

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

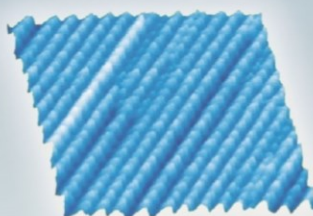
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

4 (154)
2024

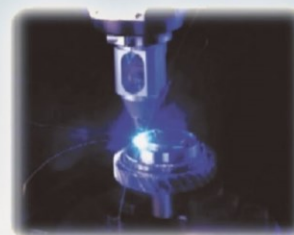
**ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
И КОМБИНИРОВАННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



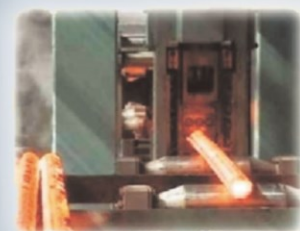
**НАНОТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**



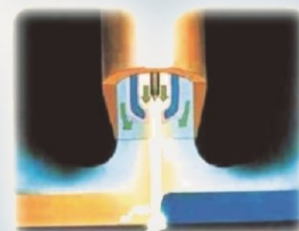
**ЛАЗЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



**ТЕХНОЛОГИИ
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В СВАРОЧНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



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

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 4 (154)

2024

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

Главный редактор

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

Зам. главного редактора

д.т.н., доц. ШАЛЫГИН М.Г. (г. Брянск)

Председатель редакционного совета

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

Зам. председателя редакционного совета

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

Редакционный совет:

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

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

д.н., доктор инженер ВАЛЬДЕНМАЙЕР Т.

(г. Штутгарт, Германия)

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

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

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

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

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

д.т.н., проф. ЛАРИН С.Н. (г. Тула)

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

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

д.т.н., проф. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

DOI:10.30987/issn.2223-4608

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

Подписной индекс: **Э79195**.

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

E-mail: editntm@yandex.ru

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

Журнал зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и
массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

26 апреля 2019 года

рег. номер ПИ № ФС77-75524

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Куксенова Л.И., Фахуртдинов Р.С., Алексеева М.С. Износостойкость
теплостойких сталей ВКС-7 и ВКС-10 после ионно-плазменного
азотирования, вакуумной цементации и вакуумной
нитроцементации. 3

ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Ваниев Э.Р., Джамалудинов Р.М., Теминдаров И.Э., Бекиров Э.Л.
Особенности моделирования шероховатости поверхности при
фрезеровании нержавеющей стали с применением различных сред 19

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПОДГОТОВКА И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В., Тихонова Ж.С. Трансформация
информационной структуры как инструмент повышения эффективности
многономенклатурного производства 29

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ СБОРКЕ МАШИН

Иванова Л.Н., Иванов С.Е. Высокотехнологичное автосборочное
производство 41

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

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

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 4 (154)

2024

Publishes from July 2011

MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

Comes out with assistance of Engineering Technologists Association

Editor-in-chief

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

Deputy chief editor

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

Chairman of Editorial Committee

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

Chairman Assistant

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

Editorial Committee:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

d.en.s., prof. TCHIGIRINSKY Ju.L. (Volgograd)

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

DOL:10.30987/issn.2223-4608

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

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

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

CONTENTS

MATERIALS SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING

Kuksenova L.I., Fakhurtdinov R.S., Alekseeva M.S. Wear resistance of
heat-resistant steels HSM-7 and HSM-10 after ion-plasma nitriding,
low-pressure carburizing and low-pressure carbonitriding 3

TECHNOLOGIES OF MECHANICAL PROCESSING OF WORKPIECES

Vaniev E.R., Dzhemalyadinov R.M., Tamindarov I.E., Bekirov E.L. Modeling
characteristics for surface finish when milling stainless steels using
various media 19

TECHNOLOGICAL PROCESSES AUTOMATED CONTROL

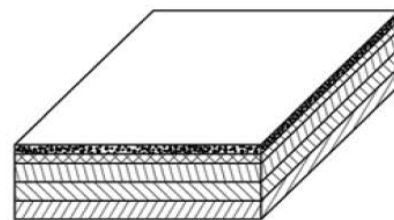
Chigirinsky Yu.L., Krainev D.V., Tikhonova Z.S. Transformation
of the information structure as a tool for efficiency increase in
high-variety production 29

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MACHINE ASSEMBLY

Ivanova L.N., Ivanov S.E. High-tech incomplete vehicle production 41

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. 2024. №4 (154). С.3-18.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №4 (154). P.3-18.

Научная статья
УДК 621.785.53:620.178.16.620.186
doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-18

Износостойкость теплостойких сталей ВКС-7 и ВКС-10 после ионно-плазменного азотирования, вакуумной цементации и вакуумной нитроцементации

Лидия Ивановна Куксенова¹, д.т.н.
Равел Садуртдинович Фахуртдинов², к.т.н.
Мария Сергеевна Алексеева³, к.т.н.

^{1,3} Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), г. Москва, Россия

² МГТУ им. Н.Э.Баумана, г.Москва, Россия

³ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, ГНЦ РФ, г. Москва, Россия

¹ lkukc@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² ravelf@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ alekseeva_ma@list.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Проанализированы триботехнические характеристики сталей мартенситного класса ВКС-7 (16Х2Н3МФБАЮ-Ш) и ВКС-10 (13Х3Н3М2ВФБ-Ш). Стали подвергали ионно-плазменному азотированию, вакуумной цементации и вакуумной нитроцементации. Реализована концепция двухэтапной технологии упрочнения: создание термически стабильного ультрамелкодисперсного состояния стали на первом этапе и использование такого состояния для ускоренного и качественного насыщения поверхностного слоя азотом или углеродом на втором этапе. Для создания ультрамелкодисперсного состояния в образцах исследуемых сталей использован метод интенсивной пластической деформации (ИПД). В основе метода лежит измельчение микроструктуры за счет больших сдвиговых деформаций. ИПД выполнена методом теплой осадки в штампе со степенью деформации 80 % при температуре 700 °С. Испытания образцов на износостойкость проводили на специальном стенде с возвратно-поступательным движением в среде пластичного смазочного материала сопрягаемых образцов, имеющих плоские поверхности трения при давлении 10 МПа и средней скорости скольжения 0,19 м/с. Показано, что стали ВКС-7 и ВКС-10 после ионно-плазменного азотирования и вакуумной цементации обладают высокой износостойкостью (интенсивность изнашивания $I \leq 10^{-10}$). После вакуумной нитроцементации значения интенсивности изнашивания образцов пары трения практически одинаковые и составляют $\sim 0,3 \cdot 10^{-10}$, что в $\sim 3,0$ раза меньше, чем после вакуумной цементации. В результате ионно-плазменного азотирования и вакуумной нитроцементации на поверхности сталей формируется наноструктурный поверхностный слой, что приводит к повышению износостойкости сталей. Сформулированы представления о природе повышения износостойкости азотированных сталей.

Ключевые слова: конструкционные материалы, теплостойкие стали, азотирование, цементация, нитроцементация, поверхностные слои, износостойкость

Для цитирования: Куксенова Л.И., Фахуртдинов Р.С., Алексеева М.С. Износостойкость теплостойких сталей ВКС-7 и ВКС-10 после ионно-плазменного азотирования, вакуумной цементации и вакуумной нитроцементации // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 4 (154). С. 3–18. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-18

Wear resistance of heat-resistant steels HSM-7 and HSM-10 after ion-plasma nitriding, low-pressure carburizing and low-pressure carbonitriding

Lidiya I. Kuksenova¹, D. Eng.
Ravel S. Fakhurtdinov², Ph.D. Eng.
Maria S. Alekseeva³, Ph.D. Eng.

^{1,3} Science Institute of Mechanical Engineering named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAS), Moscow, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³ National Research Center «Kurchatov Institute» (SIC «Kurchatov Institute» – VIAM), SSC RF, Moscow, Russia

¹ lkukc@mail.ru

² ravelf@bmstu.ru

³ alekseeva_ma@list.ru

Abstract. Tribotechnical characteristics of martensitic grade steels HSM-7 (16Cr2Ni3MoVNbNAl) and HSM-10 (13Cr3Ni3Mo2VNbNAl) were analyzed. Steels underwent ion plasma nitriding, low-pressure carburizing and low-pressure carbonitriding. The concept of a two-stage hardening technology has been implemented: the creation of a thermally stable finely dispersed state of steel at the first stage and the use of such a state for accelerated and qualitative saturation of the surface layer with nitrogen or carbon at the second stage. To create an ultra-finely divided state in the samples of steels under investigation, the method of intensive plastic deformation (IPD) was used. The method is based on the grinding of the microstructure due to large shear deformations. IPD was performed by the method of warm precipitation in a die with a degree of deformation of 80 % at a temperature of 700 °C. The wear resistance tests of the samples were carried out on a special stand with reciprocating motion in the medium of a plastic lubricant material of mating samples having flat friction surfaces at a pressure of 10 MPa and an average velocity of 0,19 m/s. It is shown that HSM-7 and HSM-10 steels after ion-plasma nitriding and vacuum cementation have high wear resistance (wear intensity $I \leq 10^{-10}$). After low-pressure carbonitriding, the values of the wear intensity of the friction pair samples are almost the same and amount to $0,3 \cdot 10^{-10}$, which is $\sim 3,0$ times less than after low-pressure carburizing. As a result of ion-plasma nitriding and low-pressure carbonitriding, a nanostructured surface layer is formed on steel surfaces contributing to wear resistance increase. The ideas concerning nitrided steel score resistance increase are given.

Keywords: structural materials, heat-resistant steels, nitriding, carbonisation, low-pressure carbonitriding, surface layers, wear resistance

For citation: Kuksenova L.I., Fakhurtdinov R.S., Alekseeva M.S. Wear resistance of heat-resistant steels HSM-7 and HSM-10 after ion-plasma nitriding, low-pressure carburizing and low-pressure carbonitriding / Science intensive technology in mechanical engineering. 2024. № 4 (154). P. 3–18. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-18

Введение

Снижение металлоемкости деталей машин и конструкций, повышение их эксплуатационных характеристик тесно связаны с проблемами обеспечения качества конструкционных металлических материалов. Низкое качество массовых марок сталей часто не удовлетворяет требованиям конструкторов при создании машин. Это особенно ярко проявляется при изготовлении узлов трения, в частности зубчатых колес редукторов различного назначения, эксплуатация которых проходит в условиях высоких контактных

давлений. Поэтому экономически целесообразно не только наращивать объем производимого металла, но и совершенствовать упрочняющие технологии обработки конструкционных материалов на основе фундаментальных положений инженерии поверхности. Связано это с тем, что современные традиционные технологии изготовления и упрочнения высоконагруженных деталей из теплостойких сталей, используемых для изготовления зубчатых колес редукторов, практически исчерпывают свои потенциальные возможности.

Основными показателями качества нагруженных подвижных сопряжений является их надежность и долговечность, которые в существенной мере определяются эксплуатационными свойствами конструкционных материалов, зависящими от характеристик механических свойств (твердости, износостойкости, усталостной прочности). При этом поверхностный слой является объектом, с которого начинается разрушение детали. Поэтому технические решения проблемы повышения надежности и долговечности нагруженных сопряжений должны быть направлены на технологическое обеспечение качества их поверхностного слоя, в котором локализуются основные деформационные и физико-химические процессы при контактном взаимодействии. Практика эксплуатации нагруженных сопряжений свидетельствует о значительных ресурсах повышения комплекса эксплуатационных свойств ответственных деталей машин, связанных с разработкой новых технологий термической и химико-термической обработки [1 – 3].

Азотирование, цементация и нитроцементация являются распространёнными способами поверхностной обработки для повышения эксплуатационных свойств тяжелонагруженных деталей машин. Однако применение традиционных технологий химико-термической обработки сталкивается с проблемой низкой скорости насыщения поверхности изделия легирующими элементами, что существенно увеличивает время процесса. Предложения новых технологий обработки теплостойких сталей ориентированы в направлении интенсификации процесса насыщения поверхности и регулирования структурного состояния эксплуатационного слоя. Показано, что ресурс повышения эксплуатационных свойств ответственных деталей машин реализуется за счет комплексных технологий термической и химико-термической обработки, основанных на активизации процессов диффузионного насыщения поверхностных слоев в условиях формирования износостойкого структурного состояния [1, 2, 4].

Каждый из указанных методов химико-термической обработки поверхности имеет свои преимущества и недостатки.

Ионное азотирование как низкотемпературный процесс упрочняющей обработки обеспечивает повышение производительности по сравнению с газовым азотированием. Продолжительность диффузионного насыщения азотом сплавов на основе железа сокращается в 2,0 – 3,0 раза, а общее время технологического цикла – в 3,0 – 5,0 раз. В условиях ионного азотирования можно регулировать процесс насыщения поверхности с оптимизацией структуры и свойств нитридной и диффузионной зон применительно к условиям реальной эксплуатации изделий. Принципиальным преимуществом азотирования для промышленности является незначительная деформация формы и размеров деталей. Изменения объема при азотировании невелики и могут быть учтены при изготовлении детали. Объемы шлифования, если оно требуется, малы. Исключение операции шлифования после ионного азотирования обеспечивает сохранение в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия, которые уменьшают неблагоприятное влияние напряжений растяжения, обычно возникающих на поверхности детали в процессе ее эксплуатации при многих видах нагружения, особенно при усталостном.

Цементация является основным способом поверхностного упрочнения высоконагруженных зубчатых колес. Особенности вакуумной цементации являются высокая скорость поступления углерода из газовой среды, высокий углеродный потенциал, саморегулирование процесса поступления углерода в поверхностный слой, простота управления процессом и его технологической подготовки. Главное достоинство вакуумной цементации состоит в формировании диффузионных слоев высокой несущей способности, что особенно важно для условий эксплуатации нагруженных сопряжений. Однако поверхностный цементированный слой более склонен к задирам и схватыванию при контактном взаимодействии, чем азотированный.

Вакуумная нитроцементация сочетает преимущества процессов ионного азотирования и вакуумной цементации, обеспечивая формирование протяженных качественных диффузионных слоев с повышенной концентрацией азота, что создает предпосылки для

высокой износостойкости и контактной проч-ности зубчатых колес.

В настоящее время дополнительные ресурсы повышения эксплуатационных свойств ответственных деталей машин заключаются в разработке новых комплексных технологий термической и химико-термической обработки, основанных на активизации процессов диффузионного насыщения в комбинации с предварительным субструктурным упрочнением [1 – 3]. Одним из путей решения этой задачи является формирование структуры в ультрамелкодисперсном или наноструктурном состоянии, приводящем к высокопрочному состоянию сталей при высоком запасе пластичности и вязкости, что крайне необходимо для обеспечения эксплуатационной надежности и долговечности деталей машин. Использование уникальных свойств таких структур открывает перспективы создания новых технологий производства деталей из конструкционных материалов, которые обладают высокой усталостной прочностью и износостойкостью [1, 2].

Создание в металлических материалах ультрамелкодисперсного или наноструктурного износостойкого состояния поверхностного слоя достигается с использованием методов предварительного интенсивного силового и теплового воздействия и последующих высокоэффективных процессов ионно-

вакуумной и вакуумной химико-термической обработки. В результате предварительной обработки создаются условия для существенного повышения скоростей диффузионного насыщения поверхности азотом, углеродом и другими элементами, что, в свою очередь, может привести к принципиальному изменению режимов технологии химико-термической обработки.

В данной работе представлены экспериментальные результаты оценки влияния нового вида технологий термической и химико-термической обработки, основанных на активизации процессов диффузионного насыщения (ионно-плазменного азотирования, вакуумной цементации и вакуумной нитроцементации), на износостойкость сталей, широко применяемых для изготовления ответственных деталей турбо- и моторостроения, гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания, зубчатых колес, различных деталей сложной конфигурации.

Исследуемые материалы, их обработка и методики исследования

Исследуемые образцы изготавливали из сталей ВКС-7 (16Х2Н3МФБАЮ-Ш по ТУ 14-1-4483-88) и ВКС-10 (13Х3Н3М2ВФБ-Ш по ТУ 14-1-4999-91), их состав приведен в табл. 1.

1. Химический состав исследуемых сталей (% масс.)

1. Chemical composition of the studied steels (% by weight)

ВКС-7	C	Cr	Ni	Mo	Mn	W
	0,14...0,18	1,8...2,2	2,7...3,0	0,4...0,6	0,3...0,6	0,2...0,3
	Si	V	Nb	Al	S	P
	0,17...0,37	0,1...0,2	0,1...0,2	0,02...0,07	≤ 0,015	≤ 0,025
ВКС-10	C	Cr	Ni	Mo	Mn	W
	0,10...0,15	3,0...3,4	2,7...3,0	1,9...2,3	0,3...0,6	0,2...0,5
	Si	V	Nb	Al	S	P
	0,17...0,37	0,05...0,15	0,05...0,15	≤ 0,04	≤ 0,015	≤ 0,015

При подготовке к ионно-плазменному азотированию и вакуумной цементации

проводили закалку образцов из стали ВКС-7 при температуре 880 °С, закалочная среда –

масло и высокий отпуск при температуре 570 °С, время обработки – 3 ч. Образцы из стали ВКС-10 подвергали закалке при температуре 1010 °С и высокому отпуску при температуре 570 °С, время обработки – 3 ч. Перед вакуумной нитроцементацией проводили нормализацию образцов из стали ВКС-7 и ВКС-10 при температуре 950 °С, время – 2,5 ч; высокий отпуск сталей ВКС-7 при температуре 640 °С и стали ВКС-10 при температуре 670 °С, время – 6 ч. Для создания мелкозернистого состояния образцы из сталей ВКС-7 и ВКС-10 подвергали предварительной интенсивной пластической деформации – осадке при температуре 700 °С и степени деформации 80 % [1, 2].

Ионно-плазменное азотирование проводили на опытной установке ионно-плазменного азотирования в среде азотно-водородной газовой смеси состава 95%N₂ + 5%H₂ при температуре 500 °С в течение 20 ч. После ионно-плазменного азотирования образцы не подвергались механической обработке [1].

Вакуумную цементацию осуществляли на опытной установке при температуре 940 °С. Выход на температурный режим вакуумной цементации проводили при нагреве образцов последовательно до 800 °С, 900 °С и 940 °С. Рабочая среда – ацетилен. Общее время цементации – 6 ч с соблюдением соотношений времени насыщения и времени диффузии. После цементации образцы подвергали высокому отпуску при температуре (650 ± 10) °С в течение 5 ч и закалке. Режим закалки образцов из стали ВКС-7: нагрев до температуры 880 °С; охлаждение в масле; обработка холодом при температуре -70 °С; отпуск при температуре 200 °С. Закалку образцов из стали ВКС-10 проводили по режиму: температура закалки 1010 °С; охлаждение в масле; отпуск при температуре 510 °С; выдержка 1 ч; охлаждение на воздухе; обработка холодом при температуре -70 °С; выдержка 2 ч; отпуск при температуре 510 °С; выдержка 1 ч; охлаждение на воздухе. После вакуумной цементации образцы подвергались шлифованию [2].

Вакуумную нитроцементацию сталей ВКС-7 и ВКС-10 осуществляли на опытной установке вакуумной цементации и нитроцементации при температуре 880 °С с выходом на температурный режим по схеме: последовательный нагрев при температуре 820 °С;

840 °С; 880 °С. В качестве рабочей среды использовали ацетилен и аммиак в равном соотношении. Суммарный расход газовой среды 12 дм³/ч, рабочее давление в камере 8,0 ГПа. Аммиак подается постоянно, ацетилен циклически. Общее время выдержки для формирования диффузионного слоя, толщиной не менее 0,7 мм составляет: для стали ВКС-7 5 ч 4×(4 мин / 26 мин) + 6×(5 мин / 25 мин); для стали ВКС-10 5,0 ч 4×(2 мин / 28 мин) + 3×(3 мин / 57 мин). После нитроцементации образцы подвергали высокому отпуску при температуре 650 °С в течение 5 ч и закалке. Закалка образцов из стали ВКС-7 осуществлялась при нагреве до 880 °С и охлаждении в масле, далее следуют обработка холодом при температуре -70 °С и отпуск при температуре 200 °С. Закалку образцов из стали ВКС-10 проводили по режиму: температура 1010 °С, охлаждение в масле; двукратный отпуск при температуре 510 °С с выдержкой 1 ч; охлаждение на воздухе; обработка холодом при температуре -70 °С; отпуск при температуре 510 °С; охлаждение на воздухе. Для предохранения от обезуглероживания нитроцементированной поверхности нагрев под закалку проводили в вакууме [5].

При подготовке к исследованию распределения микротвердости по толщине обработанного слоя изготавливали поперечный шлиф. Для травления шлифов применяли 5%- ный спиртовой раствор азотной кислоты (C₂H₅OH + 5,0%HNO₃). Качество полирования и травления контролировали с помощью светового микроскопа «Неофот-30» при максимальном увеличении ×(500...1000). Шлиф подвергали исследованию на микротвердомере ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76 при нагрузке 0,980 Н по всей толщине обработанного слоя.

Испытания образцов на износостойкость проводили на специальном стенде с возвратно-поступательным движением в среде пластичного смазочного материала сопрягаемых образцов, имеющих плоские поверхности трения [6]. Выбор условий испытаний обусловлен широким распространением в разнообразных областях техники пар трения, рабочие поверхности которых испытывают воздействие знакопеременных сдвиговых деформаций (при этом знакопеременность деформаций поверхностных слоев наблюдается не только при реверсивном трении, но и в тех случаях, когда

сила трения постоянна по направлению, но рабочие поверхности неравновелики), наиболее тяжелыми условиями состояния материала поверхностного слоя – повышенной концентрацией дефектов структуры, существенным увеличением свободной поверхностной энергии, интенсификацией механо-физико-химических процессов на поверхностях реверсивного трения, что характерно для тяжело нагруженных узлов трения, таких как пары цилиндро-поршневой группы двигателей, пары плунжерных и золотниковых механизмов, направляющих скольжения, зубчатых зацеплений и многих других [4, 6].

В испытании участвуют два образца. Испытываемый первый образец с меньшей поверхностью трения – образцы из сталей после химико-термической обработки. Этот образец неподвижный, и к нему прикладывается нагрузка. В качестве контробразца (второй образец с большей поверхностью трения) использовали сталь 20 в состоянии после цементации и закалки до твердости 59...60 HRC. Он совершает возвратно-поступательное движение относительно неподвижного образца со средней скоростью скольжения 0,19 м/с. Ход подвижного образца $H = 0,04$ м. Смазочным материалом служила пластичная смазка «Литол-24» (ТУ0254-116-04001396-05), предназначенная для смазывания всех типов подшипников качения и скольжения, шарниров зубчатых и иных передач, промышленных механизмов и электромашин.

Перед началом испытаний пары трения подвергали макроприработке, при которой достигается равномерное распределение следов контакта по всей рабочей поверхности образцов. Приработка осуществлялась также в смазке «Литол-24» при ступенчатом повышении нагрузки через каждые 0,5 ч работы на 49 Н до полного прилегания поверхностей трения и достижения величины нагрузки, равной 705,6 Н. Время приработки составляло не менее 7 ч.

Износ упрочненного слоя определяли по результату работы на стенде в течение 15 ч при $p = 10$ МПа (705,6 Н) и $v = 0,19$ м/с. Величины линейного износа и интенсивности изнашивания по ГОСТ 27674-88 определяли расчетом по потере массы образцов. По значениям линейных износов рассчитывали интенсивности изнашивания каждого из образцов пары и

суммарный износ для пары в целом. Для первого или второго образцов за период испытаний с числом циклов n интенсивность изнашивания определяется по формуле:

$$I_{1,2} = \Delta q_{1,2} / 2\gamma_{1,2} nHA, \quad (1)$$

где $\Delta q_1, \Delta q_2$ – потеря массы первого или второго образца за n циклов соответственно; $A = l \cdot b$ – площадь контакта пары (площадь поверхности трения образца); l – размер образца в направлении относительного перемещения; b – размер образца в направлении, перпендикулярном относительному перемещению, $\gamma_{1,2}$ – плотность материала первого или второго образца соответственно.

Суммарная интенсивность изнашивания пары оценивается по формуле:

$$I_{\Sigma} = I_1 + (l/H)I_2. \quad (2)$$

Средние значения интенсивностей изнашивания определялись по потере массы образцов после испытаний пяти идентичных пар.

Результаты испытаний и их обсуждение

В процессах ионно-плазменного азотирования, вакуумной цементации и вакуумной нитроцементации реализована концепция двухэтапной технологии упрочнения: создание термически стабильного ультрамелкодисперсного состояния материала детали на первом этапе и использование такого состояния для многократно ускоренного и качественного насыщения поверхностного слоя азотом и/или углеродом на втором этапе. Для создания ультрамелкодисперсного состояния в образцах исследуемых сталей использован метод интенсивной пластической деформации (ИПД). В основе метода лежит измельчение микроструктуры за счет больших сдвиговых деформаций. ИПД выполнена методом теплой осадки в штампе со степенью деформации 80 % при температуре 700 °С. Формирование ультрамелкозернистой структуры приводит к высокопрочному состоянию при высоком запасе пластичности и вязкости, что крайне необходимо в обеспечении эксплуатационной надежности деталей машин. Использование уникальных свойств ультрамелкозернистых структур

открывает перспективы создания инновационных технологий производства деталей, обладающих высокой усталостной прочностью и износостойкостью.

Температура при осадке 700 °С занимает особое положение. Она весьма близка к температуре рекристаллизации (которая для стали ВКС-7 составляет 650 °С, для стали ВКС-10 – 680 °С) и к температуре критической точки A_{C1} (730 °С для стали ВКС-7 и 720 °С для стали ВКС-10). Такие температурные условия и высокие скорости деформирования при осадке стимулируют преимущественное развитие динамической полигонизации и начальных стадий динамической рекристаллизации – процессов, ответственных за интенсивное измельчение зерна и образование фрагментированной структуры [1, 2, 5].

Снимки структуры стали до азотирования приведены на рис. 1 и рис. 2. Металлографические исследования (см. рис. 1) указывают на сильное (до 16 раз) измельчение исходной крупнозернистой структуры; размер зерна составляет 0,8...0,9 мкм, что соответствует ультрамелкодисперсному состоянию. Кристаллы феррита, сохранявшие кристаллографическую ориентировку бывших реек мартенсита, дробятся на мелкие фрагменты, приобретая форму новых достаточно равноосных зерен. Кроме того, результаты электронно-микроскопических исследований на просвет тонких фольг (см. рис. 2) свидетельствуют об образовании в ферритных зернах развитой дислокационной субструктуры, состоящей из наноразмерных ячеек, разделенных дислокационными сетками в виде сплетенных дислокационных линий и расположенных внутри ячеек субзерен (полигонов, блоков) с малоугловыми границами. Элементы субструктуры – ячейки и субзерна характерны для тонкой структуры обеих деформированных сталей.

Микроструктура стали ВКС-7 после азотирования при температуре 500°С представлена на рис. 3. Отличаются снимки тем, что первый образец подвергался азотированию после предварительной термической обработки, а второй – после комплексной, состоящей из термической и деформационной обработок. Существенное отличие составляет слой, непосредственно прилегающий к свободной поверхности образца после деформационной

обработки, представляющий собой наноструктурный слой нитридов железа (ϵ -Fe₂₋₃N) [7].

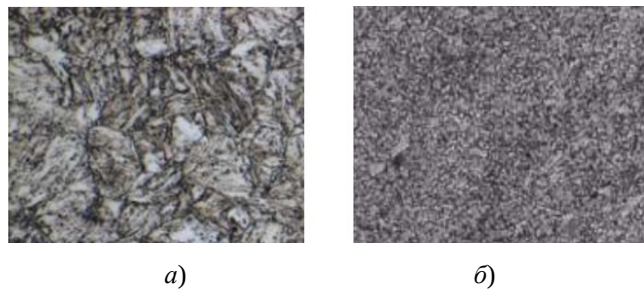


Рис. 1. Микроструктура стали ВКС-7:

а – после предварительной термической обработки; б – после объемной пластической деформации, $\times 1000$

Fig. 1. Microstructure of HSM-7 steel:

а – after preliminary thermal treatment; б – after volumetric plastic deformation, $\times 1000$

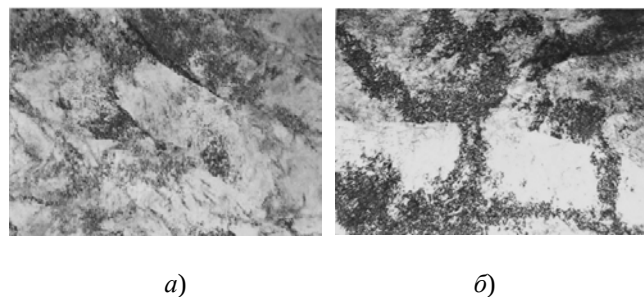


Рис. 2. Субструктура сталей после высокой степени объемной пластической деформации:

а – ВКС-7, $\times 20\ 000$; б – ВКС-10, $\times 37\ 000$

Fig. 2. Substructure of steels after a high degree of volumetric plastic deformation:

а – HSM-7, $\times 20\ 000$; б – HSM-10, $\times 37\ 000$

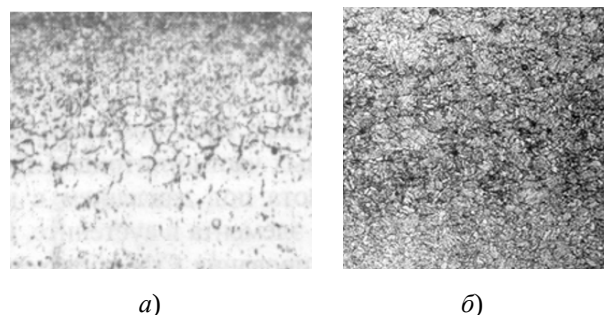


Рис. 3. Микроструктура азотированной стали без предварительной пластической деформации (а) и с предварительной деформацией (б), $\times 400$

Fig. 3. Microstructure of nitrided steel without preliminary plastic deformation (а) and with preliminary deformation (б), $\times 400$

Формирование наноструктурного нитридного слоя при ионно-плазменном азотировании проводится путем изменения азотного потенциала газовой среды по ходу процесса, что приводит к многократной фазовой перекристаллизации азотированного слоя. Механизм перекристаллизации вызывает образование зародышей кристаллов новой фазы внутри имеющейся (исходной) фазы. В условиях циклического изменения значения азотного потенциала и многократной фазовой перекристаллизации на поверхности детали формируется наноструктурный нитридный слой с размером кристаллов от 20 до 50 нм. Важно, что нанокристаллический слой формируется непосредственно на поверхности упрочняемой детали по ходу процесса азотирования. В этом проявляется заметное преимущество фазовой перекристаллизации в качестве способа интенсивного измельчения зерна и повышение эксплуатационных свойств [1, 8, 9].

Особенности способа обработки перед азотированием сталей существенно влияют на достигаемый уровень микротвердости в поверхностных слоях. Например, для ВКС-7 максимальная твердость после традиционного газового азотирования достигает величины 820 HV, а после ионно-плазменного с предварительным деформационным и тепловым воздействием – 950 HV, для стали ВКС-10 твердость достигает величины 1050 HV.

Процесс вакуумной цементации также наследует ультрамелкодисперсное состояние поверхностного слоя, полученного при тепловой осадке, которое создает благоприятные условия для проведения процесса цементации. Вследствие развитой субструктуры, высокой плотности дислокаций существенно сокращается продолжительность диффузионного насыщения из-за ускорения процессов диффузии углерода, образуются высокодисперсные частицы карбидов, увеличивается эффект дисперсионного упрочнения поверхностного слоя, формируются остаточные напряжения сжатия и высокий уровень твердости поверхности при равномерном ее снижении по толщине слоя [2].

Несмотря на определенное сходство между указанными двумя способами химико-термической обработки, имеются и важные различия как в технологии, так и достигаемых характеристиках свойств обрабатываемых материалов. На рис. 4 и 5 приведены результаты измерения микротвердости соответственно по толщине азотированного и цементованного слоев. Для азотирования характерна небольшая (0,3...0,5 мм) эффективная толщина слоя. Для цементации эффективная толщина слоя значительно больше (до 2,0 мм). В тоже время азотированный слой обеспечивает более высокую твердость в слоях, непосредственно прилегающих к поверхности; в более глубоких слоях твердость цементованного слоя выше.

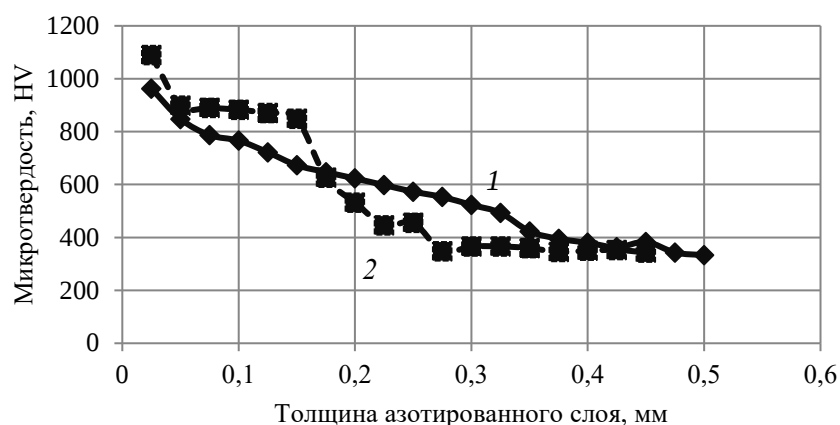


Рис. 4. Распределение микротвердости HV по толщине азотированного слоя:
1 – сталь ВКС-7; 2 – сталь ВКС-10

Fig. 4. Distribution of microhardness HV over the thickness of the nitrided layer:
1 – HSM-7 steel; 2 – HSM-10 steel

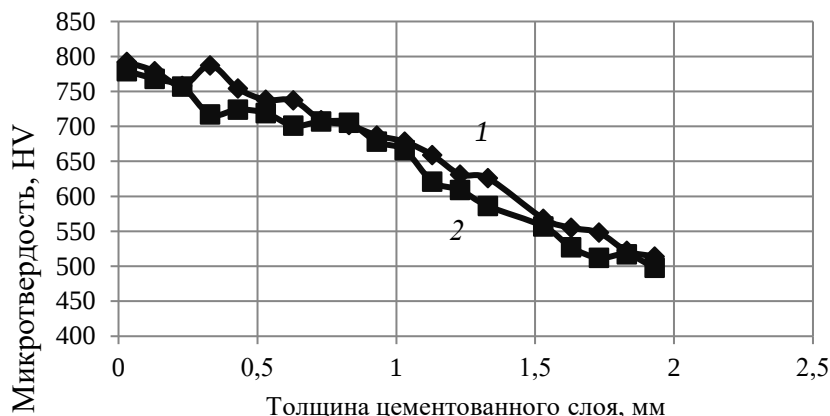


Рис. 5. Распределение микротвердости HV по толщине цементованного слоя:
1 – сталь ВКС-7; 2 – сталь ВКС-10

Fig. 5. Distribution of microhardness NV over the thickness of the carbonised layer:
1 – HSM-7 steel; 2 – HSM-10 steel

Для исследованных марок сталей значения микротвердости также несколько отличаются, что видно из рис. 4 и рис. 5. Так при азотировании наибольшая микротвердость соответствует стали ВКС-10, но при этом для стали ВКС-10 убывание микротвердости по толщине слоя происходит быстрее (см. рис. 4, кривая 2), чем для стали ВКС-7 (см. рис. 4, кривая 1).

Микротвердость цементованных слоев двух исследованных сталей мало отличаются (см. рис. 5); наблюдается лишь тенденция формирования более низких значений твердости для стали ВКС-10 (на 1,0...4,0 %, что соответствует точности определения величин микротвердости).

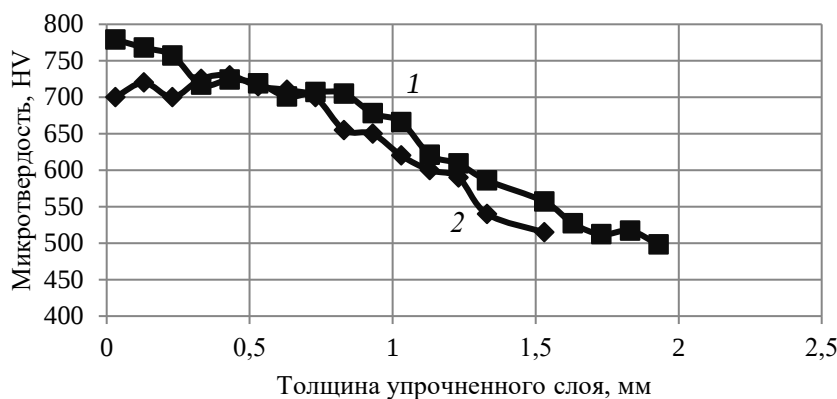


Рис. 6. Распределение микротвердости HV по толщине упрочненного слоя стали ВКС-10:
1 – вакуумная цементация; 2 – вакуумная нитроцементация

Fig. 6. Distribution of HV microhardness over the thickness of the hardened steel layer HSM-10:
1 – low-pressure carburizing; 2 – low-pressure carbonitriding

В условиях вакуумной нитроцементации сталей ВКС-7 и ВКС-10, обладающих ультрамелкодисперсной структурой, сформированной за счет интенсивной пластической деформации и динамической полигонизации,

также создаются благоприятные условия для поверхностного легирования. Также, как и в условиях вакуумной цементации, вследствие развитой субструктуры, высокой плотности дислокаций существенно сокращается

продолжительность диффузионного насыщения из-за ускорения процессов диффузии элементов, образуются высокодисперсные частицы упрочняющей фазы, увеличивается эффект дисперсионного упрочнения поверхностного слоя, формируются остаточные напряжения сжатия и высокий уровень твердости поверхности при равномерном ее снижении по толщине слоя. При этом параллельно с процессами диффузии углерода происходит формирование наноструктурного нитридного слоя ($F_{2-3}N$ – фаза).

Результаты измерения микротвердости по толщине цементованного (кривая 1) и нитроцементованного (кривая 2) слоев стали ВКС-10 приведены на рис. 6. Для вакуумной цементации эффективная толщина обработанного слоя несколько больше (до 2,0 мм), чем для нитроцементации (до 1,5 мм), причем микротвердость цементованного слоя, непосредственно прилегающего к поверхности, выше, чем микротвердость нитроцементованного слоя. В слоях на расстоянии до 0,25 мм от поверхности микротвердость цементованных

деталей составляет ~ 760 HV, а нитроцементованных ~ 700 HV. В слоях до 0,75 мм значения микротвердости образцов практически одинаковы, в более глубоких слоях нитроцементация создает несколько меньшую твердость диффузионного слоя, чем цементация.

Таким образом, исследуемые теплоустойчивые стали после комплексной обработки, включающей предварительную термическую обработку, пластическую деформацию методом теплой осадки и ионно-плазменное азотирование, вакуумную цементацию или вакуумную нитроцементацию отвечают требованиям повышенной твердости поверхностного слоя (см. рис. 4, рис. 5, рис. 6), что существенно для увеличения эксплуатационных характеристик нагруженных сопряжений.

Результаты оценки интенсивности изнашивания образцов из сталей ВКС-7 и ВКС-10, прошедших ионно-плазменное азотирование, вакуумную цементацию и вакуумную нитроцементацию после предварительной пластической деформации, приведены в табл. 2 и на рис. 7, рис. 8.

2. Интенсивность изнашивания сталей I_1 и суммарная интенсивность изнашивания материалов I_Σ пары трения (Литол-24, $p = 10$ МПа)

2. The wear intensity of steels I_1 and the total wear intensity of materials I_Σ of the friction pair (Lithol-24, $p = 10$ MPa)

Марка стали образца	Вид упрочнения	Марка стали контробразца	$I_1 \cdot 10^{10}$	$I_\Sigma \cdot 10^{10}$
ВКС-7	Ионно-плазменное азотирование	Сталь 20, цементация, закалка	0,36	0,49
ВКС-10			0,27	0,31
ВКС-7	Вакуумная цементация		0,48	0,61
ВКС-10			0,89	1,02
ВКС-7	Вакуумная нитроцементация		0,17	0,28
ВКС-10			0,24	0,31

Интенсивности изнашивания поверхностных азотированных слоев сталей ВКС-7 и ВКС-10 не превышают величины $0,5 \cdot 10^{-10}$, что является показателем их высокой износостойкости, что видно из данных табл. 2 и рис. 7. Средние интенсивности изнашивания стали ВКС-10 в 1,4 раза меньше, чем стали ВКС-7. Сопряженные контробразцы в паре со сталью ВКС-10 изнашиваются в 2,4 раза меньше, чем

при работе со сталью ВКС-7. Следует особенно подчеркнуть, что исследуемые азотированные поверхностные слои не склонны к задирам при испытаниях, которые характеризуются тяжелыми условиями: пара трения испытывала возвратно-поступательное (реверсивное) движение, а сами испытания были достаточно длительными. Особенностью трения цементованных образцов является появление очагов схватывания на некоторых участках пути трения.

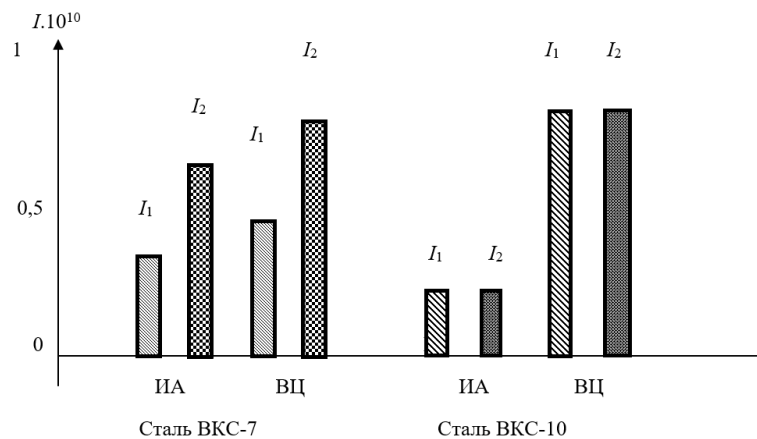


Рис. 7. Интенсивности изнашивания сталей ВКС-7 и ВКС-10 (I_1), прошедших ионно-плазменное азотирование (ИА) и вакуумную цементацию (ВЦ), и сопряженной детали из цементованной стали 20 (I_2)

Fig. 7. The wear intensity of steels HSM-7 and HSM-10 (I_1), which underwent ion plasma nitriding (IN) and low-pressure carburizing (LPC), and the mated part made of converted steel 20 (I_2)

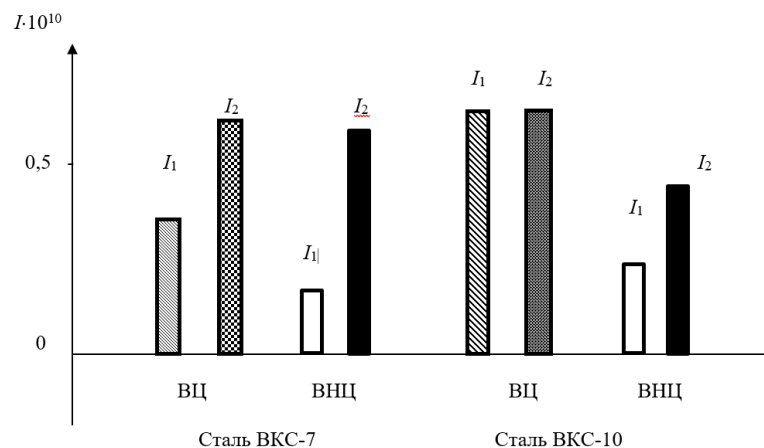


Рис. 8. Интенсивности изнашивания (I_1) сталей ВКС-7 и ВКС-10, прошедших вакуумную цементацию (ВЦ) и вакуумную нитроцементацию (ВНЦ), и сопряженной детали (I_2) из цементованной стали 20

Fig. 8. The wear intensity (I_1) of HSM-7 and HSM-10 steels subjected to low-pressure carburizing (LPC) and low-pressure carbonitriding (LPCN), and the mated part (I_2) made of converted steel 20

Средние значения интенсивности изнашивания поверхностных нитроцементованных слоев сталей ВКС-7 и ВКС-10 (табл. 2) не превышают величины $0,3 \cdot 10^{-10}$, практически одинаковы для обеих марок сталей и в 3,0 – 4,0 раза меньше, чем интенсивности изнашивания после вакуумной цементации. Сопряженные контробразцы в паре со сталью ВКС-10 после ВНЦ (рис. 8) изнашиваются в 1,6 раза меньше, чем в паре со сталью ВКС-7 и в 1,9 раза меньше, чем с цементованными сталями. Как показывают кинетика изнашивания и состояние поверхности после окончания испытаний на стенде, характеризуемом тяжелыми условиями длительного реверсивного

трения, исследуемые поверхностные слои после вакуумной нитроцементации не склонны к задирам, также, как и азотированные стали.

Анализ изменения интенсивностей изнашивания и состояния поверхности в зависимости от вида обработки дает основание заключить, что при вакуумной нитроцементации сталей ВКС-7 и ВКС-10 имеют место те же закономерности структурного состояния поверхностного слоя, что и при ионно-плазменном азотировании (на поверхности модифицированного слоя формируется нанокристаллический слой соединений $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$). Данные о механизме влияния наноструктурного состояния поверхностного азотированного слоя [8, 9]

могут быть с уверенностью распространены на стали, прошедшие ВНЦ. Особенностью нанокристаллического состояния, в котором находится $\varepsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$, является существенное увеличение свободной поверхности. Объем зерна нанокристалла соизмерим с объемом границ зерен. Энергия границ зерен возрастает, что приводит к появлению напряжений сжатия в нанокристаллических частицах, а это, в свою очередь, может быть также одной из причин существенного возрастания износостойкости нанокристаллического поверхностного слоя нитроцементованной стали.

Кроме того, результаты изнашивания сталей после ВЦ и ВНЦ подтверждают данные,

полученные ранее [4, 9, 10] о том, что износостойкость материалов не всегда тем выше, чем больше их твердость. Сравнивая результаты испытаний на износостойкость ($\varepsilon = 1/I_1$) стали ВКС-10, прошедшей упрочнение ВЦ и ВНЦ (табл. 3), можно видеть, что после ВНЦ износостойкость стали выше, чем после ВЦ, в то время, как твердость поверхностного слоя выше для стали после ВЦ.

Следовательно, твердость, как характеристика механических свойств конструкционного материала, не всегда может служить однозначным критерием износостойкости металлических материалов при трении скольжения в среде смазочного материала [4].

3. Микротвердость HV и износостойкость ε стали ВКС-10

3. Microhardness HV and wear resistance ε of HSM-10 steel

Микротвердость HV слоя 0,3 мм		Износостойкость $\varepsilon \cdot 10^{-10}$		Средние значения микротвердости по толщине HV	
ВЦ	ВНЦ	ВЦ	ВНЦ	ВЦ	ВНЦ
760	700	1,1	4,2	650	650

Следует в итоге подчеркнуть, что применение двухэтапной технологии химико-термической обработки теплостойких сталей ВКС-7 и ВКС-10 решает задачи совершенствования процесса обработки и повышения эксплуатационных свойств и, прежде всего износостойкости сталей в условиях тяжелонагруженного контакта. Однако сложная проблема задиристости и локального формирования повреждений поверхностей изделий из сталей при контактном взаимодействии на данном этапе исследований остается открытой.

Известно, что процессы, которые происходят при контактном взаимодействии поверхностей твердых тел под нагрузкой в условиях их относительного перемещения, в машиностроении объединяют общим понятием контактная деформация, трение и износ. Явления, сопровождающие эксплуатацию зубчатых передач, подшипников качения, кулачковых механизмов, характеризуются общими условиями контактного взаимодействия, поэтому их несущая способность, во многом связанная с противозадирной стойкостью, определяется общей совокупностью факторов, которые позволяют воздействовать на их работоспособность. Проблема противозадирной стойкости при

эксплуатации машин входит в число наиболее актуальных. Связано это с последствиями схватывания, т. к. процесс формирования повреждаемости от отдельных микросхватываний в дискретном контакте переходит в заедание с образованием рисок, борозд, выровов, переноса металлов вплоть до катастрофического разрушения и заклинивания.

Среди достоинств азотирования особое место имеет обеспечение более высокой противозадирной стойкости поверхностного слоя стали. Практика эксплуатации зубчатых передач показала, что схватывание зубчатых пар при допустимых условиях работы почти не наблюдается, если они подвергались азотированию; схватывание присуще поверхностям, прошедшим процесс цементации. Природа этих явлений окончательно не установлена. Можно только говорить, что многочисленные экспериментальные исследования и опыт практического применения азотирования и цементации дает основание полагать, что в основе различия противозадирной стойкости стали, подвергнутой этим видам химико-термической обработки, лежит компромисс двух моделей трения – скольжения путем сдвига и скольжения путем схватывания. Превалирование того

или иного механизма определяет уровень противозадирной стойкости материала поверхностного слоя и соответственно ресурс изделий.

На основании проведенных исследований сталей различных структурных классов [4] и специальных экспериментов, имитирующих условия тяжело нагруженного контакта, в [11] высказана гипотеза причины схватывания цементованных пар и снижение вероятности схватывания при трении азотированных сопряжений при допустимых условиях работы.

С позиций термодинамики проанализированы реакции диссоциации нитридов и карбидов железа и влияние температуры на этот процесс.

При азотировании образуются нитриды железа согласно реакции $2\text{Fe} + \text{N}_2 = \text{Fe}_2\text{N}$ и $4\text{Fe} + 2\text{N}_2 = \text{Fe}_4\text{N}$; при цементации образуются карбиды: $3\text{Fe} + \text{C} = \text{Fe}_3\text{C}$. Процессы диссоциации могут проходить с образованием следующих веществ: $2\text{Fe}_2\text{N} \rightarrow 4\text{Fe} + \text{N}_2$ (газ), $2\text{Fe}_4\text{N} \rightarrow 8\text{Fe} + \text{N}_2$ (газ), $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C}$ (твердое).

Согласно [12], изменение свободной энергии Гиббса ΔG_T в результате образования Fe_2N составляет 2500 кал/моль при температуре 298 К, 5830 кал/моль при 600 К, 8000 кал/моль при 800 К и 10600 кал/моль при 1000 К; изменение свободной энергии Гиббса ΔG_T в результате образования Fe_4N соответственно составляет 900 кал/моль при 298 К, 4150 кал/моль при 600 К, 6700 кал/моль при 800 К и 9500 кал/моль при 1000 К. Положительная величина ΔG_T означает термодинамическую нестабильность соединений, которая растет с повышением температуры; при этом нитрид Fe_4N более

нестабилен, чем Fe_2N . Следовательно, можно ожидать их диссоциацию в зоне тяжело нагруженного контакта, когда развиваются достаточно высокие температуры (особенно в пятнах фактического контакта) с выделением газообразного азота.

Изменение свободной энергии диссоциации оценивается по соотношению: $\Delta G_T = -RT \ln K$, где K – константа равновесия реакции диссоциации; T – абсолютная температура; R – универсальная газовая постоянная. Величина K для температур $\sim 3000^\circ\text{C}$ (что соответствует жестким условиям работы зубчатых передач) для нитрида Fe_2N составляет 4,95, для Fe_4N – $K = 3,5$. При этом чем выше величина константы равновесия, тем выше склонность соединения к распаду.

Основные термодинамические характеристики диссоциации нитридов и карбида железа приведены в табл. 4.

Из приведенных данных следует, что для диссоциации всех соединений железа (Fe_2N ; Fe_4N ; Fe_3C) изменение свободной энергии Гиббса имеет отрицательные значения, т.е. процесс диссоциации нитридов и карбидов железа при повышенной температуре протекает самопроизвольно. При этом в результате диссоциации нитридов дополнительное выделение теплоты реакции растет с повышением контактной температуры, усиливая процесс диссоциации. При диссоциации карбидов железа склонность к распаду на железо и твердый углерод, наоборот, несколько снижается, т. к. с ростом температуры тепловой эффект реакции уменьшается.

4. Характеристики диссоциации соединений

4. Compounds dissociation characteristics

Соединение	Характеристика	Температура, К			
		298	600	800	1000
Fe_2N	Изменение свободной энергии ΔG_T , кал/моль	- 2500	- 5860	- 8000	- 10600
	Тепловой эффект ΔQ , кал/моль	900	740	1040	1600
Fe_4N	ΔG_T	- 900	- 4150	- 6700	- 9500
	ΔQ	2550	2400	3580	5070
Fe_3C	ΔG_T	-4800	-3100	-1850	-750
	ΔQ	5780	7050	6750	5100

В итоге реакций диссоциации нитридов железа в зоне контактного взаимодействия образуется прослойка молекул газа N_2 , давление и объем которой связаны выражением $P_{аз}V = nRT$, где $P_{аз}$ – давление газа; V – его объем; n – число молей газа), а при диссоциации карбида железа на трущейся поверхности образуются углеродные атомы с ненасыщенными атомными связями и высокой поверхностной энергией. Используя несложные термодинамические соотношения, можно получить примерные значения давления азота в зоне контакта, которое зависит от его количества в результате диссоциации и расстояния между телами h в период жизни контакта. При $h = 100$ нм $P_{аз} = 100$ атм, при $h = 10$ нм $P_{аз} = 1000$ атм. Учитывая, что поверхность имеет шероховатость, возможен широкий диапазон колебаний достаточно высокого уровня давления.

Таким образом, при трении азотированных материалов в условиях тяжелонагруженного контакта под действием контактной деформации и повышенной температуры может происходить диссоциация нитридов железа с образованием на поверхности газовой прослойки, которая в условиях взаимодействия микронеровностей выполняет роль клина, препятствуя сближению поверхностей и предотвращая схватывание. При трении цементованных сталей также может происходить диссоциация карбидов железа, но с образованием твердого углерода с ненасыщенными атомными связями и избыточной поверхностной энергией, компенсация которой возможна только за счет установления мостиков сильных межатомных связей между цементованным телом и сопряженным контртелом, что приводит к схватыванию. Описанные процессы наряду с повышенной износостойкостью нитридов и их сопротивляемостью циклическим нагрузкам являются составляющими в механизме формирования более высокой противозадирной стойкости азотированных сталей по сравнению с цементованными.

Представленные материалы о роли химико-термической обработки в формировании свойств поверхностных слоев не содержат исчерпывающего описания многочисленных процессов, протекающих в трибосопряжениях и связанных с их влиянием на задиростойкость металлических материалов. Отмечены лишь

важные внутренние процессы, которые устанавливаются в сложной, иерархически многоуровневой системе – в зоне контактной деформации при трении, которые частично указывают возможные пути решения проблемы задиростойкости

Заключение

Проведенное исследование позволяет сформулировать следующие итоговые положения.

Стали марок ВКС-7 и ВКС-10, прошедшие ионно-плазменное азотирование с предварительной интенсивной пластической деформацией методом теплой осадки, при испытаниях в условиях реверсивного трения при $p = 10$ МПа в среде пластичного смазочного материала обладают высокой износостойкостью (интенсивность изнашивания $I \leq 10^{-10}$). Пары трения со сталью ВКС-10 имеют более высокую работоспособность; средняя суммарная интенсивность изнашивания составляет $\sim 0,3 \cdot 10^{-10}$, что в 1,6 раза меньше, чем для пар со сталью ВКС-7.

После вакуумной цементации лучшие результаты получены для пар трения со сталью ВКС-7; средняя суммарная интенсивность изнашивания составляет $\sim 0,6 \cdot 10^{-10}$, что в 1,7 раза меньше, чем для пар со сталью ВКС-10.

После вакуумной нитроцементации для обеих исследованных марок сталей средние суммарные значения интенсивности изнашивания образцов пары трения практически одинаковые и составляют $\sim 0,3 \cdot 10^{-10}$, что в 2,0...3,0 раза меньше, чем после вакуумной цементации.

Изменения интенсивностей изнашивания и металловедческий анализ поверхностей, формирующихся при разных видах обработки, дают основание заключить, что при ионно-плазменном азотировании и вакуумной нитроцементации сталей ВКС-7 и ВКС-10 имеют место общие закономерности формирования структурного состояния поверхностного слоя. На поверхности стали формируется износостойкий наноструктурный поверхностный слой, что проявляется в понижении уровня поверхностного разрушения при трении (возрастает износостойкость модифицированного поверхностного слоя).

На основе анализа возможности реакций диссоциации нитридов и карбидов железа в зонах контакта тяжело нагруженных сопряжений высказана термодинамическая гипотеза причин различия характеристик противозадирной стойкости азотированных и цементованных поверхностей. Температуры в зоне контакта стимулируют реакции диссоциации Fe_2N , Fe_4N , Fe_3C с образованием газообразного азота для азотированных сталей и атомов углерода с ненасыщенными связями и повышенной поверхностной энергией. В парах с азотированной сталью газовая среда действует в качестве клина, разделяющего пятна контакта, препятствуя тем самым схватыванию; с цементованной поверхностью – атомы углерода, склонные к формированию мостиков сильных межатомных связей, способствуют схватыванию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Фахуртдинов Р.С., Алексеева М.С., Данилов В.Д., Смирнов А.Е., Громов В.И. Повышение характеристик механических свойств теплоустойчивых сталей методом активизации процесса азотирования // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2014. № 2. С. 90–96.
2. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Фахуртдинов Р.С., Данилов В.Д., Щербаков Ю.И., Алексеева М.С., Смирнов А.Е., Громов В.И. Механические свойства теплоустойчивых сталей после активизации процесса цементации // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2014. № 4. С. 113–119.
3. Петрова Л.Г. Научно-технические технологии в материаловедении: высокотемпературное сквозное азотирование жаростойкой стали // Научно-технические технологии в машиностроении, 2023. № 9 (147). С. 3–15.
4. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г. Структура и износостойкость азотированных сталей и сплавов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 518 с.
5. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Фахуртдинов Р.С., Смирнов А.Е., Громов В.И., Ступников В.В. Исследование износостойкости сталей ВКС-7 и ВКС-10 после

вакуумной цементации и вакуумной нитроцементации // Наука и образование, 2013. № 5. С. 345–356.

6. Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Колмаков А.Г., Рыбакова Л.М. Методы испытаний на трение и износ. М.: Интермет инжиниринг, 2001, 152 с.

7. Kyskenova L.I., Lapteva W.G., Berezina E.W., Gerasimov S.A., Senatorski J. Tribological properties of toughened and nitrided 38H2MJA steel // Surface Engineering, 2004. № 4. P. 45–50.

8. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Крапошин В.С., Лисоцкий И.В., Березина Е.В., Лаптева В.Г. Влияние нанокристаллической фазы нитридов железа на износостойкость азотированной стали 38Х2МЮА // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Машиностроительные технологии», Москва. 2010. ИМАШ РАН. С. 216–218.

9. Березина Е.В. Разработка технологии формирования наноструктурированного азотированного слоя конструкционных сталей для повышения их износостойкости. Автореферат диссертации на соискание уч. степени к.т.н. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 16 с.

10. Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Мичугина М.С., Березина Е.В. Структура поверхностных слоев сталей и износостойкость после разных условий азотирования // Сб. Методы упрочнения поверхностей деталей машин. М.: Красанд, 2008. С. 303–341.

11. Куксенова Л.И., Симонов В.Н., Алексеева М.С., Пахомова С.А., Козлов Д.А. Исследование трения, износа и противозадирной стойкости тяжело нагруженных азотированных сопряжений // Трение и износ, 2021. Т. 42. № 3. С. 319–328.

12. Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. Физическая химия. М.: Металлургия. 1987. 704 с.

REFERENCES

1. Gerasimov S.A., Kyskenova L.I., Lapteva V.G., Fakhurtdinov R.S., Alekseeva M.S., Danilov V.D., Smirnov A.E., Gromov V.I. Improvement of mechanical properties of heat-resistant steels by activation of the nitriding process // Problems of machine building and machine reliability, 2014, no. 2, pp. 90–96.

2. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Fakhurtdinov R.S., Danilov V.D., Shcherbakov Yu.I., Alekseeva M.S., Smirnov A.E., Gromov V.I. Mechanical properties of hot-working steels after activization of cementation process // Problems of machine building and machine reliability, 2014, no. 4, pp. 113–119.

3. Petrova L.G. High-techs in materials science: through-the-thickness austenitic nitriding of heat-resistant steel // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2023, no. 9 (147), pp. 3–15.

4. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G. Structure and wear resistance of nitrided steels and alloys. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2012, 518 p.

5. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Fakhurtdinov R.S., Smirnov A.E., Gromov V.I., Stupnikov V.V. Study of wear resistance of HSM-7 and HSM-10 steels after low-pressure carburizing and low-pressure carbonitriding // Nauka i obrazovanie (Science and Education), 2013, no. 5., pp. 345–356.

6. Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Kolmakov A.G., Rybakova L.M. Methods of tests for friction and wear. Moscow: Internet engineering, 2001, 152p.

7. Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Berezina E.V., Gerasimov S.A., Senatorski J. Tribological properties of toughened and nitrided 38H2MJA steel // Surface Engineering, 2004, No. 4. P. 45–50.

8. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Kraposhin V.S., Lisotsky I.V., Berezina E.V., Lapteva V.G. The influence of the nanocrystalline phase of iron nitrides on the wear resistance of nitrided steel 38X2MYA // Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical conference «Machine-building technologies», Moscow, 2010, IMASH RAS, pp. 216–218.

9. Berezina E.V. Development of technology for the formation of a nanostructured nitrided layer of structural steels to increase their wear resistance. Extended abstract of candidate's thesis: Bauman Moscow State Technical University, 2007, 16 p.

10. Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Michugina M.S., Berezina E.V. Structure of surface layers of steels and wear resistance after different conditions of nitriding // Collection of Methods of hardening surfaces of machine parts. Moscow: Krasand, 2008, pp. 303–341.

11. Kuksenova L.I., Simonov V.N., Alekseeva M.S., Pakhomova S.A., Kozlov D.A. Investigation of friction, wear and extreme pressure resistance of heavily loaded nitrided compounds // Friction and wear, 2021, vol. 42, no. 3, pp. 319–328.

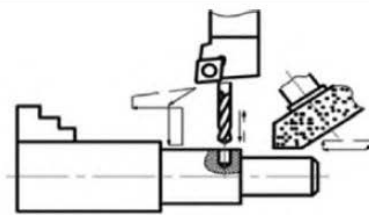
12. Zhukhovitsky A.A., Shvartsman L.A. Physical chemistry. Moscow: Metallurgiya, 1987, 704 p.

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 26.02.2024; одобрена после рецензирования 11.03.2024; принята к публикации 20.03.2024.

The article was submitted 26.02.2024; approved after reviewing 11.03.2024; assepted for publication 20.03.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №4 (154). С.19-28.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №4 (154). P.19-28.

Научная статья

УДК 621.91.01

doi: 10.30987/2223-4608-2024-19-28

Особенности моделирования шероховатости поверхности при фрезеровании нержавеющей стали с применением различных сред

Эльдар Рустемович Ваниев¹, к.т.н.

Руслан Марленович Джемалядинов², преподаватель

Ильяс Эльвирович Теминдаров³, преподаватель

Эскендер Латифович Бекиров⁴, преподаватель

^{1, 2, 3, 4} Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова,
Симферополь, Россия

¹ e.vaniev@kipu-rc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6583-2455>

² rus.dzhemalyadinov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3319-3542>

³ temindarov23@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-9938-3297>

⁴ eska1691@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2837-5184>

Аннотация. Рассмотрены особенности моделирования шероховатости обработанной поверхности при фрезеровании нержавеющей стали марки 12X18H10T с применением И-20А, МР-99, рапсового и касторового масел и при сухой обработке, на основе использования алгоритмов метода группового учета аргументов. Применение различных смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) рассматривается в теории резания металлов как фактор, уменьшающий шероховатость поверхности. Однако степень влияния различных СОТС в том числе и масел растительной природы при фрезеровании стали 12X18H10T не установлена. Проведенный анализ исследований влияния различных факторов на процесс фрезерования показал, что эти исследования проводились на основе однофакторных экспериментов, которые не позволяют установить взаимное влияние исследуемых факторов на значение параметров процесса резания для различных видов обработки. Методика проведения исследований предусматривает моделирование шероховатости поверхности при фрезеровании стали 12X18H10T по экспериментальным данным в присутствии различных технологических жидкостей в принятом диапазоне изменения режимов резания. Вместе с тем современные методы моделирования позволяют устанавливать это взаимовлияние. Для получения моделей необходимо, прежде всего, знать критерий приработки и критерий затупления режущего инструмента. В результате обработки экспериментальных данных для каждой из технологических сред построены модели шероховатости поверхности в виде зависимостей $Ra = f(v, sz, t)$, адекватно описывающие процесс фрезерования с применением различных сред. Показано, что влияние режимных параметров на образование микронеровностей проявляется в их тесной взаимосвязи. Их взаимное влияние по-разному проявляется в зависимости от используемых СОТС для заданных обрабатываемого и инструментального материалов.

Ключевые слова: моделирование, МГУА, шероховатость поверхности, фрезерование, сталь 12X18H10T, режимы резания, СОТС

Благодарности: экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова.

Для цитирования: Ваниев Э.Р., Джемалядинов Р.М., Теминдаров И.Э., Бекиров Э.Л. Особенности моделирования шероховатости поверхности при фрезеровании нержавеющей стали с применением различных сред // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 4 (154). С. 19–28. doi: 10.30987/2223-4608-2024-19-28

Modeling characteristics for surface finish when milling stainless steels using various media

Eldar R. Vaniev¹, Ph.D. Eng.

Ruslan M. Dzhemalyadinov², senior lecturer

Ilyas E. Tamindarov³, senior lecturer

Eskender L. Bekirov⁴, senior lecturer

^{1, 2, 3, 4} Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov,
Simferopol, Russia

¹ e.vaniev@kipu-rc.ru

² rus.dzhemalyadinov@mail.ru

³ teminav23@gmail.com

⁴ eska1691@mail.ru

Abstract. Modeling characteristics for surface finish when milling stainless steels using various media (grade steel 12X18H10T) using IOL-20A (industrial oil lubricant), CM-99 (cooling mixture), rapeseed and castor oils and on dry treatment, using the algorithms of the group method of data handling are viewed. The use of various lubricating and cooling technological mixtures (LCTM) is thought of as the theory of metal cutting factor reducing surface undulation. However, the degree of influence of various LCTM, including vegetable oils, when milling steel 12X18H10T has not been determined. The study case of various effects interaction on the milling process has shown that these studies were conducted on the basis of single-phase experiments that do not allow specifying mutual influence of the studied factors on the value of the parameters of the cutting process for various types of treatment. The research methodology provides for modeling surface finish under milling of 12X18H10T steel according to experimental data using various process liquids in the accepted range of cutting modes. At the same time, modern modeling methods allow us to determine these mutual effects. To obtain models, it is urgent, first of all, to be aware of break-in process criterion and dulling tool criterion as well. As a result of processing experimental data for each of processing media, surface finish models in the form of dependencies $Ra = f(v, sz, t)$ were constructed, adequately describing the milling process with various media. It is indicated that the influence of regime parameters on the formation of micro-dimensions take the form of their close interrelation. Their interplay has various effects, depending on the LCTM used for the specified work stock and tool material.

Keywords: modeling, group method of data handling (GMDH), surface undulation, milling, steel 12X18H10T, cutting modes, target locator (TL)

Acknowledgements: experimental studies were carried out using the equipment of the Crimean Engineering and Pedagogical University named after F. Yakubov.

For citation: Vaniev E.R., Dzhemalyadinov R.M., Tamindarov I.E., Bekirov E.L. Modeling characteristics for surface finish when milling stainless steels using various media / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 4 (154). P. 19–28. doi: 10.30987/2223-4608-2024-19-28

Введение

Шероховатость обработанной поверхности можно представить, как след рабочего движения режущей кромки (кромки) инструмента при снятии им поверхностного слоя металла (регулярный профиль), искаженного в результате воздействия в процессе резания множеством случайных факторов. Факторы, которые вызывают отклонение реальной шероховатости поверхности от регулярного профиля, условно могут быть представлены тремя группами, а именно, связанными с положением режущей кромки инструмента относительно обработанной поверхности, упругой и пластической деформацией обрабатываемого материала и возникновением вибраций в технологической станочной системе [1].

Для заданных обрабатываемого и инструментального материалов, исходного инструмента и его геометрии основными

факторами, определяющими шероховатость поверхности, являются режимы резания и технологическая среда, в присутствии которой происходит процесс резания. В данной статье рассматривается процесс фрезерования нержавеющей стали марки 12X18H10T быстрорежущим инструментом из стали P6M5.

Как и в случае с каждым процессом резания, процесс фрезерования сопровождается рядом особенностей упругопластической и пластической деформации, вибрациями, трением и температурой в зоне резания, наростообразованием и другими явлениями, что является причиной искажения регулярного (расчетного) профиля неровностей.

В работах [1, 2, 5] отмечается, что наростообразование резко ухудшает шероховатость поверхности из-за нестабильности процесса образования адгезионного слоя и его срыва с поверхности инструмента, которое во многом

зависит от свойств обрабатываемого материала и условий резания.

Условия резания, для определенных марок обрабатываемого и инструментального материалов, а также геометрии инструмента и воспроизводимого им вида обработки на станке, главным образом, определяются режимами резания и смазочно-охлаждающими технологическими средствами (СОТС). Режимы резания при фрезеровании дисковой трехсторонней фрезой характеризуются скоростью резания, подачей на зуб, шириной и глубиной фрезерования.

Влияние скорости резания на высоту микронеровностей в зависимости от склонности материала к наростообразованию влияет по-разному [1, 2]. При обработке материалов несклонных к образованию нароста высота микронеровностей с повышением скорости резания уменьшается. Если же материалы склонны к наростообразованию, к которым относится и сталь аустенитного класса 12X18H10T, высота неровностей напрямую зависит от высоты нароста. В этом случае при увеличении скорости резания до определенного значения высота нароста растет и соответственно растет и высота микронеровностей, достигая максимума при наибольшем значении высоты нароста. С дальнейшим повышением скорости резания нарост уменьшается, уменьшается и высота неровностей. При скорости резания, когда нарост исчезает, с дальнейшим ее увеличением высота неровностей непрерывно уменьшается [2].

Вместе с тем в работе [5] отмечается, что при точении стали 12X18H10T после исчезновения нароста, дальнейшее увеличение скорости мало сказывается на изменении шероховатости обработанной поверхности. Так же отмечается, что при фрезеровании сталей этого класса изменение скорости резания в диапазоне от 20 м/мин до 50 м/мин оказывает незначительное влияние на шероховатость поверхности.

Влияние подачи на шероховатость поверхности носит сложный характер. Объясняется это тем, что с ее уменьшением, уменьшается толщина среза, а радиус скругления режущей кромки оказывается соизмеримым с толщиной срезаемого слоя. Процесс стружкообразования в этих условиях становится

неустойчивым, вследствие чего возрастают силы трения на задней поверхности инструмента и высота микронеровностей.

Следует отметить, что исследования влияния каждого из параметров режима резания (скорость резания v , м/мин; подача на зуб s_z , мм/зуб; глубина резания t , мм) на шероховатость поверхности проводилось при варьировании значений одного из них и постоянстве остальных. Вместе с тем, установлено [6] их взаимовлияние на характеристики процесса резания.

Износ инструмента в большинстве случаев также приводит к возрастанию высоты микронеровностей, что связывают с увеличением коэффициента трения на задней поверхности инструмента, и как следствие, пластических деформаций металла при его контакте с фаской износа [1, 2]. Введение в зону обработки СОТС рассматривается в резании металлов как фактор, снижающий высоту микронеровностей обработанной поверхности. Однако степень влияния различных СОТС, в том числе и растительных масел, при фрезеровании стали 12X18H10T не установлена.

Постановка задачи и цель исследований

Проведенный анализ исследований влияния различных факторов на процесс фрезерования показал, что эти исследования проводились на основе однофакторных экспериментов, которые не позволяют установить взаимное влияние исследуемых факторов на значение параметров процесса резания для различных видов обработки. Вместе с тем современные методы моделирования позволяют устанавливать это взаимовлияние.

Исследований взаимного влияния режимов резания в присутствии различных технологических средств на шероховатость поверхности при фрезеровании стали 12X18H10T дисковыми трехсторонними фрезами из быстрорежущей стали не выявлено. В этой связи определение взаимного влияния режимных параметров на высоту микронеровностей в условиях использования различных СОТС при фрезеровании стали 12X18H10T является актуальной задачей, которая рассматривается в данной работе.

Целью исследований является построение моделей для определения шероховатости обработанной поверхности при фрезеровании стали 12Х18Н10Т быстрорежущим инструментом из стали Р6М5 в присутствии различных СОТС в зависимости от режимов резания.

Методика проведения исследований

Методика проведения исследований предусматривает моделирование шероховатости поверхности при фрезеровании стали 12Х18Н10Т по экспериментальным данным в присутствии различных СОТС в принятом диапазоне изменения режимов резания.

Построение моделей в виде функции $Ra = f(v, s_z, t)$ проводилось с использованием одного из методов эвристической самоорганизации упрощенного алгоритма – метод группового учета аргументов (МГУА) [6, 7].

Этот метод нашел широкое применение в исследованиях и прогнозировании сложных естественных систем. В этом случае данными для получения моделей служат результаты экспериментальных данных или производственных наблюдений в рассматриваемых пределах изменений выбранных контролируемых переменных, определяемых изучаемый процесс. Он представляет собой соединение регрессионного анализа и методов регуляризации, предназначен для прямого моделирования сложных систем по небольшому числу экспериментальных данных (пять, шесть экспериментов на одну переменную). Путем использования поэтапного усложнения комбинаций пороговых самоотборов (эвристических критериев) лучших из них в алгоритмах МГУА реализуется схема массовой селекции. В отличие от других методов моделирования по экспериментальным данным, этот метод обеспечивает получение моделей, вид и структура функций которых неизвестна.

В ряде исследований [3, 4, 7 – 10] отмечается, что эффективность использования СОТС зависит от ее правильного выбора, который при том или другом виде обработки в большей степени зависит от режимов резания, как определяющих условия ее применения для исследуемых обрабатываемого и инструментального материалов. Поэтому

моделирование влияния режимов резания проводилось в присутствии следующих технологических средств: И-20А, МР-99, рапсового и касторового масел, а также при сухой обработке.

В качестве контролируемых переменных при моделировании шероховатости в присутствии каждой из СОТС и при сухом резании были выбраны: скорость резания v , м/мин; подача на зуб s_z , мм/зуб; глубина резания t , мм.

Для решения этих задач на универсально-фрезерном станке модели 6Б75ВФ1, соответствовавшему нормам точности и жесткости по ГОСТ 4.93-86 и ГОСТ 8-82, был смонтирован испытательный комплекс (рис. 1), который обеспечивал в пределах одной серии опытов устанавливать значения как приработочные режимы резания, так и эксплуатационные после приработки инструмента, а также измерения, предусмотренные статическими планами проведения экспериментов.



Рис. 1. Испытательный стенд

Fig. 1. Bench-testing unit

На горизонтальной оправке, закрепленной в шпинделе станка, устанавливалась цельная дисковая трехсторонняя фреза Ø100 мм с разнонаправленными зубьями ($Z = 14$) по ГОСТ 28527-90 из быстрорежущей стали Р6М5 одной партии (7,0 фрез), конструкция и геометрические параметры инструмента приведены на рис. 2, которая поочередно обрабатывала уступы на заготовке из стали 12Х18Н10Т по заданному плану режимам резания. Обработка осуществлялась до критерия износа зубьев фрезы $h_3 = 0,3$ мм.

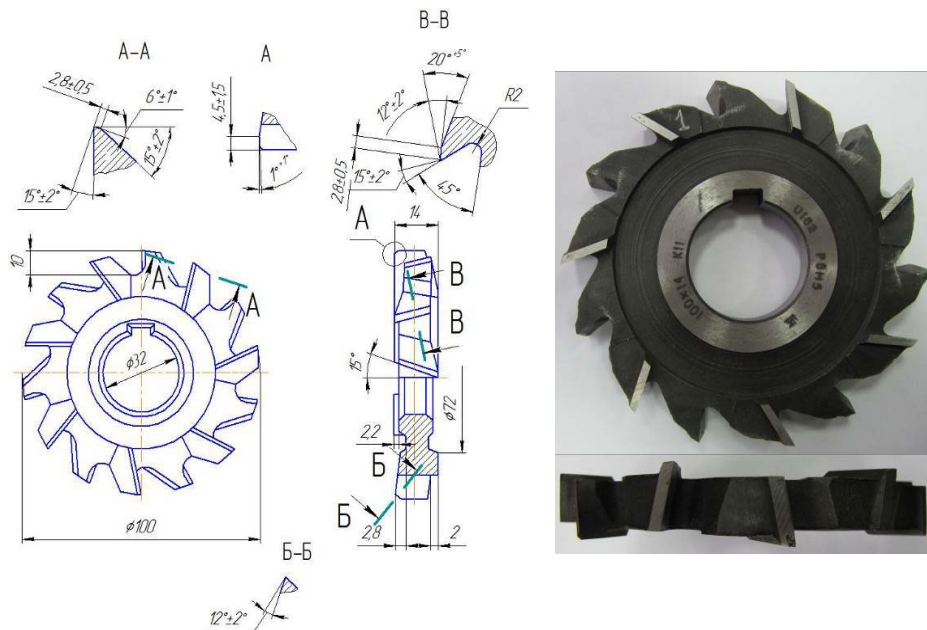


Рис. 2. Элементы конструкции и геометрические параметры инструмента

Fig. 2. Structural elements and geometric parameters of the tool

Подача СОТС осуществлялась по задней поверхности зубьев фрезы при помощи специального дозирующего устройства фирмы Noga «Minicool» (рис. 3), предназначенного для реализации технологии минимального смазывания (ТМС).

Измерение шероховатости обработанной поверхности Ra проводилось портативным профилометром мод. Time Group Inc. TR200 (рис. 4). Степень точности прибора соответствует третьему классу.

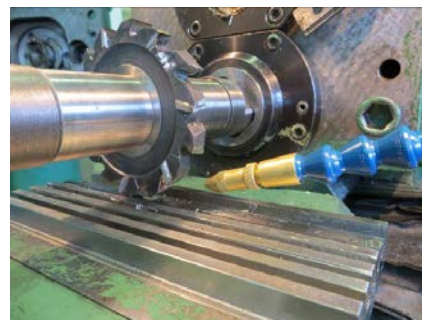


Рис. 3. Способ подачи СОТС в зону резания с использованием ТМС

Fig. 3. LCTM practice for cutting zone using LMF

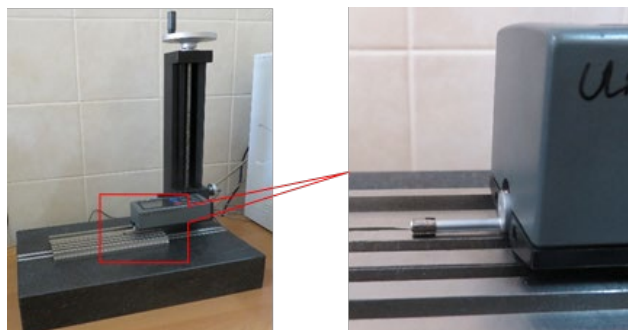


Рис. 4. Измерение шероховатости обработанной поверхности: общий вид профилометра модели TR200 со специальным программным обеспечением Time DataView For TR200

Fig. 4. Roughness measurement for the treated surface: a general view of the profilometer model TR200 with special software Time DataView For TR200

Исследуемая заготовка и схема измерения шероховатости обработанной поверхности изображена на рис. 5. Ось измерительного индукционного датчика с алмазным наконечником модели TS100 располагалась по нормали к измеряемой поверхности образца. Замеры проводились на каждом из уступов пути резания в трех равноудаленных друг от друга участках в начале (участок 1) в середине (участок 2) и в

конце пути резания (участок 3). В свою очередь каждый из участков представляет собой три параллельных отрезка (трассы) с базовой длиной измерения $L = 8,0$ мм. Результаты измерений статистически обрабатывались по критерию Стьюдента и устанавливались средние значения параметра Ra . Разброс результатов полученных значений не превышал 5,0 %.

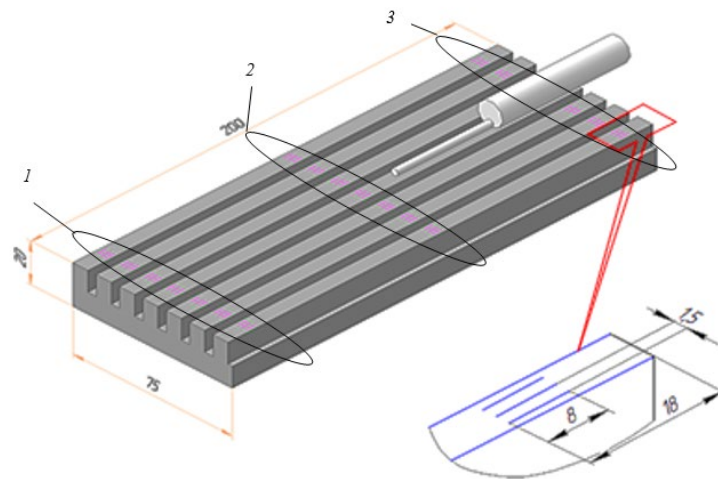


Рис. 5. Заготовка и схема измерения шероховатости обработанной поверхности

Fig. 5. Material blank and roughness measurement scheme for the treated surface

Моделирование шероховатости обработанной поверхности

Моделирование шероховатости обработанной поверхности проводилось в масштабном пространстве исходных данных $\bar{X}, \ln \bar{X}$. Выходной параметр шероховатости поверхности – в пространстве $\ln Y$. Информационная матрица экспериментальных данных реализовывалась по статическому плану,

который для каждой из исследуемых технологических сред состояли из 20 опытов, где каждый из режимных параметров варьировался на пяти уровнях. План охватывал всю область варьирования.

Основываясь на нормативных документах и данных литературных источников [11 – 13] были выбраны границы изменения контролируемых переменных. Пределы их изменения приведены в табл. 1.

1. Верхние и нижние границы контролируемых переменных

1. Upper and lower bounds of controlled variables

Границы изменения переменных	Значения контролируемых переменных		
	v , м/мин (X_1)	s_z , мм/зуб (X_2)	t , мм (X_3)
Верхние	50,0	0,3	2,0
Нижние	28,0	0,1	0,4

Задача построения моделей с использованием упрощенного алгоритма МГУА сводилась к определению функции:

$$M(\ln Y/\bar{X}, \ln \bar{X}) = F(\ln Y/\bar{X}, \ln \bar{X}, \bar{\Theta}), \quad (1)$$

где $M(\ln Y/\bar{X}, \ln \bar{X})$ – математическое ожидание средней величины $\ln Y$ при значениях контролируемых переменных; $F(\ln Y/\bar{X}, \ln \bar{X}, \bar{\Theta})$ – неизвестный по виду и структуре оператор (функциональная связь); $\bar{\Theta} = \|\Theta_0, \Theta_1, \dots, \Theta_n\|$ – неизвестный вектор оцениваемых параметров.

Для получения этих моделей необходимо, прежде всего, знать критерий приработки и критерий затупления. В этом случае, за критерий приработки, при котором образуются упрочненные контактные слои инструмента, следует принимать установленные значения фаски износа по задней поверхности, после которого наблюдается снижение составляющей силы резания P_h . Таким образом, инструмент считался приработанным при обработке всухую и в присутствии И-20А, МР-99 – $h_{зпр} = 0,098 \dots 0,1$ мм, а в среде рапсового масла – $h_{зпр} = 0,084$ мм. Значение $h_{зпр}$ в среде касторового масла принято равным $0,07 \dots 0,077$ мм.

В качестве критерия затупления зуба фрезы после приработки была выбрана фаска затупления по задней поверхности $h_3 = 0,3$ мм.

Так для всех испытуемых инструментов в присутствии исследуемых в работе сред глубина резания принята минимальной из рекомендуемых значений и равной $t = 0,4$ мм, а подача на зуб максимальной из рекомендуемых при приработке подач и равной $s_z = 0,15$ мм/зуб. Скорость резания при приработке режущего инструмента для каждой серии испытаний была выбрана наибольшая из рекомендуемого диапазона, а именно – при сухой обработке и в присутствии И-20А и МР-99 скорость принималась равной $v_{пр} = 15 \dots 15,5$ м/мин, а при использовании рапсового и касторового масел – $v_{пр} = 27 \dots 28$ м/мин, что определялось приработкой инструмента [11 – 13].

Такой подход выбора условий испытаний продиктован возможностью проверки влияния на стойкость инструмента режимов образования упрочненных слоев резанием [14].

Классом функций, внутри которого синтезировалась модель, был разработан класс степенных номиналов.

В результате обработки экспериментальных данных были получены следующие модели, адекватно описывающие шероховатость обработанной поверхности:

– сухая обработка (относительная ошибка – 8,0 %):

$$\ln Ra = 1,1 + 6,19 \cdot 10^{-2} \cdot v_c \cdot t + 3,45 \cdot 10^{-3} \cdot s_z \cdot \ln s_z \cdot v_c^2 \cdot t^2 + 6,7 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 \cdot \ln v_c \cdot v_c + 2,15 \cdot s_z \cdot t; \quad (2)$$

– И-20А (относительная ошибка – 12 %):

$$\ln Ra = 1,97 + 5,87 \cdot s_z \cdot \ln t - 4,098 \cdot 10^{-1} \cdot v_c \cdot s_z^2 \ln t; \quad (3)$$

– МР-99 (относительная ошибка – 23 %):

$$\ln Ra = 1,59 - 5,76 \cdot 10^{-1} \cdot v_c \cdot s_z + 4,21 \cdot 10^{-2} \cdot s_z^2 \cdot v_c^2 + 6,27 \cdot 10^{-5} \cdot \ln t \cdot s_z^5 \cdot v_c^4; \quad (4)$$

– рапсовое масло (относительная ошибка – 18 %):

$$\ln Ra = -0,78 + 1,18 \cdot 10^{-1} \cdot v_c \cdot s_z + 1,3 \cdot 10^{-4} \cdot v_c^3 \cdot \ln t \cdot s_z^2; \quad (5)$$

– касторовое масло (относительная ошибка – 9,0 %):

$$\ln Ra = -0,51 + 2,44 \cdot s_z \cdot t - 9,6 \cdot 10^{-2} \cdot v_c \cdot s_z^3 \cdot t^2. \quad (6)$$

Анализ структуры полученных моделей (2) – (6) в виде зависимостей шероховатости от режимов фрезерования с использованием каждой из исследуемых технологических средств показывает, что на шероховатость обработанной поверхности оказывают влияние во взаимосвязи друг с другом исследуемые параметры режимов резания.

Вместе с тем, не зависимо от среды, в присутствии которой были получены модели, описывающие шероховатость обработанной поверхности в пределах исследуемых переменных, большое влияние на Ra оказывает глубина резания t .

Однако, в работах [1, 2] отмечается, что глубина резания на высоту микронеровностей обработанной поверхности не оказывает значительного влияния.

Такое противоречие об установившемся в теории резания металлов представлении влияния глубины резания на шероховатость поверхности

может быть объяснено, с одной стороны, тем, что исследования по взаимосвязанному влиянию режимов резания приработанным режущим инструментом с использованием различных сред при фрезеровании сталей аустенитного класса ранее не проводилось.

Это влияние глубины резания при фрезеровании таким инструментом может являться результатом изменения физико-механических свойств контактируемых поверхностей за счет образования упрочненных вторичных структур на трущихся поверхностях в результате приработки резанием.

Это влияние глубины резания на шероховатость поверхности может также объясняться и различным силовым нагружением [10, 15].

Статистически обработанные результаты экспериментальных испытаний, в сравнении с рассчитанными по моделям, приведены в табл. 2.

2. Экспериментальная проверка результатов моделирования

2. Experimental verification of simulation results

№ п/п	Среда	Режимы приработки	Режимы резания			Сравнение результатов		
			v_c , м/мин	s_z , мм/зуб	t , мм	$Ra_{экс}$, мкм	$Ra_{расч}$, мкм	ΔRa , %
1	Сухая обработка	$v_{пр} = 15,5$ м/мин; $s_z = 0,15$ мм/зуб; $t = 0,4$ мм	27,9	0,3	0,8	9,78	11,2	14,5
2			43,2	0,15	1,6	4,65	4,4	5,3
3			28,0	0,1	0,4	6,8	5,98	12,0
4			38,0	0,2	0,8	8,7	9,6	10,3
5	И-20А		27,45	0,3	0,4	3,7	3,6	2,7
6			38,0	0,1	0,4	5,1	4,83	5,3
7			37,8	0,2	0,8	6,1	6,25	2,5
8			27,5	0,15	2,0	10,8	11,0	1,9
9	МР-99		48,9	0,1	1,2	0,71	0,8	12,7
10			38,0	0,2	0,8	0,78	0,7	10,3
11			39,8	0,3	0,4	1,3	1,44	10,8
12			35,6	0,3	0,8	1,1	1,2	9,1
13	Рапсовое масло		27,51	0,1	0,8	3,7	3,52	5,1
14			48,0	0,25	2,0	3,82	3,52	4,9
15			38,0	0,2	0,8	1,57	1,39	11,5
16			28,0	0,25	1,2	1,12	1,08	3,6
17	Касторовое масло		43,3	0,1	0,8	0,64	0,73	14,1
18			27,7	0,3	1,6	1,58	1,61	1,9
19			38,0	0,2	2,0	1,46	1,41	3,5
20			38,6	0,2	0,8	0,78	0,79	1,3

Так в работах [1, 2] отмечается взаимосвязанное влияние на усилия резания глубины и подачи на зуб. При этом глубина резания оказывает большее влияние, нежели подача на зуб.

Изменение силового нагружения, в свою очередь, оказывает влияние на все явления, сопровождающие процесс резания для любого вида обработки, и определяет интенсивность этих явлений, в том числе, и на значение шероховатости поверхности.

В результате получены модели, адекватно описывающие шероховатость обработанной поверхности, по которым может быть определена степень влияния каждого и параметров режима резания.

Заключение

Впервые при моделировании основных характеристик процесса фрезерования стали 12Х18Н10Т фрезами из быстрорежущей стали был использован алгоритм МГУА, обеспечивающий синтез моделей по не большому количеству экспериментальных данных, в выбранных пределах изменения исследуемых переменных.

Показано, что влияние режимных параметров на образование микронеровностей проявляется в их тесной взаимосвязи. Их взаимное влияние по-разному проявляется в зависимости от используемых СОТС для заданных обрабатываемого и инструментального материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания: Учебник. Минск: ООО «Новое знание», 2006. 512 с.
2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
3. Голубков Ю.В., Ермолаева Н.В., Могусева М.С. Альтернативные смазочно-охлаждающие материалы на основе растительных масел // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2014. № 1. С. 32–35.
4. Виноградов Д.В. Применение смазочно-охлаждающих технологических средств при резании металлов: Учеб. пособие. Ч. 1: Функциональные действия. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 92 с.
5. Петруха П.Г., Чубаров А.Д., Стерлин Г.А. и др. Обработка резанием высокопрочных коррозионностойких и жаропрочных сталей / Под ред. П.Г. Петрухи. М.: Машиностроение, 1980. 167 с.
6. Родин П.Р., Равская Н.С., Касьянов А.И. Монолитные твердосплавные концевые фрезы. Киев: Вища школа, 1985. 64 с.
7. Ивахненко А.Г. Системы эвристический самоорганизации в технической кибернетике. Киев: Техника, 1971. 268 с.
8. Ивкович Б. Трибология резания: смазочно-охлаждающие жидкости / Под ред. П.И. Ящерицына. Минск: Наука и техника, 1982. 144 с.
9. Худобин Л.В., Бабичев А.П., Булыжев Е.М. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.
10. Якубов Ч.Ф. Упрочняющее действие СОТС при обработке металлов резанием. Симферополь: ОАО «Симферопольская городская типография» (СГТ), 2008. 156 с.
11. Гуревич Я.Л., Горохов М.В., Захаров В.И. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник. М.: Машиностроение, 1986. 240 с.
12. Локтев А.Д., Гушин И.Ф., Батуев В.А. Общемашиностроительные нормативы режимов резания: Справочник: Том 1. М.: Машиностроение, 1991. 640 с.
13. Гузеев В.И. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с ЧПУ: Справочник. М.: Машиностроение, 2005. 368 с.
14. Ваниев Э.Р., Скакун В.В., Джемалядинов Р.М. Повышение стойкости лезвийных инструментов с износостойким покрытием путем направленного действия СОЖ в начальный период обработки // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2019. № 1. С. 245–251.
15. Ким В.А., Якубов Ф.Я., Схиртладзе А.Г. Мезомеханика процессов контактного взаимодействия при трении и резании металлов: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Конструкторско-технологическое

обеспечение машиностроительных производств». Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2017. 244 с.

REFERENCES

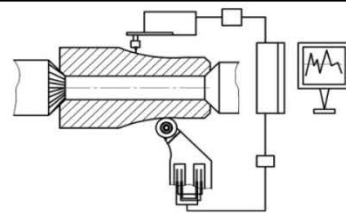
1. Yashcheritsin P.I., Feldstein E.E., Kornievich M.A. Theory of cutting: Textbook. Minsk: LLC «New Knowledge», 2006, 512 p.
2. Bobrov V.F. Fundamentals of the theory of metal cutting. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 344 p.
3. Golubkov Yu.V., Ermolaeva N.V., Mogucheva M.S. Alternative lubricating and cooling materials based on vegetable oils // Equipment and technologies for oil and gas complex, 2014, no. 1, pp. 32–35.
4. Vinogradov D.V. The use of lubricating and cooling technological tools for metal cutting: Textbook. Part 1: Functional actions. Moscow: Bauman Moscow State Technical University publishing house, 2013. 92 p.
5. Petrukha P.G., Chubarov A.D., Sterlin G.A. et al. Cutting of high-strength corrosion-resistant and heat-resistant steels / ed. by P.G. Petrukha, Moscow: Mashinostroenie, 1980. 167 p.
6. Rodin P.R., Ravskaya N.S., Kasyanov A.I. Monolithic carbide end mills. Kiev: Vishcha shkola, 1985. 64 p.
7. Ivakhnenko A.G. Systems of heuristic self-organization in technical cybernetics. Kiev: Technika, 1971, 268 p.
8. Ivkovich B. Tribology of cutting: lubricants and coolants / Edited by P.I. Lizarditsyn. Minsk: Science and Technology, 1982, 144 p.
9. Khudobin L.V., Babichev A.P., Bulyzhev E.M. Lubricating and cooling technological means and their application in cutting job: Handbook. M.: Mechanical Engineering, 2006, 544 p.
10. Yakubov Ch.F. Strengthening action of coolants under metal cutting. Simferopol: JSC «Simferopol city printing house» (SCP), 2008, 156 p.
11. Gurevich Ya. L., Gorokhov M. V., Zakharov V. I. et al. Cutting conditions for difficult-to-machine materials: handbook. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 240 p.
12. Loktev A.D., Gushchin I.F., Batuev V.A. General machine engineering normatives of cutting modes: Handbook: Volume 1. Moscow: Mashinostroenie, 1991, 640 p.
13. Guzeev V.I. Cutting conditions for turning and drilling-milling-boring machines with numerical control: Handbook, Moscow: Mashinostroenie, 2005, 368 p.
14. Vaniev E.R., Skakun V.V., Dzhemalyadinov R.M. Increasing the durability of blade tools with wear-resistant coating by directed action of coolant in the initial period of processing, Scientific notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University. 2019, Instrumentation, v. 1 (63), pp. 245–251.
15. Kim V.A., Yakubov F.Ya., Skhirtladze A.G. Mesomechanics of contact interaction processes under friction and cutting of metals: A textbook for students of higher educational institutions studying in the field of «Design and technological support of machine-building industries». Stary Oskol: Fine Science-intensive Technologies LLC, 2017, 244.

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 13.02.2024; одобрена после рецензирования 29.02.2024; принята к публикации 11.03.2024.

The article was submitted 13.02.2024; approved after reviewing 29.02.2024; assepted for publication 11.03.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №4 (154). С.29-40.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №4 (154). P.29-40.

Научная статья
УДК 621.91.01; 621.9.011
doi: 10.30987/2223-4608-2024-29-40

Трансформация информационной структуры как инструмент повышения эффективности многономенклатурного производства

Юлий Львович Чигиринский¹, Д.Т.Н.
Дмитрий Вадимович Крайнев², К.Т.Н.
Жанна Сергеевна Тихонова³, К.Т.Н.

^{1, 2, 3} Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

¹ julio-tchigirinsky@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5620-5337>

² krainevdv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8762-4251>

³ tikhonovazhs@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5047-0244>

Аннотация. Рассмотрены особенности функционирования многономенклатурного предприятия, в частности: технологической подготовки, оперативного управления и повышения эффективности производства. Освещены вопросы повышения конкурентоспособности многономенклатурного предприятия, определяющие требования к процессам управления и подготовки производства с ориентацией на обеспечение эффективной загрузки технологического оборудования, планирования работы производственных участков при сохранении высокой гибкости. Определены ключевые проблемы можно отметить: отсутствие справочно-статистической информации для расчетов и планирования применительно к условиям конкретного производства; недостаточный уровень взаимодействия между службами и производственными подразделениями; статичный подход к управлению динамической производственной системой; отсутствие эффективных каналов обратной связи, позволяющих отслеживать текущую производственную ситуацию для соответствующего анализа и выработки необходимых коррекций. Показано, что применение цифровых технологий и программных средств имеет существенный потенциал для решения задач в рассматриваемых производственных условиях. Существующие средства цифровизации позволяют значительно повысить уровень взаимодействия между подразделениями и взаимосвязь отдельных этапов подготовки и функционирования производства, доступность необходимой информации и оперативность ее передачи. Выявлены перспективы развития информационной среды предприятия в целях повышения эффективности технологической подготовки производства и оперативного управления производством. Определена необходимость наличия каналов обратной связи, позволяющих отслеживать текущую производственную ситуацию для соответствующего анализа и выработки необходимых коррекций в условиях стохастического характера производственных процессов и динамичности производства. Обоснована целесообразность интеграции в информационную среду предприятия цифровых производственных систем, построенных на базе систем адаптивного управления и наделенных технологическим интеллектом. Таким образом интеллектуализация производства требует модернизации принципов построения информационного обеспечения производственного процесса.

Ключевые слова: информационная среда предприятия, искусственный технологический интеллект, оперативное планирование, многономенклатурное производство

Для цитирования: Чигиринский, Ю.Л., Крайнев Д.В., Тихонова Ж.С. Трансформация информационной структуры как инструмент повышения эффективности многономенклатурного производства // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 4 (154). С. 29–40. doi: 10.30987/2223-4608-2024-29-40

Transformation of the information structure as a tool for efficiency increase in high-variety production

Yuliy L. Chigirinsky¹, D. Eng.

Dmitry V. Krainev², Ph.D. Eng.

Zhanna S. Tikhonova³, Ph.D. Eng.

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

¹ julio-tchigirinsky@yandex.ru

² krainevdv@mail.ru

³ tikhonovazhs@yandex.ru

Abstract. Characteristics of high-variety production enterprise are viewed, in particular: technological training, operational management and improvement of production efficiency. The issues of increasing the competitiveness of a high-variety production enterprise, determining the requirements for the processes of management and preparation of production with a focus on ensuring efficient loading of technological equipment, planning the operation of production sites while maintaining high flexibility, are highlighted. The key problems identified. The following ones can be noted: the lack of statistical information for calculations and planning in relation to the conditions of a particular production; insufficient level of interaction of services and production units; a static approach to managing a dynamic production system; lack of effective feedback channels that allow tracking the current production situation for appropriate analysis and giving necessary corrections. It is shown that the use of digital technologies and software has significant potential for solving problems in the considered production conditions. The existing means of digitalization make significant improvements possible in the level of interaction between departments and the interconnection of individual stages of preparation and operation of production, the availability of necessary information and quick delivery of it. The prospects for the development of the enterprise information environment for improving the efficiency of technological preparation of production and its operational management are identified. The necessity of having feedback channels that allow monitoring the current production situation for appropriate analysis and development of necessary corrections in the conditions of the stochastic nature of production processes and enterprise agility is determined. The practicability of integrating digital production systems based on adaptive management systems having technological intelligence into the information environment of an enterprise is reasoned out. Thus, the intellectualization of production requires the modernization of the principles of building information support for the production process.

Keywords: enterprise information environment, artificial technological intelligence, operational planning, high-variety production

For citation: Chigirinsky Yu.L., Krainev D.V., Tikhonova Z.S. Transformation of the information structure as a tool for efficiency increase in high-variety production / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 4 (154). P. 29–40. doi: 10.30987/2223-4608-2024-29-40

Введение

Современные экономические условия определяют необходимость комплексного развития отраслей производственной сферы. Ограничения внешней торговли и уход иностранных компаний оказали существенное влияние на развитие обрабатывающей промышленности. Несмотря на то, что обрабатывающие отрасли в период 2021 – 2023 гг. имели один из наилучших показателей роста, их динамика была достаточно нестабильной. Здесь можно отметить рост сферы ОПК за счет госзаказа и спад в сфере автомобилестроения [1, 2]. Существенное неблагоприятное воздействие на производственную деятельность оказали санкционные ограничения в отношении поставок оборудования, технологий, а

также рост стоимости материалов и комплектующих [3].

Тем не менее, рядом экспертов отмечается значимый потенциал восстановительного подъема отечественной промышленности и необходимость работы в данном направлении. Любые кризисные времена помимо вызовов предоставляют и большие перспективы для развития.

В современных условиях российская экономика сталкивается с огромным количеством вызовов. Так необходимость обеспечения собственных потребностей в области машиностроения оказала стимулирующее воздействие на развитие многономенклатурных производств.

Конструкции машин и аппаратов постоянно усложняются, объяснимым становится и необходимость обеспечения постоянно

растущих функциональных требований к отдельным деталям и их поверхностям в соответствии с современным уровнем развития науки и техники. Кроме того, все большую роль играет кастомизация продукции без потерь надежности, долговечности и ремонтпригодности. Фактически, это означает снижение серийности производства и рост удельного веса предприятий с многономенклатурным типом производства в общей структуре машиностроения [4].

Функционирование многономенклатурного производства сопряжено с такими факторами как: динамично изменяющийся спрос на продукцию и высокая динамика производства; сочетание различных типов производства; короткий жизненный цикл изделий; нехватка оборотных средств; рост производственных затрат; широкий диапазон изменения длительности производственного цикла изделий; большая доля унифицированных, нормализованных и стандартизованных деталей; наличие дискретных и непрерывных процессов; тесная связь оперативного управления производством с другими функциональными подсистемами управления предприятием. Все вышеперечисленное диктует свои требования к процессам управления и подготовки производства с

ориентацией на обеспечение эффективной загрузки технологического оборудования, планирования работы производственных участков при сохранении высокой гибкости [5].

Таким образом, решение этих вопросов является актуальным направлением работы и требует решения целого комплекса задач.

Технологическая подготовка в условиях многономенклатурного производства

Эффективность работы и конкурентоспособность машиностроительного предприятия определяется не только уровнем технологического оборудования и квалификацией рабочих, но и правильной организацией управления производственными процессами. Особенности организации устанавливает серийность производства. Каждый тип производства обуславливает построение ресурсных потоков, применяемых станков, транспортную систему и многое другое. Специфические особенности многономенклатурного производства вызывают многофакторные проблемы управления при решении задач планирования, организации и регулирования производства с оперативным реагированием и высокими требованиями к достоверности получаемых результатов (рис. 1).



Рис. 1. Проблемы технологической подготовки многономенклатурного производства

Fig. 1. Problems of technological preparation of high-variety production

Возможности предприятия по изготовлению продукции определяются наличием соответствующего технологического оборудования обеспечивающего выполнение тех или иных методов обработки и формообразования. Как правило, для обеспечения высокой гибкости производства предпочтительной альтернативой широкому станочному парку является применение комплексных станков с ЧПУ с широкими возможностями по геометрии изготавливаемых деталей и высокими точностными показателями и повторяемостью. Такие станки экономят производственные площади, имеют высокий коэффициент загрузки, могут быть достаточно легко интегрированы в единую информационную сеть предприятия, что также

создает дополнительные преимущества. Вместе с тем растет стоимость приобретения и монтажа, а также обслуживания, эксплуатации, квалификации персонала, средств программирования и моделирования.

Конкурентоспособность производства определяется не только парком оборудования и его технологическими возможностями, но и оперативностью реализации всех этапов технологической подготовки без потерь надежности производственного процесса и обеспечения требуемого качества изделий. А особенности организации производства, напрямую влияют на методологию технологической подготовки производства.

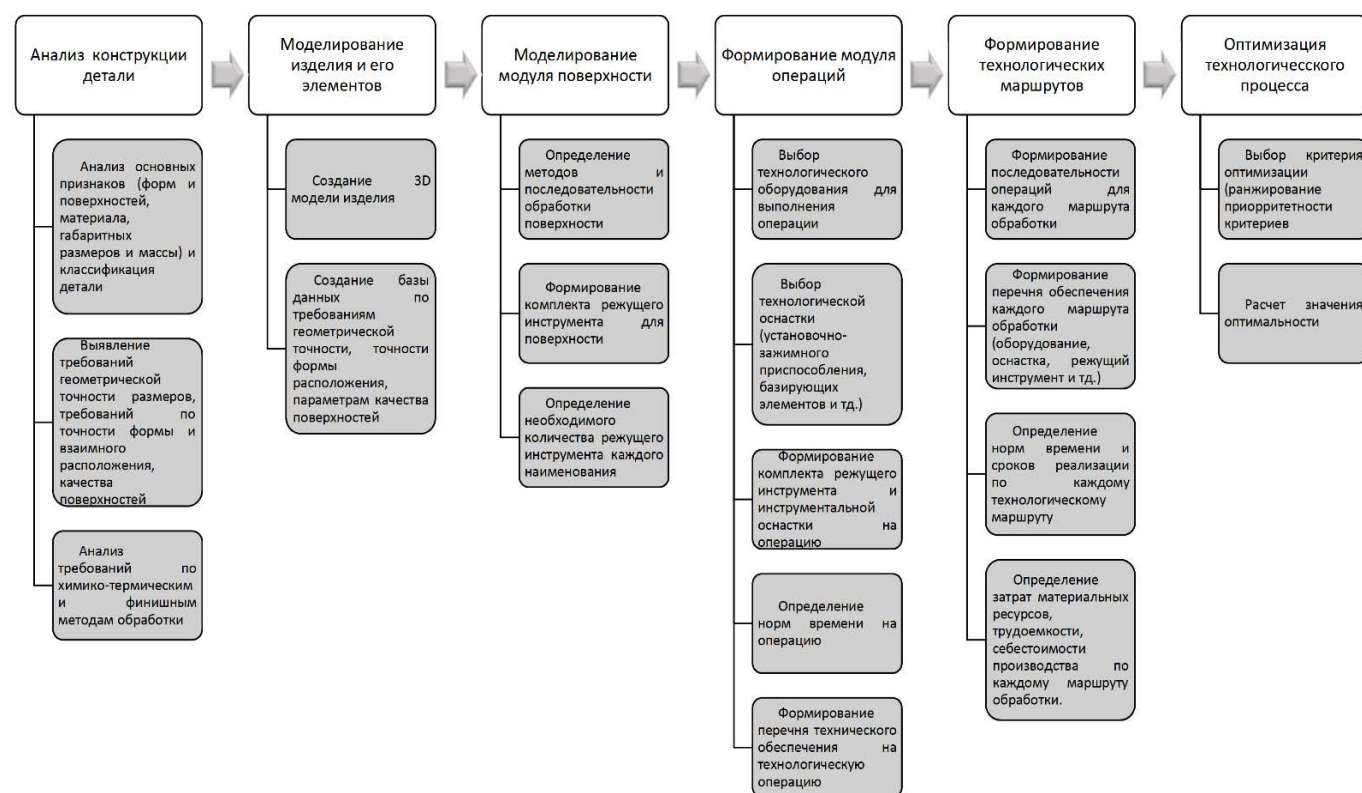


Рис. 2. Декомпозиционная схема технологической подготовки производства

Fig. 2. Decomposition scheme of technological preparation of production

В процессе технологической подготовки производства (ТПП) решаются технологические, экономические и организационные задачи, каждая из которых тесно взаимосвязана с другими. В первую очередь (рис. 2) проводится анализ конструктивных особенностей детали (требуемая точность размеров,

параметры качества поверхностей и физико-механические свойства материала детали) с целью определения технологических задач. В дальнейшем контур детали дифференцируется на модули поверхностей, для которых выбираются методы формообразования и параметры процесса обработки. Здесь также в

зависимости от типа и технических характеристик определяется перечень допустимых методов обработки каждой поверхности и применяемого / имеющегося технологического оборудования. Для каждого маршрута обработки составляются комплекты режущего инструмента и технологической оснастки. Определяются режимы резания и нормы времени. Помимо того, выявляется трудоемкость операций и загрузка станков, определяется необходимое количество и разновидности оборудования, количество и квалификацию работников, устанавливаются нормы расхода материалов и многое другое.

Невысокая серийность выпуска продукции в условиях многономенклатурного производства сказывается на существенной доли затрат на технологическую подготовку, которые могут достигать до 25 % от себестоимости изготовления [6]. В общем объеме затрат на технологическую подготовку до 80 % составляют затраты связанные с проектированием и изготовлением специальной технологической оснастки (40 % – проектирование, 60 % – изготовление), 5 % составляют затраты, связанные с решением общих вопросов, 5 % составляют затраты на проектирование технологических процессов, 7 % – затраты на управление ТПП, 3 % – затраты на программирование и настройку программных средств [7].

Возможные варианты реализации обработки формируют некоторую сетевую структуру маршрутного технологического процесса, по которой производится оптимизация и определяется маршрут обработки согласно выбранных критериев [8].

Оптимизация требует систематизации, организации хранения, обновления, поиска и актуализации технических и экономических данных, а также их интеграции. Многовариантность технологии обработки детали и необходимость достижения различных взаимно противоречивых целей в процессе изготовления изделия обосновывает использование комплексных критериев оптимизации, выражаемых целевой функцией с регулируемыми весовыми коэффициентами, значения которых определяются текущими целями и задачами предприятия [9, 10]. Сложность формализации

технологического процесса и отдельных операций определяют необходимость наработки технологической информационной базы данных в условиях конкретного предприятия.

Немаловажным вопросом является организация эффективной системы оперативного управления в связи с необходимостью учета динамики спроса и динамики производства. Такая система должна обладать гибкостью к динамике номенклатуры и объемов выпуска; исключать укрупненные и условные планово-учетные единицы; обеспечивать высокую точность оперативных плановых заданий и согласованность целей и показателей на отдельных периодах для различных структурных подразделений; вести подетальный оперативно-производственный учет; осуществлять регулярный контроль, анализ и регулирование производства [11]. Более того, оперативная система управления для различных типов производства (единичного, мелко-, средне- и крупносерийного) должна строиться на единой методологической основе, с едиными алгоритмами и моделями.

Высокая загрузка персонала, оборудования, сложности синхронизации операций в рамках маршрута обработки, увеличение сроков выполнения задач на каждом этапе ведет к росту длительности изготовления изделий в условиях многономенклатурного производства. Кроме того, в процессе производства часто возникает необходимость корректировок, что еще больше усложняет технологическую подготовку производства.

Одной из ключевых проблем, снижающих эффективность производства, становятся непроизводственные потери, связанные с выполнением работы не предусмотренной производственным заданием, но вызванной производственной необходимостью.

В качестве главной причины непродуктивных потерь отмечается необходимость согласования требований технологического процесса и текущих производственных условий. Зачастую производственные подразделения применительно к текущей ситуации и на основе своей квалификации заменяют технологическое оборудование и оснастку, схему базирования, а также режущий инструмент и режимы

обработки, что может вести к появлению брака [12].

Следует отметить, что к браку может вести не только недостаточная компетентность производственных, но и технологических подразделений, а также низкий уровень взаимодействия между ними. Кроме того, нарушается график выпуска продукции и затрудняется планирование, учет, контроль, анализ и регулирование производства и в итоге сбалансированность целей и показателей результативности деятельности предприятия, оперативное управление производственными запасами и затратами. Важность вопросов оперативного управления, учета и управления незавершенного производства подтверждается и работами авторов [13].

Таким образом, в качестве ключевых проблем можно отметить: отсутствие справочно-статистической информации применительно к условиям конкретного производства; недостаточный уровень взаимодействия между службами и производственными подразделениями; статичный подход к управлению производством, являющимся динамической системой; отсутствие эффективных каналов обратной связи, позволяющих отслеживать текущую производственную ситуацию для соответствующего анализа и выработки необходимых коррекций.

Цифровые средства повышения эффективности функционирования многономенклатурного производства

К настоящему времени созданы и функционируют технологии, имеющие достаточный потенциал для решения указанных проблем, в частности в условиях многономенклатурного производства.

Одним из перспективных направлений развития производственной сферы, реализуемых на государственном уровне, является цифровизация. Концепция «цифрового производства» изложенная в рамках государственной программы «Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности», утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 года № 328,

предполагает, что интеллектуализация производственных систем на основе современных информационных технологий станет одним из основных факторов повышения конкурентоспособности российских промышленных предприятий [14].

На современных машиностроительных предприятиях широко используются такие цифровые решения как САПР, объединяющие CAD/CAE/CAM и PDM-системы (рис. 3). Последние осуществляют управление проектными данными инженерно-технической информации на всех этапах проектирования и координируют работу CAD/CAE/CAM систем. Управление массивами данных на всех этапах жизненного цикла изделия осуществляют PLM-системы. Они же обеспечивают интеграцию не только САПР, но и MES, ERP, PDM, SCM, CRM и других автоматизированных систем [15].

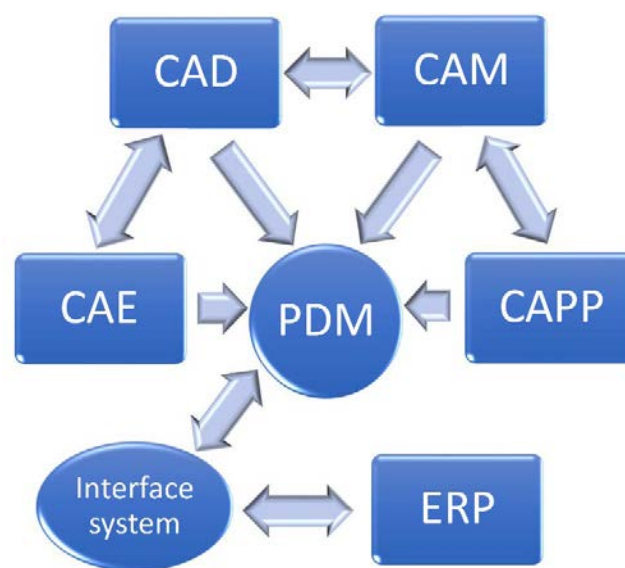


Рис. 3. Схема взаимодействия модулей информационной среды функционирования производства

Fig. 3. Scheme of interaction of modules of the information environment of production performance

В настоящее время достаточно четко прослеживается тенденция интеграции изначально специализированных CAD/CAE/CAM систем в единую среду создания изделия «от идеи до реализации», что функционально должно обеспечить решение таких задач как:

планирование, проектирование, проведение изменений и архивация. Это означает снижение ресурсоемкости и трудоемкости проведения проектно-конструкторских работ, а также повышение производительности труда и в итоге прибыль организации [16].

Одним из примеров практической реализации описанной выше концепции является САПР ТП ВЕРТИКАЛЬ, в которой на основе импортированной модели изделия создается комплексная структурно-графическая база данных технологического процесса [17], что позволяет связать цифровую модель изделия с технологическим маршрутом ее изготовления и механическими переходами технологического процесса. Теоретической основой создания данной системы стали разработки профессора Базрова Б.М. [18].

В рамки концепции единой информационной автоматизированной среды укладывается и совершенствование математического и методического аппарата конструкторского и размерного анализа изделия, позволяющие системе автоматизированного планирования технологических процессов выбирать рациональные технологии изготовления [19].

Разработанные программные средства помогают решать и задачи планирования, направленные на снижение производственных затрат за счет исключения простоя оборудования. Для составления расписаний как всего производства, так и отдельных производственных подразделений (цеха и участки) применяются системы планирования и обеспечения производственного процесса (APS, MES, ERP). К сожалению, перечисленные средства не лишены определенных недостатков. Функциональные алгоритмы данных систем имеют эвристический характер и зачастую не учитывают транспортные операции, а также переналадку оборудования, регулирование режимов обработки или настройку исполнительного размера и др. Как следствие разработанные планы-графики и производственное расписание будет с высокой вероятностью нарушаться [20].

Таким образом, существующие средства цифровизации позволяют существенно

повысить уровень взаимодействия отдельных этапов подготовки и функционирования производства, доступность необходимой информации и оперативность ее передачи, но для комплексного решения задачи повышения эффективности предприятия необходимо соответствующее информационное обеспечение.

В качестве информационного обеспечения при технологической подготовке традиционно используются справочные данные, сведенные в табличные логические модели. Классическим примером тому являются таблицы достижимой экономической точности обработки, которые охватывают наиболее распространенные методы обработки и содержат сведения о точности размеров, шероховатости поверхности и величине дефектного слоя. На этом принципе основываются основные справочные и учебные материалы для технологических специальностей. Табличные базы не требуют значительных объемов хранилищ, являются доступными и не вызывают затруднений в работе, однако не лишены определенных недостатков.

Прежде всего, не учитывается стохастический характер процесса обработки, фактор технологической наследственности (фактически не учитывается предыдущие операции, в том числе изменение параметров поверхностного слоя детали) и зависимость результатов обработки от технологических возможностей конкретного производства. Названные проблемы требуют существенного расширения объема информационной базы и, в ряде случаев, модернизации логической структуры информационных массивов.

Все вышеперечисленное выступает предпосылкой изменения принципов построения информационного обеспечения ТПП. Одним из наиболее перспективных направлений является технологию хранения и обработки больших объемов информации с использованием гибридных многомерных информационных HOLAP-структур, что позволяет упростить переход к оптимальному проектированию с использованием вероятностных таблиц точности обработки. Кроме того, единый информационный массив может

расширяться за счет наработки данных в рамках конкретного предприятия на основе анализа существующих и создаваемых методов обработки. Тем самым нарабатывается информационное обеспечение, актуализированное применительно к условиям конкретного производства и определяющее высокую надежность и достоверность сформированных моделей [9].

Это требует наполнения информационных структур данными непосредственно с производства (участков, операций и т. д.). Существенно облегчают решение данной задачи цифровые измерительные средства, современные модели которых позволяют работать с поддержанием технологии беспроводной передачи данных не только между прибором и компьютером, но и между отдельными приборами. Подобные возможности закономерно ведут к эволюции производственных систем измерения и контроля, а также учета измерительной информации. Однако даже эти средства не позволяют в полной мере обеспечить сплошной контроль изделия на всех этапах производства.

Кроме того, некоторые характеристики как выпускаемых изделий или же, например режущего инструмента требуют использования разрушающих методов контроля, что в условиях производства не всегда является приемлемым.

Вместе с тем контроль и измерения требуются и при выполнении технологических операций с целью обеспечения формирования требуемых параметров изделия в установленном допуске. Характер же большинства процессов обработки существенно ограничивают использование прямых измерений, в отличие от косвенных измерений. Это позволяет не только выполнять мониторинг хода технологической операции, но и строить системы адаптивного управления, в том числе на базе технологического оборудования с ЧПУ.

Иначе говоря, естественное развитие производственного оборудования до уровня цифровых технологических систем [21], обладающих определенной степенью автономности за счет приобретения

«технологического интеллекта» [22] позволяет не только решить задачу повышения эффективности операций, но и информировать о длительности, динамике технологических операций вышестоящие системы управления производством. Таким образом, цифровое производство должно опираться на разработки, связанные с применением адаптивного управления производственными процессами» [15].

Цифровые производственные системы, как следующий этап развития систем адаптивного управления и обладающие технологическим интеллектом, должны строиться на информационных каналах мониторинга процесса резания, применимых в производственных условиях и не требовать существенного изменения принципов построения технологического оборудования.

Поскольку в условиях реального производства в качестве информационных каналов отслеживания хода процесса обработки при вышеописанных условиях могут быть использованы косвенные характеристики (измерения термо-ЭДС, динамометрические, виброакустические измерения), то повышение уровня надежности системы возможно за счет их интеграции и совместного анализа. Кроме того, это требует накопления информационного массива данных в памяти с целью обучения и развития системы. Коррекцию же режимов резания целесообразно построить в виде многоуровневой поэтапной оптимизации в соответствии с требуемыми характеристиками результата обработки [23].

Расширение возможностей технологического оборудования с ЧПУ за счет установки модуля адаптивного управления и интеграция производственной системы в информационную сеть позволяет изменить порядок технологической подготовки и оперативного управления производственным подразделением (рис. 4).

Получив производственное задание, включающее параметрическую цифровую модель изделия, объем выпуска и прочую информацию о технологическом оборудовании, оснастке и инструменте и т. д., технолог с помощью соответствующих программных

средств (CAM, CAPP) может разработать по-операционный маршрут обработки, управляющие программы для требуемых станков с ЧПУ и распределить технологические задания по подразделениям. После укомплектования и настройки занятых производственных единиц оборудования операторами ими же осуществляется контроль выполнения обработки. При штатном режиме работы с цифровой производственной системы по каналам обратной связи поступает информация о динамике и длительности технологической операции, которая учитывается в MES и других производственных системах более высокого уровня. В случае выхода за допустимую

область регулирования режимов обработки адаптивная система сообщает оператору о невозможности обеспечения требований и необходимости корректировки технологической операции (изменении схемы базирования, последовательности обработки и т. д.) для передачи информации технологу.

Это позволяет не только сократить длительность этапа технологической подготовки, накопить базу технологической информации применительно к данному производству, но и повысить эффективность оперативного управления.

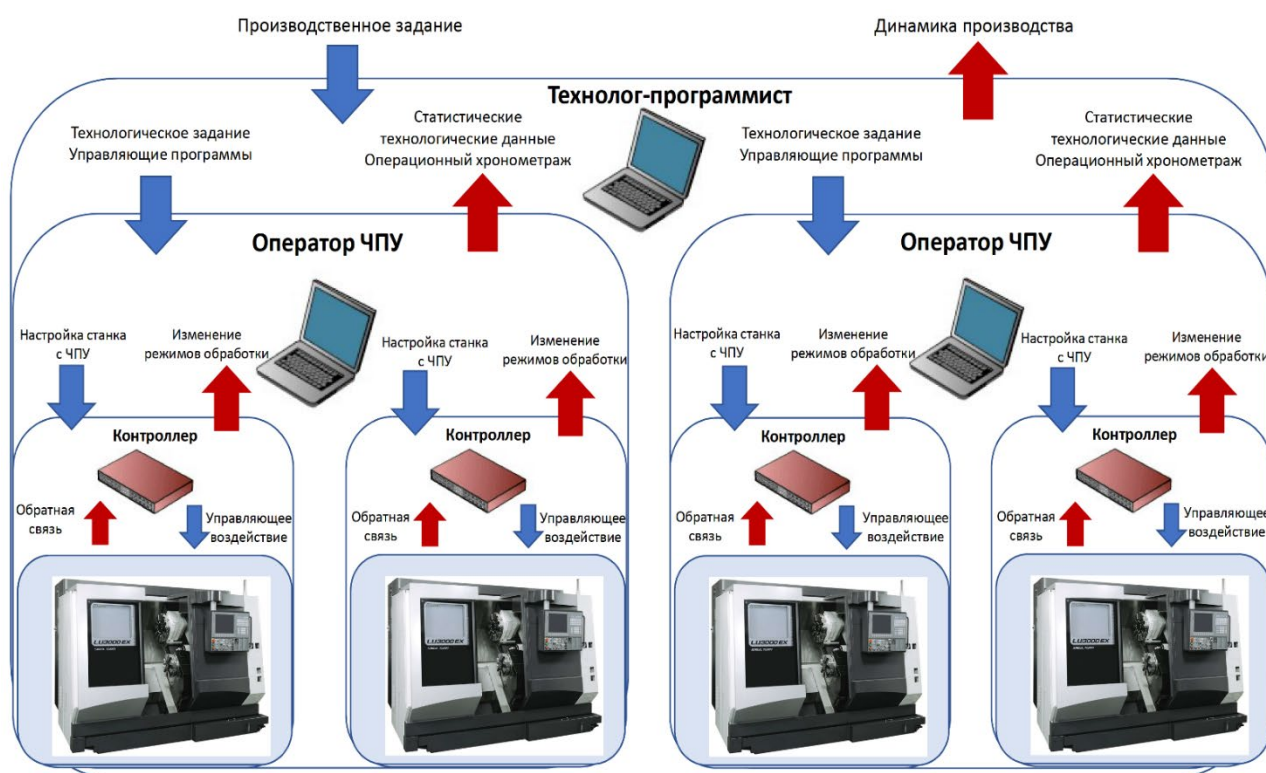


Рис. 4. Схема взаимодействия цифровой производственной системы с информационной средой предприятия

Fig. 4. Scheme of interaction of the digital production system with the information environment of the enterprise

Выводы

Функционал современных программных средств обеспечения организации и планирования промышленного производства имеет существенный потенциал развития за счет включения в информационную среду

предприятия основного обрабатывающего оборудования

Повышение эффективности производства на современном этапе развития отечественного машиностроения требует глубокой модернизации принципов построения информационного обеспечения производственного процесса, в том числе, в отношении идей

«Индустрии 4.0» и расширения функциональных возможностей основного оборудования металлообрабатывающих производств – в плане «интеллектуализации» систем ЧПУ и, в частности, развития систем адаптивного управления процессами обработки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Промышленное** производство в России. 2023: Стат.сб. / Росстат. М.: 2023. 259 с.

2. **Тенденции** развития и модернизация промышленности регионов России. Итоги 2022 года // Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова. URL: <https://www.рэу.рф/~file/44385/Тенденции+развития+и+модернизации+промышленности+регионов+России+выпуск+4.pdf> (дата обращения: 04.02.2024)

3. **Кузнецов С.В., Горин Е.А.** Промышленность макрорегиона «Северо-Запад»: адаптация к новым реалиям // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. 2023. № 3 (74). С. 17–23. DOI 10.52897/2411-4588-2023-3-17-23. EDN QAIQLS.

4. **Капитанов А.В., Митрофанов В.Г.** Анализ закономерностей развития переналаживаемых производственных систем многономенклатурного производства // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 5(184). С. 61–66. EDN VYWZWP.

5. **Вороненко В.П., Седых М.И., Шашин А.Д.** Проблемы проведения технологической подготовки производства в многономенклатурном производстве // Инновационные технологии в металлообработке: Всероссийская научно-практическая заочная конференция с международным участием: сборник научных трудов (посвящается 90-летию Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, д.т.н., профессора Л.В. Худобина), Ульяновск, 25 ноября 2018 года / Ответственный редактор Н.И. Веткасов. Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2019. С. 326–330. EDN BBCRNJ.

6. **Анализ** существующих методов технической подготовки мелкосерийного производства <http://pereosnastka.ru/> (Анализ существующих методов технической подготовки мелкосерийного производства – Совершенствование производства (pereosnastka.ru)) (дата обращения: 06.02.2024).

7. **Костюков В.Д., Сычев В.Н., Селиверстов А.И., Цырков А.В.** Проектирование технологической подготовки производства // Системы проектирования,

технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2010): ТРУДЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Москва, 19–21 октября 2010 года. М.: ООО «Аналитик», 2010. С. 293–297. EDN TCTBTT.

8. **Хрусталева И.Н., Любомудров С.А., Романов П.И.** Автоматизация технологической подготовки единичного и мелкосерийного производства // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 1. С. 113–121. DOI 10.18721/JEST.240111. EDN YUJEKA.

9. **Чигиринский Ю.Л.** Информационная структура маршрутного технологического проектирования // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. № 8 (98). С. 41–48.

10. **Селиванов С.Г., Гаврилова О.А.** Методы оптимизации технологических процессов в авиадвигателестроении // Information Technologies for Intelligent Decision Making Support ITIDS'2015 : Proceedings of the 3rd International Conference, Ufa, 18–21 мая 2015 года / General Chair Woman: Yusupova Nafisa. Том 1. Ufa: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2015. С. 188–193. EDN VKSKSR.

11. **Коновалова Г.И.** Концепция формирования конкурентоспособности машиностроительного предприятия в условиях жесткой рыночной конкуренции // Организатор производства. 2019. Т. 27, № 3. С. 92–101. DOI 10.25987/VSTU.2019.42.50.008. EDN NYWRLZ.

12. **Долгов В.А.** Повышение эффективности многономенклатурного машиностроительного производства путем адаптации работ технологического процесса к текущему состоянию технологической системы // Вестник МГТУ «Станкин». 2011. № 3(15). С. 83–87. EDN NWDWHR.

13. **Галимов М.Р., Якимович Б.А.** Постановка задачи применения показателя конструктивно-технологической сложности для управления затратами незавершенного производства // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2006. № 3(31). С. 107–108. EDN KAUNMT.

14. **Программа «Цифровая экономика Российской Федерации»**, утвержденная правительством РФ от 28 июля 2017 г. №1632-р. URL: <http://www.government.ru/docs/28653/> (дата обращения: 03.02.2024).

15. **Вороненко В.П., Шашин А.Д.** От адаптивного управления станочным оборудованием до адаптивного цифрового управления механообрабатывающим участком //

Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. 2018. № 2(45). С. 66–73. EDN URVKIV.

16. **Воробьев А.М., Щеглов Д.К., Данилова Л.Г. и др.** Концепция создания единой среды проектирования, как первый этап обеспечения жизненного цикла изделий. Опыт ОАО «КБСМ» // Журнал CADmaster, № 2(42). М.: Нанософт, 2008. С. 16–20.

17. **Вертикаль.** Система автоматизированного проектирования технологических процессов (2023) URL : <https://ascon.ru/products/vertikal/> (дата обращения: 06.02.2024)

18. **Базров Б.М.** Модульная технология в машиностроении. М.: Машиностроение, 2001. 368 с.

19. **Назарьев А.В., Бочкарев П.Ю., Митин С.Г.** Формализация стратегии выявления критичных требований к сборке при проведении технологической подготовки многономенклатурных машиностроительных производств // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 10(136). С. 42–48. DOI 10.30987/2223-4608-2022-10-42-48. EDN BOTHWO.

20. **Загидуллин Р.Р.** Влияние подналадки на точность планирования в системах классов APS, MES // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста: Мат. Всерос. науч.-технич. конф., Уфа, 26–28 февраля 2019 года. Уфа: «Уфимский государственный авиационный технический университет», 2019. С. 133–139. EDN SJVJHU.

21. **Ингеманссон А.Р.** Основные положения методологии технологической подготовки производства и адаптивного управления в цифровых производственных системах для механической обработки // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 1 (248). С. 15–18. DOI :10.35211/1990-5297-2021-1-248-15-18.

22. **Плотников А.Л., Чигиринский Ю.Л., Тихонова Ж.С. и др.** Как научить систему ЧПУ решать технологическую задачу по выбору надёжных значений параметров процесса металлообработки // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 3(129). С. 32–39. DOI 10.30987/2223-4608-2022-3-32-39. EDN UCRIPT.

23. **Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В., Фролов Е.М.** Цифровизация машиностроительного производства: технологическая подготовка, производство, прослеживание // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 8 (134). С. 39–48. DOI : 10.30987/2223-4608-2022-8-39-48.

REFERENCES

1. Industrial production in Russia. 2023: Collection of papers / Rosstat. Moscow: 2023, 259 p.

2. Trends in the development and modernization of industry in the regions of Russia. 2022 year in review // Plekhanov Russian University of Economics. URL: <https://www.reu.ru/~file/44385/Trends+and+development+and+modernization+of+industries+and+regions+Russia+issue+4.pdf> (accessed on 02/04/2024)

3. Kuznetsov S.V., Gorin E.A. Industry of the macro-region «North-West»: adaptation to new realities // The economy of the North-West: problems and prospects of development, 2023, no. 3 (74), pp. 17–23. DOI 10.52897/2411-4588-2023-3-17-23. EDN QAIQLS.

4. Sokolov A.Yu. Improving the organization and planning of single and small-scale production in the conditions of using CNC machines: Dissertation PhD in Economics: 08.00.05 / Author Alexey Yurievich Sokolov. Moscow, 1984. 189 p.

5. Voronenko V.P., Sedykh M.I., Shashin A.D. Problems of technological preparation of production in high-variety production // Innovative technologies in metalworking: All-Russian scientific and practical correspondence conference with international participation: collection of scientific papers (dedicated to the 90th anniversary of the Honored Worker of Science and Technology of the RSFSR, Doctor of Technical Sciences, Professor L.V. Khudobina), Ulyanovsk, November 25, 2018 / Responsible editor N.I. Vetkasov. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University, 2019. pp. 326–330. EDN BBCRNJ.

6. Analysis of existing methods of technical preparation of small-scale production <http://pereosnastka.ru/> (Analysis of existing methods of technical preparation of small-scale production - Improvement of production (pereosnastka.ru)) (accessed on 02/06/2024)

7. Kostyukov V.D., Sychev V.N., Seliverstov A.I., Tsytkov A.V. Designing technological preparation of production // Systems of design, technological preparation of production and management of stages of the life cycle of an industrial product (CAD/CAM/PDM - 2010): Proc. of the International Conference, Moscow, October 19-21, 2010. Moscow: LLC «Analyst», 2010. pp. 293–297. EDN TCTBTT.

8. Khrustaleva I.N., Lyubomudrov S.A., Romanov P.I. Automation of technological preparation of single and small-scale production // Scientific and technical bulletin of SPbPU. Natural and engineering sciences. 2018, vol. 24, No. 1. pp. 113–121. DOI 10.18721/JEST.240111. EDN YUJEKA.

9. Chigirinsky Yu.L. Information structure of route technological design // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2019, no. 8 (98), pp.41–48.

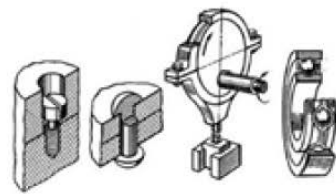
- 10.Selivanov S.G., Gavrilova O.A. Methods of optimization of technological processes in aircraft engine building // Information Technologies for Intelligent Decision Making Support ITIDS'2015 : Proceedings of the 3rd International Conference, Ufa, May 18-21, 2015 / General Chair Woman: Yusupova Nafisa. Volume 1. Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2015. pp. 188–193. EDN VKSKSR.
- 11.Konovalova G.I. The concept of forming the competitiveness of a machine-building enterprise in conditions of tough market competition // Organizer of production. 2019. Vol. 27, No. 3. pp. 92–101. DOI 10.25987/VSTU.2019.42.50.008. EDN NY-WRLZ.
- 12.Dolgov V.A. Improving the efficiency of high-variety machine-building production by adapting the work of the technological process to the current state of the technological system // Bulletin of MG TU «Stankin», 2011, no. 3(15), pp. 83–87. EDN NWDWHR.
- 13.Galimov M.R., Yakimovich B.A. Statement of the problem of applying the indicator of constructive and technological complexity to manage the costs of work in progress // Bulletin of Izhevsk State Technical University. 2006, no. 3(31), pp. 107–108. EDN KAUNMT.
- 14.The program «Digital Economy of the Russian Federation», approved by the Government of the Russian Federation dated July 28, 2017 No.1632-R. URL:<http://www.government.ru/docs/28653> / (accessed on 02/03/2024).
- 15.Voronenko V.P., Shashin A.D. From adaptive control of machine tools to adaptive digital control of a machining site // Bulletin of the Russian State Technical University named after P. A. Solov'yov. 2018, no. 2 (45), pp. 66–73. EDN URVKIV.
- 16.Vorobyov A.M., Shcheglov D.K., Danilova L.G., et al The concept of creating a unified design environment as the first stage of ensuring the life cycle of products. The experience of JSC «KBSM» // CADmaster Magazine, No. 2(42). Moscow: Nanosoft, 2008, pp. 16–20.
- 17.Vertical. Computer-aided design of technological processes (2023) URL : <https://ascon.ru/products/vertikal/> (accessed on 02/06/2024)
- 18.Bazrov B.M. Modular technology in mechanical engineering. Moscow: Mashinostroyeniye, 2001, 368 p.
- 19.Nazariev A.V., Bochkarev P.Y., Mitin S.G. Formal characterization of the strategy for identifying critical assembly requirements when staging multipart machinery productions // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 10(136), pp. 42–48. DOI 10.30987/2223-4608-2022-10-42-48. EDN BOTHWO.
- 20.Zagidullin R.R. Influence of the metal-cutting equipment corrective adjustment on planning accuracy in class systems APS and MES // Machine tool construction and innovative mechanical engineering. Problems and growth points: Maths All-Russian Scientific and Technical Conference, Ufa, February 26-28, 2019. Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2019, pp. 133–139. EDN SJVJHU.
- 21.Ingemansson A.R. The main provisions of the methodology of technological preparation of production and adaptive management in digital production systems for mechanical processing // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2021, no. 1 (248), pp. 15–18. DOI :10.35211/1990-5297-2021-1-248-15-18.
- 22.Plotnikov A.L., Chigirinsky Yu.L., Tikhonova Zh.S., et al. How to teach a CNC system to solve a technological problem of choosing reliable values of the parameters of the metalworking process // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 3(129), pp. 32–39. DOI 10.30987/2223-4608-2022-3-32-39. EDN UCRIPT.
- 23.Chigirinsky Yu.L., Krainev D.V., Frolov E.M. Digitalization of machine-building production: technological preparation, production, control // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 8 (134), pp. 39–48. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-8-39-48

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 16.02.2024; одобрена после рецензирования 26.02.2024; принята к публикации 05.03.2024.

The article was submitted 16.02.2024; approved after reviewing 26.02.2024; assepted for publication 05.03.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №4 (154). С.41-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №4 (154). P.41-48.

Научная статья
УДК 621.71; 621.865.8; 629.33
doi: 10.30987/2223-4608-2024-41-48

Высокотехнологичное автосборочное производство

Любовь Николаевна Иванова¹, к.т.н.

Сергей Евгеньевич Иванов², к.ф.-м.н.

¹ Санкт-Петербургский морской государственный технический университет,
Санкт-Петербург, Россия

² Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹ 45is@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6880-0897>

² serg_ie@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2366-9458>

Аннотация. В современном автомобильном производстве для всех четырех основных производственных этапов: прессовое, сварочное, покрасочное и сборочное производство широко применяются высокотехнологичные роботизированные комплексы и автосборочные линии. В работе рассматривается высокотехнологичное автосборочное производство с внедрением промышленных роботов-манипуляторов. Проведены исследования эффективности и производительности автомобильного производства при использовании роботизированной сборки. Представлен краткий обзор научных работ по автоматизации производства с применением роботизированных комплексов. В состав рассмотренных роботизированных комплексов входят различные роботы: сборщики, манипуляторы, вспомогательные роботы. Срок окупаемости роботизированного комплекса составляет от трех до пяти лет. Роботизированные комплексы успешно применяются на различных заводах, на заводе Volkswagen применяются 115 роботов, на заводе Renault – 112 роботов, на заводе Nissan – 106 роботов. Средний временной период сборки одного базового изделия автомобиля на заводе составляет 25 ч. Рассмотрены основные характеристики роботизированной автомобильной сборки: такт сборочной линии; темп выпуска изделий; коэффициент загрузки сборочной линии. Оценивается влияние основных характеристик сборочной линии на производительность в роботизированном автомобильном производстве. Результаты показывают увеличение выпуска изделий до 10 % при повышении коэффициента загрузки на одну десятую. Расчет эффективности роботизированной линии сборки в автомобильном производстве показывает, что за пять лет прирост чистой прибыли только от одной роботизированной линии сборки, составит около пяти миллионов рублей. Кроме того, существенно увеличится производительность выпуска изделий при роботизации сборки в автомобильном производстве. Также показана эффективность применения роботизированной линии сборки в автомобильном производстве.

Ключевые слова: высокотехнологичное производство, автомобильное производство, роботизированная сборка, промышленные роботы, роботы-манипуляторы, автоматизация производства

Для цитирования: Иванова Л.Н., Иванов С.Е. Высокотехнологичное автосборочное производство // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 4 (154). С. 41–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-41-48

High-tech incomplete vehicle production

Lyubov N. Ivanova¹, Ph.D. Eng.
Sergey E. Ivanov², Ph.D. Eng.

¹ St. Petersburg Maritime State Technical University, St. Petersburg, Russia

² National Research University IPMO, St. Petersburg, Russia

¹ 45is@mail.ru

² serg_ie@mail.ru

Abstract. In modern automotive production, high-tech robotic complexes and assembly lines are widely used for all four main production stages: pressing, welding, coating and assembly. The paper views industrial robot-assisted high-tech incomplete vehicle production using robotic manipulators. Studies have been conducted on the efficiency and productivity of automotive production through the use of a robotic assembly. Studies have been conducted on the efficiency and productivity of automotive production using a robotic assembly. A brief overview of scientific works on automation of production using robotic systems is presented. The discussed robotic complexes include various robots: assemblers, manipulators, auxiliary robots. The payback period of the robotic complex ranges from three to five years. Robotic complexes are successfully used in various factories, e.g. 115 robots are used at Volkswagen, 112 robots are used at Renault, 106 robots are used at Nissan. The average time period for assembling one basic vehicle product at the factory is 25 hours. The main characteristics of a robotic automobile assembly such as cycle of the assembly line; work pace; assembly line load factor are viewed. The influence of the main characteristics of the assembly line on productivity in robotic automotive production is estimated. The results show an increase in product output of up to 10% with an increase in the load factor by one tenth. The robotic assembly line efficiency calculation for automotive production shows that within five years the increase in net profit when using just one robotic assembly line will amount to about five million rubles. In addition, the output of products will significantly increase with RPA in automotive production. The effectiveness of using a robotized assembly line in automotive production is also shown.

Keywords: high-tech manufacturing, automotive production, robotic assembly, industrial robots, robotic manipulators, manufacturing automation

For citation: Ivanova L.N., Ivanov S.E., High-tech incomplete vehicle production / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 4 (154). P. 41–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-41-48

Введение

При современном развитии технологий производства появляются способы автоматизации значительной части процесса сборки в автомобильном производстве. Кроме того, современные методы позволяют компенсировать рутинный человеческий труд. Промышленные роботы-манипуляторы привлекаются для выполнения основных и вспомогательных технологических операций как по сборке, так и для установки деталей. При использовании роботизированных комплексов возможно собирать детали и узлы сложной геометрической формы с небольшим количеством переустановок, что, в свою очередь, повышает качество сборки. Вместе с тем, применяя роботы-манипуляторы, можно сделать более комфортными условия труда человека, а также снизить уровень профессиональных заболеваний. Основная цель работы выполнить оценку влияния применения промышленных роботов-манипуляторов в автосборочном производстве.

Процесс производства автомобиля с помощью роботизированных комплексов состоит из четырех основных производственных этапов: пресовое, сварочное, покрасочное и сборочное

производство. Первые три этапа производства практически полностью автоматизированы. В сборочном производстве автоматизация может достигать 10...30 % из-за большой сложности сборочных технологических операций. Следует отметить, что срок окупаемости роботизированного комплекса составляет от трех до пяти лет. В процессе сборки роботы-манипуляторы перемещают с транспортного конвейера крупные и тяжелые детали. Для подачи деталей на конвейер используются автоматические транспортеры, в частности, для непрерывной сборки в зависимости от конкретных технологических параметров применяют конвейер либо с непрерывным, либо с периодическим движением. Временной период между выпуском двух готовых автомобилей машин отражает такт сборки. Если используется поточная сборка, то на каждом рабочем месте последовательно выполняется конкретная сборочная операция, причем с общей синхронизацией и со сборочным циклом. Важно отметить, что каждая сборочная операция с использованием роботизированного комплекса планируется с доскональной точностью, буквально до секунды. Чтобы обеспечить непрерывность сборки, тысячи различных деталей поступают на сборочную линию синхронно.

Автоматизация в автосборочном производстве

Роботы на производственных линиях собирают различные компоненты изделия, производят манипуляции по подъему и точному размещению деталей. Конечный эффектор, рабочий орган манипулятора, как правило, включает в себя различные захваты. Важно, что сборочные роботы закрепляют детали с помощью датчиков силы и крутящего момента при установке детали. Роботизированная сборочная линия в автомобильном производстве включает в себя различные конвейерные роботы. Некоторые из этих роботов устанавливают, например, автокресла, другие – стекла в автомобиле. Самые важные части автомобиля, такие как кузов, двигатель, ходовая часть, электрооборудование содержат в себе огромное количество деталей элементов и узлов. Этот список элементов обязательно приводится в техническом описании инструкции автомобиля в соответствии с комплектацией.

Следует обратить внимание, что производство автомобиля стартует с прессового производства, далее, на этапе сварочного производства, приваривается кузов, осуществляется покраска. Затем следует этап сборочного производства, собираются шасси, двигатель, трансмиссию, рулевой механизм, ведущий мост, подвеску, ось, ступицу колеса и тормоза на линии оснастки двигателя. После этого уже собираются трансмиссия, генератор, гидроусилитель руля, радиатор, вентилятор и приводные ремни. Следующий шаг – собранный двигатель устанавливается на место, потом монтируется передний блок автомобиля: радиатор, декоративные решетки, фары, после чего устанавливаются колеса, сиденья, аккумулятор, бамперы и другие функциональные компоненты.

На современных промышленных предприятиях и заводах сборочных комплексов есть множество наглядных примеров продуктивного использования роботов манипуляторов. Следует отметить, что роботизированные сборочные комплексы успешно применяются на таких заводах, как Volkswagen применяются 115 роботов, на заводе Renault – 112 роботов, на заводе Nissan – 106 роботов. Приведем автомобильное производство на конкретном заводе Volkswagen.

Данное предприятие осуществляет производство известных во всем мире модели

автомобилей Golf, Tiguan, Touran. Площадь сборочного цеха завода предприятия Volkswagen достигает почти пятьдесят семь тысяч квадратных метров. Технологический комплекс включает 69 роботов, внедрено 48 манипуляторов. В технологическом процессе есть шаг, когда окрашенный кузов по конвейеру поступает в сборочный цех. Обязательная информация о комплектации, двигателе, коробке передач, которая необходимая для осуществления сборки передается посредством штрих-кода. Нужно отметить, что благодаря этой информации устанавливается около восьми тысяч компонентов кузова и интерьера. После этого, обору́дуются кабина водителя и монтируется электропроводка, затем кузов подключается к трансмиссии. И уже дальнейшим шагом проводится установка следующих элементов: приборная панель, сиденья, руль, подушки безопасности, после чего устанавливаются стекла, тормозные магистрали, бамперы и колеса. Готовые двери с остеклением монтируются на последнем конечном этапе.

На заводе Renault робототехнический комплекс включает в себя около 110 роботов. В сварочном цехе производственный технологический процесс стартует со сварки панелей кузова на стапеле. Установка, монтирование и сварка деталей кузова проводится с помощью роботов. При этом, нужно отметить, осуществляется автоматический контроль геометрии собранного кузова автомобиля по 16000 точкам. На втором шаге производится автоматизированная покраска и осмотр кузова. Затем шасси и кузов, обязательно синхронно, поставляются и собираются с разных транспортных конвейеров, после чего все детали уже устанавливаются на конвейер. Далее последовательно монтируется дополнительное оборудование, собирается салон и заливается жидкость. Временной период сборки одного базового изделия автомобиля на заводе – 25 ч.

Посмотрим автомобильное производство на заводе Nissan. На складском участке комплектующих завода находятся тысячи деталей необходимых для сборки изделий. Обращает на себя внимание использование роботизированных тележек с автопилотом для автоматизированной доставки. Также с помощью роботизированных комплексов кузов сваривается из штампованных деталей в кузовном цехе. После этого, следующим этапом в покрасочном цехе проводится роботизированная покраска кузова. Собранный в сборочном цехе двигатель поступает на конвейер, где монтируется в

кузов. Важно, что передняя панель кабины отдельно собирается роботами-манипуляторами в кабину, при этом часть сборки производится вручную. Двери с остеклением монтируются уже на последнем этапе. Временной период сборки одного базового изделия автомобиля на заводе – 25 ч. В год собирается тридцать шесть тысяч автомобилей, максимальная мощность завода может составить до ста тысяч автомобилей в год.

Нужно отметить, что вопросам технологических процессов роботизированного производства посвящено множество современных научных работ. Приведем краткий обзор научных работ автоматизации производства с применением роботизированных комплексов.

Обзор научных работ автоматизации производства

Работа Ахатова Р.Х. [1] посвящена автоматизации сборки на заводе с применением промышленного робота Kuka KR и лазерного трекера. В статье [2] представлены результаты разработки модернизированной концепции обеспечения статистически управляемых процессов контроля и мониторинга качества электрокомпонентов в автосборочном производстве. Существующая насыщенность производственного процесса инструментами мониторинга и контроля качества электрокомпонентов имеет явную недостаточность с точки зрения обеспечения процесса контроля качества электрокомпонентов в составе системы электрооборудования.

Работа [3] отражает вопросы по автоматизированному производству в автомобильной промышленности, связанные с Индустрией 4.0. Очевидна необходимость рассмотреть конкретные технологии, связанные с Индустрией 4.0, такие как передовые роботизированные устройства, 3D-печать, интернет вещей или автоматизированное производство, которые последовательно и неуклонно внедряются в производственные компании. Выполнена выборка, в которую вошли производственные компании автомобильного сектора стран, ключевых игроков мирового рынка производства автомобилей. Для сбора данных используется электронная анкета, в которой сформулированы вопросы согласно теоретическому обзору предыдущих исследований и исследований. Сделаны два предположения, исследования и проверка проводилась с помощью оценки

среднего уровня использования технологий. Помимо этого, проанализирован уровень внедрения технологий автоматизации и других технологий Индустрии 4.0. Результаты отражают высокую частоту использования датчиков, программируемых устройств и промышленных роботов.

Интеллектуальная автоматизация (ИА) [4] в автомобилях включает в себя автоматизацию роботизированных процессов и искусственный интеллект, что отражает цифровую трансформацию в автономных транспортных средствах. ИА имеет тенденцию полностью заменить человека автоматизацией, повысив при этом безопасность и интеллектуальность движения транспортных средств. В исследовании речь идет о новейших инновационных методологиях, проведен сравнительный анализ методов, которые используют искусственный интеллект, машинное обучение и IoT (интернет вещей) в автономных транспортных средствах. Необходимо продумать и осознать технологии снижения риска при переходе от ручного управления к автоматизации процесса. Более того, не маловажные стандарты безопасности и вопросы кибербезопасности, конфиденциальности, автономности транспортных средств требуют не менее пристального рассмотрения. Описаны и перечислены преимущества автономных технологий изучения искусственного интеллекта как важного критерия в управлении транспортными средствами в перспективе. Учеными, исследователями, предприятиями изучаются и создаются инструменты, максимально эффективные структуры для автономных транспортных средств. Достаточно подробно показаны области применения автономных грузовых автомобилей, автобусов и легковых автомобилей, а также шаттлов, вертолетов и подземных транспортных средств

В работе [5] приводится анализ технологии механической автоматизации в автомобильном производстве. Чтобы противостоять жесткой рыночной конкуренции в области автомобильной промышленности, идти в ногу с потребительскими требованиями, необходимо решить вопросы повышения эффективности, более стабильного качества и получения большого конкурентного преимущества. В этом аспекте, автоматизация – важная тенденция в автомобильной промышленности, опора современной промышленности, большой потенциал применения во многих областях. Применение технологии автоматизации предлагает

новые идеи для перспективного развития автомобильной промышленности.

В работе [6] рассматривается применение технологий автоматизации в производстве автомобильного оборудования. Современные технологии становятся все более высокотехнологичными в различных сферах, активно применяются соответствующие передовые технологии. Благодаря применению высокоточной техники автоматизации все работы проводятся непрерывным процессом в соответствии с установленными компьютерными программами. Количество ошибок, вызванных человеческим фактором, сокращается, скорость прохождения – значительно повышается. Работники машиностроительного производства применяя наиболее подходящую технологию автоматизации в соответствии с реальными условиями, интегрируя свой ценный опыт работы с совершенно новыми технологиями автоматизации, смогут сделать всю работу более качественной, сэкономить время производства деталей, упорядочить работы по сборке и обработке

В работе [7] рассматривается автоматизация в автомобильной промышленности. Почти все крупные производители автомобилей такие как BMW, Ferrari, Tesla, Honda и Lamborghini применяют автоматические процессы, в том числе роботизированные манипуляторы, сортировщики объектов, мобильные роботы и 3D-принтеры для увеличения производства автомобильных деталей. Машины 3D-печати применяются для изготовления различных сложных деталей с полной автоматизацией процесса, причем самая серьезная проблема при внедрении автоматизации – высокие первоначальные затраты.

В работе [8] рассмотрена цифровизация автомобильного производства. Сегодня ситуация в автомобильной промышленности характеризуется множеством инженерных инструментов с разнообразными собственными форматами. Особенное внимание уделено автоматизированному созданию процессов сборки и сборочных ресурсов на примере деталей автомобильного кузова. В рамках производственной концепции выполняется планирование последовательности соединений и крепежных элементов для конкретного продукта. Главное преимущество высокой степени автоматизации – возможность автоматически находить различные специализированные инженерные инструменты.

В работе [9] рассмотрено применение промышленных роботов на автоматизированных производственных линиях на фоне интеллектуального производства. Делается акцент на том, что промышленные роботы по праву являются высокотехнологичным продуктом современного общества. Технологии промышленных роботов широко используются в автоматизированных производственных линиях, что позволяет заметно повысить эффективность промышленного производства, способствует экономическому развитию, в частности, обрабатывающей промышленности. Вместо ручного труда для выполнения различных сложных производств и операций применяется автоматизация промышленного производства. Проанализировано применение промышленных роботов на автоматизированных производствах, изучены будущие направления перспективы развития обрабатывающей промышленности.

В работе [10] разработаны математические модели динамики манипуляционных роботов, которые применяются в технологических процессах сборки изделий. В статье [11] представлены результаты разработки и реализации цифрового комплекса управления качеством в автосборочном производстве. Предложен подход по выбору операций для первоочередного перевооружения на умный инструмент (гайковерт). Предложена информационная система мониторинга качества выполнения сборочных операций.

В работе [12] представлены методы оптимизации режимов движения манипулятора в автоматизированном технологическом процессе сборочного производства. В статье [13] рассматривается вопрос применения статистических инструментов управления качеством на примере корпоративных стандартов отечественных компаний ПАО «АВТОВАЗ» и ПАО «КАМАЗ». Переход на новую для российского производства систему управления качеством процессов предприятия и выпускаемой продукции предполагает анализ используемых нормативных документов, обеспечивающих воспроизводимость процессов предприятия. Предметом исследования являются документы СМК, стандарты компаний и регламенты управления производственными процессами, планы управления и контрольные карты. Приведен зарубежный опыт компаний в сфере внедрения технологий цифровизации.

В работе [14] рассмотрены технологические процессы сборки изделий автомобильного

производства с внедрением робототехнического комплекса и применением гибридного метода оптимизации режимов движения роботов-манипуляторов. В статье [15] представлены результаты исследования проблемы развития цифровых инструментов управления качеством и примеры их реализации в автосборочном производстве.

Необходимо отметить, в большинстве научных работ исследуются и рассматриваются только частные задачи, которые влияют на отдельные параметры в автоматизации производства.

Вначале рассмотрим влияния роботизированной сборки на производительность автомобильного производства.

Результаты оценки влияния роботизированной сборки на производительность автомобильного производства

Выполним оценку влияние роботизации на производительность в автосборочном производстве. Рассмотрим такт сборочной линии. Он определяет время выхода с конвейера готового изделия и рассчитывается по формуле:

$$T = (k F) / P, \quad (1)$$

где T – такт сборочной линии в минутах; F – суммарное рабочее время за месяц, в минутах; k – коэффициент рабочего времени; P – план выпуска готовых изделий за месяц, в штуках.

Для производства 3000 автомобилей в месяц такт сборочной линии равен 3,0 мин.

Рассмотрим темп выпуска сборочной линии. Он определяет число готовых изделий с конвейера в единицу времени и рассчитывается по формуле:

$$X = P / (k F). \quad (2)$$

В автосборочном производстве темп выпуска равен 1/3 изделия в 1 мин.

Рассмотрим коэффициент загрузки. Он определяет загруженность рабочего места на роботизированной операции и рассчитывается по формуле:

$$n = t / (T q). \quad (3)$$

где t – продолжительность операции; q – число роботов на операции.

При такте полминуты отмечается высокая загрузка 95 % роботизированного сборочного участка. Статистические результаты показывают увеличение выпуска изделий до 10 % при повышении коэффициента загрузки на 0,1. Применение роботизированного комплекса позволит увеличить производительность выпуска.

Далее оценим эффективность роботизированной линии сборки.

Эффективность роботизированной линии сборки

Выполнен расчет прироста прибыли по результатам внедрения в технологический процесс сборки роботизированного комплекса.

Роботизированный комплекс состоит из манипулятора, робота-сборщика и стоит 8,0 млн. руб. Доставка и монтаж комплекса стоит 200 тыс. руб. Капитальные вложения – 8200 тыс. руб. Гарантийный срок применения роботизированного комплекса составляет пять лет. Амортизация роботизированного комплекса в год – 1640 тыс. руб. По истечении гарантийного срока эксплуатации роботизированный комплекс продается за 20 % стоимости – 1600 тыс. руб.

Посчитаем экономию от внедрения роботизированного комплекса.

Два высококвалифицированных работника сборочной линии освобождаются с зарплатой по 100 тысяч рублей. Зарплата каждого работника увеличивается на 5,0 % в год. За пять лет суммарная оплата труда составит 13261 тыс. руб.

Страховые взносы составят 3978 тыс. руб.

Экономия по охране труда составит 330 тыс. руб. Затраты на отопление и кондиционирование составят 272 тыс. руб. Экономия по снижению брака составит 280 тыс. руб. Затраты по больничным составят 552 тыс. руб. В итоге за пять лет экономия составит 18563 тыс. руб.

Рассчитаем дополнительные расходы.

За пять лет амортизация комплекса составит 8200 тыс. руб. Налог на имущество составит 295 тыс. руб.

За пять лет расходы по дополнительной энергии составят 330 тыс. руб. Расходы по программированию и перепрограммированию составят 663 тыс. руб. Затраты по расходным материалам составят 1105 тыс. руб. Затраты по текущему и капитальному ремонту составят 2,0 млн. руб. За пять лет дополнительные расходы составят 12594 тыс. руб.

Посчитаем чистую прибыль за пять лет. Снижение затрат составит 18563 тыс. руб. Дополнительные расходы составят 12594 тыс. руб. Снижение затрат составит 5969 тыс. руб. Налог на прибыль составит 1194 тыс. руб. Прирост чистой прибыли от внедрения одной роботизированной линии сборки составит 4775 тыс. руб. [14].

В результате оценки показана эффективность внедрения роботизированного комплекса в автосборочное производство.

Заключение

В работе рассматривается высокотехнологичное автосборочное производство с внедрением промышленных роботов-манипуляторов. Проведены исследования эффективности и производительности автомобильного производства при использовании роботизированной сборки. Рассмотрены характеристики роботизированной сборки: такт сборочной линии; темп выпуска; коэффициент загрузки. Оценивается влияние характеристик на производительность в роботизированном автосборочном производстве. Расчет эффективности роботизированной линии сборки показывает, что эффективность применения робота существенно превосходит эффективность квалифицированного рабочего.

При автоматизации автосборочного производства важно отметить, что за пять лет прирост чистой прибыли от роботизированной линии сборки – 4775 тыс. руб. Кроме того, существенно увеличится производительность выпуска изделий при роботизации сборки в автомобильном производстве, а также несомненна эффективность применения роботизированной линии сборки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ахатов Р.Х., Однокурцев К.А., Зыкова Е.В. Технология монтажа сборочной оснастки с применением промышленного робота // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 16. № 1 (5). 2014. С. 1284–1291.
2. Крицкий А.В., Козловский В.Н., Айдаров Д.В. Модернизированная концепция методики и инструментария обеспечения статистически управляемых процессов контроля и мониторинга качества электрокомпонентов в автосборочном производстве // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 25. № 2 (112). 2023. С. 14–18.
3. Papulová Z., Gažová A., Šufliarský E. Implementation of automation technologies of industry 4.0 in

automotive manufacturing companies // Procedia Computer Science. Т. 200. 2022. С. 1488–1497.

4. Bathla G. Autonomous vehicles and intelligent automation: Applications, challenges, and opportunities // Mobile Information Systems. Vol. 7, no.5, 2022, pp. 26–31.

5. Zhang M. Practical Analysis of Mechanical Automation Technology in Automobile Manufacturing // Journal of Electronic Research and Application. Т. 7. №. 5. 2023. С. 26–31.

6. Wang X., Wang Y. Application of automation technology in automobile machinery manufacturing // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing,. Т. 1885. №. 4. 2021. С. 042056.

7. Melendez O., Thamma R., Kirby E. D. Automation in the automotive industry // Int. Res. J. of Modernization in Eng. Technol. Sci. Т. 2. №. 10. 2020. С. 282–286.

8. Zech A. Automated generation of clamping concepts and assembly cells for car body parts for the digitalization of automobile production // Advances in Automotive Production Technology—Theory and Application: Stuttgart Conference on Automotive Production (SCAP2020). Springer Berlin Heidelberg, 2021. С. 293–301.

9. Zhou L. Application of industrial robots in automated production lines under the background of intelligent manufacturing // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing. Т. 1992. №. 4. 2021. С. 042050.

10. Иванова Л.Н., Иванов С.Е. Математические модели динамики манипуляционных роботов при проектировании технологических систем // Металлообработка. № 5-6. 2022. С. 48–55.

11. Благовещенский Д. И., Козловский В. Н., Васин С. А. Ключевые аспекты цифровизации управления качеством в автосборочном производстве // СТИН. №. 10. 2021. С. 17–21.

12. Иванова Л.Н., Иванов С.Е. Математические методы оптимизации режимов движения манипулятора в автоматизированном технологическом процессе // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. № 11 (137). С. 39–48.

13. Карпов А.О., Карпов А.О., Рамазанов И. А. К вопросу о применении статистических инструментов управления качеством в автосборочном производстве // XXV Туловские чтения (школа молодых ученых). 2021. С. 564–571.

14. Иванова Л.Н., Иванов С.Е. Совершенствование технологических процессов в автомобилестроении // Кузнечно-штамповочное производство – обработка материалов давлением. №10. 2023 С. 28–34.

15. Благовещенский Д.И. Примеры технической реализации решений в области цифровизации автосборочного производства // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. №. 5. 2022. С. 14–18.

REFERENCES

1. Akhatov R.H., Odnokurtsev K.A., Zyкова E.V. Technology of assembly tooling installation using industrial robots // Proc. of the Samara Scientific Center

of the Russian Academy of Sciences, vol. 16. no. 1 (5), 2014, pp. 1284–1291

2. Kritsky A.V., Kozlovsky V.N., Aidarov D.V. Modernized concept of the technique and instrumentation of statistically controlled processes of control and monitoring of the quality of electrical components in the automotive assembly production // Izvestiya of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, vol. 25. no. 2 (112), 2023, pp. 14–18.

3. Papulová Z., Gažová A., Šufliarský L. Implementation of automation technologies of industry 4.0 in automotive manufacturing companies // Procedia Computer Science, vol. 200, 2022, pp. 1488–1497.

4. Bathla G. Autonomous vehicles and intelligent automation: Applications, challenges, and opportunities // Mobile Information Systems. Vol.7, no.5, 2022, pp. 26–31.

5. Zhang M. Practical Analysis of Mechanical Automation Technology in Automobile Manufacturing // Journal of Electronic Research and Application. vol. 7, no. 5, 2023, pp. 26–31.

6. Wang X., Wang Y. Application of automation technology in automobile machinery manufacturing // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, vol. 1885, no.4, 2021, pp. 042056.

7. Melendez O., Thamma R., Kirby E. D. Automation in the automotive industry // Int. Res. J. of Modernization in Eng. Technol. Sci. vol. 2. no. 10. 2020. pp. 282–286.

8. Zech A. Automated generation of clamping concepts and assembly cells for car body parts for the digitalization of automobile production // Advances in Automotive Production

Technology–Theory and Application: Stuttgart Conference on Automotive Production (SCAP2020). Springer Berlin Heidelberg, 2021. pp. 293–301.

9. Zhou L. Application of industrial robots in automated production lines under the background of intelligent manufacturing // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. vol. 1992. no. 4. 2021. pp. 042050.

10. Ivanova L.N., Ivanov S.E. Mathematical models of dynamics of programmable manipulators in the design of technological systems // Metalworking. No. 5-6, 2022, pp. 48–55.

11. Blagoveshchenskiy D. I., Kozlovsky V. N., Vasin S. A. Key aspects of quality management digitalization for incomplete vehicle production // STIN, no. 10, 2021, pp. 17–21.

12. Ivanova L.N., Ivanov S.E. Mathematical methods for optimizing manipulator movement modes in an automated workflow // Science intensive technology in mechanical engineering, 2022, no. 11 (137), pp. 39–48.

13. Karpov A.O., Karpov A.O., Ramazanov I. A. More on the application of statistical quality management tools in incomplete vehicle production // XXV Tupolev readings (school of young scientists), 2021, pp. 564–571.

14. Ivanova L.N., Ivanov S.E. Improvement of technological processes in the automotive industry // Forging and stamping production – processing of materials by pressing, no.10, 2023, pp. 28–34

15. Blagoveshchenskiy D.I. Examples of technical implementation of solutions in the field of digitalization of car assembly production // Izvestia of the Tula State University. Technical Sciences, no. 5. 2022, pp. 14–18.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.02.2024; одобрена после рецензирования 12.02.2024; принята к публикации 20.03.2024.

The article was submitted 12.02.2024; approved after reviewing 12.02.2024; assepted for publication 20.03.2024.

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 17.04.2024. Выход в свет 26.04.2024.

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

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

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

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

12+