

# НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

**№ 8 (146)**

**2023**

Издается с июля 2011 г.

**ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ**

**Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей**

## Главный редактор

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

## Зам. главного редактора

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

## Председатель редакционного совета

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

## Зам. председателя редакционного совета

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

## Редакционный совет:

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

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

д.н., доктор инженер ВАЛЬДЕНМАЙЕР Т.  
(г. Штутгарт, Германия)

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

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

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

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

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

д.т.н., доц. ЛАРИН С.Н. (г. Тула)

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

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

д.т.н., проф. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)

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

д.т.н., проф., акад. НАН Беларуси

МЫШКИН Н.К., (г. Гомель, Беларусь)

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

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

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

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

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

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

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

DOI:10.30987/issn.2223-4608

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

Подписной индекс: **Э79195**.

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

E-mail: editntm@yandex.ru

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

**Киселев Е.С., Илюшкин М.В.** Компьютерное моделирование процесса сверления сложных пакетов титанового сплава и композиционного материала с использованием цифровых двойников . . . . . 3

**Хейфец М.Л.** Проектирование мехатронных систем гибридных станочных комплексов. . . . . 12

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

**Приходько В.М., Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С.** Автоматизация и цифровизация ультразвуковых технологических процессов. . . . . 20

**Смоленцев В.П., Кондратьев М.В., Смоленцев Е.В.** Комбинированные технологии повышения надежности и ресурса изделий авиакосмической техники. . . . . 27

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

**Безъязычный В.Ф., Шеховцева Е.В.** Технологическое обеспечение изготовления зубчатых колес авиационных газотурбинных двигателей с учетом нестабильности физико-механических свойств их материалов. . . . . 35

**Базров Б.М.** Специализация машиностроительного производства. . . . . 43

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

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

# SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

**№ 8 (146)**

**2023**

**Publishes from July 2011**

**MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL**

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

## Editor-in-chief

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

## Deputy chief editor

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

## Chairman of Editorial Committee

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

## Chairman Assistant

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

## Editorial Committee:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

c.en.s., assoc. prof. SHOHYON A.N. (Kulob,  
Tajikistan)

DOI:10.30987/issn.2223-4608

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

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

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

## CONTENTS

### TECHNOLOGIES OF MECHANICAL PROCESSING OF WORKPIECES

**Kiselev E.S., Ilyushkin M.V.** Computer simulation technique for drilling process  
of titanium alloy and composite material complex packages using digital twins . . . . . 3

**Kheifets M.L.** Design of mechatronic systems of hybrid machine complexes . . . . . 12

### TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

**Prikhodko V.M., Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S.** Automation  
and digitalization of ultrasonic technological processes. . . . . 20

**Smolentsev V.P., Kondratiev M.V., Smolentsev E.V.** Combined technologies  
for increasing the reliability and service life of aerospace products . . . . . 27

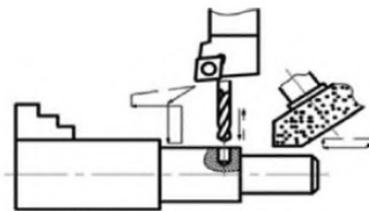
### TECHNOLOGICAL SUPPORT OF OPERATIONAL PROPERTIES OF MACHINE PARTS AND THEIR CONNECTIONS

**Bezyazichniy V.F., Shekhovtseva E.V.** Engineering support for the manufacture  
of gears of aviation gas turbine engines providing for the instability of the  
physical and mechanical properties of their materials . . . . . 35

**Bazrov B.M.** Machine-building line of production . . . . . 43

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

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



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №8 (146). С.3-11.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №8 (146). P. 3-11.

Научная статья  
УДК 536:621.9  
doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-8-14

## Компьютерное моделирование процесса сверления сложных пакетов титанового сплава и композиционного материала с использованием цифровых двойников

Евгений Степанович Киселев<sup>1</sup>, д.т.н.  
Максим Валерьевич Илюшкин<sup>2</sup>, к.т.н.

<sup>1</sup> Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия;

<sup>2</sup> Ульяновский научно-исследовательский институт авиационной технологии и организации производства, Ульяновск, Россия

<sup>1</sup> kec.ulstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1745-9016>

<sup>2</sup> fzbm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3335-728X>

**Аннотация.** Сложные пакеты из поликристаллических композитных материалов на основе углепластиков и титановых сплавов находят все более широкое распространение в конструкциях изделий машиностроения и становятся основным материалом при производстве современных видов скоростного транспорта. Однако технология механической обработки поверхностей деталей из этих материалов, в частности отверстий, отличается недостаточной изученностью, отсутствием нормативных режимов резания и основывается чаще всего на производственном опыте предприятий. При изменении условий обработки и материалов сложных пакетов длительность технологической подготовки производства становится причиной существенного увеличения себестоимости изготовления узлов и деталей вследствие необходимости опытного подбора рациональных элементов режима резания. Для исключения эмпирического подбора рациональных элементов режима резания на станочном оборудовании была рассмотрена возможность использования цифровых двойников процессов сверления отверстий в заготовках из данных материалов, в том числе, с введением в зону формообразования новых поверхностей энергии ультразвукового поля с целью повышения качества обработанных поверхностей, производительности обработки и сокращения технологической подготовки производства на этапе подбора элементов режима резания взамен апробации выбранных условий обработки на действующем технологическом оборудовании. При моделировании использовалась программа LS-DYNA. Подготовка моделей и обработка результатов выполнялась в программе LS-Prepost 4.8. В процессе исследований применяли явный метод моделирования с предварительной валидацией. Исследованиями установлено, что разработанные конечно-элементные модели позволяют имитировать технологические процессы одновременного сверления пакетов титанового сплава и композиционного материала в компьютере (цифровой двойник) без проведения достаточно сложных и затратных натурных испытаний. В результате моделирования был получен расчетный файл, содержащий процесс симуляции, решение которого визуально отражает процесс сверления отверстий в заготовках из сложных пакетов титанового сплава и композиционного материала, максимально приближенный к реальной ситуации со снятием стружки. Так как использование цифровых двойников для выполнения данного этапа технологической подготовки производства в условиях действующих предприятий не связано с длительной и дорогостоящей эксплуатацией станочного парка, следует ожидать существенного снижения себестоимости изготовления узлов и деталей из подобных материалов в промышленности, прежде всего в мелкосерийном и единичном производстве.

**Ключевые слова:** сложный пакет, титановый сплав, композиционный материал, сверление, ультразвук, моделирование, цифровой двойник, качество поверхности

*Для цитирования:* Киселев Е.С., Илюшкин М.В. Компьютерное моделирование процесса сверления сложных пакетов титанового сплава и композиционного материала с использованием цифровых двойников// Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 8 (146). С. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-8-14

## Computer simulation technique for drilling process of titanium alloy and composite material complex packages using digital twins

Evgeniy S. Kiselev<sup>1</sup>, D. Eng.  
Maxim V. Ilyushkin<sup>2</sup>, PhD. Eng.

<sup>1</sup> Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia;

<sup>2</sup> Ulyanovsk Research Institute of Aviation Technology and Production Organization,  
Ulyanovsk, Russia

<sup>1</sup> kec.ulstu@mail.ru,

<sup>2</sup> fzbm@mail.ru

**Abstract.** Complex packages of polycrystalline composite materials based on carbon fiber plastics and titanium alloys find wide application in the designs of machine-building products and become the main material in the production of high-speed modern transport modes. However, the technology of machining parts surfaces made of these materials, namely holes, is characterized by insufficient knowledge, lack of standards for cutting modes and is based more often on the production experience of enterprises. When machining conditions and materials of complex packages change, the duration of technological preparation of production causes a significant increase in the cost of manufacturing components and parts due to the need for competent selection of rational elements of the cutting mode. To exclude the empirical fit of rational elements of the cutting mode on machining facility, the possibility of using digital twins of drilling processes in workpieces made of these materials is studied. It also implies the introduction of ultrasonic field energy into new surfaces generation of geometry in order to improve the quality of the machining area production efficiency and reduction of technological preparation of production based on the selection of elements of the cutting mode instead of testing the selected machining conditions using the existing technological equipment. The LS-DYNA program was used in the simulation process. Preparation of models and data process was carried out in the LS-Prepost 4.8 program. In the course of research, an explicit simulation technique with preliminary validation was used. Studies proved that the developed finite element models allow simulating the technological processes of simultaneous drilling of packages of titanium alloy and composite material in a computer (digital twin) without conducting sufficiently complex and costly field tests. Generated by simulation, a calculation sheet was obtained containing the simulation process, the solution of which visually reflects the process of drilling holes in workpieces made of complex packages of titanium alloy and composite material, as close as possible to the real situation with chip removal. Since the use of digital twins for performing this stage of technological preparation of production in the conditions of existing enterprises is not associated with a long and expensive operation of machine-tool fleet, we should expect a significant reduction in the cost of manufacturing components and parts from similar materials in industry, primarily in small-scale or single-part production.

**Keywords:** complex package, titanium alloy, composite material, drilling, ultrasound, simulation, digital twin, surface quality

**For citation:** Kiselev E.S., Ilyushkin M.V. Computer simulation technique for drilling process of titanium alloy and composite material complex packages using digital twins / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 8 (146). P. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-8-14

### Введение

Все возрастающий рост уровня спроса композиционных материалов в машиностроении влечет за собой необходимость разработки эффективных технологий для их обработки. Одним из основных видов применения таких материалов, в частности полимерных композиционных материалов (ПКМ), является их использование при изготовлении конструктивных элементов продукции авиационной промышленности. Это происходит за счёт уникальных свойств таких материалов – малой плотности и высокой прочности.

Расчетные данные, подтвержденные результатами экспериментальных исследований, показывают, что использование композиционных материалов позволяет снизить массу планера летательного аппарата на 30...40 % по сравнению с массой планера из традиционных металлических материалов. Все это обеспечивает получение резерва массы, который может быть использован для увеличения дальности полета или полезной нагрузки.

Использование композиционных материалов в авиационной промышленности существенно снижает материалоемкость конструкций, увеличивает до 90 % коэффициент

использования материала, уменьшает количество оснастки и резко снижает трудоемкость изготовления конструкций за счет уменьшения в несколько раз количества входящих в них деталей. Компоненты, состоящие из композиционных материалов, производятся, практически, в окончательной форме, но в процессе соединения их с титановыми или алюминиевыми кронштейнами механическая обработка неизбежна. Сверление является наиболее частой операцией для получения конструктивных отверстий, используемых для соединения между собой деталей самолёта посредством специального крепежа, применяемого в авиации. Проблемы, возникающие при сверлении, могут привести к отказу компонентов летательного аппарата (ЛА). Расслоение является одним из наиболее негативных повреждений, т. к. оно приводит к резкому снижению механических свойств узла самолёта и, бесспорно, к снижению его надежности в эксплуатации. В большинстве случаев ПКМ, применяемые в авиастроении используются в совокупности с другими материалами, образуя сложный пакет, состоящий из нескольких слоёв. В основном в состав таких соединений, кроме ПКМ, входят титан или алюминий. Как правило, из алюминиевых и титановых сплавов изготавливают детали силового каркаса планера и обводообразующие элементы.

Количество разнородных материалов в пакетах обычно не превышает трех (титановый сплав, алюминиевый сплав, КМ), а суммарное количество слоев ПКМ может достигать пяти и более. Состав сложного пакета и последовательность расположения слоев зависит от конструктивных особенностей и назначения соединяемых деталей. Составляющие элементы таких многослойных пакетов обладают различными физико-механическими свойствами (например, низкой теплопроводностью и склонностью к адгезии титановых сплавов, ярко выраженной анизотропией свойств ПКМ и др.). Поэтому в процессе механической обработки возникают дефекты: расслоение, деструкция, несрезанные волокна, вырывы, оплавление полимерной матрицы, изменение формы отверстий, их разбивка, образование прижогов на обработанных поверхностях и т. п. В свою очередь, снижение качества отверстий может привести к высоким контактным нагрузкам, снижению ресурса и разрушению соединений в сложных пакетах.

На сегодняшнее время в авиационной промышленности обозначена конкретная проблема, заключающаяся в необходимости повышения эффективности процессов лезвийной механической обработки как ПКМ, так и сочетания композиционных материалов с титановыми сплавами в различных конструкциях. Объяснением могут являться следующие причины:

– ПКМ и титановые сплавы входят в число труднообрабатываемых материалов, которые требуют использования специальных режимов резания и дорогостоящего режущего инструмента, период стойкости которого значительно ниже, чем при обработке других материалов. С учетом повышенного износа, расход инструмента значительно увеличивается, следовательно, увеличивается и конечная стоимость продукции [1];

– получение отверстий в сложных пакетах в большинстве случаев является окончательным видом обработки, которая необходима для последующих сборочных операций, а именно соединения ПКМ и титанового сплава между собой. Учитывая высокие требования к таким отверстиям и характеру соединения слоев между собой, можно сделать вывод о том, что цена ошибки на заключительной операции крайне высока.

Титановые сплавы и ПКМ существенно отличаются по технологии производства, природе достижения механических свойств и структурному построению, что усложняет выбор способов соединений данных материалов между собой.

Процесс получения отверстий в сложных пакетах, состоящих из титановых сплавов и композиционных материалов, является сложной задачей. Это обусловлено различными требованиями к режиму резания, в том числе, практически, при полном отсутствии нормативной информации по их обработке. Поэтому для решения таких задач необходим поиск нестандартного технологического решения.

Направлениями, способными повысить производительность и уменьшить себестоимость изготовления, могут быть:

– уменьшение машинного времени за счет интенсификации элементов режима резания вследствие рационального выбора материала и геометрии режущего инструмента, снижения затрат на трение в контактных зонах режущего

инструмента и заготовки за счет введения в зону формообразования энергии внешних энергетических полей, например ультразвука;

– сокращение затрат на технологическую подготовку производства (ТПП);

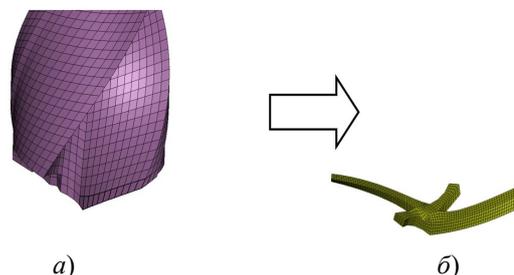
– повышения жесткости технологической системы и др.

Использование цифровых двойников процессов сверления отверстий в заготовках из сложных пакетов титанового сплава и композиционного материала, том числе – с введением в зону формообразования новых поверхностей энергии ультразвукового (УЗ) поля взамен натурной апробации возможных сочетаний элементов режима резания позволит сократить длительность ТПП и затраты на их проведение на действующем оборудовании. Для моделирования в данной работе использовалась программа LS-DYNA [2, 3], подготовка моделей и обработка результатов выполнялась в программе LS-Prepost 4.8 [3].

### Материалы и методы

Для уменьшения времени расчета применяли упрощенную сеточную геометрию сверла. С этой целью от полного сверла оставляли только режущую кромку (рис. 1). Данный подход допустим и не вводит большую

погрешность при наличии сколотой стружки, которая в данном случае характерна для применяемых материалов.



**Рис. 1. Упрощение сверла от полной модели (а) до режущей кромки (б)**

**Fig. 1. Facilitation of the drill from the complete model (a) to the cutting edge (b)**

В принятой модели использовались следующие кинематические параметры движения сверла:

– окружная скорость вращения сверла в модели составляла 942 рад/с или 150 об/с;

– осевая подача сверла составила 0,15 мм/об.

Для заготовки использовался пакет «металл – композит – металл.»

В качестве металла использовался титановый сплав ВТ6, материала композита – ВКУ-39.

В пакете моделировались 12 слоев (табл. 1).

## 1. Состав пакета из слоев, марок и моделей материалов

### 1. Package composition of layers, grades and models of materials

Слой	Материал	Толщина, мм	Марка материала	Модель материала в программе LS-DYNA
1 слой	Металл	1,5	ВТ6	MAT JOHNSON COOK
2...11 слой	Композит	0,15*	ВКУ-39	054/055MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE
12 слой	Металл	1,5	ВТ6	MAT_JOHNSON_COOK

\* – толщина слоя препрега

Металл моделировался при помощи восьмиузловых объемных элементов с пониженным интегрированием. Композит моделировался также при помощи восьмиузловых

толстостенных оболочных элементов с пониженным интегрированием. Размеры сеточных ячеек модели представлены в табл. 2, положение зон представлено на рис. 2.

## 2. Размеры сеточных ячеек модели

### 2. Model grid cell sizes

Материал	Сетка под сверлом (зона 1*)	Сетка в зоне окружной части сверла (зона 2*)	Сетка вне зоны сверла (зона 3*)
Металл и композит	0,15×0,15×0,15	0,06×0,15×0,15	0,6×0,15×0,15

\* – согласно рис. 2

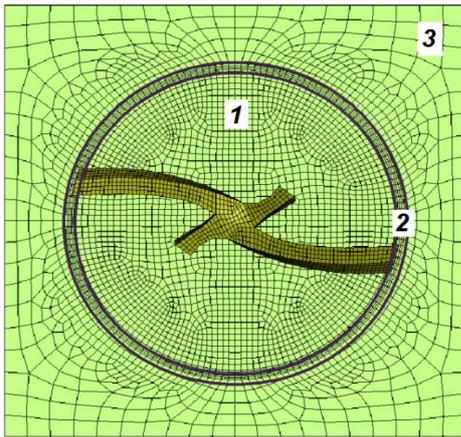


Рис. 2. Сеточная модель сверления пакета с сеткой различной величины:

1 – сетка заготовки, перекрываемая сверлом; 2 – сетка заготовки в зоне окружной части сверла; 3 – сетка вне зоны сверла

Fig. 2. Grid model of drilling a package with a grid of various sizes:

1 – the pattern of the workpiece overlapped by the drill; 2 – the pattern of the workpiece in the zone of the circular part of the drill; 3 – the pattern outside the drill area

Сетка, перекрываемая сверлом (зона 1), будет полностью удаляться в процессе сверления, ее размеры приняты в виде средней величины 0,15 мм по всем сторонам. Данная величина принята после многократных тестовых испытаний на сеточную зависимость. Большая сетка не позволит адекватно отобразить разрушение элементов модели, а использование более мелкой сетки приводит к увеличению времени расчета.

Сетка заготовки в зоне окружной части сверла (зона 2) будет удалена частично, ее величина непосредственно влияет на качество отверстия после сверления и на возникновения дефекта деламинации слоев композита. Предварительно размер сетки уменьшен с 0,15 по 0,06 мм и в зависимости от величины отхода композитных слоев. Размер сетки может быть уменьшен еще больше.

Сетка в зоне 3, находящаяся вне действия сверла (его контактной части), увеличена до 0,6 мм, что сделано для уменьшения времени расчета. С целью обеспечения более точного анализа остаточных напряжений в металле и деламинационных эффектов в композите имеется переходная сеточная зона 2 – в зоне окружной части сверла (см. рис. 2).

В качестве модели материала сверла принимали недеформируемый материал со свойствами быстрорежущей стали и возможностью перемещение и вращения вокруг вертикальной оси Z.

Для удобства расчетов использовалась система единиц несколько отличная от системы СИ (длина в миллиметрах, время в секундах, масса в тоннах).

За модель материала титанового сплава VT6 принимали модель Джонсона Кука с разрушением [4, 5]. Параметры материала приведены в табл. 3.

### 3. Параметры модели материала 015\_MAT\_JOHNSON\_COOK для VT6

#### 3. Material model parameters 015\_MATT\_JOHNSON\_COOK for VT6

Плотность	$4,443 \times 10^{-6}$ кг/мм <sup>3</sup> ;
Модуль Юнга	$1,138 \times 10^5$ МПа
Коэффициент Пуассона	0,34
Параметры пластичности:	
<i>A</i>	968 МПа
<i>B</i>	380 МПа
<i>N</i>	0,421
<i>C</i>	0,0197
<i>M</i>	0,577
Параметры разрушения:	
<i>D1</i>	0,5

В качестве основной модели материала ПКМ (ВКУ-39) использовалась модель композиционного ортотропного материала с разрушением.

В модели материала задавались следующие параметры, представленные в табл. 4 [6, 7].

4. Параметры модели материала 054/055\_MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE  
для ВКУ-39

4. Material Model parameters 054/055\_MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE  
for VKU-39

Плотность	$1,525 \times 10^{-6}$ кг/мм <sup>3</sup> ;
Модуль Юнга ( <i>EA</i> , <i>EB</i> )	$6,39 \times 10^4$ МПа
Коэффициент Пуассона	0,3
Модуль сдвига	4080 МПа

В модели материала задавалось разрушение от действия растягивающих напряжений и были заданы значения разрушающих деформаций. Деформации от сжатия и сдвига были несколько завышены, поскольку на процесс разрушения оказывают влияние только деформации растяжения.

Для связи между слоями (моделирование клеевого слоя) использовался автоматический контакт поверхность – поверхность с

приставкой *tiebreak* (связной разрушаемый контакт) и с дискретной моделью трещины, степенной зависимостью и моделями повреждения, основные параметры также были взяты из работы [7] на основе прочностных данных применяемых клеевых составов после проведения тестовых испытаний и их валидации. Были использованы следующие параметры, представленные в табл. 5.

5. Параметры клеевого слоя

5. Parameters of the adhesive layer

Нормальные напряжения разрушения клеевого слоя	0,15 МПа;
Сдвиговые напряжения разрушения клеевого слоя	1,5 МПа;
Энергия разрушения (нормальное направление)	0,9 мДж;
Энергия разрушения (сдвиговое направление)	0,9 мДж;
Жесткость (нормальное направление)	6,25 МПа.

За модель режущего инструмента была принята режущая кромка спирального двухперого сверла диаметром 10 мм и углом при вершине  $2\phi = 140^\circ$ . Модель представляли твердотельными элементами со сторонами 0,12...0,14 мм.

Модель пакета представляла собой набор из слоев материала, содержащих металлическую пластину 2 (рис. 3), 10 слоев композита 3 и металлическую пластину 4. Общие размеры модели составляли 15×15×4,5 мм. Все слои модели были связаны между собой, что имитировало клеевое соединение. Модель заготовки представлена в прямоугольной виде для упрощения установки ограничений. На четыре боковых поверхности модели заготовки были введены ограничения по всем шести степеням свободы.

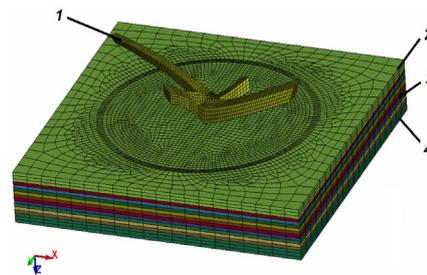


Рис. 3. Модель сверла и пакета для моделирования процесса сверления:

1 – сверло; 2 – слой металла; 3 – слой композита; 4 – слой металла

Fig. 3. Drill and package model for drilling process simulation:

1 – drill bit; 2 – metal layer; 3 – composite layers; 4 – metal layer

С целью оценки условий контакта между сверлом и композитом, а также контактов между самими слоями композита (после разрушения клеевой связи), задавался контакт, учитывающий разрушение материала [8, 9].

После подготовки конечно-элементной модели выполнялся расчет в программе LS-DYNA версии 971 V10.2 с двойной точностью.

### Результаты и обсуждение

Этапы сверления композита приведены на рис. 4. Для проверки адекватности модели были выведены графики энергетического коэффициента (рис. 5) и графики всех энергий (рис. 6). Значения на графике энергетического коэффициента должны быть близкие к единице [3]. На представленном графике (см. рис. 5) в установившемся режиме значения близки к  $1,0 \pm 0,01$ , что говорит об полном удовлетворении требования к энергиям. На начальных и конечных этапах значение коэффициента больше единицы на 6...8 %, что допустимо на данных этапах.

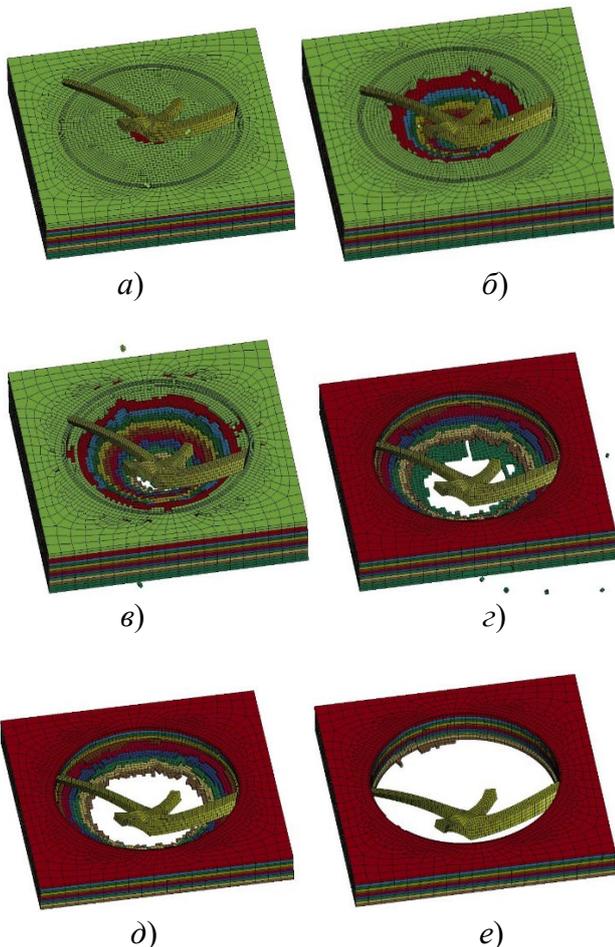


Рис. 4. Этапы сверления пакета по времени: а – 0,02 с; б – 0,06 с; в – 0,08 с; г – 0,1 с; д – 0,12 с; е – 0,15 с

Fig. 4. The stages of drilling the package with respect to time: a – 0,02 s; b – 0,06 s; c – 0,08 s; d – 0,1 s; e – 0,12s; f – 0,15 s

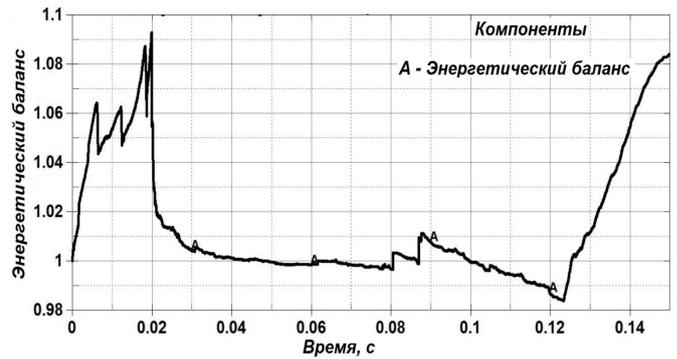


Рис. 5. График вывода энергетического коэффициента для проверки адекватности процесса

Fig. 5. The graph of the output of the energy coefficient to check the process consistency

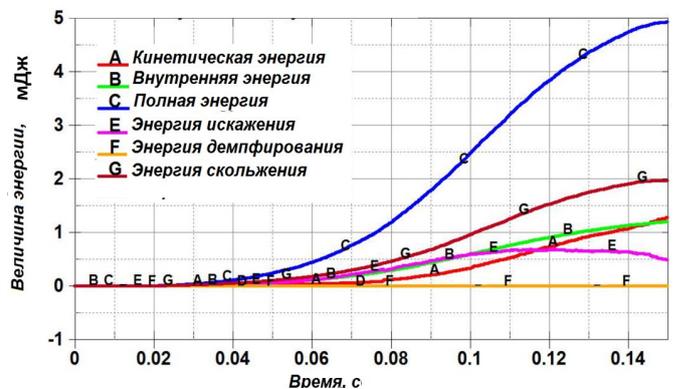


Рис. 6. Графики энергий (МДж) в процессе сверления пакета

Fig. 6. Graphs of energy (MJ) in the process of drilling the package

Оценка величин энергий на конечном этапе показало следующие значения: кинетическая энергия – 1280 МДж; внутренняя энергия – 1190 МДж; полная энергия – 4920 МДж; энергия искажения Hourglass – 480 МДж; энергия скольжения – 1970 МДж.

Полная энергия состоит из суммы всех других энергий и по процентному содержанию составляет: кинетическая энергия – 26 %; внутренняя энергия – 24 %; энергия искажения Hourglass – 10 %; энергия скольжения – 40 %.

Наибольшая из рассматриваемых энергий является энергия скольжения (SlidingEnergy), что связано со скольжением (трением) сверла по поверхности заготовки, вносящая наибольший вклад в общую энергию [7, 10]. Подбирая соответствующие режимы обработки и внося, в качестве примера, в зону формообразования новых поверхностей энергию ультразвукового поля, можно уменьшить

энергию скольжения и, соответственно, общую энергию, что положительно скажется на всей модели и на процессе сверления в целом. Последнее сопровождается существенным уменьшением теплосилового напряженности процесса резания, снижением вероятности возникновения дефектов на обработанных поверхностях, уменьшением износа режущих кромок инструмента [7, 8].

Данные расчетов, представленные в виде графиков на рис. 5 и рис. 6, подтверждают адекватность выполненного моделирования.

На рис. 7 представлены графики усилия сцепления слоев композита. Оценка величин усилия на конечных этапах показала, что верхние слои композита имеют более низкие значения сцепления. Например, сцепление между препрегами один и два составляет 9,5 Н, но по следующим слоям препрега это значение увеличивается и для слоя между препрегами девять и десять составляет 25,5 Н. Это увеличение может быть связано с воздействием нижних зажатых слоев на рассматриваемые слои при освобождении (удалении) при сверлении верхних слоев.

Если оценивать усилие сцепления не по всей поверхности препрегов, а только по зонам края отверстия, это позволит по результатам подобных расчетов предсказать возникновение деламинации слоев композита.

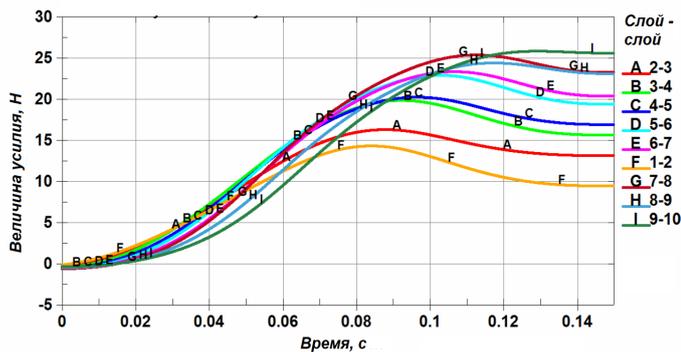


Рис. 7. Усилие сцепления (Н) между слоями композита

Fig. 7. Coupling force (N) between composite layers

### Выводы

Выполненные исследования подтверждают возможность замены натуральных испытаний использованием цифровых двойников процессов сверления отверстий в заготовках из сложных пакетов титанового сплава и

композиционного материала, в том числе с введением в зону формообразования новых поверхностей энергии ультразвукового поля для сокращения технологической подготовки производства на этапе подбора элементов режима резания взамен апробации изменений условий обработки на действующем технологическом оборудовании. Использование подобных расчетов в действующем производстве позволит существенно уменьшить себестоимость изготовления деталей и узлов из сложных пакетов титанового сплава и композиционного материала и сократить технологический цикл изготовления изделий в целом.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Киселев Е.С., Илюшкин М.В., Савельев К.С. Исследования процессов резания заготовок из труднообрабатываемых материалов с использованием для математического моделирования цифровых двойников // Научные технологии в машиностроении. 2021. № 7. С. 29–40.
2. LS-DYNA Theory Manual. Livermore: LSTC, 2019, 689 p.
3. LS-DYNA Keyword User,s Manual. Volume I, II. Livermore: LSTC, 2019, 5289 p.
4. Криворучко Д.В., Залого В.О., Корбач В.Г. Основы 3D-моделирования процессов механической обработки методом конечных элементов. Учебное пособие. Сумы, 2009. 209 с.
5. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. М.: URSS, 2018. 426 с.
6. Кудрявцев О.А., Оливенко Н.А., Жихарев М.В. Разработка и верификация численных моделей для анализа механического поведения композитных элементов при высокоскоростном ударе // XXIV Туловские чтения (школа молодых ученых) тексты докладов участников Международной молодежной научной конференции, в 6 т. 2019. Т. 1. С. 146–152.
7. Савельев К.С., Илюшкин М.В., Киселев Е.С. Использование цифровых двойников для математического моделирования ультразвукового сверления титановых заготовок // Вектор науки ТГУ. 2021. № 1. С. 42–55.
8. Илюшкин М.В., Киселев Е.С. Моделирование процессов сверления заготовок из полимерных композиционных материалов путем использования цифровых двойников // FrontierMaterials&Technologies. 2023. № 2. С. 47–57. DOI: 10.18323/2782-4039-2023-2-64-1.
9. Муйземник А.Ю., Морозов Е.М. ANSYS в руках инженера: Динамическое нагружение. М.: ЛЕНАНД, 2023. 244 с.
10. Nguyen Thi Anh, Tran Thanh Tung. Drilling Modelling Using Computer Simulation. International Journal Of Scientific & Technology Research Volume 9, Issue 10, October 2020. pp.171–174.

## REFERENCES

1. Kiselev E.S., Ilyushkin M.V., Savelyev K.S. Studies of cutting operation of hard-to-machine billets through the use of digital twins applied in mathematical modeling // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2021, no. 7, pp. 29–40.
2. LS-DYNA Theory Manual. Livermore: LSTC, 2019, 689 p.
3. LS-DYNA Keyword User,s Manual. Volume I, II. Livermore: LSTC, 2019, 5289 p.
4. Krivoruchko D.V., Zaloga V.O., Gorbach V.G. Fundamentals of 3D machining modeling through finite element method: manual. Sumy: SumSU, 2009, 209 p.
5. Morozov E.M., Nikishkov G.P. Finite element method in fracture mechanics. Moscow: URSS, 2018. 426 p.
6. Kudryavtsev O.A., Olivenko N.A., Zhiharev M.V. Development and verification of numerical models for analysis of composite elements mechanical behavior during high-velocity impact. // XXIV Tupolev readings (school of young scientists). Texts of reports of the participants of the International Youth Scientific Conference, in 6 volumes, 2019, vol. 1, pp. 146–152.
7. Savelyev K.S., Ilyushkin M.V., Kiselev E.S. Ultrasonic titanium blanks drilling using digital twins for mathematical modeling // Vector of Science TSU, 2021, no. 1, pp. 42–55.
8. Ilyushkin M.V., Kiselev E.S. Simulation of the processes of drilling polymer composite blanks using digital twins. Frontier Materials & Technologies. 2023;(2):47-57. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-2-64-1>
9. Muizemnek A.Yu., Morozov E.M. ANSYS in the hands of an engineer: Dynamic loading. Moscow: LE-NAND, 2023, 244 p.
10. Nguyen Thi Anh, Tran Thanh Tung. Drilling Modelling Using Computer Simulation. International Journal of Scientific & Technology Research Volume 9, Issue 10, October 2020. pp.171–174.

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

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

Статья поступила в редакцию 21.06.2023; одобрена после рецензирования 26.06.2023; принята к публикации 01.07.2023.

The article was submitted 21.06.2023; approved after reviewing 26.06.2023; assepted for publication 01.07.2023.



Научная статья  
УДК 621.7/620.3  
doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-15-23

## Проектирование мехатронных систем гибридных станочных комплексов

Михаил Львович Хейфец, д.т.н.  
Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь  
mlk-z@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6942-3605>

**Аннотация.** Рассмотрены мировые тенденции за последние полвека и перспективы развития на ближайшие десятилетия комплексов технологического оборудования. Проведен всесторонний анализ применяемых стадий и этапов проектирования обрабатывающего оборудования с помощью построения традиционных для механики машин расчетных схем. Показано, что перспективы применения потоков энергии для интенсификации процессов обработки, должны анализироваться на ранних стадиях проектирования, с использованием теплофизических и электрофизических критериев для изучения формирующихся связей в системе. Предложено приступать к проектированию мехатронных систем станочных комплексов, с анализа структурных связей информационных технологий в гибридном производстве, включающем традиционные и аддитивные технологии. Рекомендовано использовать последовательности критериев переноса для анализа процессов образования структур материала и поверхностного слоя при термомеханической и электрофизической обработке. Критерии тепломассопереноса устанавливают последовательность структурообразования в обрабатываемом материале при увеличении мощности воздействий. Критерии, характеризующие потоки энергии, при электрофизической обработке оказывают влияние на последовательность поверхностных явлений и определяют процесс формирования свойств материала. Показана организация обратных связей при управлении технологическим оборудованием через степени свободы инструментов, частиц наносимого материала и удаляемого слоя, посредством дополнительных воздействий потоками энергии. С учетом контуров прямых и обратных связей в технологической системе, следует выбирать системы числового программного управления и проектировать комплекс станочного оборудования как мехатронную систему. Комплекс гибридного технологического оборудования с позиций компьютеризации производственной деятельности, а также его модули, следует проектировать как устройства компьютерной периферии, построенные по той же архитектуре, что и ЭВМ.

**Ключевые слова:** мехатронные системы, гибридные станочные комплексы, теплофизические и электрофизические критерии, традиционные и аддитивные технологии

**Для цитирования:** Хейфец М.Л. Проектирование мехатронных систем гибридных станочных комплексов // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 8 (146). С. 12–19. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-15-23

## Design of mechatronic systems of hybrid machine complexes

Mikhail L. Kheifets, D. Eng.  
Institute of Applied Physics NAS of Belarus, Minsk, Belarus  
mlk-z@mail.ru

**Abstract.** The world trends over the last half century and prospects for the development of technological equipment complexes for the coming decades are viewed. A comprehensive analysis of the applied stages and stages of designing processing machinery with the help of the construction of traditional mechanical design models is carried out. It is shown that the prospects of using energy flows to intensify machining processes should be analyzed at the early stages of design, using thermal and electrophysical criteria to study the emerging connections in the system. It is proposed to start designing mechatronic systems of machine complexes by analyzing structural connections of information technologies in hybrid production, including traditional and additive technologies. It is recommended to use sequences of transfer criteria to analyze the processes of formation of material structures and the surface layer under thermomechanical and electrophysical processing. The criteria of heat and mass transfer sequence the structure formation in the finished material with an increase in the power of stimulation. The criteria characterizing energy flows within electrophysical processing influence the sequence of surface phenomena and determine the process of material properties formation. Feedbacks linkage in the control of production machinery is shown through the degrees of tool

*freedom, particles of the applied material and the layer to be removed, by means of additional effects of energy flows. Taking into account direct and feedback loops in the technological system, numerical control systems should be selected and the machining facility complex should be designed as a mechatronic system. The complex of hybrid technological equipment from the standpoint of computerization of production activities, as well as its modules, should be designed as computer peripherals devices based on the same architecture like a computer.*

**Keywords:** mechatronic systems, hybrid machine tool complexes, thermophysical and electrophysical criteria, traditional and additive technologies

**For citation:** Kheifets M.L. Design of mechatronic systems of hybrid machine complexes / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 8 (146). P. 12–19. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-15-23

## Введение

Совокупность средств производства или производящих машин, включающих: технологические, транспортные, энергетические и информационные машины, получила название технологических комплексов. Такие комплексы автономно функционируют и с использованием программного управления, в установленных пределах значений, обеспечивают требуемые характеристики качества изделий [1 – 3].

Комплексы технологического оборудования прошли в своем развитии ряд этапов. По сравнению с универсальным станочным оборудованием современное компьютерно-управляемое производство, использующее компоненты искусственного интеллекта, позволяет повысить эффективность оборудования в десятки раз при обеспечении все более возрастающих требований к качеству продукции [4 – 6].

### Мировые тенденции развития технологических комплексов

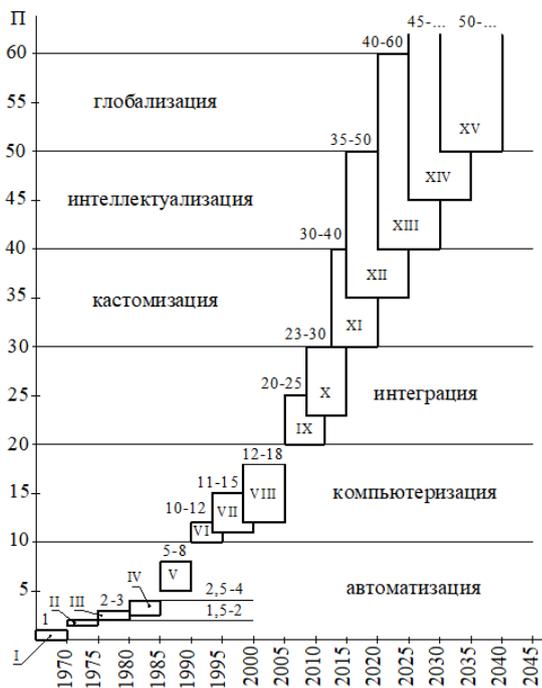
Началом первого этапа развития технологических комплексов (рис. 1) можно обозначить автоматизацию 1970-х гг. на основе числового программного управления (ЧПУ). В постиндустриальных странах уже с середины 1980-х гг. наметился переход от обрабатывающих центров к гибким производственным системам с элементами интеллектуального производства [7].

Развитие средств микроэлектроники явилось базой для создания мехатронных систем, которые включают как электромеханическую, так и электронно-управляющую части. Мехатронные системы обеспечивают синергетическое объединение узлов точной

механики с электротехническими, электронными и компьютерными компонентами с целью проектирования и производства качественно новых комплексов машин с интеллектуальным управлением их функциями [8, 9].

Новые этапы развития гибкой автоматизации производственных систем связаны, прежде всего, с предельной концентрацией средств производства и управления, а также с сокращением сроков конструирования, проектирования, технологической подготовки и изготовления изделий. В результате мехатронные технологические комплексы объединяются в гибридное компактное интеллектуальное производство (CIM – Compact Intelligent Manufacture), базирующееся на сочетании различных интенсивных, в том числе и аддитивных технологий, прогрессивного технологического оборудования и интегрированной системы управления [10].

Современный уровень развития информационных технологий в промышленности обеспечил переход к использованию технологий создания, поддержки и применения единого информационного пространства во времени на всех этапах жизненного цикла продукции: от ее проектирования до эксплуатации и утилизации, то есть к CALS-технологиям (Continuous Acquisition and Life-cycle Support). Единое информационное пространство позволяет интегрироваться разрозненным комплексам компактного производства в виртуальное предприятие, создаваемое из различных пространственно удаленных подразделений, которые обладают единой информационной ERP-системой (Enterprise Resource Planning) для использования в компьютерной поддержке этапов жизненного цикла продукции [11].



**Рис. 1. Этапы развития комплексов технологического оборудования:**

П – производительность оборудования, возрастающая со временем: I – универсальное оборудование с производительностью, принятой за 1,0; II – оборудование с числовым программным управлением; III – робототехнические комплексы; IV – обрабатывающие центры; V – гибкие производственные системы; VI – компьютерно-управляемое производство; VII – мехатронные технологические комплексы; VIII – компактное интеллектуальное производство; IX – компьютерное сопровождение жизненного цикла изделий; X – виртуальные предприятия, XI – аддитивное производство; XII – интернет вещей; XIII – машинное обучение; XIV – искусственный интеллект; XV – синергия технологий

**Fig. 1. Stages of development of production machinery complexes:**

P – equipment productivity, increasing in due course time: I – universal equipment with a performance taken as 1,0; II – equipment with numerical control; III – robotic complexes; IV – processing centers; V – flexible production systems; VI – computer-controlled production; VII – mechatronic technological complexes; VIII – compact intelligent production; IX – computer support of the life cycle of products; X - virtual enterprises, XI – additive production; XII – Internet of things; XIII - machine learning; XIV – artificial intelligence; XV – synergy of technologies

После пространственно-временной интеграции производственных процессов и жизненного цикла изделий следуют этапы, обеспечивающие компактность производства на основе технологий аддитивного производства (AM – Additive Manufacturing). Аддитивные

технологии синтеза композиционного материала и формообразования изделия обеспечивают высокую эффективность за счет сокращения длительности и количества производственно-технологических этапов жизненного цикла изделий [12].

Анализ производства и адресной поставки кастомизированных изделий, с учетом внешней и внутренней логистики предприятий, можно дополнить прогнозом на ближайшее будущее, которое обусловлено новой парадигмой производства, связанной с промышленным интернетом вещей (IIoT – Industrial Internet of Things) и называемой «Индустрия 4.0».

В основе зарождающихся этапов новой эпохи лежит массовая компьютеризация и глобализация интернета. Дальнейшее развитие производства прогнозируют на базе машинного обучения (ML – Machine Learning) и искусственного интеллекта (AI – Artificial Intelligence). Сочетание робототехники и 3D-печати на основе машинного обучения с интернетом вещей в глобальной сети и искусственным интеллектом уже сегодня позволяют создавать полностью автоматизированные производства [5, 6].

Одновременно с эволюцией производственных технологий идет прогресс биомедицинских технологий, с которыми связывают «Индустрию 5.0». По прогнозам уже после 2025 г. носимая человеком электроника начнет замещаться имплантатами, а в 2030-х гг. 3D-принтеры приступят к печати новых органов, и к 2040-м гг. нанороботы начнут ремонтировать организм на клеточном уровне. Предполагают, что к 2035 г. люди могут стать «киборгами», напичканными множеством электронных имплантов, а к 2045 г. вся планета превратится в один «огромный компьютер», использующий весь людской интеллект [5, 6].

### Анализ традиционных стадий и этапов проектирования оборудования

Мехатронные станочные системы включают механическую (кинематическую), электромеханическую (энергетическую), электронную и управляющую (использующую компьютеры и микропроцессоры) части. В нее входят: датчики состояния как внешней среды, так и самой системы управления; источники энергии; исполнительные механизмы; усилители;

вычислительные элементы (компьютеры и микропроцессоры). Мехатронная система представляет собой единый комплекс электро-механических и электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется непрерывный обмен энергией и информацией [8, 9].

Функционально простую мехатронную систему комплекса технологического оборудования можно подразделить на следующие составные части [1, 5]: исполнительные устройства (объект управления и приводы), информационные устройства (датчики внутреннего состояния системы и датчики состояния внешней среды) и систему управления (компьютер и микропроцессоры). Взаимодействие между этими частями, реализующее прямые и обратные связи в системе, осуществляется через устройство сопряжения (интерфейс). Система управления включает аппаратные средства и программное обеспечение, которое управляет согласованной работой аппаратных средств и обеспечивает синхронизацию

процессов сбора и обработки данных, поступающих от информационных устройств, с процессами, управляющими исполнительными устройствами (рис. 2).

При проектировании механической части технологического оборудования, используемого в традиционном и в перспективном производстве, применяются как известные, так и новые схемы формообразования и послойного синтеза изделий, а также интенсивные процессы модифицирования материалов концентрированными и распределенными потоками энергии [5, 13].

Традиционно исходные данные для проектирования технологического оборудования содержит техническое задание конкретного заказчика, включающее только:

- данные о материалах и готовых изделиях;
- производительность оборудования;
- характер и тип производства;
- уровень автоматизации и встраиваемость

в современное высокотехнологичное производство.

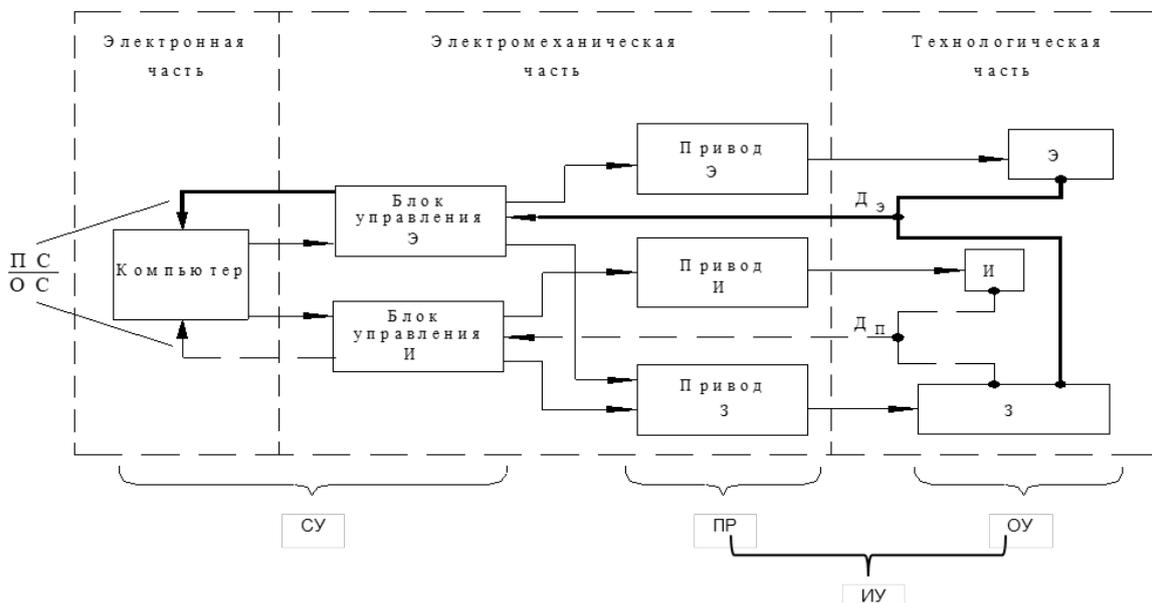


Рис. 2. Структурная схема мехатронного технологического оборудования:

З – заготовка; И – инструмент; Э – концентрированный поток энергии; Д<sub>п</sub> – датчик перемещений; Д<sub>э</sub> – датчик интенсивности потока энергии; СУ – система управления; ПР – приводы; ОУ – объект управления; ИУ – исполнительные устройства; ПС – прямая связь; ОС – обратная связь

Fig. 2. Structural diagram of mechatronic technological equipment:

W – workpiece; T – tool; E – concentrated energy flow; D<sub>s</sub> – displacement sensor; D<sub>e</sub> – energy flow intensity sensor; CS – control system; Dr – drives; CO – control object; A – actuators; DC – direct communication; F – feedback

Последовательность проектирования технологического оборудования для производства

традиционного типа включает укрупненные стадии, опирающиеся на расчетные схемы:

- 1) компоновка и выбор кинематической схемы;
- 2) модульное построение по ограниченному набору агрегатов и узлов;
- 3) выбор схемы и проведение прочностных расчетов;
- 4) выбор схемы и проведение динамических расчетов;
- 5) выбор термодинамической схемы и расчет температур;
- 6) точностные расчеты геометрических и кинематических связей;
- 7) расчеты надежности и долговечности с экономическим обоснованием ресурса оборудования;
- 8) анализ человеко-машинной системы, включающий охрану труда.

Расчет основных систем технологического оборудования производится по детализированным стадиям для: несущих систем; направляющих движений; приводов движений и других.

Проектирование основных систем технологического оборудования проводится по техническим требованиям, предъявляемым: механическим агрегатам, технологической оснастке и средствам автоматизации; системам смазки и охлаждения; электрооборудованию и программируемым системам; системам диагностики, с учетом техники безопасности и эргономики станка.

В первую очередь при проектировании строятся схемы систем, с учетом ограничительных наборов агрегатов и узлов. Затем после структурного синтеза проводится параметрическая оптимизация, определяющая основные параметры систем технологического оборудования.

### Применение потоков энергии для интенсификации процессов обработки

При формировании комплексов технологического оборудования для автоматизированного производства, использующего управление многочисленными приводами, концентрированными и распределенными потоками энергии, перечисленных стадий проектирования недостаточно. Связано это с тем, что требуется дополнительно рассматривать схемы технологических модулей и определять параметры оборудования, описывающие подвод

инструмента и распределение потоков энергии и материала (рис. 3).

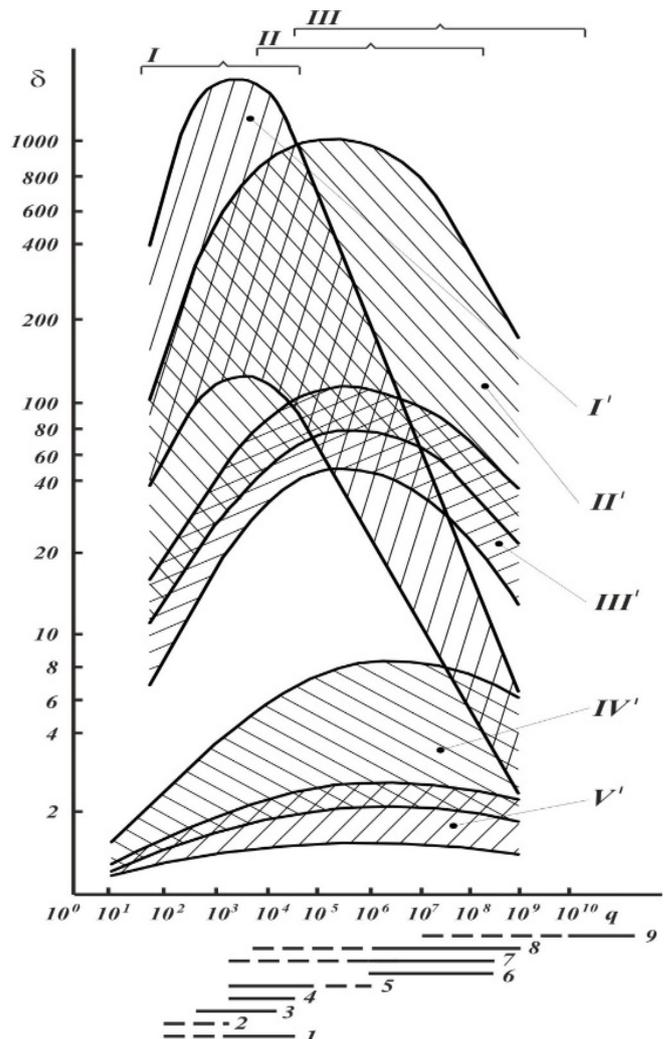


Рис. 3. Распределение методов обработки по точности формирования поверхностей (I' – разделение; II' – нанесение; III' – термообработка; IV' – резание; V' – деформирование) в зависимости от уровня концентрации энергии (I – объемная распределенная; II – множество локализованных; III – сфокусированные зоны тепловыделения) при использовании технологических источников:

1 – индукционный нагрев; 2 – газовое пламя; 3 – плазменная дуга; 4 – электроконтактный подогрев; 5 – сварочная дуга; 6 – искровой разряд; 7 – электронный, ионный луч; 8 – непрерывный лазер; 9 – импульсно-периодический лазер

Fig. 3. Distribution of processing methods according to the accuracy of surface formation (I' – separation; II' – application; III' – heat treatment; IV' - cutting; V' – deformation) depending on the level of energy concentration (I – volumetric distributed; II – the number of locate data; III – focused heat release zones) when using technological sources:

1 – induction heating; 2 – gas flame; 3 – plasma arc; 4 – electric contact heating; 5 – welding arc; 6 – spark discharge; 7 – electron, ion beam; 8 – continuous laser; 9 – pulse-periodic laser

Создание формы изделия в аддитивных технологиях происходит путем добавления материала, с использованием источников энергии, в отличие от традиционных технологий механической обработки, основанных на удалении инструментом «лишнего» материала.

Широко применяемые в мировом производстве технологии позволяют заключить, что наиболее перспективно применение оборудования по наращиванию слоев и формообразованию поверхностей изделий, использующего различные сочетания материалов и источников энергии. Это в свою очередь ставит задачи распределения компонентов материалов и потоков энергии не только по заданному контуру или поверхности, но и по глубине от поверхности изделия, а также по характеру подачи материала и энергии [5, 13].

Использование последовательностей критериев переноса для анализа процессов образования структуры материала многократно сокращает объем экспериментальных исследований технологии по формированию поверхностного слоя при термомеханической и электрофизической обработке. Критерии тепломассопереноса устанавливают последовательность структурообразования в обрабатываемом материале при увеличении мощности воздействий. Критерии, характеризующие потоки энергии, при электрофизической обработке оказывают влияние на последовательность поверхностных явлений и определяют процесс формирования свойств материала [13].

Организация обратных связей при управлении технологическим оборудованием через степени свободы инструментов, частиц наносимого материала и удаляемого слоя, посредством дополнительных воздействий потоками энергии, позволяет управлять устойчивостью процессов формирования поверхностного слоя. Поэтому, с учетом контуров прямых и обратных связей в технологической системе, следует выбирать системы числового программного управления и проектировать комплекс технологического оборудования как мехатронную систему [1, 5].

Рассматривая комплекс технологического оборудования с позиций компьютеризации производственной деятельности, его модули, узлы и детали следует проектировать как устройства

компьютерной периферии, построенные по той же архитектуре, что и ЭВМ.

### Структурные связи информационных технологий в аддитивном производстве

Анализ процессов производства деталей без использования формообразующей оснастки (3D-печати), в зависимости от агрегатного состояния исходного материала, размерности потоков формообразующей среды и последовательности технологических операций [1, 5], позволяет в виде диаграммы структурных связей описывать совокупность методов прямого «выращивания» изделий (рис. 4).

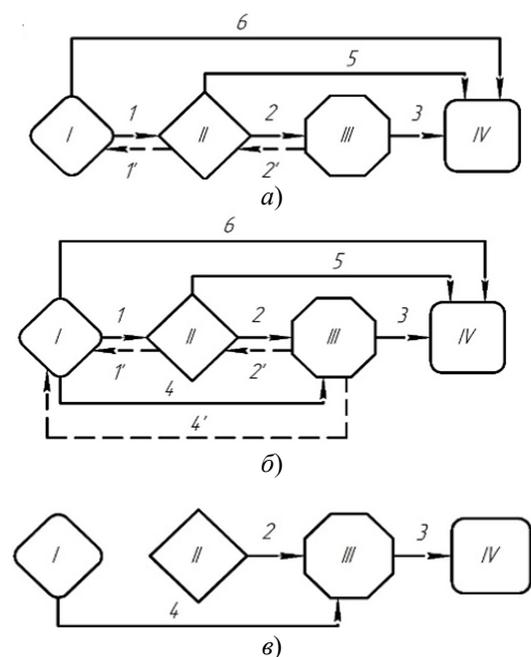


Рис. 4. Диаграммы структурных связей технологий в аддитивном производстве (I – прямое получение «выращиванием»; II – послойный «платформенный» синтез; III – оперативное макетирование «прототипирование»; IV – окончательное «3D формирование» изделий):

*a* – обобщенная модель методов производства изделий без формообразующей оснастки; *b* – сборка из листовых материалов в LOM-процессе; *v* – синтез лазерным сплавлением порошковых слоев в SLS-процессе

Fig. 4. Diagrams of structural connections of technologies in additive manufacturing (I - direct production by «growth»; II – layered «platform» synthesis; III - operational scale modelling «prototyping»; IV – final «3D formation» of products):

*a* – generalized model methods of products manufacturing without shape-generating molding tools; *b* – assembly of sheet materials in the LOM process; *c* – synthesis by laser fusion of porous layers in the SLS process

Диаграмма структурных связей представляет собой направленный замкнутый граф и описывает автомат с конечным числом состояний. Вершины графа изображают процессы создания изделий без формообразующей оснастки и представляют логические операции: трансляцию информации (II); движение потоков вещества и энергии (III); запуск (I) и остановку (IV) автоматического цикла [14, 15].

Описание алгоритмами в соответствии с терминами логических операций процессов 3D-печати по диаграмме структурных связей дает возможность анализировать существующие и разрабатывать новые методы прямого «выращивания» изделий [1, 5].

### Заключение

Анализ стадий и этапов проектирования технологического оборудования, мировых тенденций за последние полвека и перспектив развития на ближайшие десятилетия гибридных мехатронных станочных комплексов показывает, что отечественное станкостроение в последние десятилетия не развивалось должными темпами. Ставка делалась на приобретение лучших зарубежных образцов оборудования ведущих фирм или станков и средств их оснащения недорогого массового производства.

В этой связи, научное сопровождение развития станкостроения при цифровизации производства, в настоящее время становится крайне необходимым и должно строиться на фундаментальной и поисковой основе, совместными усилиями академической, отраслевой и вузовской науки.

Всесторонний комплексный анализ проектирования обрабатывающего оборудования с помощью построения традиционных для механики машин расчетных схем показал, что перспективы применения новых технологий, использующих искусственный интеллект, потоки энергии для интенсификации процессов обработки и модифицирования материалов, должны анализироваться на ранних стадиях проектирования.

Предложено приступать к проектированию мехатронных систем станочных комплексов с анализа структурных связей информационных технологий в гибридном производстве, включающем как традиционные, так и

аддитивные технологии, и использовать теплофизические и электрофизические критерии для изучения формирующихся связей в технологической системе.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Теоретические основы проектирования технологических комплексов** / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. Минск: Беларус. навука, 2012. 239 с.
2. **Конструирование и оснащение технологических комплексов** / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. Минск: Беларус. навука, 2014. 316 с.
3. **Автоматизация и управление в технологических комплексах** / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого (гл. ред.), П.А. Витязь (зам. гл. ред.), М.Л. Хейфец (зам. гл. ред.). Минск: Беларус. навука, 2014. 375 с.
4. **Обеспечение качества изделий в технологических комплексах** / С.А. Чижик [и др.]; под общ. ред. М.Л. Хейфеца. Минск: Беларус. навука, 2019. 248 с.
5. **Хейфец М. Л.** Проектирование мехатронных технологических комплексов для традиционного и аддитивного производства // Доклады Нац. акад. наук Беларуси. 2020. Т. 64. № 6. С. 744–751.
6. **Перспективные технологии машиностроительного производства** / О. П. Голубев [и др.]; под общ. ред. Ж. А. Мрочка и М. Л. Хейфеца. Новополоцк: Полоцк. гос. ун-т, 2007. 204 с.
7. **Сироткин О.** Технологический облик России на рубеже XXI века / О. Сироткин // Экономист. 1998. № 4. С. 3–9.
8. **Мехатроника** / Т. Исии [и др.]; пер. с яп. С.А. Масленникова; под. ред. В.В. Василькова. М.: Мир, 1988. 314 с.
9. **Bradley D.A.** Mechatronics – Electronics in Products and Processes. London: Chapman & Hall, 1993. 376 p.
10. **Delchambke A.** Computer-aided Assembly Planning. London: Chapman & Hall, 1992. 276 p.
11. **Компьютеризированные интегрированные производства и CALS-технологии в машиностроении** / Б.И. Черпаков [и др.]; под ред. Б.И. Черпакова. М.: ГУП «ВИМИ», 1999. 512 с.
12. **Gibson I.** Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stuker. N.Y.: Springer, 2015. 498 p.
13. **Хейфец М.Л., Крутько В.С., Грецкий Н.Л.** Проектирование технологических процессов и оборудования, использующих поля и потоки энергии на основе анализа критериев подобия // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2021. Т. 65, № 5. С. 628–635.
14. **Нейман фон Дж.** Теория самовоспроизводящих автоматов. М.: Мир, 1971. 342 с.
15. **Винер Н.** Кибернетика или управление и связь в живом и машине. М.: Совет. радио, 1958. 296 с.

## REFERENCES

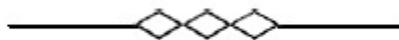
1. Theoretical foundations of the design of technological complexes / A.M. Rusetsky [et al.]; under the general editorship of A.M. Rusetsky. Minsk: Belarus. navuka, 2012. 239 p.
2. Design and equipment of technological complexes / A.M. Rusetsky [et al.]; under the general editorship of A.M. Rusetsky. Minsk: Belarus, navuka, 2014, 316 p.
3. Automation and control in technological complexes / A.M. Rusetsky [et al.]; under the general editorship of A.M. Rusetsky (chief editor), P. A. Vityaz (deputy editor-in-chief), M. L. Heifets (deputy see ed.). Minsk: Belarus. nauka, 2014, 375 p.
4. Product quality support in technological complexes / S.A. Chizhik [et al.]; under the general editorship of M.L. Heifets. Minsk: Belorussian Science, 2019, 248 p.
5. Kheifets M. L. Design of mechatronic technological complexes for traditional and additive manufacturing // Reports of the National Academy of Sciences of Belarus, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 744–751.
6. Promising technologies of machine-building production / O. P. Golubev [et al.]; under the general editorship of J. A. Mrochek and M. L. Heifetz. Novopolotsk: Polotsk State University, 2007. 204 p.
7. Sirotkin O. The technological appearance of Russia at the turn of the XXI century. / O. Sirotkin // Economist, 1998, no. 4, pp. 3–9.
8. Mechatronics / T. Ishii [et al.]; translated from the Japanese by S.A. Maslennikov; edited by V.V. Vasilkov. Moscow: Mir, 1988, 314 p.
9. Bradley D.A. Mechatronics – Electronics in Products and Processes. London: Chapman & Hall, 1993. 376 p.
10. Delchambke A. Computer-aided Assembly Planning. London: Chapman & Hall, 1992. 276 p.
11. Computerized integrated production and CALS technologies in mechanical engineering / B.I. Cherpakov [et al.]; edited by B.I. Cherpakova. Moscow: SUE «VIMI», 1999, 512 p.
12. Gibson I. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. N.Y.: Springer, 2015. 498 p.
13. Kheifets M.L., Krutko V.S., Gretskey N.L. Design of technological processes and equipment using fields and energy flows based on the analysis of similarity criteria // Reports of the National Academy of Sciences of Belarus, 2021, vol. 65, no. 5, pp. 628–635.
14. Neumann von J. Theory of self-reproducing automata. Moscow: Mir, 1971. 342 p.
15. Wiener N. Cybernetics or control and communication in the animal and the machine. Moscow: Sovetskoe radio, 1958, 296 p.

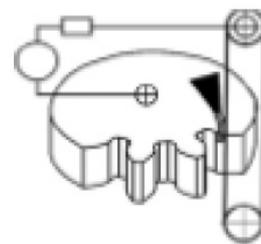
**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 22.06.2023; одобрена после рецензирования 26.06.2023; принята к публикации 01.07.2023

The article was submitted 22.06.2023; approved after reviewing 26.06.2023; accepted for publication 01.07.2023





Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №8 (146). С.20-26.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №8 (146). P. 20-26.

Научная статья  
УДК 621.7/620.3  
doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-24-32

## Автоматизация и цифровизация ультразвуковых технологических процессов

Вячеслав Михайлович Приходько<sup>1</sup>, Д.Т.Н.  
Равиль Исламович Нигметзянов<sup>2</sup>, К.Т.Н.  
Сергей Константинович Сундуков<sup>3</sup>, К.Т.Н.  
Дмитрий Сергеевич Фатюхин<sup>4</sup>, К.Т.Н.

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Россия

<sup>1</sup> prikhodko@madi.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>2</sup> lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>3</sup> sergey-lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4393-4471>

<sup>4</sup> mitriy2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5914-3415>

**Аннотация.** На основании проведенного анализа литературных источников выявлено, что цифровое производство включает в себя не только полную автоматизацию производственных процессов, но и создание многоуровневой инфраструктуры управления ими на основе информационных технологий. Основанные на таком подходе технические решения, позволят значительно интенсифицировать производственные процессы. Рассмотрены возможности автоматизации и цифровизации ультразвуковых технологических процессов путём создания аппаратно-программного комплекса, включающего в себя технологическое и измерительное оборудование, а также программное обеспечение для выбора наиболее эффективных технических решений. Обоснованы общие принципы создания ультразвуковых технологий, этапы разработки которых включают в себя постановку задачи, анализ объекта обработки, выбор схемы обработки и оборудования, контроль процесса и оценку качества. Предложены методологические подходы к реализации производственных процессов с многоуровневой инфраструктурой управления ими на основе информационных технологий. Приведены примеры разработанных программных продуктов, с помощью которых методами поисковой оптимизации производится выбор оборудования и рациональных режимов обработки. Показаны не только возможность использования автоматизированной технологии, но и создания на её основе самообучающейся технологической системы. Разработка и создание оборудования для реализации предлагаемых технических решений основывается на общих принципах использования числового программного управления. Предлагаемый алгоритм может применяться для широкого спектра ультразвуковых технологий: очистки, поверхностного пластического деформирования, нанесения покрытий, резания и др. Кроме того, совокупность выбора технических и информационных решений, даёт возможность оперативного перехода от одних видов обработки к другим. Даны рекомендации по реализации предлагаемых технических и информационных решений.

**Ключевые слова:** цифровизация, автоматизация, технологический процесс, ультразвуковая обработка, информационные технологии

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда по приоритетному направлению деятельности Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» научного проекта: «Разработка гибридных ультразвуковых технологий получения функциональных покрытий» № 21-19-00660.

## Automation and digitalization of ultrasonic technological processes

Vyacheslav M. Prikhodko<sup>1</sup>, D. Eng.

Ravil I. Nigmatzyanov<sup>2</sup>, PhD. Eng.

Sergey K. Sundukov<sup>3</sup>, PhD. Eng.

Dmitry S. Fatyukhin<sup>4</sup>, PhD. Eng.

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia

<sup>1</sup> prikhodko@madi.ru

<sup>2</sup> lefmo@yandex.ru

<sup>3</sup> sergey-lefmo@yandex.ru

<sup>4</sup> mitriy2@yandex.ru

**Abstract.** Having analyzed the literature sources, it is revealed that digital production includes not only full automation of production processes, but also the creation of a multi-level infrastructure for their control on the basis of information technologies. Technical solutions based on this approach will significantly intensify production processes. The possibilities of automation and digitalization of ultrasonic technological processes are viewed through the creation of a hardware and software complex that includes technological and measuring equipment, as well as software to select the most effective technical solutions. Some general principles of creating ultrasonic technologies are substantiated, their stages of development include setting the task, analysis of the processing object, selection of the processing scheme and equipment, process control and quality monitoring. Methodological approaches to the implementation of production processes with a multi-level process control infrastructure based on information technologies are proposed. Examples of developed software products are given, with the help of which search engine optimization methods are used to select equipment and rational processing modes. It shows not only the possibility of using automated technology, but also the creation of a self-learning technological system based on it. The development and creation of equipment for the implementation of the proposed technical solutions has in its basis general principles of using numerical control software. The proposed algorithm can be used for a wide range of ultrasonic technologies: cleaning, surface plastic deformation, coating, cutting, etc. In addition, the combination of the choice of technical and information solutions makes quick switch from one type of processing to another possible. Recommendations on the implementation of the proposed technical and information solutions are given.

**Keywords:** digitalization, automation, technological process, ultrasonic machining, information technologies

**Acknowledgements:** the work was supported by the grant of the Russian Science Foundation under the priority direction of the Russian Science Foundation «Carrying out fundamental scientific research and search scientific research by separate scientific groups» of the scientific project: «Development of hybrid ultrasonic technologies for obtaining functional coatings» № 21-19-00660.

**For citation:** Prikhodko V.M., Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. Automation and digitalization of ultrasonic technological processes / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 8 (146). P. 20–26. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-24-32

### Введение

Одной из современных глобальных задач общества является цифровизация промышленности. Несмотря на это, сами термины «цифровизация» и «цифровая промышленность» пока ещё не стандартизованы. Согласно [1], концепция индустрии 4.0, характеризующая переходом к киберфизическим системам, наиболее точно отражает понятие «цифровизация». Основой цифровизации машиностроительного производства безусловно является автоматизация –

«применение энергии неживой природы в технологическом процессе или его составных частях для их выполнения и управления ими без непосредственного участия людей, осуществляемое в целях сокращения трудовых затрат, улучшения условий производства, повышения объема выпуска и качества продукции» [2].

Цифровое производство включает в себя не только полную автоматизацию производственных процессов, но и создание многоуровневой инфраструктуры управления ими на основе информационных технологий.

Основанные на таком подходе технические решения, позволят значительно интенсифицировать производственные процессы.

Ультразвуковые технологические процессы, как процессы, связанные с постоянными изменениями свойств обрабатываемой среды, требуют системы постоянных обратных связей между собственно обрабатываемой средой и технологическим оборудованием. Так, например, изменение температуры обрабатываемой жидкости влечёт за собой как изменение технологического режима обработки, так и корректировку рабочей частоты колебательной системы.

Наиболее эффективное использование информационных технологий возможно при их комплексном применении на различных этапах разработки и использования технологии – от подготовки производства до контроля готовой продукции. В статье рассмотрены методологические подходы и технические решения, позволяющие повысить эффективность ультразвуковых технологий за счёт автоматизации и цифровизации производственных процессов.

Спектр применения ультразвука для интенсификации самых различных технологических процессов достаточно широк. Воздействие высокочастотных колебаний позволяет изменять структуру и свойства материалов, улучшать эксплуатационные свойства деталей при их обработке, повысить качество нанесения функциональных покрытий и др. Несмотря на различия воздействий на газообразные, жидкие и твердые среды, существуют общие подходы к разработке и созданию ультразвуковых технологий, этапы разработки которых включают в себя постановку задачи, анализ объекта обработки, выбор схемы обработки и оборудования, контроль процесса и оценку качества.

### **Подготовка производственного процесса**

Этап подготовки производства включает в себя выбор схемы и рациональных режимов обработки, ультразвукового оборудования, стратегии и параметров обработки, а также характеристик технологической среды. Для автоматизации этого процесса приём, обработка и

распространение информации, т. е. информационная система, являются частью технологии.

Создание информационной системы основывается на использовании системы управления базами данных (СУБД) для выбора наиболее эффективных технических решений. В настоящее время накоплено достаточное количество результатов теоретических и экспериментальных исследований, позволяющие создавать и использовать эти материалы для создания СУБД. Активно создаются базы данных ультразвуковых преобразователей, генераторов, технологических режимов обработки [3, 4]. Интеграция информации различных баз данных позволяет создать информационную систему.

Для выбора технических решений применяется 3D-модель объекта обработки. В качестве моделей используются модели, созданные при проектировании изделия. В случае отсутствия конструкторской документации необходимо создание цифровой копии с помощью САД (Computer aided design) программ.

Основываясь на конструктивных особенностях изделий и требованиях к обработке, можно выделить минимальный набор баз данных, достаточных для разработки технологического процесса.

На основании анализа объекта обработки и требуемого технологического воздействия с помощью СУБД осуществляется выбор схемы обработки, от которой зависят тип и характеристики генератора, колебательной системы и рабочего инструмента. В случае применения контурной или объёмной обработки производится выбор стратегии обработки.

Поисковая оптимизация позволяет не только идентифицировать начальное состояние деталей и выбрать значения параметров обработки, но и корректировать их в процессе ультразвукового воздействия в соответствии с показаниями измерительных средств.

Для реализации автоматического выбора технологии и оборудования для конкретного объекта обработки, поддержания заданного технологического режима, отображения параметров обработки в реальном масштабе времени, а также работы оборудования по специально заданной программе или в интерактивном режиме разработана программа «Управление и мониторинг ультразвуковой установки» [5] (рис. 1).

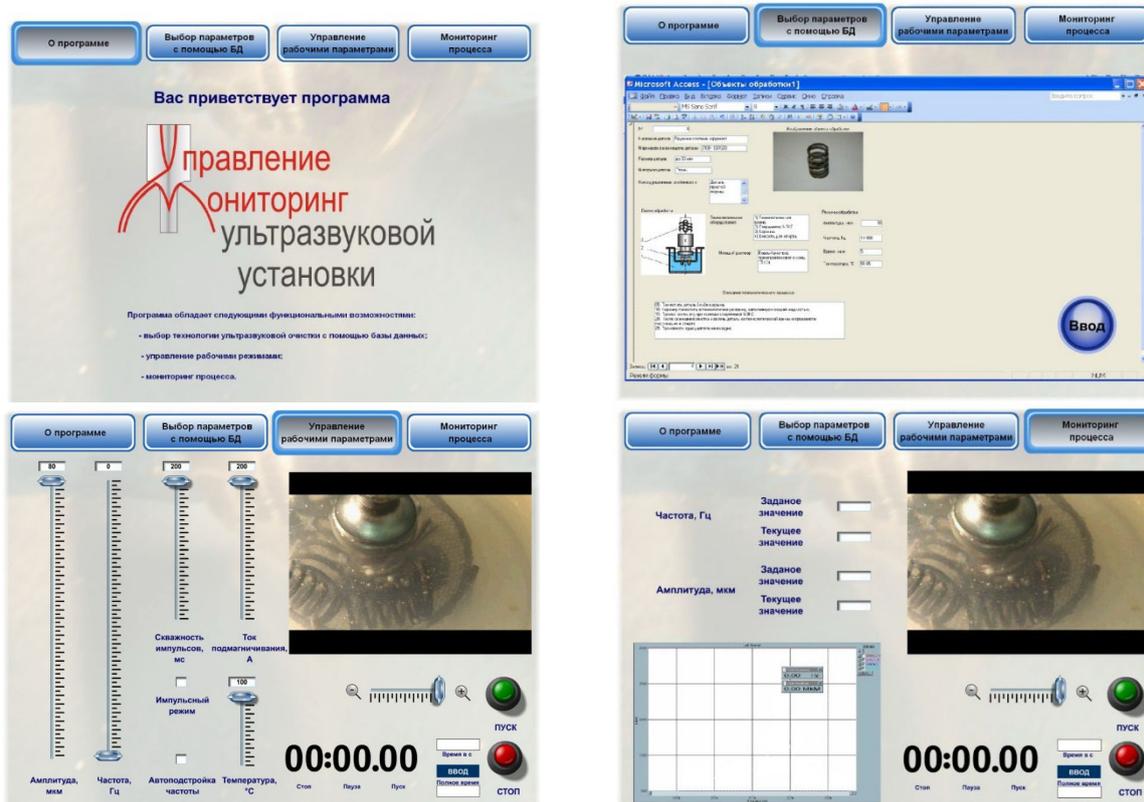


Рис. 1. Программная оболочка «Управление и мониторинг ультразвуковой установки»

Fig. 1. Shell program «Control and monitoring of ultrasonic installation»

Важной особенностью программы является возможность самообучения. Пополнение и корректировка базы данных (БД) технологий происходит занесением или изменением записей, полученных непосредственно в процессе обработки. Источниками получения информации могут быть ручной ввод данных, информация, полученная от средств обратной связи или внешних источников. Подобный подход позволяет сформировать необходимый объем данных по существующим технологиям и обеспечить его постоянное пополнение, что обеспечивает оперативное освоение обработки новых изделий.

### Управление процессом и оценка качества обработки

Сбор входных параметров и регулирование этих параметров в процессе обработки осуществляется виртуальными приборами [6]. В качестве измерительной части используются такие приборы, как электродинамические датчики, термодатчики, гидрофоны, вискозиметры и др. С их помощью информация об

изменении рабочих параметров поступает на многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который передает оцифрованную информацию на персональный компьютер через интерфейс USB.

Физические эффекты, создаваемые ультразвуком в жидкой среде, распространяются и распределяются неравномерно по обрабатываемому объему. Для обеспечения наибольшей эффективности объект обработки необходимо четко позиционировать в той области ультразвукового поля, где кавитация и гидродинамические потоки оказывают на него требуемое технологическое воздействие.

Корректировка работы технологического оборудования осуществляется программно-аппаратным комплексом.

Учитывая стохастический характер распределения кавитации, наибольшее значение имеет концентрация эффектов, создаваемых ультразвуком в жидкости, в требуемом месте обрабатываемого объема. Изменение температуры и плотности жидкости в процессе обработки требует подстройки рабочих параметров колебательной системы в режиме реального

времени. Измерение спектральных составляющих сигнала, поступающего с гидрофона, позволяет контролировать качественные и количественные характеристики ультразвукового поля. Организация обратной связи обеспечивается синхронизацией работы программы MIXI [7] и сигнала гидрофона, полученного и обработанного аппаратно - программным комплексом ZETLAB [8] (рис. 2).

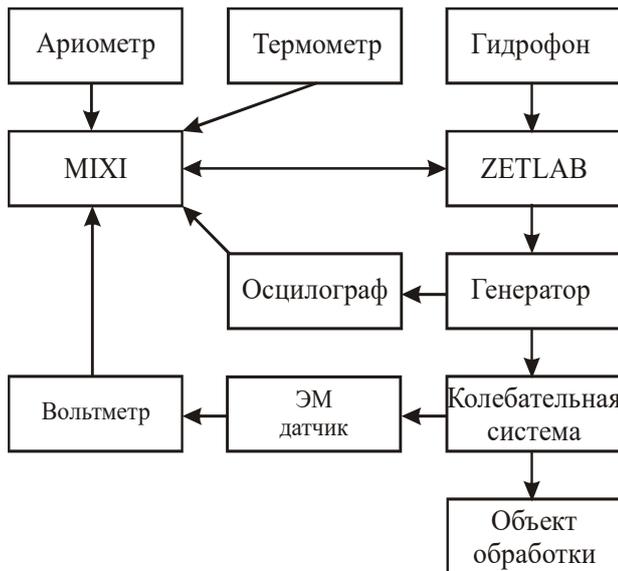
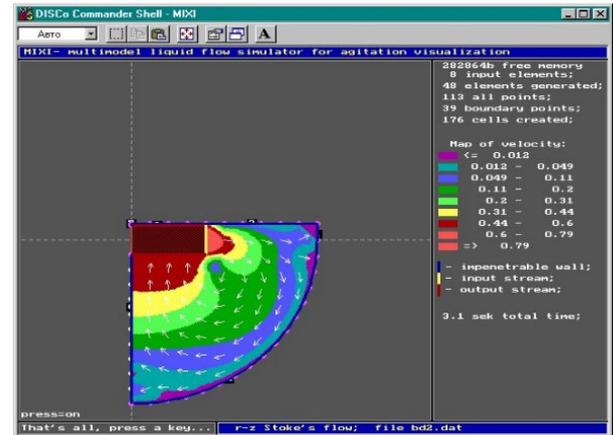
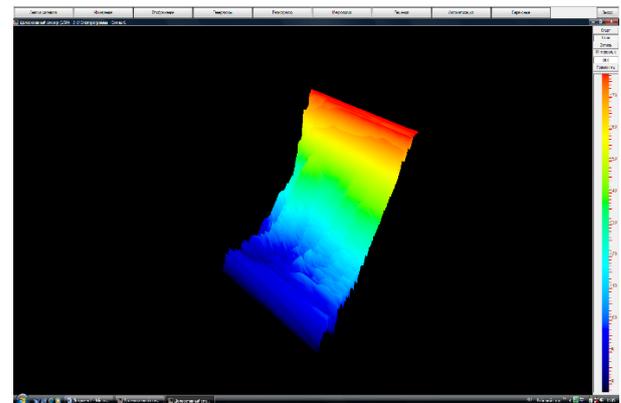


Рис. 2. Схема аппаратно-программного комплекса  
Fig. 2. Hardware and software complex scheme

На основании сигналов, получаемых с измерительных приборов, программа MIXI рассчитывает поле скоростей гидродинамических потоков и поле давления в зависимости от температуры и вязкости жидкости, а также от амплитуды и частоты колебательной системы (рис. 3, а). Сигнал гидрофона принимается и анализируется программой ZETLAB (рис. 3, б). После сравнения расчётных значений и измеренных показаний происходит корректировка управляющего сигнала, который передаётся на ультразвуковой генератор. Созданные генератором электрические колебания передаются колебательной системе. Контроль амплитуды и частоты работы колебательной системы осуществляется с помощью электромагнитного (ЭМ) датчика и осциллографа, сигналы от которых передаются программе MIXI.



а)



б)

Рис. 3. Распространение гидродинамических потоков:  
а – полученные расчётные значения; б – результат измерений

Fig. 3. Distribution of hydrodynamic flows:  
а – obtained calculated values; б – measurement result

Предлагаемое решение позволяет организовать самонастраивающуюся систему, приспособляющуюся к изменению внешних условий. Основной и дополнительные потоки информации позволяют корректировать процесс обработки с учётом изменений рабочей среды, требований к обработке и др.

Оценка качества проводится по ряду показателей характерных для используемого вида обработки. Так, например, при ультразвуковом выглаживании наиболее значимым показателем является шероховатость поверхности. Мониторинг параметров шероховатости позволяет не только обеспечить заданное качество, но и вносить необходимые изменения в базу данных технологических режимов обработки [9].

Разработка и создание оборудования для реализации предлагаемых технических

решений основывается на общих принципах использования числового программного управления.

Источниками движения могут являться шаговые двигатели, которые позволяют осуществлять регулирование угла поворота выходного вала, обеспечивающего точное управление скоростью вращения ротора, и, соответственно, перемещение исполнительных механизмов. Число шаговых двигателей соответствует необходимому числу перемещений обрабатываемой заготовки и инструмента.

Управление двигателями осуществляется контроллерами. В качестве программируемого контроллера могут быть использованы многоканальные контроллеры, например, SMSD-4.2. Кроме управления шаговыми двигателями, контроллеры позволяют управлять ещё и дополнительным оборудованием (например, регулировать подачу моющей жидкости с необходимым расходом, температурой и т. п.).

Коммутация персонального компьютера и контроллера управления реализуется драйвером коммутации. Кода управляющей программы преобразуется драйвером и контроллером в импульсное напряжение питания шаговых двигателей [10].

### Заключение

На основе приведённых в статье методологических подходов возможна не только реализация автоматизированной технологии, но и самообучение технологической системы.

Предлагаемый алгоритм может применяться для широкого спектра ультразвуковых технологий: очистки, поверхностного пластического деформирования, нанесения покрытий, резания и др. Кроме того, совокупность выбора технических и информационных решений, дает возможность оперативного перехода от одних видов обработки к другим.

Интерактивное взаимодействие с другими предприятиями обеспечивает не только совместное использование и совершенствование технологий несколькими различными предприятиями, но и создает условия для передачи технологии и соответствующих прав на них от передающей стороны к принимающей в целях их последующего внедрения и использования, т. е. трансфера технологий [11].

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шваб К. Четвертая промышленная революция. М.: «Эксмо», 2016. 138 с.
2. ГОСТ 23004-78. Механизация и автоматизация технологических процессов в машиностроении и приборостроении.
3. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022623243 РФ. База данных технических характеристик ультразвуковых генераторов: № 2022623151: заявл. 24.11.2022: опубл. 05.12.2022 / Д. С. Фатюхин, Р. И. Нигметзянов, С. К. Сундуков [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет».
4. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022622370 РФ. База данных технологических режимов ультразвуковой очистки деталей машин: № 2022622321: заявл. 26.09.2022: опубл. 29.09.2022 / Д. С. Фатюхин, Р. И. Нигметзянов, В. М. Приходько [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет».
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022663082 РФ. Мониторинг ультразвуковой колебательной системы: № 2022662789: заявл. 11.07.2022: опубл. 11.07.2022 / Д. С. Фатюхин, Р. И. Нигметзянов, С. К. Сундуков [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет».
6. Харуби Н. Автоматизация проектирования виртуальных приборов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2009. № 6 (20). С. 161–165.
7. Приходько В.М., Фатюхин Д.С., Юдаков Е.Г. Научноёмкая технология ультразвуковой очистки крупногабаритных корпусных деталей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2012. № 1 (7). С. 17–20.
8. Контрольно-измерительное оборудование ZETLAB. [Электронный ресурс]. 2023. URL: <https://zetlab.com> (дата обращения: 10.05.2023).
9. Fatyukhin D.S., Nigmatzyanov R.I., Prikhodko V.M., Sukhov, A.V., Sundukov, S.K. Comprehensive Estimation of Changes in the Microgeometry of Steel 45 by Ultrasonic Plastic Deformation with a Free Deforming Element // Metals, 2023, 13(1), 114 p.
10. Ловыгин А.А., Васильев А.В., Кривцов С.Ю. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM система. М.: ДМК Пресс, 2017. 286 с.
11. ГОСТ Р 57194.1-2016. Трансфер технологий. Общие положения.

## REFERENCES

1. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. Moscow: Eksmo, 2016, 138 p.
2. State standard 23004-78. Mechanization and automation of technological processes in mechanical engineering and instrumentation.
3. Certificate of state registration of the database No. 2022623243 of the Russian Federation. Database of technical characteristics of ultrasonic generators: No. 2022623151: application 24.11.2022: publ. 05.12.2022 / D. S. Fatyukhin, R. I. Nigmatzyanov, S. K. Sundukov [et al.]; the applicant is the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Moscow Automobile and Road Construction State Technical University».
4. Certificate of state registration of the database No. 2022622370 of the Russian Federation. Database of technological modes of ultrasonic cleaning of machine parts: No. 2022622321: application 26.09.2022: publ. 29.09.2022 / D. S. Fatyukhin, R. I. Nigmatzyanov, V. M. Prikhodko [et al.]; the applicant is the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Moscow Automobile and Road Construction State Technical University».
5. Certificate of state registration of the computer program No. 2022663082 of the Russian Federation. Monitoring of the ultrasonic oscillatory system: No. 2022662789: application 11.07.2022: publ. 11.07.2022 / D. S. Fatyukhin, R. I. Nigmatzyanov, S. K. Sundukov [et al.]; the applicant is the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Moscow Automobile and Road Construction State Technical University».
6. Harubi N. Automation of design of virtual devices // Issues of modern science and practice. V.I. Vernadsky Crimean Federal University, 2009, no. 6 (20), pp. 161-165.
7. Prikhodko V.M., Fatyukhin D.S., Yudakov E.G. Science-intensive technology of ultrasonic cleaning of large-sized body parts // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2012, no. 1 (7), pp. 17-20.
8. ZETLAB control and measuring equipment. [[Electronic resource]. 2023. URL: <https://zetlab.com> (accessed: 10.05.2023).
9. Lovygin, A.A., Vasiliev, A.V., Krivtsov, S.Yu. Modern CNC machine and CAD/CAM system. Moscow: DMK Press, 2017, 286 p.
10. State Standard R 57194.1-2016. Technology transfer. General provisions.

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

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

Статья поступила в редакцию 30.06.2023; одобрена после рецензирования 04.07.2023; принята к публикации 10.07.2023.

The article was submitted 30.06.2023; approved after reviewing 04.07.2023; assepted for publication 10.07.2023.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №8 (146). С.27-34.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №8 (146). P. 27-34.

Научная статья  
УДК УДК 621.9.047/621.9.048  
doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-24-32

## Комбинированные технологии повышения надежности и ресурса изделий авиакосмической техники

Владислав Павлович Смоленцев<sup>1</sup>, д.т.н.  
Михаил Вячеславович Кондратьев<sup>2</sup>, к.т.н.  
Евгений Владиславович Смоленцев<sup>3</sup>, д.т.н.  
<sup>1, 2, 3</sup> Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия  
<sup>1</sup> vsmolen@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0327-0354>  
<sup>2</sup> 540520@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8444-0668>  
<sup>3</sup> smolentsev.rabota@gmail.com, [orcid.org/0000-0002-8747-588X](https://orcid.org/0000-0002-8747-588X)

**Аннотация.** В работе рассмотрена крупная научная и прикладная проблема повышения качества, и надежности наукоемких изделий технологическими методами и средствами, что составляет основу для производства конкурентоспособной продукции отечественного машиностроения в первую очередь в авиакосмической отрасли. Проведен анализ причин появления дефектов техники и снижения ее надежности по стадиям жизненного цикла изделий. Были определены мероприятия, обеспечивающие заданную надежность при сохранении или повышении ресурса с минимизацией затрат на стадии запуска изделий в серийное производство путем поэтапного повышения эксплуатационных характеристик в процессе испытаний продукции. Показано, что комбинированные методы обработки деталей позволяют создавать малогабаритные многослойные вибростойкие фильтры с увеличенной площадью рабочей зоны и суммарной толщиной стенки, обеспечивающей устойчивость изделия к многократным колебаниям, что ранее приводило к необходимости нежелательного увеличения габаритов и массы производимого изделия. Раскрыты возможности использования комбинированных методов обработки с наложением электромагнитных полей для улучшения эксплуатационных характеристик модернизированных и создаваемых деталей летательных аппаратов, в том числе их элементов, при освоении серийного производства наукоемких изделий, особенно разрабатываемых для их импортозамещения. Изучено изменение механических характеристик материалов при различных методах обработки. Испытания образцов на предел прочности и удлинение показали, что последовательное использование высокоэффективной электрохимической размерной обработки с последующим виброударным (или иным) упрочнением позволяет повысить характеристики изделий до 10 % и достичь результата, не ниже полученного после механической обработки с упрочнением.

**Ключевые слова:** ресурс, надежность, технологичность, комбинированные методы обработки, двигатели

**Для цитирования:** Смоленцев В.П., Кондратьев М.В., Смоленцев Е.В. Комбинированные технологии повышения надежности и ресурса изделий авиакосмической техники // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 8 (146). С. 27–34. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-24-32

## Combined technologies for increasing the reliability and service life of aerospace products

Vladislav P. Smolentsev<sup>1</sup>, D. Eng.  
Mikhail V. Kondratiev<sup>2</sup>, PhD. Eng.  
Evgeny V. Smolentsev<sup>3</sup>, D. Eng.  
<sup>1, 2, 3</sup> Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia  
<sup>1</sup> vsmolen@inbox.ru  
<sup>2</sup> 540520@mail.ru  
<sup>3</sup> smolentsev.rabota@gmail.com

**Abstract.** The paper considers a major scientific and applied problem of improving the quality and reliability of scientific products by technological methods and means, forming the basis for the production of competitive products of domestic engineering, primarily in the aerospace industry. The analysis of the defect appearance causes in technology and the decrease in its reliability at the stages of product life cycle is carried out. Measures were identified to ensure established reliability while

*maintaining or increasing the resource with minimizing costs at the stage of commercializing by gradually increasing operational characteristics underway product test. It is shown that combined methods of part process allow creating small-sized multilayer vibration-resistant filters with an increased area of the working area and a total wall thickness that ensures the stability of the product to repeated vibrations, which previously caused undesirable increase in the dimensions and mass of a manufactured product. The possibilities of using combined processing methods with the imposition of electromagnetic fields to improve the operational characteristics of upgraded and aircraft parts under formation, including their elements, in the expansion of mass production of scientific products, particularly developed for their import substitution, are found. The change in the mechanical characteristics of materials under various processing methods has been studied. Specimens test for strength at failure and stretch have shown that the consistent use of highly efficient electrochemical sizing followed by jackhammering (or other) way of hardening allows the increase in the characteristics of products up to 10%, achieving a result not lower than that obtained after tooling with hardening.*

**Keywords:** resource, reliability, manufacturability, combined tooling techniques, engines

**For citation:** Smolentsev V.P., Kondratiev M.V., Smolentsev E.V. Combined technologies for increasing the reliability and service life of aerospace products / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 8 (146). P. 27–34. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-24-32

## Введение

К изделиям авиакосмического машиностроения относятся летательные аппараты, где объективно существуют повышенные требования к уровню надежности изделий. Одним из основных элементов таких изделий, определяющий длительность их безотказной работы, является надежность двигателя, характеризующая межремонтный цикл эксплуатации современных самолетов оборонного и гражданского назначения [1]. После освоения выпуска ракетных двигателей новых поколений, обеспечивающих многоразовые пуски, повысились требования к их надежности и долговечности при минимальной доработке аппаратов, возвратившихся из космоса [2]. Опыт разработки новых способов и устройств [3] изготовления ответственных деталей с использованием комбинированных методов обработки [4 – 6] показал, что расширение области использования таких процессов способно существенно улучшить характеристики летательных аппаратов, их двигателей и позволяет достичь эксплуатационных показателей, превышающих достигнутый уровень не только отечественных, но и зарубежных изделий авиакосмической техники.

### Основные причины, снижающие надежность двигателей летательных аппаратов

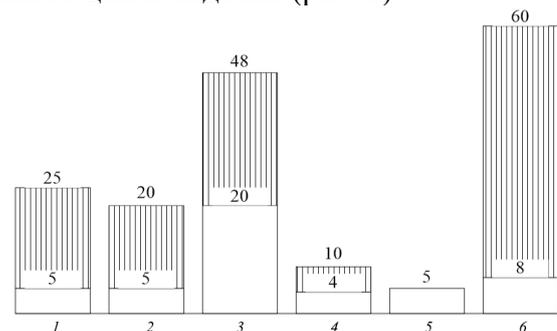
В процессе отработки технологичности двигателей установлено, что в области качества и надежности изделий в отечественном машиностроении имеется весомый задел основополагающих конструкторских и технологических решений, который достаточен для построения эффективной системы управления качеством наукоемких изделий,

соответствующей уровню качества создаваемой и выпускаемой продукции отечественных и зарубежных фирм.

На стадии запуска изделий в серийное производство путем поэтапного повышения эксплуатационных характеристик в процессе испытаний продукции были определены мероприятия, обеспечивающие заданную надежность при сохранении или повышении ресурса с минимизацией затрат на эти цели.

Общий подход к оценке качества техники возможен за счет единых критериев, определяемых границами нормативных документов, и при сертификации продукции.

Анализ причин появления дефектов техники и снижения ее надежности позволили выявить объекты исследований по стадиям жизненного цикла изделий (рис. 1).



**Рис. 1. Анализ причин, снижающих надежность двигателей летательных аппаратов:**

1 – дефекты материалов, заготовок; 2 – механообработка; 3 – сварка и пайка; 4 – сборка и испытание; 5 – хранение и транспортировка; 6 – прочие причины (эксплуатация, качество приборов, комплектующих, случайные факторы и др.)

**Fig. 1. Analysis of the causes that reduce the reliability in aircraft engines:**

1 – defects in materials, blanks; 2 – machining operation; 3 – welding and brazing; 4 – assembly and testing; 5 – storage and transportation; 6 – other causes (operation, quality of devices, components, random factors, etc.)

Рис. 1 показывает, что появление брака первой группы деталей определяется причинами, слабо зависящими от изготовителя наукоемких изделий, например, двигателей авиакосмической техники. Это получаемые со стороны материалы, готовые профили, в том числе от поставщиков из-за рубежа. Здесь для контроля качества материалов обычно вводят входной выборочный контроль, что повышает затраты на их приобретение до 0,4...0,5 % от стоимости и снижает оценки технологичности. Если имеется выбор, то для снижения брака производят смену поставщика, что практически используется крайне редко. Качество заготовок (рис. 1), как правило, определяется состоянием технической базы собственных заготовительных производств и оценивается их технологическими возможностями, соблюдением производственной дисциплины. Так при стальном литье брак заготовок с простой геометрией и небольшими размерами практически не проявляется, но в случае сложных изделий (лопаток, облопаченных роторов, статоров, корпусных деталей), свойственных авиакосмическому машиностроению, он может достигать 30...40 % (даже при использовании точных видов литья).

При механообработке, включая комбинированные методы обработки, значимые дефекты проявляются за счет нарушения точности, зависящей главным образом от состояния станочного парка, средств технологического оснащения, квалификации исполнителей, соблюдения технологической дисциплины. Их устранение возможно путем использования новых технологических приемов, создаваемых комбинацией различных воздействий на объект изготовления. Так, для обработки поверхностей сложной формы, особенно в деталях из труднообрабатываемых материалов, широко применяют электрические методы и их комбинации с механической обработкой.

Изучено изменение механических характеристик материалов при различных методах обработки. Испытания образцов на предел прочности и удлинение показали, что последовательное использование высокоэффективной электрохимической размерной обработки с последующим виброударным (или иным) упрочнением [1, 2] позволяет повысить характеристики изделий до 10 % и достичь результата, не ниже полученного после механической обработки с упрочнением.

Анализ других значимых факторов, приведенных на рис. 1, рассмотрен в [4 – 6].

### Основные направления технологических исследований по повышению качества и надежности двигателей летательных аппаратов

В работе [1] обобщены исследования в различных отраслях машиностроения [7] и предложено в качестве приоритетных использовать следующие направления технологических изысканий по повышению эксплуатационных показателей деталей для газотурбинных двигателей (ГТД):

– применение новых видов материалов и покрытий, отвечающих условиям работы в изделии, технико-экономическим требованиям и уровню показателей, достигнутых на мировом уровне. Применительно к ГТД свойства наносимых покрытий могут повысить эксплуатационные показатели по надежности до желательной величины без ухудшения весовых и стоимостных характеристик изделия. Количественно это может быть оценено с помощью критериев производственной технологичности, приведенных в [2], а научную новизну и приоритет необходимо закрепить открытиями и патентами. В результате необходимо достичь получения высоких эксплуатационных характеристик изделий из дорогостоящих и дефицитных материалов при минимальном их использовании в качестве покрытий. На этом этапе отработки производственной технологичности основной задачей технологов является создание новых способов и средств технологического обеспечения, эффективных для обработки новых материалов, покрытий и их сочетаний при минимальных затратах в производстве;

– создание методов и средств для контроля качества на всех этапах изготовления, сборки и опытной эксплуатации ответственных деталей, сборочных комплектов и готовых изделий. Здесь выполняется поэтапное совершенствование создаваемых и модернизируемых объектов с использованием, в основном, технологических приемов опытного производства, единых для различных отраслей машиностроения [7];

– целенаправленные исследования по комбинированным методам обработки применяемых и создаваемых материалов для объектов различной геометрической формы и сложности, предлагаемых для использования в перспективных изделиях. Специфичными здесь являются сложнопрофильные детали типа лопаток и другие детали горячей зоны реактивных двигателей, где требуется решить вопросы по обеспечению требуемых свойств

поверхностного слоя деталей [1] при соблюдении показателей производственной технологичности [2, 5]. В современных условиях необходимо направить усилия на создание отечественных, защищенных охранными документами, технологических методов и средств [4, 8, 9], расширяющих возможности разработчиков по созданию конкурентоспособных ГТД [1].

Создание изделий ракетной техники [2] протекало с наибольшим использованием достижений технологической науки в области авиационных двигателей. Особенностью применения накопленных результатов для ракетных двигателей (в частности, жидкостных (ЖРД)) ранее являлось их одноразовое применение при рабочих пусках. В настоящее время ЖРД начали успешно применять для многократных рабочих пусков, что потребовало обеспечения повышенных требований по надежности и долговечности двигателей в случае их повторного применения для последующих пусков ракет.

В настоящее время конструктивные и технологические мероприятия должны обеспечивать их безаварийное использование не менее 20 – 25 раз, а на ближайшую перспективу поставлена задача достичь 50 пусков. Это возможно при использовании для горячей зоны двигателей термостойких защитных покрытий, наносимых преимущественно, лучевыми методами, например приведенными в [3]. Здесь решена задача повышения качества поверхностного слоя деталей при их многократной и длительной эксплуатации.

Аналогичные явления наблюдаются на переходных участках с покрытием внутри камеры сгорания, где поток горючей смеси меняет направление течения и встречает торможение, для снижения которого требуется местная локальная зачистка поверхности. Камеры сгорания могут иметь различные, в том числе малые, сечения, что затрудняет подвод профильного инструмента в зону обработки и выполнение технологических перемещений для управляемого удаления припуска.

С целью эффективного выполнения операции чистовой обработки покрытия потребовались нетрадиционные технологические процессы, одним из которых стала комбинированная электроабразивная обработка кругом и гибким нежестким инструментом с наложением электрического поля. В этом случае процесс происходит при минимальных силах резания и износе электрода с локальным перемещением инструмента, требуемым для выноса продуктов обработки, что расширяет технологические возможности изготовления качественных

деталей для изделий авиакосмической отрасли, имеющих, как правило, уменьшенную массу и габариты.

Исследования в области аддитивных процессов открыли возможность изготовления в инструменте для электроабразивной обработки каналов с профилем, обеспечивающих регулируемую подачу через корпус инструмента жидкой и газожидкостной рабочей среды со стабильным расходом для подачи ее в труднодоступные участки чистовой обработки, что существенно снизило износ инструмента и открыло возможность одновременного формообразования нескольких поверхностей (в том числе внутренних) у деталей повышенной точности и ресурса. Такие инструменты имеют достаточно высокую стойкость, оцениваемую при отработке производственной технологичности. Это является одним из перспективных направлений интенсификации производства и снижения затрат до уровня, обеспечивающего конкурентоспособность выпускаемой и перспективной отечественной продукции на мировом рынке машиностроения. Для реализации комбинированного электроабразивного метода для чистовой обработки [4, 8, 9] труднодоступных элементов деталей потребовалась разработка новых (на уровне изобретений) инструментов, наиболее полно использующих достижения в области электроабразивного процесса, что актуально для машиностроения.

При чистовой обработке длинных каналов (общая длина пазов камер сгорания современных ракетных двигателей может превышать 500 м) с пазами типа приведенных на рис. 2, желательно выбирать меньшие значения продольной подачи инструмента, ориентируясь на участки с выступающими ребрами малой (от 0,8 мм) ширины и углублениями таких же величин, создающих каналы для протекания охлаждающих сред (в основном топлива в жидком и газожидкостном состоянии).

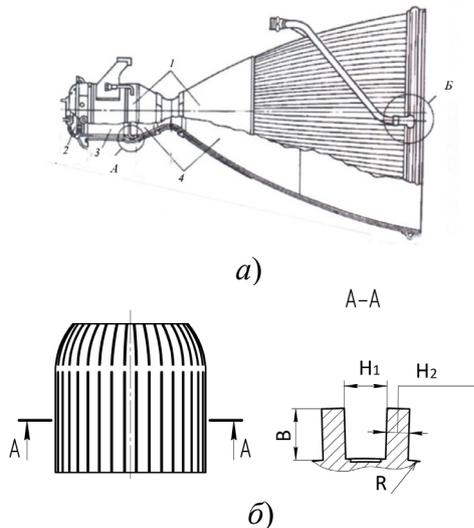


Рис. 2. Профиль корпуса ЖРД с пазами для прохождения охлаждающей жидкости

Fig. 2. The profile of the LRE body with slots for the coolant transit

При этом средняя скорость подачи инструмента может стать меньше требуемой для осуществления качественной чистовой обработки и без применения комбинированных процессов обработки существенно снизится производительность процесса. Для реализации потенциальных возможностей комбинированной обработки целесообразно использовать электроабразивный инструмент с переменным профилем проточного тракта для регулируемой подачи рабочей среды, получаемый аддитивными технологиями с возможностью использования адаптивного управления режимами обработки.

При создании ракетных двигателей с большой тягой (в частности, водородно-кислородных) потребовалось интенсифицировать охлаждение камер сгорания и реактивного сопла. Для этого начали создаваться новые системы охлаждения, в основном жидким водородом, прокачиваемым по продольным каналам через фрезерованные узкие пазы на наружной поверхности камеры сгорания и реактивного сопла. Здесь охлаждающий компонент переходит в газожидкостную смесь и возникает возможность перекрытия охлаждающего канала газовой составляющей среды. Типовая система охлаждения горячей зоны ЖРД приведена на рис. 3.



**Рис. 3. Горячая зона ЖРД:**

*a* – общий вид: 1 – корпус; 2 – смесительная головка (огневой диск); 3 – камера сгорания; 4 – реактивное сопло; А – пояс завесы, Б – подвод охладителя;  
*b* – типовое сечение охлаждающего канала камеры сгорания:  $H_1$  – ширина канала;  $H_2$  – толщина ребра между боковыми стенками паза;  $B$  – глубина канала;  $R$  – радиус паза в детали

**Fig. 3. The hot area of the LRE:**

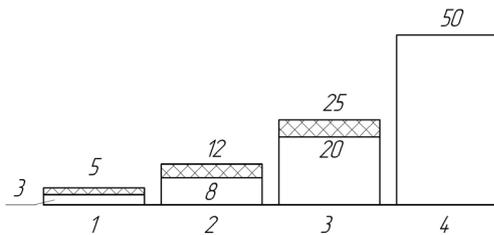
*a* – general view: 1 – the body; 2 – the mixing chamber (fire disk); 3 – the combustion chamber; 4 – jet nozzle; A – curtain belt, B – cooler supply;  
*b* – a typical cross-section of the cooling channel of the combustion chamber:  $H_1$  – the width of the channel;  $H_2$  – the thickness of the rib between the side walls of the groove;  $B$  – the depth of the channel;  $R$  – the radius of the groove in the part

На рис. 3, *a* приведен общий вид горячей зоны ракетного двигателя, включающий размещенную в корпусе 1 камеру сгорания 3 и реактивное сопло 4. Топливо перед сгоранием поступает через патрубок (рис. 3, *b*) по каналам на поверхности реактивного сопла 4 и камеры сгорания 3 к смесительной головке 2 с поясом завесы, оказывающей эффективное локальное охлаждение зоны горения, но весьма трудоемкой при изготовлении и снижающей прочностные характеристики деталей. Консольное крепление корпуса 1 вызывает вибрацию системы, что может положительно сказываться на течении охладителя по каналам. На ряде ЖРД каналы имеют прямоугольную форму в виде узкого паза (см. рис. 3, *b*). В применяемых изделиях геометрия охлаждающих каналов имеет широкие диапазоны (см. рис. 3, *b*) по ширине  $H_1$  – толщине ребер между боковыми стенками паза  $H_2$ ; глубине  $B$  от долей до нескольких миллиметров, что усложняет доступ металлообрабатывающего инструмента в зону формообразования пазов, особенно внутри изделия, и проявляет преимущества применения комбинированных методов обработки.

На рис. 3, *b* приведено типовое сечение охлаждающего канала камеры сгорания, где требуется выполнить чистовую обработку каналов с пазами шириной  $H_1$ , снизить шероховатость поверхности и удалить местные неровности типа показанного на рис. 2.

С использованием комбинированных методов обработки по гибким фотошаблонам на донной и боковых частях внутри каналов удалось изготовить профильные локальные углубления, позволяющие повысить площадь охлаждающей поверхности и за счет переменного профиля углубления обеспечить отрыв потока от стенки канала до его перекрытия газом и нарушения стабильности охлаждения горячей зоны изделия.

Рассматриваемые в работе и другие мероприятия, выполненные для повышения ресурса ракетных двигателей, позволили значительно повысить допустимое количество пусков изделий (рис. 4.). Эта проблема стала еще более актуальной при переходе на космические летательные аппараты многоразового использования. В перспективе планируется получить за счет выполнения рассматриваемых в работе и других конструкторских и технологических мероприятий повышение ресурса, обеспечивающего количество пусков до 50 и более, что требуется для многократного эффективного использования перспективных ракетных систем.



**Рис. 4. Динамика увеличения ресурса горячей зоны ракетного двигателя по количеству непрерывных безаварийных пусков:**

1 – период создания и освоения жидкостных ракетных двигателей (ЖРД); 2 – период начала эффективного использования ЖРД для освоения космического пространства; 3 – состояние на текущий период; 4 – количество пусков при использовании ЖРД в системах многократного применения

**Fig. 4. Dynamics of increasing the resource of the rocket engine hot area by the number of a continuous mishap-free motor starting:**

1 – the period of production and development of liquid rocket engines (LRE); 2 – the period of the beginning of the effective use of LRE for space exploration; 3 – the state for the current period; 4 – the number of the engine starting at the use of LRE in recoverable systems

Комбинированные методы обработки позволили создать малогабаритные многослойные вибростойкие фильтры с увеличенной площадью рабочей зоны и суммарной толщиной стенки, обеспечивающей устойчивость изделия к многократным колебаниям, что ранее приводило к необходимости нежелательного увеличения габаритов и массы изделия. В летательных аппаратах фильтры работают при значительных динамических и тепловых нагрузках и для достижения требуемых прочностных характеристик изготавливаются преимущественно из труднообрабатываемых металлических материалов, где толщина листа характеризует не только механическую прочность, но и производственную технологичность, устойчивость фильтра к вибрационным нагрузкам, фильтрующую способность изделия.

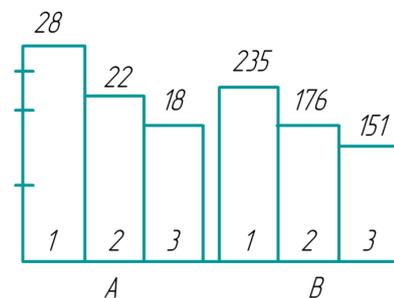
В двигателях летательных аппаратов одним из основных параметров оценки уровня технологичности является минимальная масса деталей и сборочных единиц изделия. Для фильтров, кроме того, требуется обеспечить максимальную фильтрующую способность, оцениваемую соотношением площади сечения каналов к общей площади, занимаемой проточной частью.

При изготовлении элементов конструкции, устанавливаемых в топливные магистрали летательных аппаратов, должны быть обеспечены высокие требования к точности и качеству поверхностного слоя каналов, что требует разработки и применения нетрадиционных методов получения отверстий с различным сечением каналов и кривизной оси, обеспечивающей безударный вход и выход из фильтра очищаемой

среды. Для этого реализован механизм формирования сопрягаемых отверстий различного сечения с переменной геометрией оси в слоях и разработаны пути повышения характеристик многослойных фильтров, используемых в изделиях авиакосмической отрасли.

В частности, предложен новый процесс формирования винтовых каналов в многослойных конструкциях, установлены технологические связи между воздействиями для различных схем прошивки отверстий различного профиля и положения вектора течения струи, что позволило обосновать назначение обоснованной толщины слоев многослойных фильтров, изготавливаемых лучевой, комбинированной прошивкой, в том числе по фотошаблонам, в металлических тонкостенных листовых материалах, используемых в настоящее время для изготовления фильтрующих элементов.

На примере многослойного фильтра (рис. 5) с многогранными каналами сечением 0,2 мм показана возможность снизить длину и массу перспективных изделий. При этом следует учитывать, что расчетные результаты носят оценочный характер, но хорошо подтверждаются экспериментально, пригодны для ускоренного обоснования варианта обработки каналов по фотошаблонам и могут использоваться при отработке технологичности.



**Рис. 5. Снижение длины (A, мм) и массы (B, г) фильтров с толщиной стенки до 1,0 мм при различных конструкциях и методах изготовления (прошивка круглых отверстий электронно-лучевым методом для 1, 2; комбинированные методы прошивки каналов по фотошаблонам для 3):**

1 – цельный; 2 – многослойный из листа толщиной 0,2 мм; 3 – многослойный из листа толщиной 0,2 мм, полученный многоэлектродной прошивкой квадратных отверстий

**Fig. 5. Reduction of the length (A, mm) and mass (B, d) of filters with a wall thickness of up to 1,0 mm with different designs and manufacturing methods (piercing round holes by electron beam method for 1, 2; combined methods of flashing channels by photomasks for 3):**

1 – integral; 2 – multilayer of a sheet 0,2 mm thick; 3 – multilayer of a sheet 0,2 mm thick, obtained by multielectrode stitching of square holes

Многослойные металлические фильтры обладают весомыми достоинствами перед цельными. Длина изделия только за счет снижения величины перемычки может быть снижена до 22 % и более, а масса – не менее чем на 26 %.

Применение комбинированных методов обработки позволяет снизить длину и массу фильтров более чем на 36 % при сохранении фильтрующей способности, качества и надежности.

Применительно к многослойным фильтрам основным критерием варианта технологии их изготовления является выбор толщины слоев различных материалов, используемых в отрасли для исследуемых изделий.

### **Механизм управления качеством изделий на этапе их изготовления**

При проектировании новых изделий разработчик выбирает по документации поставляемую продукцию, оценивает ее влияние на показатели качества изделия, изучает опыт изготовления и эксплуатации изделий, аналогичных создаваемому, формирует конечные показатели качества, которые должны соответствовать требованиям технического задания, согласованного с заказчиком, и общему уровню системы, для которой изготавливается изделие.

Изготовитель заинтересован в получении продукции высокого качества, но ограничен материальными средствами на такие исследования. На стадии запуска изделий в серийное производство требуется не просто поддерживать показатели качества и обеспечивать надежность объектов, но и систематически проводить научные, прикладные работы по совершенствованию технологии, а, совместно с разработчиком, – по улучшению конструкции с учетом новых технологических достижений в мире в той их части, которая реализована (или может быть применена) в производстве.

На качество изделий влияют многие факторы, зависящие от разработчика (конструкция), поставщиков (качество поставляемой продукции), эксплуатационников (соблюдение условий функционирования в изделии). Однако реализация комплекса воздействий в виде качественного изделия в основном зависит от изготовителя на всех стадиях изготовления (включая контроль и испытания).

Для улучшения показателей качества на стадии производства продукции необходимо из множества ограничений технологического, финансового, организационного вида

выделить те, которые способствуют росту общего показателя качества изделий. Это может быть высокая деловая репутация изготовителя за прошлый период, удобное географическое расположение (упрощается упаковка готового изделия, снижаются транспортные расходы и др.), современное технологическое оснащение производства, кадры требуемого уровня, эффективная структура управления, привлекательная финансовая и социальная политика.

Для управления качеством наукоемких изделий на стадии их производства требуется учет всего жизненного цикла объектов и взаимодействий с другими технологическими показателями в форме численных оценочных показателей [10].

Экономические, организационные связи, требования разработчика, потребителя продукции можно использовать в математической модели управления качеством в виде ограничений, корректируемых по мере изменения финансовой, экономической обстановки, структурных и организационных преобразований, а в ряде случаев – потребностей страны и политической обстановки.

### **Заключение**

В работе рассмотрена крупная научная и прикладная проблема повышения качества, и надежности наукоемких изделий технологическими методами и средствами, что составляет основу для производства конкурентоспособной продукции отечественного машиностроения в первую очередь в авиакосмической отрасли. Такие вопросы входят в национальные программы повышения качества промышленной продукции страны.

Ожидаемые результаты от использования материалов работы:

- рост престижа предприятий, что реализуется в производстве востребованных наукоемких изделий и приоритетах при получении выгодных заказов в стране и за рубежом;

- научно обоснованные достигнутые и перспективные показатели качества авиакосмической отрасли, которые позволяют стимулировать развитие продукции машиностроения, повысить ресурс и обеспечить надежность изделий при эксплуатации в авиакосмическом машиностроении оборонного и гражданского профиля при наибольшем использовании импортозамещения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мухин В.С. Поверхность: технологические аспекты прочности деталей ГТД // М: Наука, 2005. 296 с.
2. Бондарь А.В. Качество и надежность. М: Машиностроение. 2007. 308 с
3. Патент 2619410 РФ. Способ плазменного напыления покрытия / В.П. Смоленцев, Е.В. Смоленцев, С.В. Сафонов, М.В. Кондратьев, Е.С. Бобров // Заявлен 20.01.2015. Оpub. 15.05.2017. Бюл. № 14
4. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. // М: Машиностроение. 2005. 511 с.
5. Патент 2405662 (РФ). Способ нанесения чугуна покрытия на алюминиевые сплавы / В.П. Смоленцев, А.В. Гребенщиков, А.В. Перова, Б.И. Омигов // Бюл. изобр. 2010 № 34.
6. Перова А.В., Смоленцев В.П., Грибанов А.С. Формирование покрытий на алюминиевых сплавах методом электроэрозионного легирования // Авиакосмические технологии «АКТ - 2008», Труды IX Всерос. науч.-техн. конф. и школы молодых ученых, аспирантов и студентов, Воронеж: ВГТУ, 2008. С. 48–53.
7. Контроль и управление качеством продукции в гибкоструктурном производстве / Н.М. Бородкин, В.И. Клейменов, А.С. Белякин, В.П. Смоленцев // Воронеж: Изд-во ВГУ, 2001. 138 с.
8. Научоёмкие технологии в машиностроении / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. 528 с.
9. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / Под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина // М: Инновационное машиностроение. 2018. 818 с.
10. Смоленцев В.П., Смоленцев Е.В. Состояние и перспективы развития комбинированных методов обработки // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. № 2 (41). С. 5–9.

REFERENCES

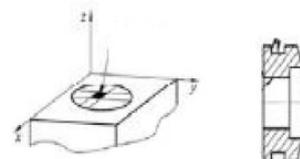
1. Mukhin V.S. Surface: technological aspects of the strength of GTE parts // Moscow: Nauka, 2005, 296 p.
2. Bondar A.V. Quality and reliability. Moscow: Mashinostroenie, 2007,308 p.
3. Patent 2619410 of the Russian Federation. The method of plasma coating spraying / V.P. Smolentsev, E.V. Smolentsev, S.V. Safonov, M.V. Kondratiev, E.S. Bobrov // Applied 20.01.2015. Publ. 15.05.2017. Bul. No. 14.
4. Smolentsev E.V. Design of electrical and combined tooling techniques. / Moscow: Mashinostroenie, 2005, 511 p.
5. Patent 2405662 (RF). Method of applying cast iron coating on aluminum alloys / V.P. Smolentsev, A.V. Grebenschikov, A.V. Petrova, B.I. Omigov // Bul. invention, 2010, no. 34.
6. Perova A.V., Smolentsev V.P., Gribanov A.S. Formation of coatings on aluminum alloys by the method of electroerosive alloying // Aerospace technologies «AST – 2008», Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Technical conf. and schools of young scientists, postgraduates and students, Voronezh: VSTU, 2008, pp. 48–53.
7. Product quality control and inspection in flexible structural production / N.M. Borodkin, V.I. Kleimenov, A.S. Belkin, V.P. Smolentsev // Voronezh: VSU Publishing House, 2001, 138 p.
8. Science intensive technologies in mechanical engineering / A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Bez'yazichny et al.; edited by A.G. Suslov. Moscow. Mashinostroenie. 2012, 528 p.
9. Directory of a machine-building technologist. In 2 vols, vol.2 / Edited by A.S. Vasiliev, A.A. Kutin // Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2018, 818 p.
10. Smolentsev V.P., Smolentsev E.V. Status and development prospects of combined processing methods // Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P.A. Solovyov, 2017, no. 2 (41), pp. 5–9.

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

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

Статья поступила в редакцию 22.05.2023; одобрена после рецензирования 25.05.2023; принята к публикации 27.05.2023.

The article was submitted 22.05.2023; approved after reviewing 25.05.2023; assepted for publication 27.05.2023.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №8 (146). С.35-42.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №8 (146). P. 35-42.

Научная статья  
УДК 621.829.93/621.833/621.83.061.1/669.01  
doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-24-32

## **Технологическое обеспечение изготовления зубчатых колес авиационных газотурбинных двигателей с учетом нестабильности физико-механических свойств их материалов**

**Вячеслав Феокистович Безъязычный<sup>1</sup>**, д.т.н.  
**Евгения Владимировна Шеховцева<sup>2</sup>**, к.т.н.

<sup>1</sup> Рыбинский государственный авиационный технический университет,  
Рыбинск, Россия

<sup>2</sup> Публичное акционерное общество «Объединенная двигательная корпорация – Сатурн»,  
Рыбинск, Россия

<sup>1</sup> technology@rsatu.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>2</sup> evgeniya.shekhovtseva@uec-saturn.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** Ключевое место при производстве газотурбинных двигателей, в том числе и зубчатых колес, как авиационного, так и судового, и энергетического назначения, отводится конструкционным сталям. В связи с этим важна не только физическая природа изготовления зубчатых колес, но прежде всего формализация и управление обеспечением физико-механических свойств материалов с учетом их стабильности. Рассмотрена проблема технологического обеспечения изготовления зубчатых колес газотурбинных двигателей, где конструкция, материал детали и технология изготовления анализируются неотъемлемо друг от друга. Разработана взаимосвязь качества рабочих поверхностей с технологическими и прочностными характеристиками относительно эксплуатационных свойств. Исследована нестабильность механических свойств конструкционного материала и обосновано их формирование на основе технологической наследственности при соответствии технологического процесса изготовления детали ее материалу и назначению. Наглядно представлена нестабильность физико-механических свойств на примере одной марки стали, но при различных методах получения заготовки и материала в состоянии поставки. Изучено влияние термической обработки на стабилизацию физико-механических свойств материала с учетом наследования свойств. Разработана модель контактного взаимодействия зубчатых колес с учетом внешних и внутренних воздействий, как в процессе изготовления, так и при эксплуатации (свойства материала, силы в зацеплении, температурное поле и т. д.). Кумулятивная модель, ориентированная на реакцию конструкционного материала при обработке и взаимодействии в работе, обобщает функциональное назначение, физико-механические свойства и особенности поведения в условиях эксплуатации. Представлено управление эксплуатационными свойствами зубчатых колес в неразделимой связи с технологией и их материалами – структурным состоянием и физико-механическими свойствами.

**Ключевые слова:** газотурбинный авиационный двигатель, зубчатое колесо, физико-механические свойства, конструкционный материал, упрочненный материал поверхностного слоя, сердцевина материала

**Для цитирования:** Безъязычный В.Ф., Шеховцева Е.В. Технологическое обеспечение изготовления зубчатых колес авиационных газотурбинных двигателей с учетом нестабильности физико-механических свойств их материалов // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 8 (146). С. 35–42. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-24-32

## Engineering support for the manufacture of gears of aviation gas turbine engines providing for the instability of the physical and mechanical properties of their materials

Vyacheslav F. Bezyazichniy<sup>1</sup>, D. Eng.

Evgeniya V. Shekhovtseva<sup>2</sup>, Ph.D Eng.

<sup>1</sup> Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov, Rybinsk, Russia

<sup>2</sup> SPA "UEC-Saturn" Rybinsk, Russia

<sup>1</sup> technology@rsatu.ru

<sup>2</sup> evgeniya.shekhovtseva@uec-saturn.ru

**Abstract.** The key place in the production of gas turbine engines, including gears, both aviation and marine, also power generation turbines, is given to sectional steels. Consequently, not just a physical nature of gear wheels manufacture plays an important part, but formal characterization and the supply of physical and mechanical properties of materials are in the priority, taking into account the reliability of the materials. The problem of technological support for the manufacture of gears for gas turbine engines is viewed with simultaneous analysis of the part material, its manufacturing technology and investigated inseparably from each other. The interrelation of working surfaces quality and technological and strength characteristics with respect to operational properties is developed. The instability of the mechanical properties of the structural material is investigated and their formation is justified on the basis of technological heredity in accordance with the technological process of manufacturing a part to its material and purpose. The instability of physical and mechanical properties is clearly presented on the example of one steel grade, but with different methods of obtaining the workpiece and the material in as-received condition. The influence of heat treatment on the stabilization of the physical and mechanical properties of the material, taking into account the inheritance of properties, is studied. A model of the contact interaction of gears has been developed taking into account external and internal influences, both during preparation and under operation (material properties, engagement forces, temperature field, etc.). The cumulative model, focused on the reaction of the structural material in machining and interaction in work, summarizes a functional use, physical and mechanical properties and features of behavior in operating conditions. The control of the operational properties of gears is presented in an inseparable connection with technology and their materials such as structural state and physical and mechanical properties.

**Keywords:** gas turbine aircraft engine, gear wheel, physical and mechanical properties, structural material, hardened material of the surface layer, the core of the material

**For citation:** Bezyazichniy V.F., Shekhovtseva E.V. Engineering support for the manufacture of gears of aviation gas turbine engines providing for the instability of the physical and mechanical properties of their materials / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 8 (146). P. 35–42. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-24-32

Конструкционная сталь имеет наибольшую продолжительность службы в изделиях авиационной, судовой и промышленной технике. При эксплуатации зубчатых механизмов, передающих крутящий момент, требуется – высокая прочность, твердость, сопротивление усталостным нагрузкам при значительном ресурсе наработки узла. В связи с этим является актуальным изучение нарушения работоспособности и выхода из строя зубчатых передач, как на базе работ ученых Старжинского В.Е., Гольдфарба В.И., Морозовой Л.В., Wang Q.J. и других [1 – 6] документов [7], так и личного опыта [8] при статистическом анализе большого объема практических данных по эксплуатации приводов газотурбинных двигателей (ГТД) авиационной, морской и наземной тематики. Статистика повреждений зубчатых колес (рис. 1) иллюстрирует, что около 80 %

нарушений работоспособности зубчатых передач возникает из-за усталостных проявлений при циклическом характере нагружения.

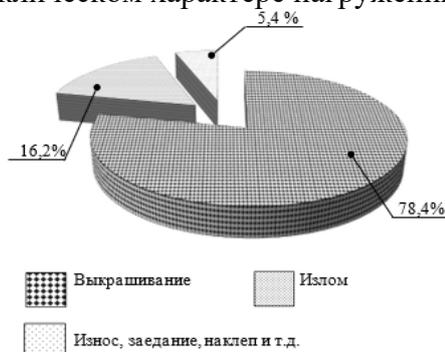


Рис. 1. Статистика повреждений зубчатых колес

Fig. 1. Gear wheel damage statistics

Это аргументирует важность методологического обоснования долговечности зубчатых колес с учетом стабильности свойств конструкционных сталей и технологической

преимущества процесса изготовления шестерен, основываясь на работах А. С. Васильева, М. Л. Хейфец, А. Г. Сулова, Е. С. Елисеева, В. В. Крымова и др. [9 – 12]. Проблема нестабильности физико-механических свойств конструкционных материалов подробно изложена в работах В. К. Старкова, А. П. Яковлевой, Л. В. Савельевой, В. В. Крымова [10, 13 – 14]. Доказано, что нестабильность физико-механических свойств материалов составляет более 40 %, а стабильность этих свойств важна для обеспечения работоспособности изделий [13].

Это приводит к необходимости более достоверного определения эксплуатационных свойств деталей, зависящих от физико-механических свойств материала из которого они изготовлены, начиная с их проектирования, а также обуславливает большой интерес к проблеме технологического обеспечения изготовления зубчатых колес ГТД при циклическом нагружении, которое связано с учётом физико-механических свойств материала и их стабильности.

Качество материала детали и его физико-механические свойства зависят от технологического процесса ее изготовления. Деталь состоит из поверхностного слоя, содержащего поверхность, сформированную механической обработкой, шлифованием с учетом химико-термической обработки, и слоем основного материала.

Эксплуатационные свойства зубчатых колес (контактная и изгибная прочность, износостойкость, коррозионная стойкость и др.) зависят от качества поверхностного слоя рабочих поверхностей сопрягаемых деталей. При разработке, расчете и производстве зубчатой передачи для его работоспособности значительное внимание уделяется технологической наследственности изготовления.

Эксплуатационные свойства зубчатой передачи формируются в рамках двух основных процессов системы менеджмента качества, которые дополняют друг друга:

– на этапе проектирования и разработки (с последующим отражением в конструкторской документации) зубчатого зацепления назначаются материал, точность изготовления, качества рабочих поверхностей и сердцевины материала, обеспечивающие требуемые параметры норм прочности. Расчетчик использует зависимости прочностных показателей с физико-механическими свойствами материалов шестерен, параметрами качества рабочих поверхностей и условиями эксплуатации. Напряжения в зубчатом зацеплении зависят от геометрии профиля, свойства материала и

обработки, в том числе габаритов, величины зазора в соединении и степени точности;

– на этапе технологической подготовки производства при выпуске пакета технологической документации. Технолог задает виды, способы и условия производства шестерен с учетом требуемой точности обработки и показателей качества рабочих поверхностей. На совокупность свойств поверхностного слоя рабочих поверхностей зубчатых колес первоначально влияет механическая обработка. И технологический процесс обработки шестерни должен формироваться с учетом поводки детали после химико-термической обработки и параметров сердцевины для обеспечения качества.

По функциональному назначению эксплуатационные свойства зубчатых колес включают в себя показатели выносливости на контакт и изгиб, износостойкость и коррозионную стойкость. Следовательно, технологическая наследственность качества поверхностного слоя рабочих поверхностей представляет собой систему связей от комплекса прочностных и технологических параметров, а эксплуатационных свойств от качества поверхностного слоя, что представлено на рис. 1:

$$\begin{cases} P_{п} = f(K_{пс}, P_{т}); \\ T_{н}^{\text{эс}} = f(K_{пс}), \end{cases} \quad (1)$$

где  $P_{п}$  – показатели прочности;  $K_{пс}$  – качество поверхностного слоя;  $P_{т}$  – параметры технологические;  $T_{н}^{\text{эс}}$  – технологическая наследственность эксплуатационных свойств.

Технологический процесс производства детали формирует физико-механические свойства материала и соответствующие им прочностные параметры. Изменение свойств, начиная от исходного состояния полуфабриката материала ( $S_{и}$  – исходные свойства материала) при производстве до получения окончательно готовой детали ( $S_{э}$  – эксплуатационные свойства материала) необходимо анализировать с точки зрения технологической наследственности, т. к. качество детали формируется всеми операциями технологического процесса. Конечно, в разных долях.

Управление влиянием каждой отдельной операции технологического процесса изготовления детали на изменение свойств материала с учетом тенденций современного производства и особенно внедрения концепции цифрового двойника на производстве делает

возможным учет взаимодействия операций через коэффициент наследования [11]:

$$K_{CB} = \frac{C_i}{C_{i-1}}, \quad (2)$$

где  $K_{CB}$  – коэффициент наследования свойств материала;  $C_i$  – значение свойства материала на текущей операции;  $C_{i-1}$  – значение свойства материала на предшествующей операции (исходное состояние – для заготовки).

Коэффициент наследования свойств материала определяет положительную ( $K_{CB} > 1$ ) или отрицательную ( $K_{CB} < 1$ ) эволюцию свойств на данной операции относительно их значений на предшествующей операции или в состоянии поставки.

В табл. 1 проведены экспериментальные исследования механических свойств материала зубчатых колес – на примере образцов из стали 18X2H4MA – применительно к различным методам получения заготовки, как исходное состояние, с последующей термической обработкой. Представленное сравнение механических свойств материала при различном методе получения заготовки доказывает, что вид заготовки существенно влияет на механические свойства материала, и наглядно показывает нестабильность его свойств, как с учетом исходного состояния материала, так и последующей термической обработки. В табл. 2 определены величины наследственности механических свойств конструкционной стали на примере двух последовательных операций – заготовительная и термическая обработки.

### 1. Механические свойства стали 18X2H4MA для различных заготовок

#### 1. Mechanical properties of 18X2N4MA steel for various piece parts

Наименование операции		Механические свойства	
Заготовительная	Термическая	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа
Прутки сортовой	—	997	1158
Поковка		1020	1182
Штамповка		1032	1205
Прутки сортовой	Нормализация и высокий отпуск	741	901
Поковка		760	923
Штамповка		785	950

### 2. Коэффициент наследования свойств стали 18X2H4MA при сопоставлении механических свойств заготовок, полученных разными способами

#### 2. The coefficient of inheritance of the properties of steel 18X2H4MA when comparing the mechanical properties of workpieces obtained by different methods

Наименование операции		Коэффициент наследования $K_{CB}$ по параметрам	
Заготовительная	Термическая	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа
Прутки сортовой	Нормализация и высокий отпуск	0,743	0,778
Поковка		0,745	0,781
Штамповка		0,761	0,788

Изготовление зубчатых колес из сортового прутка формирует растягивающие напряжения, которые при эксплуатации суммируются с напряжениями, возникающими при изгибе зуба под действием сопряженного колеса. Они направлены поперек волокон материала и способствуют снижению работоспособности деталей. Следует отметить, что метод обработки давлением не только формирует волокна материала, направленные вдоль зуба относительно наибольших растягивающих напряжений в зубьях, но и благоприятно влияет на производительность механической обработки детали. Последующая

нормализация образует структуру материала с измельченным зерном. В совокупности данные мероприятия положительно влияют на механические свойства материала и работоспособность детали, увеличивая его прочностные показатели.

Широкий ассортимент полуфабриката сортового проката, марок конструкционных сталей и способов обработки содействуют тому, что металлопрокат из стали – это высоко востребованный материал для современных элементов металлических конструкций и механизмов, которые эксплуатируются при различных нагрузках,

климатических и других условиях. Следовательно, долговечность готового изделия из сортового проката нельзя оценивать только по свойствам полуфабриката.

Оценка коэффициента наследования механических свойств материала показывает целесообразность проведения термической обработки и ее позитивное влияние на механические свойства материала, на примере стали 18Х2Н4МА, как для обеспечения наилучших свойств обрабатываемости резанием, так и для сокращения нестабильности механических свойств материала. Отмечается стабилизация по пределу прочности более 18 %, а по пределу текучести – более 11 %. Это подтверждает и коэффициент наследования свойств материала.

При эксплуатации зубчатой передачи зубья пересопрягаются между собой. При этом ведущее звено (шестерня) увлекает за собой ведомое (колесо). На этапе проектирования с учетом эксплуатационных норм по зубчатым зацеплениям предъявляют высокие требования к качеству материала, рабочей поверхности и сердцевине материала, точности обработки. В связи с этим материал, из которого изготавливают зубчатые колеса, должен обладать такими свойствами, как сопротивление явлениям усталости с возможностью воспринимать значительные нагрузки рабочей поверхностью без разрушения определенное число циклов. Таким образом, материал зубчатых колес должен обеспечить необходимый и достаточный предел выносливости согласно требуемого ресурса наработки. Зубчатые колеса в обязательном порядке проходят термическую обработку, а зубчатые передачи силовых приводов – химико-термическую обработку.

Зуб силовой зубчатой передачи (рис. 2) состоит из рабочей поверхности, включающей в себя поверхность 1 контакта и упрочненный слой 2, и сердцевины 3 материала шестерни. Каждый элемент зуба (поверхность 1, упрочненный слой 2 и сердцевина 3) характеризуется физическими, механическими и технологическими свойствами материала, как упрочненного слоя, так и сердцевины. Именно физико-механические свойства каждого слоя материала и их сочетание определяют восприимчивость детали к силовым циклическим нагрузкам. Обрабатываемость конструкционных сталей характеризуется технологическими свойствами материалов подвергаться различным видам обработки. Природа этих характеристик заключается в физико-механических свойствах материалов, влияющих на технологичность заготовок и деталей, а также стратегию обработки детали.

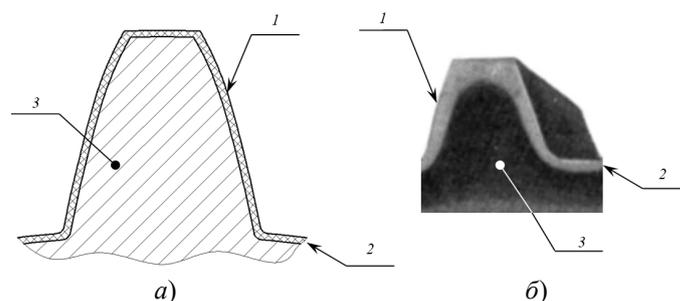


Рис. 2. Составляющие материала зуба:  
а – схематичное изображение; б – упрочненный слой детали

Fig. 2. Components of the tooth material:  
a – schematic image; b – hardened layer of the part

При этом физико-механические свойства материала в состоянии поставки широко представлены в литературе, а физико-механические свойства поверхностного слоя и сердцевины детали, которые, по сути, после химико-термической обработки детали значительно отличаются от целостных полуфабрикатов в состоянии поставки, требуют изучения и систематизации знаний.

Рабочие условия зубчатых зацеплений при передаче крутящего момента при циклическом от нулевом нагружении характеризуются трением скольжения при наличии определенных скоростей, силовой нагрузки и температуры, особенно в зоне контакта. Условия эксплуатации зубчатого зацепления требуют обязательной подачи смазочной жидкости в зону контакта. Выделяют два способа подвода смазочной жидкости в зону контакта:

- погружение – масло заполняет картер корпуса на определенную величину;
- принудительная смазка через жиклеры и систему трубопроводов маслосистемы.

В процессе работы в зоне контакта при сопряжении зубьев вырабатывается энергия в результате трения зубьев шестерен. Для охлаждения зоны контакта для защиты от теплового потока подается смазочная жидкость – масло. Это необходимо в виду того, что чрезмерное тепло в зоне контакта может вызвать изменения структурно-механических свойств рабочих поверхностей зубьев. Увеличения данных изменений негативно сказывается на эффективности отведения тепла в сопрягаемой зоне. Повреждения рабочих поверхностей в зоне контакта при трении негативно влияют на процесс охлаждения.

Следовательно, в модели контактного взаимодействия зубьев можно выделить базовые рабочие условия зубчатого механизма: тепловое поле в зоне контакта; материал шестерен; силовая нагрузка в зубчатом зацеплении.

Затем анализируем факторы использования зубчатой передачи – эксплуатационные,

конструкционные, технологические и механические (рис. 3).

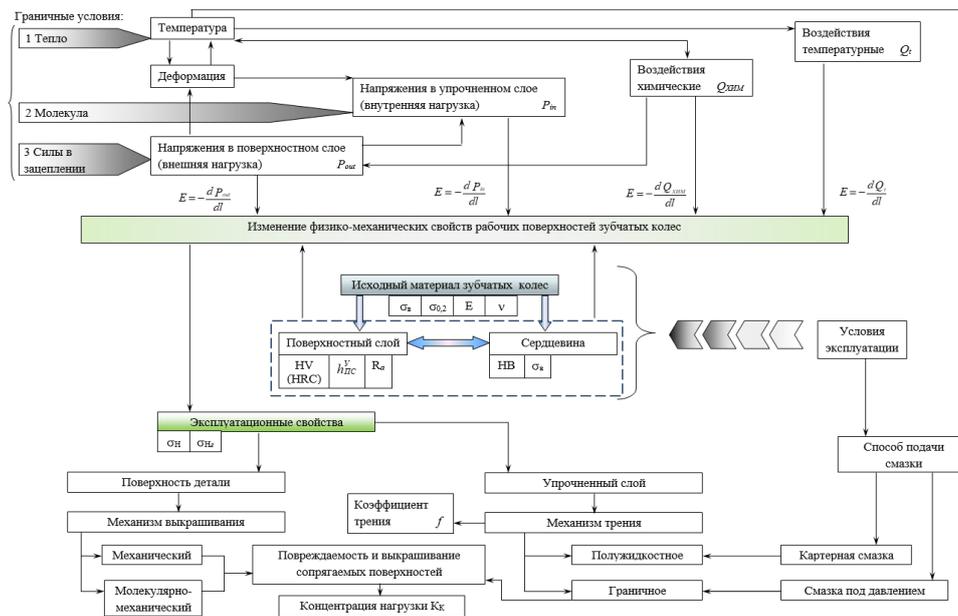


Рис. 3. Структурно-причинная модель контактного взаимодействия зубчатого зацепления

Fig. 3. Structural-causal model of the contact interaction of the gearing

Структурно-причинная модель контактного взаимодействия зубчатого зацепления демонстрирует физику вращательного движения зубчатых колес. На рис. 3 приняты следующие обозначения:  $P_{out}$  – напряжения в поверхностном слое (внешняя нагрузка);  $P_{in}$  – напряжения в упрочненном слое (внутренняя нагрузка);  $Q_{хим}$  – энергия химического взаимодействия;  $Q_t$  – энергия теплового поля;  $E$  – мера интенсивности воздействия;  $dP_{out}$ ,  $dP_{in}$ ,  $dQ_{хим}$ ,  $dQ_t$  – работа соответствующего параметра;  $dl$  – длина пути зацепления;  $\sigma_B$  – предел прочности при растяжении;  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести;  $E$  – модуль упругости материала детали;  $\nu$  – число Пуансона; HV (HRC) – твердость материала поверхностного слоя;  $h_{ПС}^y$  – глубина упрочненного слоя;  $R_a$  – шероховатость рабочих поверхностей; HB – твердость сердцевины;  $\sigma_H$  – контактные напряжения;  $\sigma_{Hг}$  – глубинные контактные напряжения;  $f$  – коэффициент трения;  $K_k$  – концентрация нагрузки.

В процессе эксплуатации рабочие поверхности зубьев шестерен подвергаются не только механическому, но и молекулярному воздействию в зоне контакта рабочих поверхностей. При передаче крутящего момента материал деталей в зоне контакта поверхностей сжимается под действием сил, а до и после зоны контакта растягивается в результате упругопластических деформаций. Работа зубчатой передачи характеризуется площадью контакта рабочих поверхностей. Площадь контакта сопрягаемых зубьев определяют параметры

профилей, физико-механические свойства материала шестерен (модуль упругости, твердость, предел прочности и др.), а также напряжения в поверхностном и упрочненном слоях, механизм трения и повреждаемости. Физическая сущность эксплуатации зубчатых колес заключается в том, что при пересопрежении зубьев механизма в зоне их контакта образуются механические и молекулярные процессы, которым сопутствуют тепловые, окислительные и другие явления.

Тепловое поле в зоне контакта может оказывать влияние в первую очередь на физико-механические свойства поверхностного упрочненного слоя, а потом и на физико-механические свойства сердцевины материала шестерен. Поверхностный упрочненный слой материала при росте температуры в зоне контакта имеет склонность к охрупчиванию или упрочнению при росте температуры и это вызвано технологией производства деталей. Влияние теплового поля до 90 °C с его быстротечностью на макро- и микроструктуру, физико-механические свойства материала несущественно с учетом достаточности охлаждения и смазки зоны контакта. Наиболее часто применяемым смазочным средством для зубчатых колес ГТД служит масло авиационное МС-8П по ОСТ 38.01163-78 или его аналог по физико-механическим и химическим свойствам масло для судовых газовых турбин по ГОСТ 10289-79. Служебные свойства масла сохраняются до 120 °C.

Увеличении температуры рабочей среды выше 120 °C приводит к окислительным

процессам и нарушению целостности рабочих поверхностей в результате адгезии сопрягаемых поверхностей. Это влечет прирост сил в зацеплении и ухудшает условия трения, и как следствие – структурно-механические изменения материала в упрочненном слое.

В целом, тепловое поле в зоне контакта сопрягаемых зубьев изменяет условия сопряжения деталей с определенными метаморфозами механических свойств упрочнённого слоя детали. Так, например, под действием сил в зацеплении и тепла в зоне контакта поверхностный слой материала под влиянием пластической деформации становится мягче. При температурном поле более 200 °С снижается предел текучести материала при небольшом увеличении предела прочности при снижении свойств используемых масел. Это требует применения более прочных конструкционных материалов, а иногда и увеличения габаритов передачи.

Зубчатые колеса ГТД изготавливаются из высоколегированных сталей. И для обеспечения требуемой прочности в сочетании с необходимой пластичностью зубчатые колеса проходят обязательную химико-термическую обработку. Именно химико-термическая обработка, формирующая упрочненный поверхностный слой, создает возможность зубчатым передачам работать при относительно высокой температуре (до 120 °С) в зоне контакта при подаче масла для отвода тепла.

Также рабочая поверхность зубьев с упрочненным слоем, достаточно твердым и необходимой толщины, обладает выносливостью относительно достаточно высоких усилий без каких-либо деформаций и повреждений контактирующих поверхностей. Грамотно назначенная и технологически правильно выполненная химико-термическая обработка – это гарантия успешного функционирования зубчатой передачи в сочетании с относительно мягкой сердцевиной материала зуба.

Анализируя взаимодействие зубьев при передаче крутящего момента, в зоне контакта возникают силы нормальные и касательные, которые создают напряжения на поверхности и в упрочненном слое с определенной концентрацией нагрузки по профилю. В зоне контакта происходит деформирование слоев материала, сопровождающееся тепловым полем, которое, при стечении определенных обстоятельств, приводит к нарушению целостности структуры рабочей поверхности, и, как следствие, к увеличению контактных напряжений. Стечением определенных обстоятельств можно считать последовательность действий, которые следуют друг за другом – увеличение тепла в зоне контакта изменяет химическое взаимодействие поверхностей, влечет модификацию механических свойств материала и сил в зацеплении.

Это приводит к изменению эксплуатационных свойств материалов зубчатых колес в сопрягаемой зоне. При нарушении условий эксплуатации

зубчатых колес процессы, протекающие в зацеплении при пересопряжении зубьев, могут «мутировать» свойства материала, в первую очередь, рабочей поверхности, созданные при изготовлении детали. И в консервативном случае могут привести к повреждению поверхности.

Систематизация воссоздания управления контактным взаимодействием зубьев в рамках структурно-причинной модели с отражением эксплуатационных, конструктивных и технологических процессов работы зубчатого механизма, а также физико-механических свойств материала сердцевины и упрочненного слоя, которые формируются при изготовлении деталей, изображена на рис. 3.

В заключение следует отметить, что определение механических свойств стали 18Х2Н4МА, как в состоянии поставки и при изготовлении различных заготовок, так и в сочетании с термической обработкой применялись серийные технологические процессы по обеспечению качества продукции. Использование метода прототипа изготовления образцов обеспечивает непредвзятость разработанного метода управления стабильностью физико-механических свойств материала детали. Наглядно представлена нестабильность механических свойств (более 20 %) конструкционного материала в базе полуфабриката, поковки и штамповки при последующей термической обработке, в том числе, для стабилизации свойств материала. На основе результатов исследований и их обработки сформирована практическая структурно-причинная модель контактного взаимодействия зубчатых колес с аргументированной методикой по управлению стабильностью физико-механических свойств материала, позволяющая учесть параметры и упрочненного рабочего слоя, и сердцевины материала с учетом технологической наследственности изготовления детали, что возможно воплотить на производстве в рамках концепции цифрового двойника.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Титов В.И., Тарасенко Л.В., Уткина А.Н., Шалькевич А.Б.** Фазовый анализ новой композиции высокопрочной конструкционной стали // Заводская лаборатория. 2015. Т. 81, № 2. С. 35–39. ID: 23024391.
2. **Орлов М.Р., Осенникова О.Г., Наприенко С.А., Морозова Л.В.** Исследование усталостного разрушения конических шестерен редуктора центрального привода газотурбинного двигателя, изготовленных из стали 20Х3МВФ // Деформация и разрушение материалов. 2014. № 7. С. 18–26. ID: 21716093.
3. **Морозова Л.В., Орлов М.Р.** Исследование причин разрушения зубчатых колес в процессе эксплуатации // Авиационные материалы и технологии. 2015. № S1. С. 37–48. ID: 24722080.
4. **Rudenko S.P., Val'ko A.L.** Contact fatigue resistance of carburized gears from chromium-nickel steels // Metal science and heat treatment. 2017. Vol. 59, iss. 1-2. P. 60–64. ID: 31036421.

5. Туманов, Н.В., Воробьев, Н.А., Калашникова, А.И., Калинин, Д.В., Кожаринов, Е.В. Комплексная фрактодиагностика авиационных конических зубчатых колес // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 2. С. 55–63. ID: 32494588.

6. Старжинский В.Е., Гольдфарб В.И., Шилько С.В., Шалобаев Е.В., Тескер Е.И. Развитие терминологии в области зубчатых передач и трансмиссий. Часть 3. Идентификация понятий по видам повреждений зубчатых колес // Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение. 2017. Т. 15. № 3. С. 51–61. ID: 29991991.

7. Wang Q.J., Chung Y-W. Encyclopedia of Tribology // Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 2013. 4190 p.

8. ANSI/AGMA 1010-F14. Appearance of Gear Teeth – Terminology of Wear and Failure. Alexandria, USA. 2014. 89 p.

9. Шеховцева Т.В., Шеховцева Е.В. Особенности повреждения рабочих поверхностей зубчатых колес ГТД // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 6. С. 406–416. ID: 41117325.

10. Хейфец М.Л., Васильев А.С., Кондаков А.И., Танович Л. Технологическое управление наследованием эксплуатационных параметров качества деталей машин // Вестні національної академії наук Білорусі. 2015. № 3. С. 10–22. ID: 24339707.

11. Суслов А.Г. Развитие учения о контактной жесткости и инженерия поверхности деталей машин // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 11 (72). С. 12–17. ID: 36557013.

12. Фомина Л.П., Крымов В.В. Совершенствование технологий упрочнения зубчатых колес авиадвигателей // Двигатель. 2016. № 2 (104). С. 6–8. ID: 26211047.

13. Антипов Д.В., Гушян Ю.Г., Ключков Ю.С., Елисеев Ю.С., Чекмарев А.Н. Оценка функционирования системы логистического управления качеством технологического процесса // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4. С. 45–48. ID: 26684252.

14. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов. М.: Машиностроение, 2009. 640 с. ID: 20240788.

15. Яковлева А.П., Савельева Л.В., Наумов В.А., Шарпов С.Н., Бессуднов Л.И. Причины разрушения зубчатых колес // Главный механик. 2017. № 1. С. 43–48. ID: 29461233.

## REFERENCES

1. Titov V.I., Tarasenko L.V., Utkina A.N., Shalkevich A.B. Phase analysis of new composition of high-strength structural steel. // Industrial laboratory, 2015, vol. 81, no. 2. pp. 35–39. ID: 23024391.

2. Orlov M.R., Ospennikova O.G., Naprienko S.A., Morozova L.V. Research of fatigue failure of conic gear wheels

of reducer of the central drive of the gas turbine engine, made of steel 20Kh3MVf // Deformation and destruction of materials, 2014, no. 7, pp. 18–26. ID: 21716093.

3. Morozova L.V., Orlov M.R. Research of failure causes of cogwheels in operational process. // Aviation materials and technologies, 2015, no. S1. pp. 37–48. ID: 24722080.

4. Rudenko S.P., Val'ko A.L. Contact fatigue resistance of carburized gears from chromium-nickel steels // Metal science and heat treatment. 2017. Vol. 59, issue 1–2, pp. 60–64. ID: 31036421.

5. Tumanov N.V., Vorobjeva N.A., Kalashnikova A.I., Kalinin D.V., Kozharinov E.V. Complex failure diagnosis of aviation bevel gears // Industrial laboratory. Diagnostics of materials, 2018, vol. 84, no. 2, pp. 55–63. ID: 32494588.

6. Starzhinsky V.E., Goldfarb V.I., Shilko S.V., Shalobaev E.V., Tesker E.I. Development of terminology in gearing and power transmissions. Part 3. Identification of notions on gear failure modes. // Energy, metallurgical and chemical engineering, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 51–61. ID: 29991.

7. Wang Q.J., Chung Y-W. Encyclopedia of Tribology // Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 2013. 4190 p.

8. ANSI/AGMA 1010-F14. Appearance of Gear Teeth – Terminology of Wear and Failure. Alexandria, USA. 2014. 89 p.

9. Shekhovtsova T.V., Shekhovtsova E.V. The features of working surfaces damages of gears in gas turbine engines // Proceedings of the Tula State University. Technical sciences, 2019, No. 6. pp. 406–416. ID: 41117325

10. Heifets M.L., Vasiliev A.S., Kondakov A.I., Tanovich L. Technological management of inheritance of quality parameters of machine parts // Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus, 2015, no. 3, pp. 10–22. ID: 24339707.

11. Suslov A.G. Development of doctrine on contact stiffness and engineering of machinery surface // Bulletin of the Bryansk State Technical University, 2018, no. 11 (72), pp. 12–17. ID: 36557013.

12. Fomina L.P., Krymov V.V. Improvement hardening technology for aircraft engine gears. Engine, 2016, no. 2, pp. 6–8. ID: 26211047.

13. Antipov D.V., Gushyan Yu.G., Klochkov Yu.S., Eliseev Yu.S., Chekmarev A.N. Evaluation of the functioning of the system of logistics management of the quality of the technological process // Proceedings of Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 45–48. ID: 26684252.

14. Starkov V.K. Physics and optimization of cutting materials. Moscow: Mashinostroenie, 2009, 640 p. ID: 20240788.

15. Yakovleva A.P., Savelyeva L.V., Naumov V.A., Sharapov S. N., Bessudnov L.I. Causes of gear wheels damage. Glavnyy mekhanik [Chief mechanical engineer], 2017, no. 1, pp. 43–48. ID: 29461233.

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

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

Статья поступила в редакцию 30.05.2023; одобрена после рецензирования 02.06.2023; принята к публикации 14.06.2023.

The article was submitted 30.05.2023; approved after reviewing 02.06.2023; assepted for publication 14.06.2023.

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №8 (146). С.43-48.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №8 (146). P. 43-48.

Научная статья

УДК 621.92

doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-24-32

## Специализация машиностроительного производства

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

**Аннотация.** Рассмотрены виды специализации – предметная, технологическая, их уровни и области их эффективного применения. Поскольку любое специализированное производство создается под выпуск изделий, то первичной является предметная специализация, например, производство автомобилей, а вторичной является технологическая специализация, которая показывает каким технологическим методом изготавливается предмет производства, например, литейное производство. Уровню предметной специализации должен соответствовать уровень технологической специализации. Показано, что в основе типов производства (единичное, серийное, массовое) лежат соответствующие уровни предметной и технологической специализаций, чем ниже уровень предметной специализации, тем ниже уровень технологической специализации. Например, низкому уровню предметной специализации соответствует мелкосерийное производство. Повышение уровня предметной специализации приводит к повышению уровня технологической специализации – организации серийного производства и т.д. Предметно специализированные производства можно разделить на две группы: к первой группе относятся производство изделий, удовлетворяющих потребности человека, например, автомобили и средства их технологического обеспечения, например, станки. Ко второй группе – специализированные производства их элементов (узлов, деталей), например, насосы, двигатели, винты, гайки и т.п. Проблема организации специализированных производств изделий второй группы заключается в отсутствии полноценной информации об их конструктивном разнообразии и частоты применения. Для решения проблемы предлагается рассматривать изделия второй группы в модульном представлении, что позволяет все их разнообразие разделить на две группы: модули функциональные технологические (МФТ), обеспечивающие выполнение изделия его служебного назначения и модули функциональные обслуживающие (МФО), обеспечивающие функционирование МФТ. На этом основании предлагается системный подход в организации специализированных производств изделий второй группы. Показано, что для реализации предлагаемого системного подхода в организации специализированных производств изделий второй группы необходимо создание базы данных двух видов: база данных МФТ и база данных МФО.

**Ключевые слова:** специализация, производство, эффективность, предмет производства, технология, модуль, база данных

**Для цитирования:** Базров Б.М. Специализация машиностроительного производства // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 8 (146). С. 43–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-24-32

## Machine-building line of production

**Boris M. Bazrov**, D.Eng.  
Federal Budget-Funded Research Institute for Machine Science named after A.A. Blagonavov of the Russian  
Academy of Sciences, Moscow, Russia  
modul\_lab@mail.ru,

**Abstract.** Specialization types such as subject, technological, their levels and areas of their effective application are viewed. Since any specialized production is aimed at running-out production, so subject specialization is primary, for example, in the production of automobiles, as for technological specialization, it is secondary, for it shows a technological method to allow making a product, for example, in the foundry production. The level of subject specialization and the level of technological specialization should dovetail into one another. It is shown that the types of production (unit, full-scale, mass) are based on the corresponding levels of subject and technological specialization, the lower the level of subject specialization, the lower the level of technological specialization. For example, small volume manufacturing is due to a low level of subject specialization. An increase in the level of subject specialization results in the level increase in technological specialization - manufacturing production process management, etc. Subject-specific specialized production can be divided into two groups: the first group includes the production of products that meet human needs, for example, vehicles and means of their engineering support, for example, machine tools. The second group includes specialized production of their elements (assemblies, parts), for example, pumps, motors, screws, nuts, etc. The problem of specialized production management of products related to the second group is the lack of complete information about their design diversity and frequency of application. To solve the problem, it is proposed to consider the products of the second group in a modular representation, which allows all their diversity to be divided into two groups: functional technological modules (FTM) that ensure the performance of a product's functional purpose and functional service modules (FSM) that ensure (FTM) functioning. On this basis, a systematic approach applicable for specialized production

management for products of the second group, is given It is shown that for the implementation of the proposed system approach in the specialized production management for the products of the second group, it is necessary to build a database of two types: FTM database and the FSM database.

**Keywords:** specialization, production, efficiency, production subject, technology, module, database

**For citation:** Bazrov B.M. Machine-building line of production / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 8 (146). P. 43–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-24-32

Специализация производства – метод повышения его эффективности [1 – 9].

В основе повышения эффективности производства за счет его специализации лежит повышение повторяемости изготовления предметов производства посредством сокращения их разнообразия, что способствует применению высокоэффективных технологий и методов организации производства.

Принимая во внимание высокую эффективность специализации производства, в основу создания специализированных производств должен быть положен научный подход.

Специализация производства входит в противоречие с законом развития, т. к. специализация предполагает сокращение разнообразия предметов производства, а закон развития – увеличение их разнообразия.

Борьба с этим противоречием осуществляется посредством типизации, унификации, стандартизации предметов производства.

Недостатком такого решения является отклонение качества конкретного предмета производства от его оптимального значения.

Например, в системе допусков и посадок [10] размах величины диаметра отверстия делится на группу диапазонов. Это приводит к тому, что принимаемые конкретные значения диаметра отверстия, лежащего в пределах одного диапазона, не будут оптимальным.

Специализация может быть предметной и технологической.

Предметная специализация имеет уровни:

- отрасли (авиастроение, станкостроения и др.);
- предприятия;
- цех;
- рабочее место.

Чем ниже уровень предмета производства, тем выше их разнообразие, а, следовательно, эффективнее его специализация.

В основе технологической специализации производства лежит снижение разнообразия технологических методов изготовления изделий, технологических процессов, операций и средств технологического оснащения.

Технологическая специализация имеет следующие уровни:

- технологический передел (заготовительный, обрабатывающий и сборочный);
- технологический процесс;
- технологическая операция.

Чем ниже уровень технологии, тем выше ее разнообразие и тем эффективнее ее специализация.

Надо отметить, что любое производство является специализированным, при этом первичной является предметная специализация, т. к. любое производство создается под выпуск тех или иных изделий, а вторичной является технологическая специализация. Эффект от применения предметной специализации значительно выше эффекта от применения технологической специализации.

В основе целесообразности создания специализированных производств лежит массовость спроса предметов производства и его длительность во времени. При этом надо отметить, что, как правило, чем ниже уровень предмета производства, тем выше его массовость. Например, массовость детали выше, чем массовость узла или изделия.

Наибольший эффект от специализации производств в масштабе машиностроения будет при системном подходе в их организации.

Изделия машиностроения различаются огромным непрерывно растущим разнообразием, объемами их выпуска и длительностью. Это затрудняет обоснование целесообразности создания специализированных производств.

Специализированные производства можно разделить на две группы: производства по выпуску изделий и производства по выпуску элементов изделий (узлов, деталей). Сложнее является первая задача, т. к. выпуск изделий, их объемы и длительность определяются потребностями общества, которые сложно установить. Что касается второй группы специализированных производств, то проблема их создания заключается в доступности информации об их разновидностях и объемах их выпуска. Надо отметить, что в большинстве случаев, характерной особенностью элементов изделий является их широкое и длительное использование и большой объем. В этой связи в первую очередь целесообразнее становится задача по созданию их специализированных производств.

Поскольку первичной является предметная специализация, то уровень технологической специализации должен соответствовать уровню предметной специализации. Поэтому при организации производства, если известна предметная специализация, то стоит задача определения соответствующего ему уровня технологической специализации.

При проектировании производства в качестве исходных данных при выборе уровня технологической специализации выступают: номенклатура

предметов производства, подлежащих изготовлению; объемы их выпуска в заданный период времени [2 – 6]. Практика показывает, что чем шире номенклатура предметов производства, тем меньше объемы их выпуска и ниже уровень технологической специализации. По мере снижения номенклатуры предметов производства, увеличения объемов их выпуска, должен повышаться уровень технологической специализации производства, который проявляется через соответствующие типы производства.

Таким образом существует связь между уровнем технологической специализации и исходными данными.

На практике эта связь проявляется через типы производства: единичное, серийное и массовое, где каждому типу производства соответствует определенный уровень технологической специализации. Тогда на этапе проектирования производства определяется его тип и соответствующий ему уровень технологической специализации.

Таким образом, выбор уровня технологической специализации сводится к установлению типа проектируемого производства.

Выбор уровня технологической специализации производства на этапе его проектирования определяется на основе связей между уровнем технологической специализации и исходными данными проектируемого производства. Уровню технологической специализации должен соответствовать уровень технологических методов, средств технологического оснащения (СТО) и организационной формы производственного процесса.

Надо отметить, что на практике тип производства устанавливается с помощью коэффициента  $K_3$  закрепления операций согласно ГОСТ 14.004-83 [6], который дает следующее определение: «Коэффициент закрепления операций – отношение числа всех различных технологических операций, выполненных или подлежащих выполнению в течение месяца, к числу рабочих мест». Отсюда следует, что под коэффициентом  $K_3$  следует понимать число различных технологических операций, выполняемых на одном рабочем месте в течение месяца.

Значения коэффициента  $K_3$  в зависимости от типа производства приведены в табл. 1.

### 1. Значение коэффициента $K_3$ в зависимости от типа производства

#### 1. The value of the $K_3$ coefficient depending on the type of production

Мелкосерийное производство		Среднесерийное производство		Крупносерийное производство	
$K_3 = 40$	$K_3 = 20$	$K_3 = 20$	$K_3 = 10$	$K_3 = 10$	$K_3 = 1,0$
при $n = 1000$ $K_3 = 40$ ; при $n = 2000$ $K_3 = 20$	при $n = 1000$ $K_3 = 20$ ; при $n = 2000$ $K_3 = 10$	при $n = 75000$ $K_3 = 0,27$	при $n = 2000$ $K_3 = 5$ ; при $n = 75000$ $K_3 = 0,13$	при $n = 200\ 000$ $K_3 = 0,05$	при $n = 75000$ $K_3 = 0,013$ ; при $n = 200\ 000$ $K_3 = 0,005$

Максимальный эффект от технологической специализации будет в том случае, если заданным исходным данным производства будет соответствовать оптимальный уровень технологической специализации.

Однако, на практике уровень технологической специализации изменяется дискретно, т. е. дискретно изменяются технологические методы, средства технологического оснащения и организационная форма производственного процесса. Например, технологические методы изменяются дискретно только при резком изменении объема выпуска предметов производства.

В свою очередь и уровень специализации СТО делится на три уровня: универсальный; специализированный; операционный.

В литературе [1, 4] в качестве вариантов организационной формы производственного процесса приводятся три вида производственных участков: участок с групповой расстановкой технологического оборудования, например, группа токарных станков, группа фрезерных станков и

т. д.; технологически-замкнутый участок, например, участок под изготовление зубчатых колес, участок под изготовление корпусных деталей и т. д.; предметно-замкнутый участок, на котором изготавливается какой-либо узел изделия, включающий изготовление его деталей и его сборку.

Первые два участка по технологическому признаку относятся к обрабатывающему производству, а третий участок – к механосборочному производству.

К первым двум участкам следует добавить участок с расстановкой технологического оборудования «в россыпь», а также дополнительно включить участок с расположением технологического оборудования по ходу технологического процесса. Из перечисленных участков участок с расстановкой технологического оборудования «в россыпь» применяется в единичном производстве, участок с групповой расстановкой технологического оборудования применяется в условиях мелкосерийного производства, технологически-замкнутый участок применяется в условиях

среднесерийного производства, участок с расстановкой технологического оборудования по ходу технологического процесса (поточный метод) применяется в условиях крупносерийного и массового производств.

Надо отметить, что дискретное изменение уровня технологической специализации существенно снижает ее эффективность. Отсюда следует, что повышать эффективность технологической специализации надо посредством обеспечения непрерывного изменения уровня технологической специализации и повышения точности определения типа проектируемого производства.

Изменение уровня технологических методов должно производиться посредством изменения соотношения между последовательными и параллельными технологическими переходами в технологической схеме обработки и сборки. Далее следует обеспечить непрерывное изменение уровня СТО, которое должно происходить одновременно с изменением технологических методов.

Что касается обеспечения непрерывного изменения организационной формы производственного процесса, то она предполагает изменение состава технологического оборудования и его расстановки. Изменение непрерывности состава оборудования и его расстановки в современных условиях связано с большими материальными и трудовыми затратами, что является серьезной проблемой.

Можно предположить, что в организации специализированных производств отсутствует управление этим процессом и их создание в значительной степени стихийно. В связи с этим

предлагается системный подход в организации специализированных производств.

Все изделия можно разделить на две группы. К первой группе относятся изделия, предназначенные для удовлетворения потребностей человека, такие как автомобили, самолеты, сеялки, швейные машины и др. и средства технологического обеспечения их производства, например станки. Ко второй группе относятся их элементы: узлы, детали.

В связи с этим организуются специализированные производства по выпуску предметов производства, как первой, так и второй групп. Если создание специализированных производств по выпуску изделий удовлетворяющих потребности человека не вызывает затруднений, то специализация производств по выпуску их узлов и деталей сталкивается с проблемой их большого разнообразия, когда, например, два элемента одного назначения незначительно различаются конструктивно, а относятся к разным группам. Для разрешения этой проблемы предлагается воспользоваться представлением изделия в модульном исполнении.

Следует отметить, что изделие содержит две группы элементов – основные, с помощью которых изделие выполняет свое служебное назначение и вспомогательные элементы, в задачу которых входит обеспечение выполнения элементами первой группы своего назначения.

Назовем элементы первой группы модулями функциональными технологическими (МФТ), а второй группы – модулями функциональными обслуживающими (МФО), их примеры приведены в табл. 2.

## 2. Примеры модулей функциональных технологических и модулей функциональных обслуживающих различных изделий

### 2. Examples of functional technological modules and functional service modules of various products

№	Изделие	МФТ	МФО
1	Токарный станок	Патрон, передняя бабка, задняя бабка, резцедержатель, коробка скоростей, коробка подач,	Ходовой винт, ходовой валик, фартук, поперечный суппорт, станина, электродвигатель,
2	Башенный кран стационарный	Крюковая подвеска, ходовая тележка, опорно-поворотный, механизм	Стрела, башня, опорная платформа
3	Одноковшовый экскаватор	Ковш, гусеничное шасси	Поворотная платформа, моноблочная стрела, двигатель, трансмиссия, рулевой механизм
5	Вилочный погрузчик	Вилы, колёсные шасси	Мачта, гидроцилиндр, двигатель, трансмиссия, рулевой механизм
6	Самоходная гусеничная дорожная фреза	Гусеничные шасси, резцы, забрасывающие лопатки, ленточный конвейер	Двигатель, трансмиссия, рулевой механизм, редуктор, барабан

Принципиальное различие между МФТ и МФО заключается в том, что МФТ входят только в состав изделия одного назначения, а МФО могут входить в изделия различного назначения.

Например, МФТ станка является инструментальная бабка, которая может входить только в состав станков, а коробка передач (как редуктор) может входить в состав не только станков, но и в изделия другого назначения.

Следовательно, повторяемость МФО будет больше повторяемости МФТ. Кроме того, возможны случаи, когда какой-либо МФО может выступать в качестве МФТ другого изделия.

Таким образом, в основе системного подхода в организации специализированных производств лежит представление изделий в модульном исполнении. Это позволяет все разнообразие узлов изделий свести к двум видам: МФО и МФТ и организовывать их специализированные производства.

На практике уже известны примеры таких специализированных производств по выпуску ряда узлов, например, подшипников, редукторов, насосов и др. В каждой подотрасли машиностроения должны создаваться свои специализированные производства по выпуску МФТ, входящие в состав их изделий. Например, в автомобилестроении производства по выпуску кузовов, шасси, кабин и др., а также должны создаваться специализированные производства по выпуску МФО, в масштабе машиностроения.

При наличии такого подхода в создании специализированных производств МФТ, МФО при создании новых изделий конструктор должен по возможности использовать в конструкции изделий известные МФО, изготавливаемые на специализированных производствах, что существенно снизит стоимость и сроки изготовления новых изделий.

Для реализации предлагаемого системного подхода в организации специализированных производств необходимы базы данных модулей функциональных технологических и модулей функциональных обслуживающих, создание которых требуют их унификации, стандартизации. Отсюда следует необходимость в построение баз данных МФТ и МФО.

Различие видов баз данных МФТ и МФО состоит в том, что база данных МФТ зависит только от вида изделия, что касается базы данных МФО, то как отмечалось выше они участвуют в различных видах изделий и потому их количество несравнимо больше количества МФТ.

Поэтому специализация производств должна начинаться со специализации производства МФО.

Наличие баз данных МФТ и МФО создает предпосылки по созданию в масштабе машиностроения специализированных производств, включающих специализированные производства по изготовлению МФТ и МФО.

#### Выводы:

- специализация производства – метод повышения его эффективности;
- специализация может быть предметной или технологической, где предметная является первичной;
- чем ниже уровень предмета и технологии, тем выше их разнообразие и тем эффективнее их специализация;
- установлено, что в основе типов производства (единичное, серийное, массовое) лежат соответствующие уровни предметной и технологической специализаций;
- специализированные производства можно разделить на две группы: к первой группе относятся производство изделий, удовлетворяющих потребности человека и средства их технологического обеспечения; ко второй группе – производство их элементов (узлов, деталей);
- с целью создания специализированных производств второй группы предлагается воспользоваться представлением изделия в модульном исполнении;
- любое изделие может быть представлено совокупностью двух модулей: модуль функциональный технологический (МФТ), обеспечивающий выполнение изделием его служебного назначения и модуль функциональный обслуживающий (МФО), обеспечивающий функционирование первого модуля. Показано, что для реализации предлагаемого системного подхода в организации специализированных производств необходимо создание базы данных двух видов: база данных МФТ и база данных МФО.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Поляков Д.И., Костин А.И. Специализация в машиностроении. М.: Машиностроение, 1975. 366 с.
2. Путятин Л.М., Барсова Т.Н. Современные подходы к анализу развития специализации производства на предприятиях машиностроительной отрасли // Modern Economy Success. 2020. № 1. С. 19–23.
3. Кондратьева М.Н., Баландина Е.В. Экономика и организация производства: Учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2013. 98 с.

4. **Елизаров Ю.Ф.** Экономика организаций: Учебник. М.: Экзамен, 2006. 495 с.
5. **Голов Р.С., Агарков А.П., Мыльник А.В.** Организация производства, экономика и управление в промышленности. Сер. Учебные издания для бакалавров. М.: Государственный университет управления, 2019. 838 с.
6. **ГОСТ 14.004-83.** Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий. М.: Стандартиформ, 2009. 9 с.
7. **Базров Б.М.** Специализация производства в машиностроении // Вестник машиностроения. 2021. № 11. С. 89–93.
8. **Базров Б.М.** Технологическая специализация производства // Вестник машиностроения. 2022. № 7. С. 70–73.
9. **Базров Б.М.** Системный подход применения видов технологии // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 7 (133). С. 27–32.
10. **ГОСТ 25347-82** Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Поля допусков и рекомендуемые посадки. 1983. 53 с.

#### REFERENCES

1. Polyakov D.I., Kostin A.I. Specialization in mechanical engineering. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 366 p.

2. Putyatina L.M., Borisova T.N. Modern approaches to analysis of production specialization development at engineering companies // Modern Economy Success, 2020, no.1, pp. 19–23.

3. Kondratieva M.N., Balandina E.V. Economics and production organization forms: study guide. Ulyanovsk: UISTU, 2013, 98 p.

4. Yelizarov Yu.F. Economics of organizations: Textbook. Moscow: Exam, 2006, 495 p.

5. Golov R.S., Agarkov A.P., Melnik AV. Organization of production, economics and management in industry. a run of Educational publications for bachelors. Moscow: State University of Management, 2019, 838 p.

6. State standard 14.004-83. Technological preparation of production. Terms and definitions of basic concepts. Moscow: Standartinform, 2009, 9 p.

7. Bazrov B.M. Specialization of production in mechanical engineering // Bulletin of Mechanical Engineering, 2021, no. 11, pp. 89–93.

8. Bazrov B.M. Technological specialization of production // Bulletin of Mechanical Engineering, 2022, no. 7, pp. 70–73.

9. Bazrov B.M. A comprehensive approach to the application of types of technology // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 7 (133), pp. 27–32.

10. State standard 25347-82 Basic standards of compatibility. A unified system of tolerances and landings. Tolerance limits and recommended seating fits, 1983, 53 p.

Статья поступила в редакцию 08.06.2023; одобрена после рецензирования 13.06.2023; принята к публикации 19.06.2023.

The article was submitted 08.06.2023; approved after reviewing 13.06.2023; accepted for publication 19.06.2023.

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

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

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

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

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

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

Сдано в набор 17.08.2023. Выход в свет 30.08.2023.

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

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

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

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

