТМ» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*lyadnik@gmail.com*

**Купцов Владимир Романович** — директор ИЦ «ЦТМ» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*v.kuptsov@stankin.ru*

**Isaev Alexander Vyacheslavovich** — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Cutting Tools and Form-Generation Technologies” of MSUT “STANKIN”

*avisz@yandex.ru*

**Lyadnik Sergey Vladimirovich** — engineer of the 1st category of the Engineering Center “Digital Technologies of Mechanical Engineering” of MSUT “STANKIN”

*lyadnik@gmail.com*

**Kuptsov Vladimir Romanovich** — Director of the Engineering Center “Digital Engineering Technologies” of MSUT “STANKIN”

*v.kuptsov@stankin.ru*

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflicts of Interest Statement:** The authors have no conflicts of interest to declare.

---



## МОДЕЛЬ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ФАСОННЫХ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПО МЕТОДУ ОБКАТКИ

### MODEL FOR SOLVING THE INVERSE PROBLEM OF PROFILING IN THE PROCESSING OF SHAPED HELICAL SURFACES USING THE HOBGING

*В данной статье описана последовательность преобразований систем координат и алгоритм действий для формирования модели решения обратной задачи профилирования при обработке поверхностей произвольного профиля, в том числе винтовых по методу обкатки. Модель позволяет определять форму профиля обрабатываемой поверхности в зависимости от формы профиля и числа заходов инструмента, параметров установки, кинематики процесса формообразования.*

*This article describes the sequence of transformations of coordinate systems and the algorithm of actions for the formation of a model for solving the inverse problem of profiling when processing surfaces of an arbitrary profile, including helical ones using the rolling method. The model allows you to determine the profile shape of the machined surface, depending on the shape of the profile and the number of tool passes, installation parameters, kinematics of the shaping process.*

**Ключевые слова:** режущий инструмент, винтовая поверхность, математическая модель, профилирование, обратная задача, алгоритм.

**Keywords:** cutting tool, helical surface, mathematical model, profiling, inverse problem, algorithm.

Решение обратных задач профилирования в сложных процессах формообразования очень важно. Системный подход к исследованию сложных режущих инструментов обуславливает необходимость максимального учета всех факторов, оказывающих влияние на процесс формообразования, как на результат взаимодействия элементов системы: станок — приспособление — инструмент — деталь — управление. Развитие методов математического моделирования, оптимизации, численного анализа, аппаратных и программных средств позволяет увеличить число учитываемых факторов, определить их взаимное влияние и расширить круг решаемых задач.

Для решения обратной задачи профилирования необходимо формализовать процесс определения координат точек на производящей поверхности инструмента в системе координат, связанной с исходной поверхностью [1]. С этой целью необходимо реализовать

последовательный переход от системы координат инструмента к системе координат обрабатываемой детали с учетом всех движений, которые совершают инструмент и деталь, а также их взаимного расположения.

С точки зрения алгоритмизации и программной реализации модели, решающей задачу профилирования, в основе этих преобразований наиболее удобно применять матричный метод преобразований систем координат. Этот подход описан в ряде литературных источников [2, 3, 4, 5], и его применяют в процессах проектирования режущих инструментов. Необходимо использовать подпрограмму (процедуру или функцию) получения матриц преобразования, предполагающих то или иное преобразование системы координат. Такая подпрограмма реализуется в виде функции  $MO$  (1), аргументами которой являются три поворота и три перемещения по осям:

$$MO(xy, yz, zx, Ax, Ay, Az) = \begin{pmatrix} \cos(xy) \cdot \cos(zx) & \sin(-xy) & \sin(zx) & Ax \\ \sin(xy) & \cos(yz) \cdot \cos(xy) & \sin(-yz) & Ay \\ \sin(-zx) & \sin(yz) & \cos(zx) \cdot \cos(yz) & Az \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

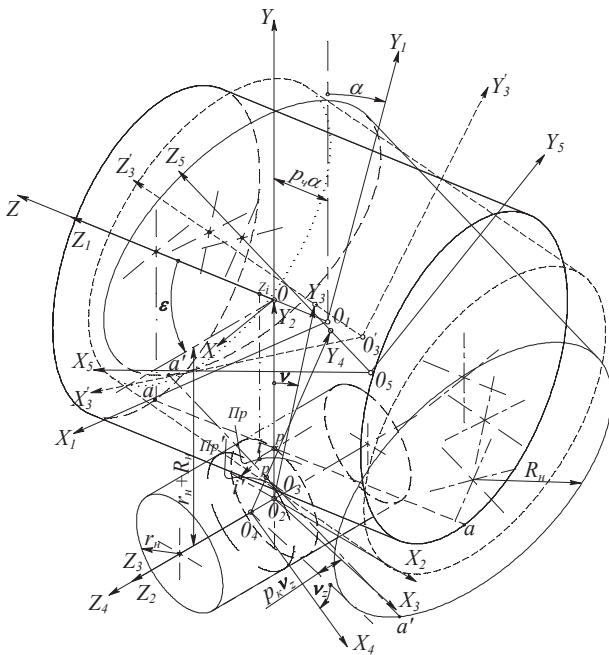
Описанная подпрограмма позволяет в автоматическом режиме из исходной матрицы  $MO$  сформировать матрицы последовательных преобразований систем координат от профиля детали к искомой поверхности инструмента.

Модель решения обратной задачи профилирования червячных фрез, обращаясь к подпрограмме  $MO$ , должна формировать заданное число матриц преобразования  $F$  в соответствии с заданным порядком  $n$  и численными значениями, характеризующими каждое преобразование в зависимости от исходных данных.

Исходные данные модели следующие:

- 1) координаты и число точек профиля червячной фрезы  $x_i, y_i, i$ ;
- 2) число преобразований систем координат  $F$  и номер  $n$  (порядок) каждого преобразования;
- 3) угловые  $x, y, z$  и линейные  $Ax, Ay, Az$  перемещения, характеризующие преобразования систем координат, которые задают исходя из кинематики процесса обработки. Данные для линейных и угловых преобразований:  $r_n$  и  $R_n$  — радиусы начальных цилиндров винтовой поверхности детали и червячной фрезы;  $p_k, p_q$  — винтовые параметры винтовой поверхности детали и червячной фрезы;  $\varepsilon$  — угол скрещивания;  $Z_k$  — число зубьев обрабатываемой детали;  $n$  — число заходов червячной фрезы.

На *рис. 1* показана расчетная схема обратной задачи профилирования, которая рассматривается как совокупность координат, образующих траекторию движения режущих кромок червячной фрезы при обработке винтовой поверхности детали при встречном фрезеровании.



**Рис. 1.** Схема модели обратной задачи профилирования червячной фрезы при обработке винтовой поверхности детали

Основное содержание схемы заключается в том, что начальный цилиндр инструмента, расположенный под углом скрещивания относительно начального цилиндра детали, катится без проскальзывания по начальному цилиндру детали, при этом система координат детали остается неподвижной, а все движения передаются инструменту. Система координат  $X_2 Y_2 Z_2$  совершает винтовое движение вдоль оси детали, при этом винтовые направляющие инструмента проецируются на координатную плоскость  $X_2 Z_2$  в каждом дискретном положении. Совокупность проекций на плоскость образуют семейство, которое и формирует профиль детали.

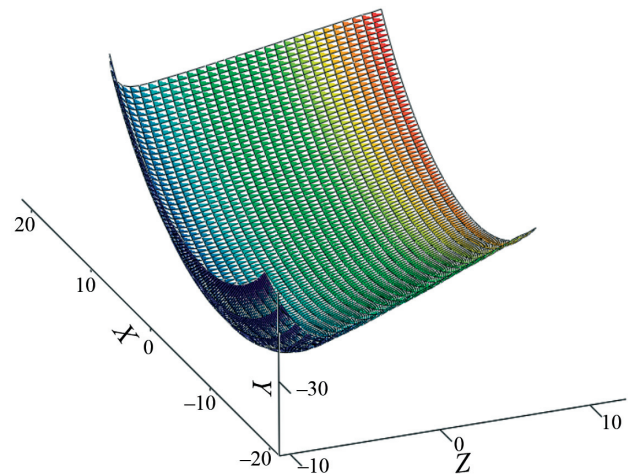
Схема включает в себя четыре ( $F = 4$ ) преобразования систем координат в следующей последовательности.

1. Поворот на угол  $\alpha$  вокруг оси  $Z (k = 1)$  системы координат  $XYZ$  и согласованное перемещение вдоль этой же оси на расстояние  $P_c \cdot \alpha$ , где  $P_c$  — винтовой параметр производящей поверхности червячной фрезы (*рис. 2*).

Подпрограмма на основании приведенных исходных данных сформирует в соответствии с разработанным алгоритмом из исходной матрицы  $MO$  (1) матрицу преобразования  $M1$  (2):

$$M1 = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & P_c \cdot \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

2. Перемещение вдоль оси  $Y (k = 2)$  на расстояние  $Ay = (r_{нк} + R_{кч})$  и поворот на угол  $zx = -\varepsilon$  скрещивания осей червячной фрезы и обрабатываемой



**Рис. 2.** Результат моделирования (визуализации) первого преобразования

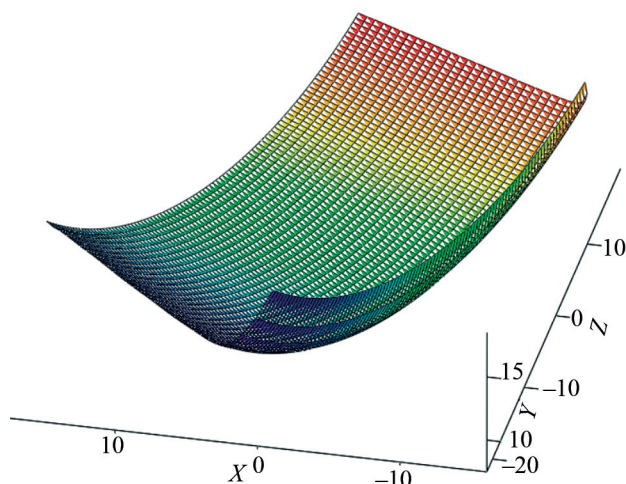


Рис. 3. Результат моделирования (визуализации) третьего преобразования

детали (рис. 3). Первый модуль сформирует на основании приведенных исходных данных из МО матрицу  $M2$ , которая будет иметь вид (3):

$$M2 = \begin{pmatrix} \cos(\varepsilon) & 0 & \sin(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & (r_{нк} + R_{нч}) \\ -\sin(\varepsilon) & 0 & \cos(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

3. Третьим преобразованием реализуется формирование винтовых проекций винтовых линий образующих производящей поверхности инструмента. Поворот вокруг оси  $Z$  ( $k = 3$ ) системы координат на угол  $\chi = -\nu$ . Переменная  $\nu$  реализует винтовое движение, формирующее обрабатываемую поверхность детали и согласованное перемещение вдоль этой оси на расстояние реализует винтовое движение, формирующее обрабатываемую поверхность детали и согласованное перемещение вдоль этой оси на расстояние  $AZ = -p_k \cdot \nu$ ,

где  $p_k = \frac{r_k}{\tan(\omega)}$   $r_k$  — наружный радиус обрабатываемой детали,  $\omega$  — угол наклона винтовой канавки обрабатываемой детали (рис. 4). Угол  $\Delta\nu = \frac{p_q \cdot \alpha}{r_{нк}}$  — дополнительный поворот обрабатываемой детали вокруг своей оси, связанный с углом  $\alpha$  из выражения (2).

В соответствии с разработанным алгоритмом, матрица  $M3$  указанного преобразования будет иметь вид (4):

$$M3 = \begin{pmatrix} \cos(\nu + \Delta\nu) & \sin(\nu + \Delta\nu) & 0 & 0 \\ -\sin(\nu + \Delta\nu) & \cos(\nu + \Delta\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & p_k \cdot \nu \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

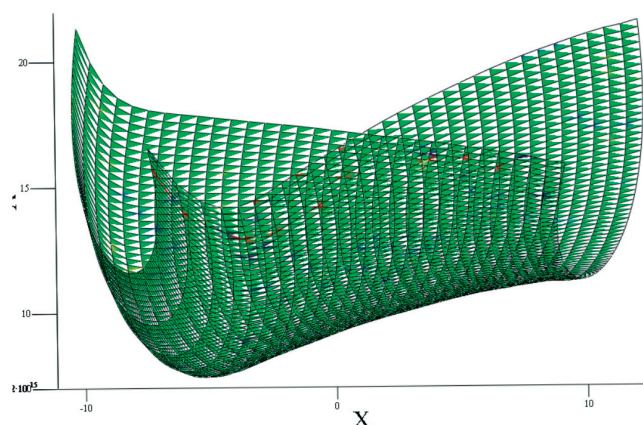


Рис. 4. Результат моделирования (визуализации) второго преобразования

4. Перемещение вдоль оси  $X$  ( $k = 4$ ) системы координат на расстояние  $Ax = -r_n \cdot \varphi$ , где  $r_n$  — радиус начального цилиндра обрабатываемой детали, и согласованный поворот (обкатка) вокруг оси  $Z$  на угол  $\chi = \varphi$ , являющейся переменной, реализующей движение обкатки начального цилиндра червячной фрезы по начальному цилиндру детали. На рис. 5 приведен результат моделирования при решении прямой задачи профилирования, полученный в среде Mathcad для случая обработки винтовых канавок концевых фрез специальной червячной фрезой.

В соответствии с разработанным алгоритмом матрица  $M4$  указанного преобразования будет иметь вид (5):

$$M4 = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 & r_n \cdot \varphi \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

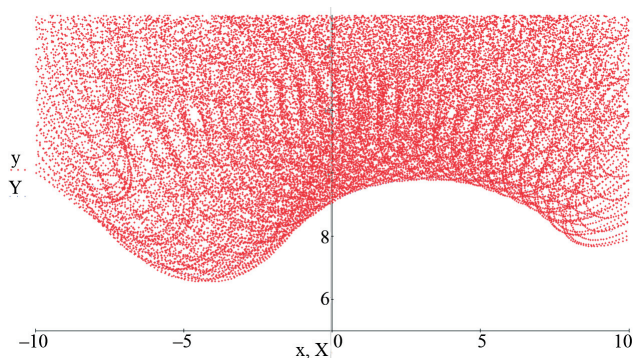


Рис. 5. Результат моделирования четвертого преобразования

Результирующая численная модель  $MR$  представляет собой матрицу столбец и определяется выражением (6):

$$MR = \begin{pmatrix} x_{3i} \\ y_{3i} \\ z_{3i} \\ 1 \end{pmatrix} = M\Sigma \cdot \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

где  $M\Sigma = M4 \cdot M3 \cdot M2 \cdot M1$ .

Разработанный метод решения обратной задачи профилирования при обработке фасонных и, в том числе, винтовых поверхностей, основанный на построении огибающей проекции направляющих линий на исходной поверхности при ее дискретных положениях, с учетом кинематики процесса формообразования, построенных во взаимосвязях между исходным профилем инструментальной поверхности, параметрами установки, применительно к червячным и дисковым инструментам, позволяет производить оценку влияния параметров установки на форму обрабатываемой поверхности, оценить верность решения прямой задачи профилирования, позволяет определять параметры установки инструмента в случае применения инструмента стандартного профиля.

#### Библиографический список

1. Домнин П.В., Петухов Ю.Е. Численный метод профилирования червячной фрезы для обработки фасонной винтовой поверхности // Будущее машиностроения России: Сб. докладов XII Всерос. Конф. молодых ученых и специалистов (с международным участием). — 2019. — С. 41–44.
2. Домнин П.В. Разработка процесса формообразования фасонных винтовых поверхностей инструментов на основе применения стандартных концевых и торцевых фрез: дис. канд. тех. наук: 05.03.07: защищена 2012: утв. / Домнин П.В. — Москва, 2012. — 199 с.
3. Петухов Ю.Е., Домнин П.В., Чжэн С. Профилирование червячных фрез численным методом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2017. — № 8–2. С. 341–347.
4. Перепелица Б.А. Режущие инструмента как аффинные многообразия // Резание и инструмент. — 1975. — вып. 14. — С. 36–40.
5. Петухов Ю.Е. Формообразование численными методами. — М.: «Янус-К», 2004. — 200 с.

**Петухов Юрий Евгеньевич** — профессор кафедры инструментальной техники и технологий формообразования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*u.petuhov@stankin.ru*

**Домнин Пётр Валерьевич** — канд. техн. наук, доц. кафедры инструментальной техники и технологий формообразования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*\_domnin@rambler.ru*

**Petukhov Yury Evgenovich** — professor at the sub-department of “Instrumental equipment and shaping technology” of MSUT “STANKIN”

*u.petuhov@stankin.ru*

**Domnin Petr Valerevich** — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Instrumental equipment and shaping technology” of MSUT “STANKIN”

*\_domnin@rambler.ru*

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflicts of Interest Statement:** The authors have no conflicts of interest to declare.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ЧАСОВОГО ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА С ПОМОЩЬЮ СРЕДСТВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ В СРЕДЕ MATHCAD

## MATHEMATICAL MODELING OF THE CLOCK WHEEL'S PROFILE USING MATHEMATICAL PROGRAMMING TOOLS IN THE MATHCAD ENVIRONMENT

*В данной статье приведён алгоритм, позволяющий сформировать параметризованную математическую модель профиля часового зубчатого колеса в среде Mathcad, как совокупность заданного количества дискретных точек. Модель может быть использована для формирования исходных данных для решения прямой задачи профилирования специальных часовых червячных фрез.*

*This article presents an algorithm, that helps to generate a parameterized mathematical model of the clock wheel profile in the Mathcad environment, as a set of given numbers of discrete points. This mathematical model can be used to forming the initial data for solving the direct problem of profiling clock wheels by a numerical method.*

**Ключевые слова:** часовое зубчатое колесо, математическая модель, параметрическая модель, алгоритм, режущий инструмент, поверхность.

**Keywords:** clock wheel, mathematical model, parametrical model, algorithm, cutting tool, surface.

В настоящее время проектирование режущих инструментов невозможно представить без систем автоматизированного проектирования (САПР). Современные вычислительные системы позволяют комплексно решать вопросы, которые возникают на всех этапах от проектирования до изготовления режущих инструментов. Это актуально и для изготовления специальных червячных фрез, применяемых в часовой промышленности, так как к деталям хронометра предъявляются высокие требования по точности [1, 3].

В данной статье приведён алгоритм, позволяющий сформировать параметризованную математическую модель часового зубчатого колеса, как массив заданного количества дискретных точек [4, 5]. Модель необходима для дальнейшего решения прямой задачи профилирования червячных фрез.

Формирование математической модели можно разделить на 4 этапа: 1) проведение расчёта геометрических параметров; 2) определение координат опорных точек профиля часового зубчатого колеса в осевом сечении; 3) интерполяция участков профиля для получения непрерывного контура; 4) формирование трёхмерной поверхности [5].

На первом этапе работы был проведён расчёт геометрических параметров часового зубчатого колеса, применяемого на Чистопольском часовом заводе «Восток» (рис. 1).

Исходными данными являются параметры: модуль  $m = 0.14$ ; число зубьев  $z = 44$ ; число зубьев триба  $z_1 = 8$ ; тип зубчатого колеса — 2-й.

Для вычисления значений геометрических параметров часового зубчатого колеса были использованы зависимости, описанные в ГОСТ 13678-73 [2]. На рис. 2 приведена расчетная схема профиля часового зубчатого колеса, обозначены размеры всех конструктивных элементов профиля.

Модель была разработана в виде алгоритма и реализована в среде математического моделирования Mathcad. Ниже приведены зависимости основных конструктивных параметров колеса с учетом синтаксиса среды Mathcad [6, 7].

Делительный диаметр:

$$D = m \cdot z \quad (1)$$

Смещение окружности центров (значение  $\Delta c1$  см. в табл. 1):

$$\Delta c = \Delta c1 \cdot m \quad (2)$$

Диаметр окружности центров:

$$D_c = D - 2 \cdot D_c$$

Окружной шаг:

$$p_t = \pi \cdot m \quad (3)$$

Угловой шаг:

$$\tau := \frac{360}{z} \quad (4)$$

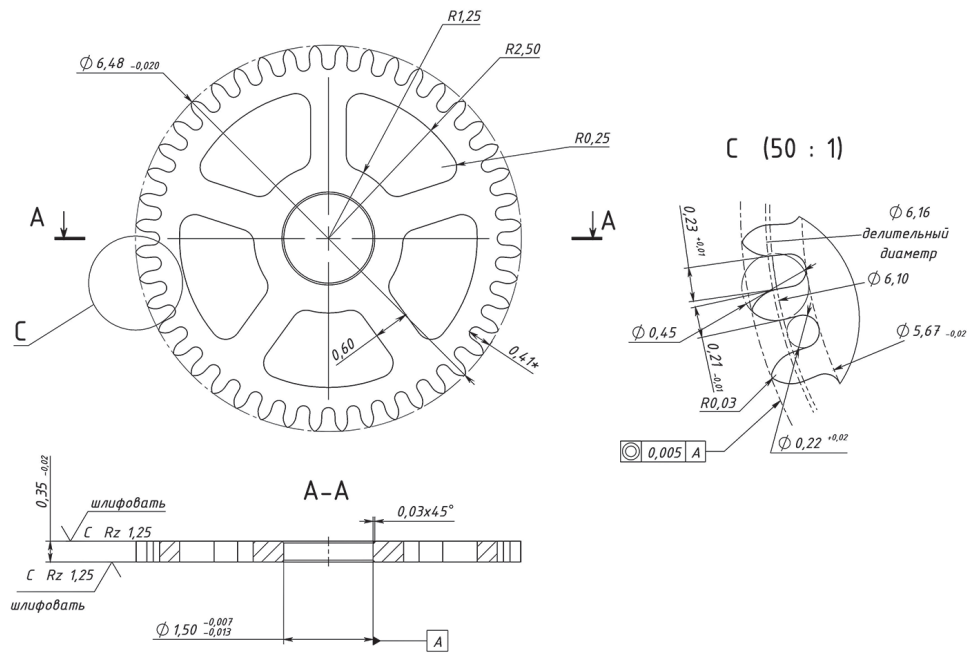


Рис. 1. Чертеж обрабатываемого зубчатого колеса

Радиус образующей зуба (значение  $\rho_1$  см. в табл. 1):

$$\rho = \rho_1 \cdot m \quad (6)$$

Радиус скругления зуба (значение  $\rho a$  см. в табл. 2):

$$\rho a = \rho a_1 \cdot m \quad (7)$$

Таблица 1. Значения коэффициентов  $\rho_1$  и  $\Delta c_1$

Коэф.	Значение	Коэф.	Значение	Число зубьев $z$
$\rho_1$	1.9	$\Delta c_1$	0.16	$8 \leq z \leq 12$
	1.95		0.18	$12 < z \leq 20$
	2.00		0.21	$20 < z \leq 50$
	2.1		0.24	$50 < z$

Диаметр основной окружности (значение  $st_1$  см. в табл. 2):

$$\delta := \frac{\left( \arccos \left( \frac{D^2 + Dc^2 - 4 \cdot \rho^2}{2 \cdot D \cdot Dc} \right) \right)}{\text{deg}} \cdot \frac{st_1 - \tau}{2}$$

$$Da := Dc \cdot \cos(\delta \cdot \text{deg}) + 2 \cdot \rho a + \sqrt{4 \cdot (\rho - \rho a)^2 - Dc^2 \cdot \sin^2(\delta \cdot \text{deg})}$$

Таблица 2. Значения коэффициентов  $\rho a_1$  и  $st_1$

Коэф.	Значение	Число зубьев $z_1$	Коэф.	Значение	Число зубьев $z$
$\rho a_1$	0.4	$z_1 = 6$	$st_1$	0.4	$10 \geq z$
	0.3	$z_1 > 6$		0.42	$z \geq 10$

Диаметр окружности впадин (значение  $hf_1$  см. в табл. 3):

$$Df := D - 2 \cdot hf_1 \cdot m \quad (9)$$

Таблица 3. Значения коэффициента  $hf_1$

Коэф.	Значение	Число зубьев $z$
$hf_1$	1.49	$z = 8$
	1.60	$z = 9$
	1.7	$z > 9$

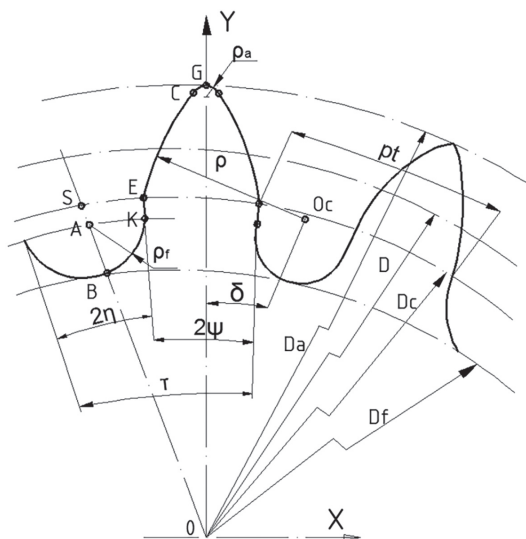


Рис. 2. Графическая схема элементов зубчатого колеса с опорными точками

Окружная толщина по общей нормали:

$$hf := \frac{D - Df}{2} st := st1 \cdot pt \quad (10)$$

Толщина зуба по общей нормали:

$$sw := 2 \cdot \rho - Dc \cdot \sin(\delta \cdot deg) \quad (11)$$

Половина угловой толщины зуба:

$$\Psi := \frac{(\text{asin}(\frac{2\rho}{Dc}))}{deg} - \delta \quad (12)$$

Половина угловой толщины впадины:

$$\eta := \frac{\tau}{2} - \Psi \quad (13)$$

Радиус кривизны переходящей привой:

$$\rho f := 0.5 \cdot Df \cdot \frac{\sin(\eta \cdot deg)}{1 - \sin(\eta \cdot deg)} \quad (14)$$

На втором этапе формирования модели определяются координаты опорных точек половинки профиля зуба. Опорные точки делят его на отдельные участки, которые описываются известными кривыми (рис. 2).

Половинка профиля зуба состоит из четырёх участков (рис. 2): прямолинейного  $EK$ , дуги  $BK$ , радиуса  $\rho f$ , впадины зуба, радиуса  $\rho$ , дуги  $EC$ , образующую участок зуба и дуги  $CG$ , являющейся скруглением вершины зуба радиусом  $\rho a$ . Таким образом, для построения половинки профиля зуба часового зубчатого колеса и вычисления координат точек профиля, достаточно задать 5 опорных точек:  $B, K, F, C, G$ . Также необходимо ввести дополнительные опорные точки:  $A, S$  и  $Oc$ , которые необходимы для интерполяции участков профиля [4, 5].

Запись формул (15)–(21) приведена в синтаксисе среды Mathcad.

Координаты точки  $E$ :

$$\begin{aligned} XE &:= -\frac{Dc}{2} \cdot \sin(\Psi \cdot deg) \\ XE &:= \frac{Dc}{2} \cdot \cos(\Psi \cdot deg) \end{aligned} \quad (15)$$

Координаты точки  $K$ :

$$\begin{aligned} XK &:= -\left(\frac{Dc}{2} - p\right) \cdot \sin(\Psi \cdot deg) \\ XK &:= \left(\frac{Dc}{2} - p\right) \cdot \cos(\Psi \cdot deg) \\ p &:= hf - \frac{D - Dc}{2} - \rho f \end{aligned} \quad (16)$$

Координаты точки  $A$ :

$$\begin{aligned} XA &:= -\left(\frac{Dc}{2} - p\right) \cdot \sin((\eta + \Psi) \cdot deg) \\ YA &:= \left(\frac{Dc}{2} - p\right) \cdot \cos((\eta + \Psi) \cdot deg) \end{aligned} \quad (17)$$

Координаты точки  $B$ :

$$\begin{aligned} XB &:= -\left(\frac{Df}{2}\right) \cdot \sin((\eta + \Psi) \cdot deg) \\ YB &:= \left(\frac{Df}{2}\right) \cdot \cos((\eta + \Psi) \cdot deg) \end{aligned} \quad (18)$$

Координаты точки  $G$ :

$$\begin{aligned} XG &:= 0 \\ YG &:= \frac{Da}{2} \end{aligned} \quad (19)$$

Координаты точки  $Oc$ :

$$\begin{aligned} XOc &:= \frac{Dc}{2} \cdot \sin(\delta \cdot deg) \\ YOc &:= \frac{Dc}{2} \cdot \cos(\delta \cdot deg) \end{aligned} \quad (20)$$

Координаты точки  $C$ :

$$\begin{aligned} XC &:= -\rho a \cdot \cos\left(\text{acos}\left(\frac{XOc}{\rho - \rho a}\right)\right) \\ YC &:= \rho a \cdot \sin\left(\text{acos}\left(\frac{XOc}{\rho - \rho a}\right)\right) + \left(\frac{Da}{2} - \rho a\right) \end{aligned} \quad (21)$$

Для удобства использования опорных точек в процессе интерполяции участков профиля их координаты заносятся в два линейных массива  $X$  и  $Y$ :

$$\begin{aligned} X &:= (XEXKXSXAXGXBXCXOc) \\ Y &:= (YEYKYSYAYGYBYCYOc) \end{aligned}$$

На третьем этапе производится интерполяция участков профиля зуба часового зубчатого колеса с целью получения непрерывного контура с заданным числом точек.

Чтобы получить профиль из массива точек, нужно собрать параметрический «скелет» из всех геометрических параметров зубчатого колеса. Найденные опорные точки:  $B, K, E, C, G$  должны быть соединены между собой множеством промежуточных точек с равномерным шагом [4, 5].

Удобнее всего описать профиль набором точек с координатами, записанными в линейные массивы  $Xm$  и  $Ym$  с числом элементов  $n$ . В данном случае, переменная  $n = 300$ . Точки должны быть равномерно распределены между четырьмя участками. Поэтому, вводятся переменные  $n1, n2, n3$  и  $n4$ , отвечающие за количество точек на каждом участке, причём каждый участок должен иметь целое число точек (расчетное значение переменных округляется до ближайшего целого значения):  $n1$  — участок  $BK$ ;  $n2$  — участок  $KE$ ;  $n3$  — участок  $EC$ ;  $n4$  — участок  $CG$ .

Для того чтобы равномерно распределить точки, необходимо знать длину всей половинки профиля зуба часового зубчатого колеса, а также длину каждого из участков. Чтобы определить длину дуги, необходимо рассчитать угол сектора, что возможно сделать через свойство прямоугольных треугольников.

Запись формул (22) приведена в синтаксисе среды Mathcad.

$$\begin{aligned}
 l1 &:= \rho f \cdot \left( \frac{\pi}{2} + \operatorname{asin}\left(\frac{YK - YA}{\rho f}\right) - \operatorname{asin}\left(\frac{XB - XA}{\rho f}\right) \right) \\
 l2 &:= \sqrt{(YE - YK)^2 + (XE - XK)^2} \\
 l3 &:= \rho \cdot \left( \frac{\pi}{2} + \operatorname{asin}\left(\frac{YOc - YE}{\rho}\right) - \operatorname{asin}\left(\frac{XOc}{\rho - \rho a}\right) \right) \quad (22) \\
 l4 &:= \rho a \cdot \operatorname{asin}\left(\frac{XOc}{\rho - \rho a}\right) \\
 L &:= l1 + l2 + l3 + l4
 \end{aligned}$$

Далее была проведена круговая интерполяция, для чего организуется цикл с предусловием и счетчиком, и применяются элементы программирования Mathcad (рис. 3, 4). Таким образом, формируются массивы точек:  $Xm$  — по оси  $X$  и  $Ym$  — по оси  $Y$  для половинки профиля зуба. Чтобы отобразить вторую половинку были введены массивы точек  $X2m = -Xm$  и  $Y2m = Ym$ , соответственно (рис. 3, 4).

В результате формируется общий график для опорных и дополнительных точек зуба обрабатываемого зубчатого колеса в декартовой системе координат и с учётом интерполяции отображается заданное количество равномерно распределенных точек, которые полностью формируют профиль в зависимости от исходных данных (рис. 5).

Современные подходы к решению задач профилирования червячных фрез основаны на численном представлении исходной поверхности и требуют описания профиля в виде набора дискретных точек [3]. При необходимости можно получить профиль всего зубчатого колеса или профиль его сегмента с определённым количеством зубьев. Для этого необходимо создать круговой массив вычисленного участка [5]. На рис. 6 представлена запись в среде Mathcad в виде алгоритма для формирования профиля с четырьмя зубчиками в виде массива точек. На рис. 7 представлен профиль сектора часового зубчатого колеса графика.

```

Xm := for i ∈ 0..n + 1
    | xqi ← ρf · sin( asin( (XB - XA) / ρf ) + q1 / n1 · i ) + XA if 0 ≤ i ≤ n1
    | xqi ← XK + (XE - XK) / n2 · (i - n1) if n1 < i ≤ (n2 + n1)
    | xqi ← XOc - ρ · sin( π / 2 + asin( (YOc - YE) / ρ ) - q2 / n3 · (i - n2 - n1) ) if (n1 + n2) < i ≤ (n2 + n1 + n3)
    | xqi ← -ρa · sin( π / 2 - acos( XOc / (ρ - ρa) ) - q3 / n4 · (i - n3 - n2 - n1) ) if (n3 + n1 + n2) < i ≤ n
    | return xq

X2m := -Xm
    
```

Рис. 3. Вычисление массива  $Xm$  с помощью элемента программирования в среде Mathcad

```

Ym := for i ∈ 0..n + 1
    | yqi ← YA - ρf · cos( asin( (XB - XA) / ρf ) + q1 / n1 · i ) if 0 ≤ i ≤ n1
    | yqi ← YK + (YE - YK) / n2 · (i - n1) if n1 < i ≤ (n2 + n1)
    | yqi ← ρ · cos( π / 2 + asin( (YOc - YE) / ρ ) - q2 / n3 · (i - n2 - n1) ) + YOc if (n1 + n2) < i ≤ (n2 + n1 + n3)
    | yqi ← (Da / 2 - ρa) + ρa · cos( π / 2 - acos( XOc / (ρ - ρa) ) - q3 / n4 · (i - n3 - n2 - n1) ) if (n3 + n1 + n2) < i ≤ n
    | return yq

Y2m := Ym
    
```

Рис. 4. Вычисление массива  $Ym$  с помощью элемента программирования в среде Mathcad



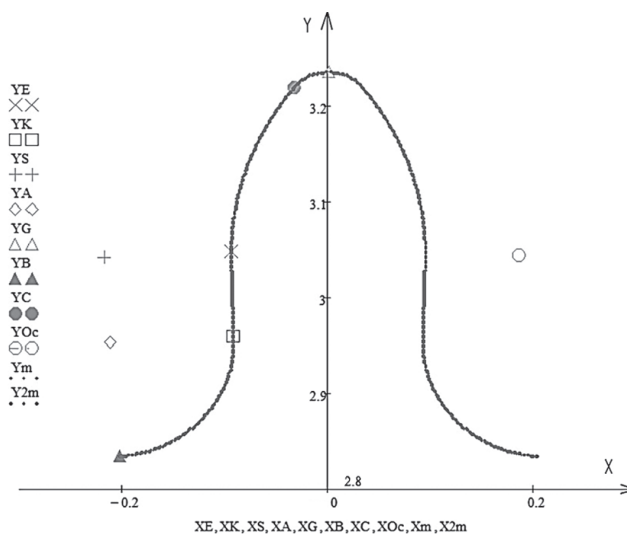


Рис. 5. График результата интерполяции опорных точек профиля зуба часового зубчатого колеса

```

M1 := | s ← (длина(Xm) - 1)
      | for i ∈ 0..2s
      |   | xi ← | Xmi if i ≤ s
      |           | X2ms-(i-s) if i > s
      |   | yi ← | Ymi if i ≤ s
      |           | Y2ms-(i-s) if i > s
      | return ( x )
      |         ( y )

M := | i ← 0
      | z1 ← 0
      | for m ∈ 1..4
      |   for j ∈ 0..длина(M10) - 1
      |     | qi ← ( cos( (m · 2 · π) / z ) sin( (m · 2 · π) / z ) ) [ (M10)j ]
      |           | -sin( (m · 2 · π) / z ) cos( (m · 2 · π) / z ) [ (M11)j ]
      |     | i ← i + 1
      |   for m ∈ 0..i - 1
      |     | qxm ← (qm)0
      |     | qym ← (qm)1
      |   return ( qx )
      |           ( qy )
    
```

Рис. 6. Организация алгоритмов в среде Mathcad для создания профиля зубчатого колеса заданным числом повторяющихся элементов

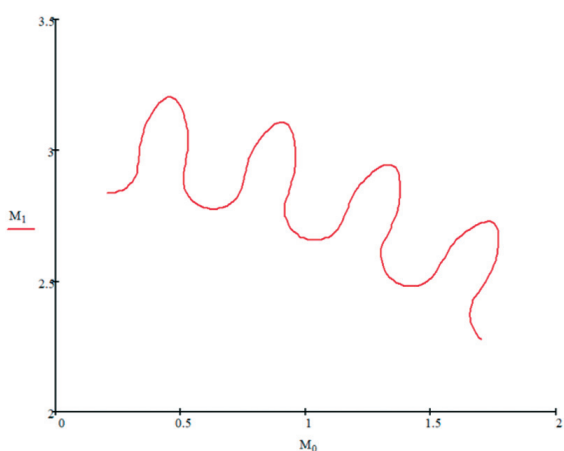


Рис. 7. Профиль сектора часового зубчатого колеса

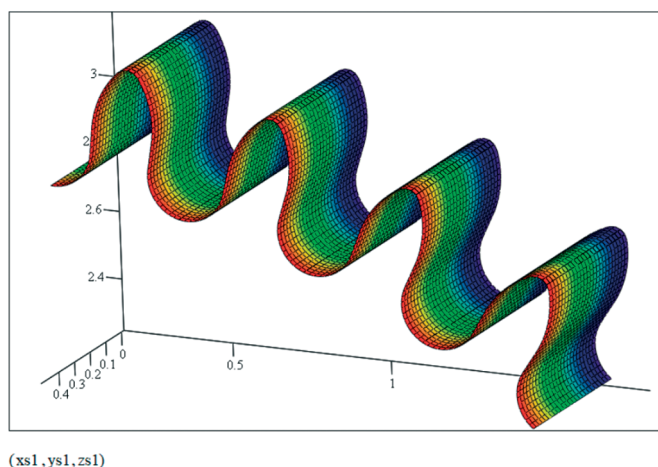


Рис. 8. Смоделированная поверхность сектора часового зубчатого колеса

Для формирования модели трехмерной поверхности сегмента часового зубчатого колеса необходимо описать формирование трех двухпараметрических массивов, которые будут содержать координаты образующей, повторяющиеся вдоль линейной направляющей. С этой целью формируется запись (23) на основе описанного ранее алгоритма, в которой переменная  $h$  отвечает за толщину зубчатого колеса. На рис. 8 показан график сформированной трехмерной поверхности сектора зубчатого колеса.

$$\begin{aligned}
 i &:= 0.. \text{длина}(M_0) - 1 \\
 j &:= 0..10 \\
 h &:= 0.5 \\
 xs1_{i,j} &:= (M_0)_i \\
 ys1_{i,j} &:= (M_1)_i \\
 zs1_{i,j} &:= h \cdot \frac{j}{25}
 \end{aligned} \quad (23)$$

Таким образом, была разработана параметризованная математическая модель, которая может быть использована для решения прямой задачи профилирования при проектировании инструмента второго порядка — специальной червячной фрезы численным методом [4, 5]. При дальнейшем развитии данной модели возможно и автоматизированное проектирование специального режущего инструмента.

### Библиографический список

1. Petukhov Y.E., Domnin P.V. Numerical shaping method for hobbing tools /Russian Engineering Research — 2020 — Т. 40, С. 76–78.
2. ГОСТ 13678-73.Передачи зубчатые цилиндрические мелко модульные с часовым профилем. Типы, основные параметры и размеры, допуски.— Издательство стандартов, 1988 —16 с.
3. Петухов Ю.Е., Домнин П.В., Сяочуан Ч. Математическая модель определения профиля червячных фрез / Вестник машиностроения. — 2020. — № 1. — С. 10–13.
4. Петухов Ю.Е., Домнин П.В. Математическое моделирование винтовой канавки концевой фрезы с помощью средств математического программирования в среде Mathcad / Вестник МГТУ «СТАНКИН». — 2017. — № 4 (43). С. 100–104.
5. Петухов Ю.Е., Домнин П.В. Математическое моделирование профиля шлицевого вала с помощью средств математического программирования в среде Mathcad / Вестник МГТУ «СТАНКИН». — 2021. — № 3 (58). С. 34–37.
6. Петухов Ю.Е. Формообразование численными методами. — М., МГТУ «СТАНКИН», 2004 г. — 200 с.
7. Петухов Ю.Е., Домнин П.В., Желтиков С.А. Исследование процесса формообразования винтовых поверхностей червячными фрезами / Вестник МГТУ «СТАНКИН». — 2021. — № 4 (59). С. 57–62.

**Петухов Юрий Евгеньевич** — профессор кафедры инструментальной техники и технологий формообразования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*u.petuhov@stankin.ru*

**Домнин Пётр Валерьевич** — канд. техн. наук, доц. кафедры инструментальной техники и технологий формообразования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*\_domnin@rambler.ru*

**Желтиков Сергей Алексеевич** — аспирант кафедры инструментальной техники и технологий формообразования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

*sergik-0072007@yandex.ru*

**Petukhov Yury Evgenovich** — professor at the sub-department of “Instrumental equipment and shaping technology” of MSUT “STANKIN”

*u.petuhov@stankin.ru*

**Domnin Petr Valerevich** — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Instrumental equipment and shaping technology” of MSUT “STANKIN”

*\_domnin@rambler.ru*

**Zhelitikov Sergey Alekseevich** — postgraduate student at the sub-department of “Instrumental equipment and shaping technology” of MSUT “STANKIN”

*sergik-0072007@yandex.ru*

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflicts of Interest Statement:** The authors have no conflicts of interest to declare.

---

# ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

---

УДК 621.777.24

А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова  
A.M. Dmitriev, N.V. Korobova

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛЬНОЙ ЗАГОТОВКИ НА КАЧЕСТВО ИЗДЕЛИЯ ТИПА СТАКАНА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ХОЛОДНЫМ ВЫДАВЛИВАНИЕМ

## INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL HEREDITY OF STEEL BILLET PRODUCTION ON THE QUALITY OF A PRODUCT SUCH AS A GLASS MADE BY COLD EXTRUSION

*Рассмотрена технология производства стальных деталей типа цилиндрических стаканов из углеродистых сталей, начиная с выплавки сталей и заканчивая холодным выдавливанием деталей из заготовок в виде цилиндров без полости, имеющих такой же объем, как и объемы стаканов. Описана роль применяемых технологий на этапах металлургического производства стальных прутков, даны рекомендации по выбору наилучших из рассмотренных технологий. Проанализирована роль подготовки и смазывания поверхности отрезанных от прутков заготовок. Обсуждены изменения механических свойств обрабатываемой холодной штамповкой стальной заготовки, происходящие как на этапах пластической деформации, так и в паузах между формоизменяющими операциями и после штамповки.*

*The technology of production of steel parts of the type of cylindrical bushings with bottoms made of carbon steels, starting with the melting of steel and ending with cold extrusion of parts from billets in the form of cylinders without a cavity, having the same volume, as the bushings volume, is considered. The role of applied technologies at the stages of metallurgical production of steel bars is described, and recommendations are given for choosing the best of the considered technologies. The role of preparation and lubrication of the cut off from the bars billet surfaces is analyzed. Changes in the mechanical properties of the steel billet processed by cold stamping, occurring both at the stages of plastic deformation, and in the pauses between forming operations and after stamping, are discussed.*

**Ключевые слова:** детали стальные выдавленные, выдавливание холодное, детали цилиндрические полые, полный производственный цикл.

**Keywords:** steel extruded parts, cold extrusion, hollow cylindrical parts, complete production cycle.

Холодная объемная штамповка (ХОШ) деталей типа цилиндрических стаканов позволяет обеспечить очень высокую точность диаметральных размеров цилиндрических поверхностей, имеющих настолько незначительную шероховатость, что они выглядят зеркальными. Указанные преимущества ХОШ содержат в себе и скрытые недостатки. Чтобы пояснить эти недостатки, рассмотрим для сравнения технологический маршрут изготовления деталей рассматриваемого типа с применением горячей объемной штамповки. Поковки деталей, полученные горячей объемной штамповкой, как правило, имеют существенные напуски и припуски по сравнению с чертежами готовых деталей. Эти напуски и припуски удаляют последующей обработкой штампованной поковки резанием.

В то же время, при ХОШ стремятся напуски и припуски на штампованную поковку сократить до минимума и, по возможности, вообще отказаться от обработки штампованной поковки резанием, т.е. штамповать сразу готовую деталь. При этом возникают трудности, не характерные для горячей объемной штамповки, рассмотренные ниже.

На *рис. 1* приведена схема обратного выдавливания детали типа стакана. Термин «обратное» связан с тем, что пуансон *1* перемещается и внедряется в заготовку *2* под действием силы *P*, создаваемой движущимся вниз ползуном пресса, а металл заготовки вытекает в зазор между пуансоном *1* и матрицей *3* со скоростью  $v_{ис}$ , направленной навстречу перемещению ползуна пресса. То, что матрица *3* перемещается

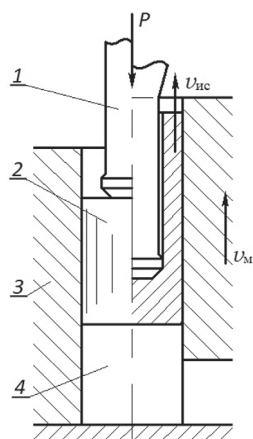


Рис. 1. Схема выдавливания детали типа стакана:

- 1 — пуансон, формирующий полость,  
2 — исходная заготовка, 3 — матрица, 4 — выталкиватель  
(контрпуансон)

в сторону истечения металла заготовки со скоростью  $v_m$ , превышающей  $v_{ис}$ , создает активно направленные напряжения контактного трения, способствующие деформированию заготовки [1].

При штамповке детали типа цилиндрического стакана, имеет место проблема обеспечения заданного чертежом детали, как правило, жесткого требования к соосности полости и внешней поверхности детали. Причиной отклонения выдавливающей полость пуансона от оси детали может явиться неравномерность структуры в поперечном сечении заготовки. Другая проблема — это наличие продольных полос или поперечных мелких надрывов на внешней и внутренней поверхностях деталей рассматриваемого типа. Источник указанных дефектов изготавливаемых ХОШ деталей находится внутри деформируемого материала и связан с металлургическим циклом его производства, которое рассмотрено далее по тексту.

Производство стального проката состоит из трёх основных этапов: выплавка стали, литьё слитков, их прокатка. От способов и режимов осуществления этих этапов существенно зависит качество проката, поступающего на штамповку [2, 3].

Наилучшие показатели по пластичности, химическому составу, газонасыщенности выплавляемой стали обеспечивают индукционные печи, конструкция и принцип действия которых позволяют успешно применять практически все известные способы повышения качества, в том числе создание вакуума в печи. Содержание примесей фосфора, серы, азота в сталях, выплавленных в индукционных печах, находится в пределах 0,008 ... 0,061 %.

Наилучшими для ХОШ являются полуспокойные и спокойные стали, раскисленные алюминием. Наличие в стали избыточного алюминия в пределах 0,025 ... 0,05 % при содержании углерода 0,08 ... 0,28 % не затрудняет процесс ХОШ, пластичность таких сталей

выше, чем у кипящих. Ударная вязкость изделий из раскисленных сталей в 2,5 ... 3,5 раза больше, чем у изделий из кипящих сталей, при одинаковом химическом составе. Наибольшее распространение для процессов ХОШ получили раскисленные полуспокойные стали.

Разнородность слитков, поступающих на прокатку (по содержанию основных компонентов и примесей, по степени газонасыщенности и другим показателям) является основной причиной неоднородности структуры в объеме данного прутка и нестабильности его свойств. Стальные слитки, полученные методом направленной кристаллизации, имеют малую газонасыщенность, мелкозернистую равномерную структуру, высокую технологическую деформируемость.

Дефекты металлургического происхождения являются «наследственными» [4], большая часть из них сохраняется при прокатке (изменяется только их форма — они вытягиваются в направлении прокатки), снижая качество штампованных из такого проката деталей. Также влияют колебания температур нагрева металла перед прокаткой, неравномерность прогрева заготовки по объёму, колебания температур окончания прокатки и неравномерность охлаждения в процессе прокатки и после её окончания.

Динамическая рекристаллизация при сортовой прокатке и вторичная рекристаллизация при последующем охлаждении не обеспечивают полного разупрочнения материала. Как следствие, сортовой прокат без дополнительной термической обработки имеет неоднородную структуру, и свойства его нестабильны. Кроме того, в сталях с повышенным содержанием углерода и в некоторых низколегированных сталях при естественном охлаждении происходит упрочняющая термическая обработка.

Перед выдавливанием полостей в деталях рекомендуется предварительная термическая обработка заготовок, которая может осуществляться на металлургических заводах в сочетании с волочением прутков. Холодная пластическая деформация исходной горячекатаной стали волочением прутков разрушает строчечную структуру и создает условия для быстрого и полного прохождения рекристаллизационных процессов.

Предварительная термообработка может занимать различное место в технологическом процессе: 1) до калибровки прутков волочением (т.е. отжигу подвергается горячекатаный металл); 2) на одном из этапов калибровки; 3) после калибровки. Лучшие результаты достигаются при термической обработке после калибровки заготовки.

Температуру нагрева при прокатке, время выдержки при термообработке принимают наименьшими, при условии стабильного получения заданных структур и свойств. С увеличением этих параметров проявляются окисление, обезуглероживание, насыщение водородом поверхности обрабатываемого металла, вредно отражающиеся на процессе его последующей

пластической деформации. Электронагревательные устройства (индукционные, контактные) применяют ограничено. Эти устройства обеспечивают большую скорость нагрева, однако структура и свойства при прокатке нагретого таким образом материала получаются неравномерными, а сопротивление деформированию — повышенным.

Обезуглероженная поверхность металла, образующаяся при нагреве под прокатку, восприимчива к образованию рисок, задигов, царапин при прокатке, а также при калибровании проката. Поэтому нагрев металла для прокатки и отжиг проката производят в печах с защитной атмосферой.

Чтобы уменьшить вероятность проявления дефектов в сортовом прокате, предназначенном для ХОШ, слитки обрабатывают резанием. При этом уделяется особое внимание толщине снимаемого слоя: при недостаточной толщине при дальнейшей обработке вскрываются подкорковые дефекты, а при излишнем повышении толщины создаются нерациональные технологические отходы. В большинстве случаев при обработке резанием слитков удаляют лишь крупные дефекты (шлаковые засоры и т.п.). При дальнейшей обработке слитков (нагреве, горячей прокатке, промежуточной термической обработке) проявляются более мелкие дефекты (плены, раковины, пузыри и т.п.). Образуются и дополнительные дефекты: избирательное окисление, закатка окалины, следы от налипшего на валки металла и обдирочного шлифования валков и т.п. По мере вытяжки заготовки при прокатке дефекты литья и прокатки уменьшаются в абсолютных размерах и приближаются к поверхности заготовки. Эффективность по качеству снятия дефектного поверхностного слоя обработкой прутка резанием увеличивается. На некотором этапе при дальнейшей вытяжке, особенно холодном волочении, дефекты выходят на поверхность прутка и постепенно исчезают.

Сказанное позволяет заключить, что при использовании холоднотянутых прутков и проволоки диаметром до 10 ... 12 мм и высокой культуре металлургического производства достигается хорошее качество поверхности изготавливаемых деталей. С увеличением размеров поперечного сечения проката в нем увеличивается содержание металлургических дефектов, ведущих к снижению качества изготовленных ХОШ деталей. Прокат больших диаметров, направляемый на ХОШ, должен подвергаться точению на глубину не менее 1,2 ... 1,5 мм с последующим полированием и матированием. Матирование железными щётками позволяет удалить плены и другие дефекты и одновременно повысить способность поверхности металла к адсорбции смазочного материала. Изделия, изготовленные из проволоки, подвергшейся обтачиванию или шлифованию, при штамповке имеют высокое качество и весьма низкий процент брака по наличию трещин.

Горячекатаная, а также отоженная сталь обычно покрыта тонким слоем окалины, которая изменяет точность размеров проволоки при волочении, способствует возникновению дефектов в виде рисок и царапин, а также износу волок. При травлении кислотами происходит отделение окалины, так как в процессе травления кислота разрушает окалину, вступая в соединение с металлом. При этом выделяется водород, одна часть которого через травильную жидкость уходит в ванны, а другая часть диффундирует в металл, образуя с ним химические соединения.

При травлении проката в мотках в результате плотного прилегания витков часть окалины остаётся на поверхности металла. Оставшаяся окалина попадает в смазку. Наличие окалины в смазке способствует образованию рисок и царапин на калиброванной стали, которые раскрываются в результате в трещины при ХОШ изделий. Также окалина способствует образованию рисок и царапин и на волоках, что приводит к увеличению коэффициента трения при калибровании и уменьшению срока службы волок, снижает качество поверхности изделий. В связи с этим очистку от окалины и других загрязнений следует производить механическими методами, либо сочетать травление с матированием (для стали и твёрдых сплавов цветных металлов) или крацовкой (для мягких цветных металлов и сплавов), использовать эффект воздействия ультразвуковых колебаний.

Для повышения адгезии смазочного материала к поверхности металла заготовки и увеличения толщины смазочного слоя заготовку перед ХОШ покрывают слоем носителя смазочного материала (покрытием). Покрытие должно обладать высокой пластичностью и прочностью, термостойкостью, надёжным сцеплением с поверхностным слоем металла заготовки, сохранением сплошности смазочного слоя по всей поверхности заготовки при ее деформировании.

Слой носителя смазочного материала образуется в результате химической или электрохимической обработки заготовки. При ХОШ заготовок из углеродистых и низколегированных сталей наибольшее распространение получило фосфатирование с последующим омыливанием. В Германии, где имеются значительные природные ресурсы дисульфида молибдена, вместо омыливания, фосфатирование заготовок сопровождается их смазыванием пастой дисульфида молибдена.

Однако фосфатирование относится к токсичным способам подготовки поверхности металла перед ХОШ. Для повышения безопасности технологии подготовки поверхности перед штамповкой применяется механическая обработка поверхностного слоя (галтовка, дробеструйная обработка, матирование, крацевание), сочетающая очистку поверхности от следов окалины, мелких дефектов металлургического происхождения, и активацию поверхности, усиливающую адсорбцию смазочного материала [3].

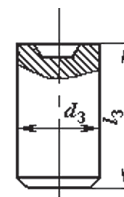
Инновационным направлением, позволяющим избежать фосфатирования заготовки, является нанесение на пуансон высокопрочного самосмазывающего покрытия. С участием авторов данной статьи разработана технология изготовления такого покрытия на основе переработки титановой стружки [5].

Для оценки антифрикционных свойств непосредственно слоя носителя смазочного материала, при отсутствии самого смазочного материала, был проведен следующий эксперимент. Авторы данной статьи в период описываемого эксперимента разрабатывали технологический процесс ХОШ деталей из алюминиевого сплава. На испытательной машине, оснащенной устройством записи изменения величины деформирующей силы по ходу деформирования заготовки, производили обратное выдавливание стаканов из алюминиевого сплава Д1. Заготовки использовали в состоянии без обезжиривания их поверхности и без нанесения на них смазочного материала, с нанесением на поверхность заготовок смазочного материала, с анодированием (применяемым для алюминия, как фосфатирование для стали) поверхности заготовок, но без нанесения на них смазочного материала, с анодированием поверхности заготовок и нанесением на них смазочного материала. Сравнивали силы обратного выдавливания заготовок при четырех указанных выше состояниях их поверхностей при ХОШ стаканов одинакового размера.

Наименьшая сила была зафиксирована при выдавливании заготовок с анодированной их поверхностью и нанесенным на них смазочным материалом. Наибольшая — при выдавливании заготовок с анодированной поверхностью при отсутствии на них смазочного материала. Таким образом, слой покрытия без нанесения на него смазочного материала только увеличивает контактное трение с инструментом по сравнению с заготовками, на которые не нанесено покрытие. Следовательно, слой носителя смазочного материала (покрытия), хотя и разделяет между собой контактные поверхности заготовки и инструмента, не может служить заменой их смазывания.

В направлении решения указанных в начале данной статьи проблем повышения соосности полости с внешней поверхностью детали и увеличения глубины полости, выдавливаемой без разрыва слоя смазочного материала, отрезанная от прутка заготовка подвергается калибровке осадкой в закрытой матрице, и ей придется форма, показанная на *рис. 2*.

На верхнем торце заготовки при ее калибровке выполняется наметка, имеющая форму усеченного конуса. Форму и размеры наметки, образуемой при калибровке заготовки, обеспечивают точно совпадающим с формой торца пуансоном, который в дальнейшем будет выполнять операцию выдавливания полости детали. Диаметр большего основания полости наметки совпадает с диаметром калибрующего пояска указанного пуансона. Наметка предназначена, во-первых, для лучшего центрирования пуансона на начальном этапе



**Рис. 2.** Заготовка, калибруемая осадкой в закрытой матрице

выполнения операции выдавливания. Во-вторых, — для некоторого увеличения, по сравнению с плоским торцом, который имела бы заготовка без наметки, того покрытого смазочным материалом участка торцевой поверхности заготовки, площадь которого многократно увеличивается при растяжении до площади поверхности изготовленной выдавливанием полости детали.

В подписи под *рис. 2* отмечено, что осадка производится в закрытой матрице, т.е. калибрующий заготовку пуансон с выступом для выполнения наметки имеет диаметр, равный диаметру заготовки  $d_3$ . В закрытой матрице не предусмотрено компенсатора погрешности размера  $l_3$  заготовки. Эта погрешность связана с точностью дозирования объема заготовки. Она приведет к незначительному колебанию высоты стенки штампованной выдавливанием детали, что должно быть устранено при следующих за выдавливанием операциях технологического процесса.

При штамповке на автоматах операциям подготовки поверхности подвергают калиброванный прокат, при штамповке на прессах — мерные заготовки. При штамповке на автоматах после отрезки в первой позиции штучной заготовки от проката на ее торец может быть нанесен, например, разбрызгиванием, только жидкий смазочный материал, создание на торце слоя носителя смазочного материала невозможно. Поэтому выдавливание глубоких полостей при штамповке на автоматах является неосуществимым.

При ХОШ стали, наряду с рассмотренным в [6] упрочнением, происходят вторичные, вызванные деформационным упрочнением (наклепом) физико-химические явления на границах зерен и внутри них: диффузия атомов азота и углерода, взаимодействие дислокаций с растворенными примесями, рост микроискажений, накопление несовершенств и т.п. Этот комплекс явлений, получивший название деформационного старения, вызывает дополнительное снижение деформируемости сталей. Повышение фактической температуры деформации за счет теплового эффекта, среднестатистически до 250...300°C и более, ускоряет протекание и усиливает эффект деформационного старения стали.

Деформационное старение, происходящее после ХОШ, вызывает снижение показателей пластичности детали. Особенно сильно снижается ударная вязкость. Склонность стали к старению зависит от химического состава, способа и условий плавки и раскисления, режимов предшествующей термообработки и обработки

давлением. Деформационное старение может быть естественным (при вылеживании исходных заготовок, поковок по переходам и готовой продукции) и искусственным (при нагревании поковок). В наибольшей степени деформационное старение проявляется у малоуглеродистых сталей. Основным элементом, определяющим склонность углеродистой стали к деформационному старению, является азот. Примеси марганца, алюминия и др., связывающие часть азота, ослабляют эффект старения. Примеси ванадия, молибдена, хрома, титана и ниобия уменьшают, а при повышенном их содержании полностью исключают деформационное старение; примеси меди и никеля — усиливают старение.

Стали вакуумной плавки не подвержены деформационному старению. У сталей, не подверженных деформационному старению, на кривой зависимости силы  $P$  растяжения стандартного образца от приращения его длины  $\Delta l$  площадка текучести отсутствует. Увеличение размеров зерен повышает эффект старения.

При малых величинах деформации ( $e = 5 \dots 10 \%$ ), характерных для операций калибровки заготовок, эффект старения выше, чем при больших. Рекомендуется в случае наличия разрыва во времени между калибровкой и последующим формоизменением заготовки отжиг производить после калибровки, особенно если калибровка осуществлялась методом осаживания заготовки.

Анализ литературных источников показывает, что наибольшее применение ХОШ нашла в крупносерийном и массовом производстве. Принято считать, что ХОШ, например, винтов позволяет заменить более дорогостоящие легированные стали более дешевыми сталями 08, 10, 20 при достижении требуемого комплекса механических характеристик изготавливаемых деталей. Для деталей типа стаканов такая замена может быть произведена, если рассматриваются их механические характеристики в направлении вдоль оси. Такие более дешевые стали наиболее доступны для машиностроительных предприятий, расположенных рядом с металлургическими комбинатами и взаимодействующих с этими комбинатами. При тесном взаимодействии с металлургами технолог-

машиностроитель может влиять на качество поставляемого ему исходного материала (прутков, катанки, проволоки, используемых при ХОШ) и какие-то из операций подготовки исходного материала передать его поставщику. Например, в Магнитогорске, где расположен крупнейший металлургический комбинат, сосредоточены российские предприятия, выпускающие болты, гайки и др. детали массового метизного производства.

### Библиографический список

1. Dmitriev A.M., Korobova N.V. Expanding of Application of Cold Die Forging by Inducing Active Contact Friction Forces // Journal of Friction and Wear, 2013. Vol. 34. — pp. 232–237.
2. Головин В.А., Ракошиц Г.С., Навроцкий А.Г. Технология и оборудование холодной штамповки: Учебник для машиностроительных техникумов по специальности «Ковочно-штамповочное производство». — М.: Машиностроение. 1987. — 352 с.
3. Ковка и штамповка: Справочник. В 4 т. Т. 3. Холодная объемная штамповка. Штамповка металлических порошков; Под ред. А.М. Дмитриева. — 2-е изд., перераб. и доп.; Под общ. ред. Е.И. Семенова. — М.: Машиностроение. 2010. — 352 с.
4. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев и др. / Под ред. А.М. Дальского. — М.: Изд-во МАИ, 2000. — 364 с.
5. Создание на основе переработки титановой стружки наноструктурированных износостойких самосмазывающихся покрытий на поверхностях деталей машин и технологического инструмента / А.М. Дмитриев, А.И. Беликов, Н.В. Коробова, Ю.В. Панфилов // Технология легких сплавов. 2010. № 3. — С. 79–86.
6. Практическое использование изменения механических характеристик конструкционных углеродистых сталей при холодной объемной штамповке / А.М. Дмитриев, Ф.В. Гречников, Н.В. Коробова, Н.С. Толмачев // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2014. № 4(31). — С. 41–44.

**Дмитриев Александр Михайлович** — член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор кафедры систем пластического деформирования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
countess.olga@gmail.com

**Коробова Наталья Васильевна** — д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой систем пластического деформирования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
mt-6@yandex.ru

**Dmitriev Alexander Mikhailovich** — corresponding member of Russian Academy of Sciences, D.Sc. of Engineering, Professor at the sub-department of “Systems of plastic deformation” of MSUT “STANKIN”  
countess.olga@gmail.com

**Korobova Natalia Vasilievna** — D.Sc. of Engineering, Full Professor, Head of the sub-department of “Systems of plastic deformation” of MSUT “STANKIN”  
mt-6@yandex.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflicts of Interest Statement:** The authors have no conflicts of interest to declare.

## ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА ПЛАСТИЧНОСТЬ СПЛАВА НА ОСНОВЕ ХРОМА

### INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION ON PLASTICITY OF ALLOY BASED ON CHROMIUM

*Показано влияние состава сплава на наличие эвтектики в структуре и, как следствие, на его пластичность. Установлено, что отсутствие эвтектики в структуре повышает пластичность сплава.*

*The influence of the composition of the alloy on the presence of eutectics in the structure and, as a consequence, on its plasticity is shown. It has been established that the absence of eutectics in the structure increases the plasticity of the alloy.*

**Ключевые слова:** сплав на основе хрома, эвтектика, пластичность.

**Keywords:** chromium based alloy, eutectic, plasticity.

#### Введение

Хром и сплавы на его основе обладают уникальным сочетанием жаропрочности и жаростойкости, тогда как прочие тугоплавкие металлы (W, Mo, Ta, Nb) и их сплавы жаростойкостью не обладают [1–4]. Важным недостатком сплавов на основе хрома является пониженная пластичность и, как следствие, хрупкость, затрудняющая их применение в промышленности. В настоящее время в промышленности используют сплавы системы «Cr–Ni», не только традиционные на основе никеля (например, нихром Х20Н80 ГОСТ 12766.1-90), но и сплавы на основе хрома имеющие удовлетворительную пластичность. К таким сплавам относится сплав Х65НВФТ.

Однако пластичность разных плавок сплава может отличаться, т.е. для сплава характерна нестабильность плавочных свойств.

Цель настоящей работы — оценка влияния структуры и состава сплав на его пластичность.

#### Методика исследования

Исследованы сплавы типа Х65НВФТ Cr — основа (Ni — 31...35; Ti — 0,05...0,3; V — 0,1...0,4; W — 1...3; примеси, не более: O — 0,08; N — 0,04 Si — 0,1; Al — 0,06; Fe — 0,5;  $\Sigma(\text{Al}+\text{Si})$  — 0,2). С различным (в пределах марки) содержанием никеля.

Получение прутка. Заготовку после ЭШП прессовали при  $1210 \pm 10^\circ\text{C}$  на прессе П8439 в два перехода с диаметра 94 до 60 мм и с 60 до 28 мм. Полученную заготовку подвергли изотермической выдержке при температуре  $900 \pm 10^\circ\text{C}$  в течении 16 часов с охлаждением на воздухе.

Металлографический анализ. Структуру изучали на инвертированном металлографическом микроскопе «GX-51» (Olympus, Япония) при увеличениях 500 $\times$ . Захват и обработку изображений исследованных структур выполняли с помощью компьютерной программы «analySIS» (OLYMPUS SoftImaging Solutions GmbH).

Микрорентгеноспектральный анализ (МРСА). МРСА проводили с использованием растрового электронного микроскопа JSM-7401F (Jeol, Япония). Использовали ускоряющие напряжения в диапазоне 5...10 кВ. Химический состав определяли с помощью энергодисперсионного анализатора Oxford INCA Energy (Oxford Instrument, Англия). Регистрацию характеристического рентгеновского излучения осуществлялась кремний-литиевым детектором со спектральным разрешением 133 эВ. Относительная ошибка определения концентрации элементов составляла  $\pm 10\%$ .

Испытание на растяжение при  $20^\circ\text{C}$  и повышенных температурах (800, 900, 1000 и  $1100^\circ\text{C}$ ) проводили на установке «RMC100» (Schenck Trebel, США). Определяли пределы прочности ( $\sigma_B$ ) и текучести ( $\sigma_T$ ), относительное удлинение ( $\delta$ ) и относительное сужение ( $\psi$ ). Образцы — по ГОСТ 1497-84, тип IV; диаметр рабочей части  $D_0 = 3$  мм, расчетная длина  $l = 5 D_0$ . Количество образцов на точку — пять. Относительная погрешность среднего арифметического определяемых величин с достоверностью 95% не превышала 10%.

#### Экспериментальная часть

Известно [5, 6], что лучшей пластичностью обладают сплавы типа твердый раствор, а смеси, особенно, содержащие в структуре эвтектику, имеют пониженную пластичность (например, сплавы на основе железа — чугуны, на основе алюминия — силумины, являются

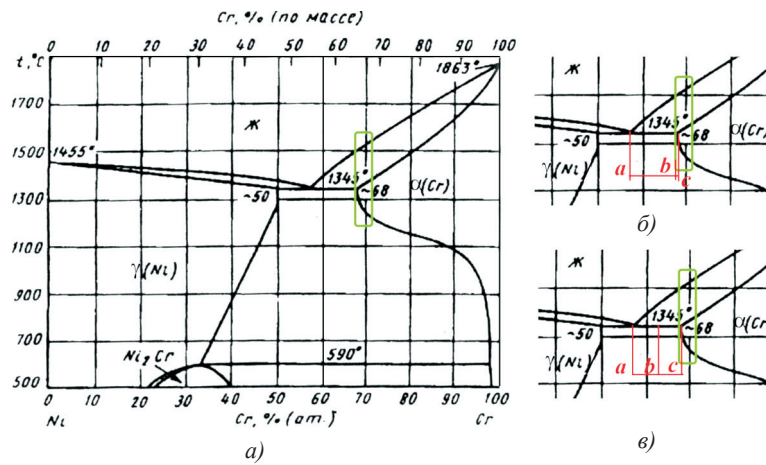


литейными, их обработка давлением затруднена или невозможна). Получение удовлетворительной технологической пластичности для сплавов на основе хрома весьма актуально, т.к. именно невозможность получения заготовок технологиями пластического деформирования была основной причиной, долгое время не позволяющей использовать эти сплавы.

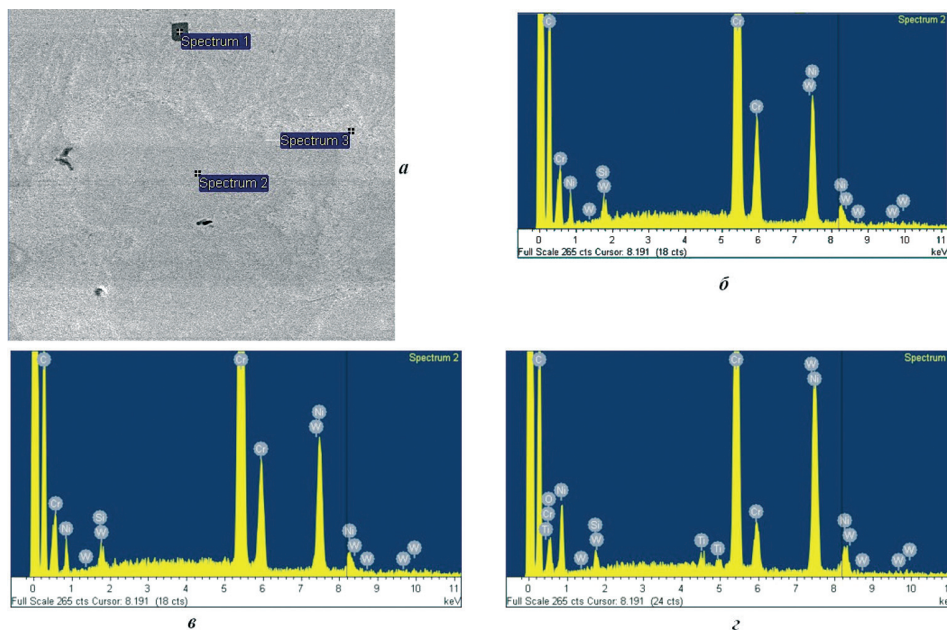
Особенностью сплава является зависимость структуры в литом состоянии от состава в пределах марки. Это определяет нестабильность плавочных свойств при операциях пластического деформирования. Анализ диаграммы состояния «Cr–Ni» показал, что в структуре литого сплава может содержаться до 10% эвтектики

(кодода отношение «bc/ac» кодода «ac» *рис. 1б*), это относится к равновесному состоянию сплава, с содержанием Ni по верхнему пределу. При содержании Ni в сплаве по нижнему пределу эвтектики быть не должно (*рис. 1а, 1б*) (корректность использования двойной диаграммы для оценки превращений реального сплава, содержащего помимо Cr и Ni небольшие количества W, Ti, V была показана в работе [7]).

Однако, вследствие ликвации концентрация никеля по сечению неодинакова, его содержание в отдельных участках может заметно превосходить его содержание в сплаве (*рис. 2*, табл. 1, наши данные достаточно хорошо совпали с результатами [9]).



**Рис. 1.** Диаграмма состояния Ni — Cr [8]: *а* — указана область, характеризующая химический состав сплава Х65НВФТ, *б, в* — элементы диаграммы для оценки доли эвтектики в структуре сплава



**Рис. 2.** Ликвация литого сплава Х65НВФТ. Результаты МРСА: *а* — поперечный шлиф; *б, в, г* — рентгенограммы точек (Spectrum) 1, 2, 3 соответственно

Таблица. 1. Химический состав (атомн. %) различных участков сплава Х65НВФТ

№ области на рис. 2а	О	Al	Si	Ti	Cr	Ni	Mg
Spectrum1	70	1	1	25	2	–	–
Spectrum2	6	–	2	–	66	23	1
Spectrum3	17	–	4	–	38	39	–

Примечание: Spectrum1 — оксид; Spectrum2 — основа сплава (эвтектики нет); Spectrum3 — зона эвтектики.

Это приводит к тому, что эвтектика распределена в структуре неравномерно. Наблюдаются участки структуры с большим количеством эвтектики. Мы наблюдали участок, в котором содержание эвтектики составляло 40–50% объемн. (рис. 3). В соответствии с диаграммой «Ni–Cr» это соответствует сплаву с 40% Ni, (рис. 1в) т.е. с содержанием, большим верхнего предела никеля в сплаве.

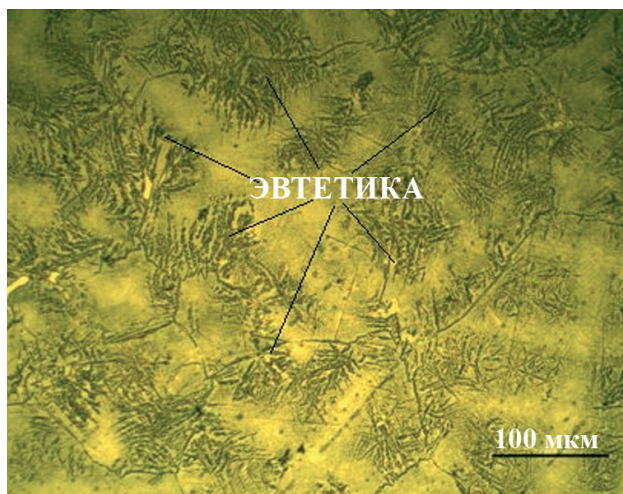


Рис. 3. Зона литого сплава с эвтектикой (поперечный шлиф)

Эвтектика присутствовала в сплавах, в которых в соответствии с диаграммой состояния «Ni–Cr», эвтектики быть не должно (34% Ni). Однако, вследствие ликвации, в реальных сплавах образуется эвтектика в зонах, обогащенных никелем.

В сплаве с содержанием Ni 33 масс % эвтектики в структуре литого сплава не наблюдали (табл. 2). Поскольку эти результаты получены только для одного сплава, гарантировать отсутствие эвтектики в сплавах с таким содержанием Ni нельзя. Тем не менее, при таком содержании никеля, в соответствии с диаграммой состояния «Ni–Cr», эвтектики в структуре быть не должно. Это определяет, если не 100% вероятность, то, по крайней мере, уменьшение вероятности наличия эвтектики в структуре.

Таблица. 3. Пластичность (относительное удлинение —  $\delta$  и относительное сужение —  $\Psi$ ) сплава Х65НВФТ в зависимости от наличия эвтектики в литой структуре

Температура, °С	Пластичность при содержании Ni (% масс) в сплаве и наличия эвтектики в структуре			
	35 есть эвтектика		33 (нет эвтектики)	
	$\delta, \%$	$\Psi, \%$	$\delta, \%$	$\Psi, \%$
20	16		24	
900	36		48	–
1050	48	34	90	42
1150	90	78	160	96

Таблица. 2. Влияние содержание никеля в сплаве на наличие эвтектики в структуре слитка

Содержание Ni в сплаве, масс%	Наличие эвтектики в структуре
35	Присутствует (см. рис. 3)
34	следы
33	отсутствует

Отсутствие эвтектики определило лучшую пластичность сплава при 20°C и высоких температурах (табл. 3).

### Заключение

Корректировка химического состав сплава Х65НВФТ за счет сужения пределов содержания никеля до 31–33% (или уменьшения его содержания до 28–30%) позволит повысить его пластичность и, таким образом, сопротивление динамическим нагрузкам.

### Библиографический список

1. Панасюк И.О. Хром и его сплавы: обзор зарубежной и некоторой отечественной литературы за 1950–1960 гг./ М.: ОНТИ, 1961. — 40 с.
2. Бутрим В.Н. Совершенствование хромоникелевых сплавов для космической техники. Конструкции из композиционных материалов. 2017. — № 2. — С. 26–38.

3. Адашкин А.М. Влияние структуры на жаростойкость жаропрочного сплава на основе хрома / Кубаткин В.С., Бутрим В.Н., Сапронов И.Ю. Вестник МГТУ «СТАНКИН» № 4 (31), 2014. с. 80–84.
4. Адашкин А.М. Влияние структуры и температуры испытаний на виды излома жаропрочного сплава / Кубаткин В.С., Бутрим В.Н., Сапронов И.Ю. Вестник МГТУ «СТАНКИН» № 4 (39), 2016, с. 52–57.
5. Материаловедение. Под ред. Б.Н. Арзамасова, В.И. Мухина. Изд. 3. М. Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2001. 646 с.
6. Гуляев А.П. Металловедение. М. Металлургия. 1977. — 647 с.
7. Адашкин А.М., Бутрим В.Н., Сапронов И.Ю. Фазовые превращения, структура и свойства сплава Х65НВФТ на основе хрома. Металлофизика и новейшие технологии / Metallofiz. Novelshle Tekhnol. Украина. 2013, т. 35, № 11.
8. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Под ред. Н.П. Лякишева. Т. 2. 1023 с.
9. Береснев А.Г. Патент № 255743820/07/2015, бюл. № 20. Жаропрочный сплав на основе хрома и способ выплавки сплава на основе хрома / Бутрим В.Н., Каширцев В.Н., Адашкин А.М.

**Адашкин Анатолий Матвеевич** — канд. техн. наук, доц. кафедры композиционных материалов ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*tolla.home@list.ru*

**Кубаткин Владимир Сергеевич** — руководитель проектов ООО «Центр эффективных производственных решений»  
*vavilon0008@gmail.com*

**Сосенушкин Евгений Николаевич** — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой композиционных материалов ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»  
*sen@stankin.ru*

**Adaskin Anatoly Matveevich** — candidate Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of «Composite materials» of MSUT “STANKIN”  
*tolla.home@list.ru*

**Kubatkin Vladimir Sergeevich** — project manager CEPR Ltd.  
*vavilon0008@gmail.com*

**Sosenushkin Evgeny Nikolaevich** — D.Sc. of Engineering, Full Professor, Head of the sub-department of “Composite Materials” of MSUT “STANKIN”  
*sen@stankin.ru*

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflicts of Interest Statement:** The authors have no conflicts of interest to declare.

---

## СОБЫТИЯ И ДАТЫ

---

### РЕКТОР ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» ВЛАДИМИР ВАЛЕРЬЕВИЧ СЕРЕБРЕННЫЙ ВСТРЕТИЛСЯ С РЕКТОРОМ БЕЛОРУССКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

*Ректор ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», находясь с рабочим визитом в Республике Беларусь, встретился с Сергеем Харитончиком, ректором Белорусского национального технического университета, на базе Научно-технологического парка БНТУ «Политехник».*

В рамках встречи была проведена презентация выставочной экспозиции высокотехнологичной продукции Научно-технологического парка БНТУ «Политехник», состоялось обсуждение направлений совместной работы и перспектив взаимовыгодного сотрудничества, а также были озвучены предложения по направлениям совместной работы в рамках подписанного соглашения.

Кроме того, на рабочей встрече ректор БНТУ рассказал Владимиру Серебрянному о достижениях университета в сфере культуры, научной деятельности, спорта и, конечно же, образования. Ректор ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» поделился опытом международного сотрудничества вуза и отметил, что данная встреча станет ступенькой к реализации совместных планов.



## МОЛОДЫЕ УЧЕНЫЕ ПРЕДСТАВИЛИ СВОИ ПРОЕКТЫ В ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

27 октября 2022 года в ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» состоялся научный поединок Science Slam. Университетская Лига Science Slam стартовала в 2022 году при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

С приветственным словом выступил ректор ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» Владимир Валерьевич Серебряный: «Очень приятно, что такое событие происходит в нашем университете. Надеюсь, все получат возможность приобщиться к научному движению и узнать больше о том, какие научные направления развиваются в ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». Всем вам желаю интересного вечера и надеюсь, что эта встреча будет не последней. Давайте насладимся наукой!».

Организатором в Московском государственном технологическом университете «СТАНКИН» выступили члены Студенческого научного общества ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»: Астафьева А.А., Абросимова О.М., Гайбу В.В., Кривобокова Е.В., Околькова А.А.

В рамках мероприятия пять молодых ученых Университета представили свои проекты, посвященные металлообработке, умным роботам, солнечным батареям, электронному документообороту, анализу данных:

- Мария Сигачева: «Как мы могли бы облегчить жизнь студентов?»;
- Арсен Тагаев: «Зачем мне солнце Монако?»;
- Евгений Волков: «Кто ты без концевых фрез?!»;
- Лилия Туктамышева: «Студентов много, а я одна»;
- Илья Ковалев: «И станки могут болеть».

Формат ScienceSlam предполагает, что лучшее выступление определяется с использованием шумомера, то есть победитель – тот, кто получил самые громкие аплодисменты.

Каждое выступление было по-настоящему интересным и запоминающимся, а победителем научного поединка стал **Илья Ковалев** – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных систем управления, директор Молодежного проектного центра ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».

Ковалев Илья прошел в региональный этап Science Slam и 21 ноября в Екатеринбурге представил свое исследование вместе с другими участниками из Санкт-Петербурга, Нижнего Новгорода, Оренбурга и Перми.

Больше информации о научных мероприятиях для студентов можно узнать на странице Студенческого научного общества ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» в социальной сети «ВКонтакте»: [https://vk.com/sno\\_stankin](https://vk.com/sno_stankin)



## ИТОГИ ВСЕРОССИЙСКИХ КОНКУРСОВ ПО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМУ ТВОРЧЕСТВУ СРЕДИ УЧАЩИХСЯ ФЦТТУ ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (ОКТАБРЬ–ДЕКАБРЬ 2022)

Юные техники и изобретатели, робототехники и программисты ежегодно имеют отличную возможность презентовать свои проекты в научно-технических мероприятиях, которые организует и проводит Федеральный центр технического творчества учащихся федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (далее — ФЦТТУ МГТУ «СТАНКИН»). В текущем 2022 году были организованы и проведены следующие мероприятия:

- **Всероссийская олимпиада по робототехнике и интеллектуальным системам среди учащихся;**
- **Всероссийский конкурс медиатворчества и программирования среди учащихся «24 bit»;**
- **Всероссийский конкурс начального технического моделирования и конструирования «Юный техник-моделист»;**
- **Всероссийский конкурс юных изобретателей и рационализаторов;**
- **Всероссийский конкурс юных фотолюбителей «Юность России».**

Данные мероприятия были реализованы в рамках проекта «Научно-методическое и организационно-техническое сопровождение участия подведомственных Министерству науки и высшего образования Российской Федерации организаций в формировании Всероссийской экосистемы, обеспечивающей профессиональное самоопределение и развитие научно-технического творчества и инновационной деятельности детей и молодёжи в соответствии с моделями деятельности Кружкового движения Национальной технологической инициативы».

Главной целью данных мероприятий является выявление, развитие и поддержка талантливых детей России в области научно-исследовательской деятельности и научно-технического творчества, ориентация их на инженерные специальности.

Мероприятия прошли в рамках «Всероссийского открытого фестиваля научно-технического творчества учащихся «Траектория технической мысли-2022» (далее — Фестиваль). Фестиваль включен в Приказ Министерства просвещения РФ «Об утверждении перечня олимпиад и иных интеллектуальных и (или) творческих конкурсов, мероприятий, направ-

ленных на развитие интеллектуальных и творческих способностей, способностей к занятиям физической культурой и спортом, интереса к научной (научно-исследовательской), инженерно-технической, изобретательской, творческой, физкультурно-спортивной деятельности, а также на пропаганду научных знаний, творческих и спортивных достижений, на 2021/22 учебный год».

**Всего в данных мероприятиях приняли участие более 600 учащихся, которые успешно защитили более 800 проектов.**

Из года в год участники не перестают удивлять все новыми и новыми знаниями, умениями и навыками, которые они демонстрируют, создавая оригинальные проекты в области робототехники, программирования, моделирования, фотоискусства и изобретательства. Современные передовые технологии, такие как трёхмерное прототипирование, интернет вещей, аддитивные технологии, цифровая фотография, программируемые микроконтроллеры с каждым годом всё активнее используются в образовательном процессе. Уровень учебных проектов постоянно растёт и вплотную приближается к производственным образцам.

### Итоги Первенства России по трассовым автомоделям среди учащихся

В период с 30 октября по 6 ноября 2022 г. в Кировской области было проведено Первенство России по трассовым автомоделям среди учащихся (далее — Первенство). Мероприятие проводилось на базе муниципального образовательного автономного учреждения дополнительного образования «Станция юных техников» города Кирова (далее — МОАУ ДО СЮТ г. Кирова). На трассе МОАУ ДО СЮТ г. Кирова неоднократно проводились мероприятия всероссийского уровня. В 2009, 2011 и 2015 гг. на ней проходили Первенства и Кубки России по трассовому автомоделю. В начале этого года она была перестроена — теперь это новая восьмидорожечная трасса, отвечающая всем современным стандартам.

В Первенстве приняли участие 8 команд из 7 субъектов Российской Федерации: г. Санкт-Петербург; г. Кузнецк Пензенской области; г. Коряжма Архангельской области; г. Копейск Челябинской области; г. Уфа

Республики Башкортостан; г. Нижний Новгород Нижегородской области; г. Киров Кировской области.

Первенство проводилось в двух возрастных категориях по классам моделей Production 1/32 (ТБ-3), Production 1/24 (ТА-3), ES-32U, ES-32 (ТБ-2), F1-32 (ТА-1), ES-24U, ES-24 (ТА-2).

В командном зачете старшей возрастной группы призовые места заняли:

1 место — команда ГБНОУ «Санкт-Петербургский городской центр детского технического творчества» (руководитель Лебедев Д.Ю.); 2 место — команда КОГОАУ ДО «Центр технического творчества» города Кирова (руководитель Обухов О.А.); 3 место — команда «ИнТехно» МБОУ ДО «Центр детского творчества» города Кузнецка Пензенской области (руководитель Мартышов В.Б.).

В командном зачете младшей возрастной группы призовые места заняли:

1 место — команда «ИнТехно» МБОУ ДО «Центр детского творчества» города Кузнецка Пензенской области (руководитель Мартышов В.Б.); 2 место — ко-

манда КОГОАУ ДО «Центр технического творчества» города Кирова (руководитель Обухов О.А.); 3 место — команда Филиала дополнительного образования детей «Дом детского творчества» МОУ «Средняя общеобразовательная школа № 1 города Коряжмы» Архангельской области (руководитель Северов Н.А.).

По итогам мероприятий победителям и призерам вручены дипломы соответствующих степеней ФЦТТУ МГТУ «СТАНКИН». Информация о мероприятиях, регламенты, приказы об итогах размещаются на сайте МГТУ «СТАНКИН» (stankin.ru) в разделе «ФЦТТУ». Информация об участниках, призерах и победителях будет занесена в информационную систему «Ресурс об одаренных детях» (talantyrussia.ru).

Педагоги, подготовившие победителей и призёров, награждены дипломами ФЦТТУ МГТУ «СТАНКИН» за успешную подготовку учащихся к конкурсам всероссийского значения.

Поздравляем победителей и призёров с достигнутыми высокими результатами, и желаем дальнейших успехов в творческой проектной деятельности.

*ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ*

## Приглашаем к участию в Круглом столе «Перспективы подготовки кадров для ОПК с учетом изменений в законодательстве»

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» проводит 14 декабря 2022 года Круглый стол на тему «Перспективы подготовки кадров для ОПК с учетом изменений в законодательстве». В ходе мероприятия будут рассмотрены особенности поступления в Университет в 2023 году (спикер **Сидоров А.С.**).

В рамках Круглого стола пройдет Научно-методический семинар по развитию и обновлению содержания деятельности организаций, подведомственных Министерству науки и высшего образования Российской Федерации, обеспечивающих профессиональное самоопределение и развитие научно-технического творчества и инновационной деятельности детей и молодежи «Формирование кадрового резерва организации за счет ранней профориентации» (спикер **Капитанов А.В.**).

Для получения дополнительной информации обращайтесь по телефону 8 (499) 973-38-49.

## В ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» ПРОШЕЛ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ СЕМИНАР «ПРАКТИКА И ОПЫТ ОРГАНИЗАЦИИ И ОТКРЫТИЯ ПРОФИЛЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЛИМПИАДЫ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ (ШКОЛЬНЫЙ ТРЕК)»

Национальная технологическая олимпиада (НТО) существует с 2015 года — она начиналась как Олимпиада Кружкового движения НТИ. Командные инженерные соревнования для школьников и студентов превратились в многоуровневый проект, объединяющий самых разных людей, которые хотят и могут решать приоритетные технологические задачи, стоящие перед Россией.

Научно-методический семинар «Практика и опыт организации и открытия профиля Национальной технологической олимпиады в образовательной организации высшего образования (школьный трек)» проводился с целью обсуждения проблем, актуализации задач и обмена лучшими практиками профориентации школьников в инженерной среде на основе реализации профиля Национальной технологической олимпиады. Ответственные за мероприятие: **Капитанов А.В.**, доктор технических наук, заведующий кафедрой автоматизированных систем обработки информации и управления ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»; **Сидоров А.С.**, начальник управления приема, практик и трудоустройства ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Участвуя в НТО, школьники и студенты со всей России обучаются у лучших и решают задачи, поставленные государственными компаниями, лидерами технологических отраслей, прорывными технологическими компаниями. Участники знакомятся с самыми разными областями: от искусственного интеллекта и «умной» энергетики до нейротехнологий и геномного редактирования.

В этом году ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» присоединился к НТО, став организатором проведения нового профиля «Цифровое производство в машиностроении».

В рамках проведенного семинара участники поделились информацией об организации и результативности профиля НТО на базе университетов. Коллеги обменялись опытом создания профилей НТО и рассказали о том, как собирали команду и проводили этапы олимпиады, с какими трудностями столкнулись и как с ними справились. Возможность сверить дорожные

карты и пообщаться уже с опытными участниками Научной технологической олимпиады для нас имела особую ценность.

С приветственным словом и рассказом о возможностях проекта НТО выступила руководитель направления по работе с вузами центра НТО при НИУ ВШЭ **Вероника Яковлева**.

«Организация профиля НТО, как правило, происходит в партнерстве с другими университетами или организациями, центром НТИ, и другими ...» — отметила **Вероника Яковлева**. ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» не стал исключением и в качестве своего партнера в организации профиля «Цифровое производство в машиностроении» привлёк ГК Роскосмос и ПАО Приборный завод «Сигнал». Совместно с представителями наших партнеров разрабатываются задания и материалы к олимпиаде. Не останутся в стороне наши партнеры и, пожалуй, в самой приятной части соревнования — награждении победителей ценными подарками и сувенирами.

В ходе научно-методического семинара были заслушаны доклады коллег на наиболее актуальные темы. Заместитель начальника Центра образовательных технологий Московского политеха, организатор профилей «ИБС: агроботехнологии» и «Автономные транспортные системы» **Ольга Заборская** рассказала об особенностях организации профилей инженерной направленности и опыте применения реального оборудования и инструмента. Об опыте привлечения к разработке и тестированию методических материалов студентов поведала и.о. заведующего кафедрой естественно-научных дисциплин Иркутского государственного университета, организатор профиля «Технологии дополненной реальности» **Анна Балахчи**. А доцент кафедры архитектуры Новосибирского государственного университета архитектуры, дизайна и искусства, член Союза архитекторов РФ, организатор профиля «Цифровые технологии в архитектуре» **Елена Духанина** поделилась опытом использования цифровых технологий в творческих профилях НТО.



## ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК МГТУ «СТАНКИН» В 2022 ГОДУ

### 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

**Драпак К.А., Крылов Е.Г., Капитанов А.В.** Методика многокритериальной оценки эффективности работы регазификационных терминалов. 2022. № 1 (60). С. 8–12.

**Афонина И.В., Глубоков А.В.** Выбор методики измерения линейного размера цилиндрической детали координатным методом. 2022. № 1 (60). С. 13–16.

**Пономарев К.С., Феофанов А.Н., Гришина Т.Г.** Автоматизированная система формирования и представления данных о поверке средств измерений как инструмент повышения эффективности функционирования организации. 2022. № 1 (60). С. 17–21.

**Карлов А.Г.** Теоретическая и методологическая основа, функциональные возможности программного продукта solvingmill 2.0 при создании инновационных технологий и технических систем автоматизации производства. 2022. № 1 (60). С. 22–31.

**Нежметдинов Р.А., Ковалев И.А., Котырова Ш., Путинцева Е.В.** Практические аспекты анализа лог-файлов технологического оборудования на примере набора данных «MillDataSet». 2022. № 2 (61). С. 8–14.

**Мешков В.Г.** Определение показателей научно-технического уровня интегрированных автоматизированных систем управления. 2022. № 2 (61). С. 15–18.

**Глубокова С.В., Ковалев А.В.** Методики измерения отклонения от соосности на кругломере. 2022. № 2 (61). С. 19–23.

**Дьяченко Е.П., Рыбаков А.В.** Перспективы развития модульной методологии разработки управляющих программ для станков с ЧПУ с применением «домика качества» на примере операций гравирования. 2022. № 2 (61). С. 24–27.

**Феофанов А.Н., Соболев А.Н., Белоцкий А.С.** Универсальный алгоритм САД-моделирования некруглых зубчатых колес по функции передаточного отношения. 2022. № 2 (61). С. 28–31.

**Иванов В.М.** Имитационная модель сферической обработки на токарном станке с ЧПУ. 2022. № 2 (61). С. 32–37.

**Сосенушкин С.Е., Юсеф Ф.** Методика обеспечения интероперабельности беспроводных сенсорных сетей на основе унификации форматов кадров. 2022. № 2 (61). С. 38–42.

**Мешков В.Г.** Направления адаптации и идентификации в интегрированных автоматизированных системах управления. 2022. № 3 (62). С. 8–12.

**Пушков Р.Л., Евстафиева С.В., Седьмов А.Э.** Разработка параметрического цикла обработки деталей типа тела вращения со сложным профилем. 2022. № 3 (62). С. 13–21.

**Баранов Н.Е., Феофанов А.Н.** Построение автоматизированных систем управления производством с использованием методов адаптивного управления. 2022. № 3 (62). С. 22–25.

**Поляков С.Д., Быстрикова В.А.** Применение комплексного метода квалиметрии при оценке цифровой зрелости предприятия. 2022. № 3 (62). С. 26–30.

**Филатов В.В., Чумаева М.В., Афонин К.С.** Постановка задачи построения модели цифрового управления исполнительным двигателем постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. 2022. № 3 (62). С. 31–35.

**Шошина К.В., Васендина И.С., Паршин А.О., Алешко Р.А., Воронцов Р.А., Тюрбева Т.Б.** Разработка методики автоматизированного определения заболоченности территорий Архангельской области на основе глубоких нейронных сетей. 2022. № 3 (62). С. 36–41.

**Тынченко В.С., Курашкин С.О.** Имитационное моделирование процесса электронно-лучевой сварки в установившемся режиме для отработки технологического процесса. 2022. № 3 (62). С. 42–46.

**Барзов А.А., Корнеева В.М., Корнеев С.С., Феофанов А.Н.** Вероятностная модель экономической эффективности функционально симультанных технологических систем. 2022. № 4(63). С. 32–36

**Бровченко А.А., Бровченко О.А., Белов П.С., Шварцбург Л.Э.** Классификация видов аддитивного производства. 2022. № 4(63). С. 37–41.

**Денисов М.С., Петрешин Д.И., Давыдов К.С.** Согласование режимов наложения давления со скоростью охлаждения металла в форме как способ управления процессом литья с кристаллизацией под давлением. 2022. № 4(63). С. 42–49.

**Пушков Р.Л., Евстафиева С.В., Грубляк В.Я.** Методика разработки имитационной модели станка для взаимодействия с системой ЧПУ. 2022. № 4(63). С. 50–56.

**Филатов В.В., Чумаева М.В., Афонин К.С.** Алгоритм составления программы построения фазового пространства управления и определения значения управляющего воздействия по заданной фазовой траектории. 2022. № 4(63). С. 57–63.

#### **2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы**

**Панфилов П.В.** Модуль для быстрого прототипирования средств управления мехатронным устройством. 2022. № 1 (60). С. 53–57.

**Вельтишев В.В., Аладышева Е.И.** Разработка и реализация программного обеспечения для анализа пространственного положения кабельной линии гибридного подводного робототехнического комплекса. 2022. № 1 (60). С. 58–61.

**Гаврилина Е.А., Честнов В.Н.** Синтез системы управления высокоманевренного необитаемого подводного аппарата с использованием  $H_\infty$  подхода. 2022. № 1 (60). С. 62–71.

**Зеленский А.А.** Комплексная методология синтеза быстродействующих доверенных систем управления движением промышленных роботов и мехатронных систем. *Часть I. Модели решения проблемы и комплексная методология синтеза систем управления движением промышленных роботов и мехатронных систем.* 2022. № 2 (61). С. 43–50.

**Ситников А.В., Курганов В.В., Трохова А.Н.** Применение аппаратно-программных средств для создания системы сканирования трёхмерных объектов. 2022. № 2 (61). С. 51–55.

**Панфилов П.В., Морозов В.В.** Повышение точности твердотельных лазерных дальномеров путем первичной обработки данных. 2022. № 2 (61). С. 56–60.

**Подураев Ю.В., Стебулянин М.М., Климов Д.Д., Жохара А.** Алгоритм автоматизации смены режима движения экзоскелета для реабилитации нижних конечностей с использованием операционной системы ROS. 2022. № 3 (62). С. 47–50.

**Зеленский А.А.** Комплексная методология синтеза быстродействующих доверенных систем управления движением промышленных роботов и мехатронных систем. *Часть II. Методологии синтеза подсистем доверенной памяти-центральной системы управления движением.* 2022. № 3 (62). С. 51–57.

**Илюхин Ю.В., Топорин А.А.** Обзор решений в области распределения задач между коллаборативным роботом и человеком. 2022. № 3 (62). С. 58–62.

**Берро С., Тимофеев А.Н.** Система реабилитации микромоторных возможностей человека. Моделирование и управление одиночной степени свободы. 2022. № 3 (62). С. 63–73.

**Смирнов Ю.Н., Каляшина А.В., Евдокимова Т.С.** Моделирование роботизированного процесса лазерной сварки. 2022. № 4(63). С. 64–69.

#### **2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки**

**Фомин Е.В., Снегирева К.К.** Планирование экспериментального исследования обрабатываемости резанием альфа титановых сплавов. 2022. № 1 (60). С. 32–36.

**Бровкова М.Б., Бушуев В.В., Молодцов В.В.** Планирование экспериментального исследования обрабатываемости резанием альфа титановых сплавов. 2022. № 2 (61). С. 61–68.

**Атрощенко В.В., Бердин В.К., Таймасова Л.А.** Влияние засаленности абразивного инструмента на качество поверхностного слоя и точностные параметры обрабатываемой детали. 2022. № 3 (62). С. 74–81.

**Балова Д.Г.** Эффективность применения и определение режущей способности твердосплавного инструмента при обработке титановых сплавов. 2022. № 3 (62). С. 82–86.

**Стебулянин М.М., Остриков Е.А.** Мультипликативно-степенные модели термосиловых параметров при точении труднообрабатываемых жаропрочных сплавов. 2022. № 4(63). С. 8–12

**Мирзомахмудов А.Р., Исаев А.В.** Геометрическая модель сборной фасонной фрезы со сменными режущими пластинами для обработки колесных пар. 2022. № 4(63). С. 70–74.

**Исаев А.В., Лядник С.В., Купцов В.Р.** Анализ конструкций приводных инструментальных блоков для прецизионных токарных станков с ЧПУ. 2022. № 4(63). С. 75–80.

**Петухов Ю.Е., Домнин П.В.** Модель решения обратной задачи профилирования при обработке фасонных винтовых поверхностей по методу обкатки. 2022. № 4(63). С. 81–84.

**Петухов Ю.Е., Домнин П.В., Желтиков С.А.** Математическое моделирование профиля часового зубчатого колеса с помощью средств математического программирования в среде Mathcad. 2022. № 4(63). С. 85–90.

**Мирзомахмудов А.Р., Исаев А.В.** Геометрическая модель сборной фасонной фрезы со сменными режущими пластинами для обработки колесных пар. 2022. № 4(63). С. 70–74.

**Исаев А.В., Лядник С.В., Купцов В.Р.** Анализ конструкций приводных инструментальных блоков для прецизионных токарных станков с ЧПУ. 2022. № 4(63). С. 75–80.

**Петухов Ю.Е., Домнин П.В.** Модель решения обратной задачи профилирования при обработке фасонных винтовых поверхностей по методу обкатки. 2022. № 4(63). С. 81–84.

**Петухов Ю.Е., Домнин П.В., Желтиков С.А.** Математическое моделирование профиля часового зубчатого колеса с помощью средств математического программирования в среде Mathcad. 2022. № 4(63). С. 85–90.

#### 2.5.6. Технология машиностроения

**Жуков С.В., Стерлин А.Я., Суминов И.В.** Технология полимер-металлооксидных композитов для адаптивной защиты от схватывания и заедания при трении на примере антифрикционных слоёв, полученных методом плазменно-электролитической обработки цилиндров модулятора высокоэнергетического акустического излучения. 2022. № 1 (60). С. 37–47.

**Седых М.И., Карташев Д.И.** Поиск оптимального технологического решения при изготовлении деталей машин. 2022. № 2 (61). С. 69–73.

**Адашкин А.М., Кубаткин В.С.** Повышение стойкости технологической оснастки для высокотемпературной термической обработки. 2022. № 3 (62). С. 87–90.

**Темпель Ю.А., Кокорин И.Н., Ергулович И.Н.** Перспективы развития нефтегазового машиностроения: новая конструкция плунжерного лифта. 2022. № 3 (62). С. 91–97.

**Перетятко С.Б., Карасева Е.А., Агеев О.В.** Обобщенная кинематическая структура станков, работающих по схеме копирования для шлифования кабашонов. 2022. № 4(63). С. 13–16

**Долгов В.А., Прошкина О.С.** Анализ технологического цикла сборки изделий в многономенклатурном машиностроительном производстве с учетом нестабильной длительности операций. 2022. № 4(63). С. 17–22.

**Седых М.И., Карташев Д.И.** Анализ стратегий поиска оптимального технологического решения при изготовлении деталей машин. 2022. № 4(63). С. 23–27.

**Темпель О.А., Темпель Ю.А., Васьков Д.Е.** Планирование эксперимента выбора оптимальных параметров процесса резания труднообрабатываемых материалов. 2022. № 4(63). С. 28–31.

#### 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

**Дмитриев А.М., Коробова Н.В.** Конструирование штампов для формования высокоплотных полых осесимметричных порошковых деталей. 2022. № 1 (60). С. 48–52.

**Толмачев Н.С., Анненков И.Ф.** Исследование трехстадийной схемы штамповки выдавливанием. 2022. № 2 (61). С. 74–78.

**Дмитриев А.М., Коробова Н.В.** Влияние технологической наследственности производства стальной заготовки на качество изделия типа стакана, изготовленного холодным выдавливанием. 2022. № 4(63). С. 91–95.

**Адашкин А.М., Кубаткин В.С., Сосенушкин Е.Н.** Влияние химического состава на пластичность сплава на основе хрома. 2022. № 4(63). С. 96–99.

#### События и даты

«Металлообработка-2021» глазами участников выставки. 2022. № 1 (60). С. 72–73.

Поздравление юбиляров. 2022. № 3 (62). С. 98–101.

Итоги и анонсы Всероссийских научно-технических олимпиад и конкурсов среди учащихся. 2022. № 3 (62). С. 102–106.

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» приглашает к участию в олимпиадах и конференциях. 2022. № 3 (62). С. 107.

Ректор ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» Владимир Валерьевич Серебрянный встретился с ректором Белорусского национального технического университета. 2022. № 4(63). С. 100.

Молодые ученые представили свои проекты в ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». 2022. № 4(63). С. 101.

Итоги Всероссийских конкурсов по научно-техническому творчеству среди учащихся ФЦТТУ ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (октябрь–декабрь 2022). 2022. № 4(63). С. 102–103.

В ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» прошел Научно-методический семинар «Практика и опыт организации и открытия профиля Национальной технологической олимпиады в образовательной организации высшего образования (школьный трек)». 2022. № 4(63). С. 104.

## THEMATIC INDEX OF ARTICLES PUBLISHED IN THE JOURNAL «VESTNIK MSUT «STANKIN» IN 2022

### 2.3.3. Automation and control of technological processes and productions

**Drapak K.A., Krylov E.G., Kapitanov A.V.** Method for multi-criteria assessment of regasification terminals efficiency. 2022. № 1 (60). p. 8–12.

**Afonina I.V., Glubokov A.V.** Selection of a method for measuring the linear size of a cylindrical part by the coordinate method. 2022. № 1 (60). p. 13–16.

**Ponomarev K.S., Feofanov A.N., Grishina T.G.** An automated system of generating and providing verification data of measuring instruments as a tool for improving the efficiency of the organization's functioning. 2022. № 1 (60). p. 17–21.

**Karlov A.G.** Theoretical and methodological basis, functional capabilities of the Solving Mill 2.0 software product in the creation of innovative technologies and technical systems for industrial automation. 2022. № 1 (60). p. 22–31.

**Nezhmetdinov R.A., Kovalev I.A., Kotyrova Sh., Putintseva E.V.** Practical aspects of the analysis of technological equipment log files on the example of the "mill data set". 2022. № 2 (61). p. 8–14.

**Meshkov V.G.** Determination of indicators of the scientific and technical level of integrated automated control systems. 2022. № 2 (61). p. 15–18.

**Glubokova S.V., Kovalev A.V.** Methods of measuring coaxiality deviations on a form measuring machine. 2022. № 2 (61). p. 19–23.

**Diyachenko E.P., Rybakov A.V.** Prospects for the development of a modular methodology for the development of control programs for CNC machines with the use of a "house of quality" on the example of engraving operation. 2022. № 2 (61). p. 24–27.

**Feofanov A.N., Sobolev A.N., Belotskiy A.S.** A universal CAD-algorithm for modeling non-circular gears by the gear ratio function. 2022. № 2 (61). p. 28–31.

**Ivanov V.M.** Simulation model of spherical processing on a CNC lathe. 2022. № 2 (61). p. 32–37.

**Sosenushkin S.E., Yousef F.** Methodology for ensuring the interoperability of wireless sensor networks based on the unification of frame formats. 2022. № 2 (61). p. 38–42.

**Meshkov V.G.** Directions of adaptation and identification in integrated automated control systems. 2022. № 3 (62). p. 8–12.

**Pushkov R.L., Evstafieva S.V., Sedmov A.E.** Development of a parametric cycle for processing rotation body type parts. 2022. № 3 (62). p. 13–21.

**Baranov N.E., Feofanov A.N.** CIM systems design based on adaptive control methods. 2022. № 3 (62). p. 22–25.

**Polyakov S.D., Bystrikova V.A.** Application of the complex method of qualimetry in assessing the digital maturity of an enterprise. 2022. № 3 (62). p. 26–30.

**Filatov V.V., Chumaeva M.V., Afonin K.S.** Statement of the problem of a digital control model constructing of a DC executive motor with excitation from permanent magnets. 2022. № 3 (62). p. 31–35.

**Shoshina K.V., Vasendina I.S., Parshin A.O., Aleshko R.A., Vorontsov R.A., Tyurbееva T.B.** Development of a methodology for the automated determination of the swampiness of the territories of the Arkhangel'sk region based on deep neural networks. 2022. № 3 (62). p. 36–41.

**Tynchenko V.S., Kurashkin S.O.** Simulation modeling of the process of the electron-beam welding in steady state for testing the technological process. 2022. № 3 (62). p. 42–46.

**Barzov A.A., Korneeva V.M., Korneev S.S., Feofanov A.N.** Proba bilistic model of economic efficiency of functionally simultaneous technological systems. 2022. № 4(63). p. 32–36.

**Brovchenko A.A., Brovchenko O.A., Belov P.S., Shvartsburg L.E.** Classification of types of addictive production. 2022. № 4(63). p. 37–41.

**Denisov M.S., Petreshin D.I., Davydov K.S.** Coordination of pressure application modes with the rate of cooling of the metal in the mold as a way to control the process of casting with crystallization under pressure. 2022. № 4(63). p. 42–49

**Pushkov R.L., Evstafieva S.V., Grublyak V.Ya.** Methodology for developing a simulation model of a machine tool for interaction with a CNC system. 2022. № 4(63). p. 50–56.

**Filatov V.V., Chumaeva M.V., Afonin K.S.** Algorithm for drawing up a program for a control phase space constructing and determining the value of the control action for a given phase trajectory. 2022. № 4(63). p. 57–63.

### 2.5.4. Robots, mechatronics and robotic systems

**Panfilov P.V.** Module for rapid prototyping of mechatronic device control. 2022. № 1 (60). p. 53–57.

**Veltishchev V.V., Aladysheva E.I.** Development and implementation of software for analyzing the spatial position of the cable line of the hybrid underwater robotic system. 2022. № 1 (60). p. 58–61.

**Gavrilina E.A., Chestnov V.N.** Synthesis of an attitude control system for highly maneuverable underwater vehicle using H-infinity approach. 2022. № 1 (60). p. 62–71.

**Zelensky A.A.** Complex synthesis methodology of high-speed trusted industrial motion control systems of robots and mechatronic systems. *Part 1. Problem solving models and integrated methodology of synthesis of motion control systems of industrial robots and mechatronic systems.* 2022. № 2 (61). p. 43–50.

**Sitnikov A.V., Kurganov V.V., Trohova A.N.** Application of hardware and software to create a system for scanning three-dimensional objects. 2022. № 2 (61). p. 51–55.

**Panfilov P.V., Morozov V.V.** Increasing the accuracy of solid state laser rangefinders through primary data processing. 2022. № 2 (61). p. 56–60.

**Poduraev Y.V., Stebulyanin M.M., Klimov D.D., Johara A.** Algorithm for automating the movement mode change of a lower limb rehabilitation exoskeleton using Robotic Operating System. 2022. № 3 (62). p. 47–50.

**Zelensky A.A.** Complex synthesis methodology of high-speed trusted industrial motion control systems of robots and mechatronic systems. *Part II. Methodology of synthesis of subsystems of a trusted memory-centric motion control system.* 2022. № 3 (62). p. 51–57.

**Ilyukhin Yu.V., Toporin A.A.** Review of solutions in the field of task allocation between a collaborative robot and a human. 2022. № 3 (62). p. 58–62.

**Berro S.M., Timofeev A.N.** Rehabilitation system of human micromotor capabilities. Modeling and loop shaping of single-dof. 2022. № 3 (62). p. 63–73.

**Kalyashina A.V., Evdokimova T.S., Smirnov Yu.N.** Simulation of a robotic laser welding process. 2022. № 4(63). p. 64–69.

### 2.5.5. Technology and equipment of mechanical and physical-technical processing

**Fomin E.V., Snegireva K.K.** Planning an experimental study cutting of alpha titanium alloys. 2022. № 1 (60). p. 32–36.

**Brovkova M.B., Bushuev V.V., Molodtsov V.V.** Digital twins of technological systems: state of the art review, specifics of implementation and use, prospects. 2022. № 2 (61). p. 61–68.

**Atroshenko V.V., Berdin V.K., Taymasova L.A.** The influence of contamination of the abrasive tool on the quality of the surface layer and the accuracy parameters of the workpiece. 2022. № 3 (62). p. 74–81.

**Balova D.G.** Efficiency of application and determination of the cutting capacity of a carbide tool in the processing of titanium alloys. 2022. № 3 (62). p. 82–86.

**Stebulyanin M.M., Ostrikov E.A.** Multiplicative-power models of thermal force parameters in turning hard-to-machine heat-resistant alloys. 2022. № 4(63). p. 8–12.

**Mirzomakhmudov A.R., Isaev A.V.** Geometric model of a milling cutter with indexable inserts for machining wheel sets. 2022. № 4(63). p. 70–74.

**Isaev A.V., Lyadnik S.V., Kuptsov V.R.** Analysis of designs of driven tools used for high-precision CNC lathe machines. 2022. № 4(63). p. 75–80.

**Petukhov Yu.E., Domnin P.V.** Model for solving the inverse problem of profiling in the processing of shaped helical surfaces using the hobbing. 2022. № 4(63). p. 81–84.

**Petukhov Yu.E., Domnin P.V., Zheltikov S.A.** Mathematical modeling of the clock wheel's profile using mathematical programming tools in the Mathcad environment. 2022. № 4(63). p. 85–90.

### 2.5.6. Technology of machine building

**Zhukov S.V., Sterlin A.Y., Suminov I.V.** Technology of polymer-metal oxide composites for adaptive protection against setting and jamming during friction on the example of antifriction layers obtained by plasmaelectrolytic treatment of cylinders of a modulator of high-energy acoustic radiation. 2022. № 1 (60). p. 37–47.

**Sedykh M.I., Kartashev D.I.** Search for the optimal technological solution in the manufacture of machine parts. 2022. № 2 (61). p. 69–73.

**Adaskin A.M., Kubatkin V.S.** Increasing the lifetime of technological equipment for high-temperature heat treatment. 2022. № 3 (62). p. 87–90.

**Tempel Yu.A., Kokorin I.N., Ergulovich I.N.** Prospects for the development of oil and gas engineering: a new design of a plunger lift. 2022. № 3 (62). p. 91–97.

**Peretyatko S.B., Karaseva E.A., Ageev O.V.** Generalized kinematic structure of machines working according to the copying scheme for grinding cabochons. 2022. № 4(63). p. 13–16.

**Dolgov V.A., Proshkina O.S.** Analysis of the technological cycle of assembly of products in multi-nomenclature machine-building production, taking into account the average duration of operations. 2022. № 4(63). p. 17–22.

**Sedykh M.I., Kartashev D.I.** The analysis of strategies for finding the optimal technological solution in the manufacture of machine parts. 2022. № 4(63). p. 23–27.

**Tempel O.A., Tempel Yu.A., Vaskov D.E.** Planning an experiment for choosing the optimal parameters for the cutting process of hard-to-cut materials. 2022. № 4(63). p. 28–31.

### 2.5.7. Technologies and machines of processing by pressure

**Dmitriev A.M., Korobova N.V.** Design of dies for forming high density hollow axisymmetric powder parts. 2022. № 1 (60). p. 48–52.

**Tolmachev N.S., Annenkov I.F.** Research of tree-stage extrusion stamping scheme. 2022. № 2 (61). p. 74–78.

**Dmitriev A.M., Korobova N.V.** Influence of technological heredity of steel billet production on the quality of a product such as a glass made by cold extrusion. 2022. № 4(63). p. 91–95.

**Adaskin A.M., Kubatkin V.S., Sosenushkin E.N.** Influence of chemical composition on plasticity of alloy based on chromium. 2022. № 4(63). p. 96–99.

### Events and dates

«Metalloobrabotka-2021» through the eyes of exhibitors. 2022. № 1 (60). p. 72–73.

Congratulations to the anniversaries. 2022. № 3 (62). C. 98–101.

Results and announcements of All-Russian Scientific and technical Olympiads and competitions among students. 2022. № 3 (62). C. 102–106.

MSUT «STANKIN» invites you to participate in olympiads and conferences. 2022. № 3 (62). p. 107.

Rector of MSUT «STANKIN» Vladimir Valeryevich Serebrenny met with the rector of the Belarusian National Technical University. 2022. № 4(63). p. 100.

Young scientists presented their projects at MSUT «STANKIN». 2022. № 4(63). p. 101.

Results of the All-Russian competitions in scientific and technical creativity among students of the Federal centre for technical creativity of MSUT «STANKIN» (October–December 2022). 2022. № 4(63). p. 102.

In MSUT «STANKIN» passed the Scientific and methodological seminar «Practice and experience of organizing and opening the profile of the National Technology Olympiad in an educational organization of higher education (school track)». 2022. № 4(63). p. 104.



Научный рецензируемый журнал «Вестник МГТУ «Станкин» выпускается ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» с 2008 года.

В журнале «Вестник МГТУ «Станкин» публикуются результаты научных исследований, характеризующие современное состояние, тенденции развития и технические решения в областях автоматизации и управления технологическими процессами и производствами, технологии машиностроения, создания оборудования механической и физико-технической обработки, технологии и машин обработки давлением, мехатроники и робототехники, направленные на модернизацию экономики страны, создание новых поколений техники и технологий.

Журнал «Вестник МГТУ «Станкин» включает в себя разделы, в которых публикуются статьи по следующим специальностям:

- 2.5.4 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки);
- 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки);
- 2.5.6 – Технология машиностроения (технические науки);
- 2.5.7 – Технологии и машины обработки давлением (технические науки);
- 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки).



**Индексирование журнала «Вестник МГТУ «Станкин»  
в системах:**

**Высшая аттестационная комиссия (ВАК) при Минобрнауки РФ**

**Российский индекс научного цитирования (РИНЦ): eLIBRARY.ru**

[https://www.elibrary.ru/title\\_about\\_new.asp?id=28046](https://www.elibrary.ru/title_about_new.asp?id=28046)

**Государственная публичная научно-техническая  
библиотека России (ГПНТБ России)**

[https://cat.gpntb.ru/index.php?id=EC/ShowFull&mfncat=3457003&irbDb=E\\_SVODT](https://cat.gpntb.ru/index.php?id=EC/ShowFull&mfncat=3457003&irbDb=E_SVODT)

**Базы данных ВИНТИ РАН**

**Научно-техническая библиотека ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»**

[https://stankin.ru/subdivisions/id\\_129/about](https://stankin.ru/subdivisions/id_129/about), [vk.com/public193839757](https://vk.com/public193839757)

---

**Требования к оформлению статей см.**

<http://stankin-journal.ru>, [https://stankin.ru/pages/id\\_75/page\\_229](https://stankin.ru/pages/id_75/page_229)

---

**Подписка на журнал «Вестник МГТУ «Станкин»**

Интернет-каталог «Пресса России», подписной индекс 48635

[https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y\\_e48635/](https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y_e48635/)

Адрес учредителя и редакции:

127994, Москва, Вадковский пер., 1, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», к. 0618

<http://stankin-journal.ru>, e-mail: [vestnik@stankin.ru](mailto:vestnik@stankin.ru), [orni.stankin@mail.ru](mailto:orni.stankin@mail.ru)

Выпуск журнала подготовлен Объединенной редакцией  
научных изданий ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Подписано в печать 30.11.2022 Формат 60 × 90 1/8. Усл. печ. л. 14,0.

Отпечатано в ИПЦ ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»