

# НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 10 (76)

2017

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

## СОДЕРЖАНИЕ

### Главный редактор

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

### Председатель редакционного совета

чл.-кор. РАН ПРИХОДЬКО В.М. (г. Москва)

### Зам. председателя редакционного совета

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

### Редакционный совет:

д.ф.-м.н., проф. АМОСОВ А.П. (г. Самара)

д.т.н., проф. АРТЁМОВ И.И. (г. Пенза)

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

д.т.н., проф. БЕЛОВ В.Д. (г. Москва)

д.т.н., проф. БОЛДЫРЕВ А.И. (г. Воронеж)

д.т.н., проф. БОЧКАРЁВ П.Ю. (г. Саратов)

акад. НАН Беларуси

ВИТЯЗЬ П.А. (г. Минск, Беларусь)

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

д.т.н., проф. ЕМЕЛЬЯНОВ С.Г. (г. Курск)

д.т.н., проф. ЗУБАРЕВ Ю.М. (г. Санкт-Петербург)

д.т.н., проф. КИРИЧЕК А.В. (г. Брянск)

д.т.н., проф. КЛИМЕНКО С.А. (г. Киев, Украина)

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, Украина)

д.т.н., проф. МОРОЗОВ В.В. (г. Владимир)

д.т.н., проф. МОТРЕНКО П.Д. (г. Ростов-на-Дону)

д.т.н., проф. ОЛЕЙНИК А.В. (г. Москва)

д.т.н., проф. ПОЛЕТАЕВ В.А. (г. Рыбинск)

д.т.н., проф. СИТНИКОВ А.А. (г. Барнаул)

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

д.п.н., проф. СХИРТЛАДЗЕ А.Г. (г. Москва)

д.т.н., проф. ФАТЮХИН Д.С. (г. Москва)

д.т.н., проф. ХАНДОЖКО А.А. (г. Брянск)

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

д.т.н., проф. ХУДОБИН Л.В. (г. Ульяновск)

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

д.т.н., проф. ШАВРИН О.И. (г. Ижевск)

### Зам. главного редактора

ДЮБКОВА Н.В.

DOI:10.12737/issn.2223-4608

Журнал распространяется по подписке,  
которую можно оформить в любом почтовом  
отделении индекс по каталогу  
«Роспечать» 79195.

Тел. редакции: 8-903-592-87-39

E-mail: naukatm@yandex.ru

www.ntmash.tu-bryansk.ru

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

Свидетельство о регистрации средства массовой

информации ПИ № ФС77-66087 от 10 июня 2016 года

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

Моргунов Ю.А. Наукометрический анализ развития наукоемких технологий  
физико-химической обработки . . . . . 3

### НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Носенко В.А., Фетисов А.В., Носенко С.В., Харламов В.О. Интенсивность  
контактного взаимодействия и перенос материалов при шлифовании и  
микроцарапании тугоплавких металлов . . . . . 9

Морозов А.В., Гусев В.Г. Моделирование напряженного состояния режущей  
поверхности дискретного шлифовального круга . . . . . 18

### НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТДЕЛОЧНО- УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Лебедев В.А., Серга Г.В., Чаава М.М., Дёмин Г.В. Компонировочные схемы  
малогабаритных роторно-винтовых вибрационных технологических систем  
для отделочно-упрочняющей обработки деталей . . . . . 24

### ТЕХНОЛОГИИ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Шиганов И.Н., Шамов Е.М., Бегунов И.А., Шелестова А.К.  
Лазерная сварка стали 09Г2С по слою флюса . . . . . 28

Богданов А.В., Соколов В.И., Шмелев С.А. Выбор оптимальных  
конфигураций оптических схем для задачи лазерной термообработки  
стальных изделий . . . . . 32

### ТЕХНОЛОГИИ НАУКОЁМКИХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Ворначева И.В., Гадалов В.Н., Макарова И.А., Филонович А.В.  
Внутреннее трение литого сплава с никель-хромовой матрицей после  
термической обработки. . . . . 39

Монсеев А.А. Критериальная модель химической стабильности в  
статических условиях . . . . . 42

*Журнал входит в перечень утвержденных ВАК при Минобрнауки России  
изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней  
по направлению 05.02.00 – Машиностроение и машиноведение*

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

# SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 10 (76)

2017

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. SUSLOV A.G. (Moscow)

## Chairman of Editorial Committee

m.-corr. RAS PRIHOD'KO V.M. (Moscow)

## Chairman Assistant

d.en.s., prof. GRIGOR'YANTS A.G. (Moscow)

## Editorial Committee:

d.p.-m.s., prof. AMOSOV A.P. (Samara)

d.en.s., prof. ARTEMOV I.I. (Penza)

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

d.en.s., prof. BELOV V.D. (Moscow)

d.en.s., prof. BOLDYREV A.I. (Voronezh)

d.en.s., prof. BOCHKAREV P.Yu. (Saratov)

Acad. NAS of Belarus

VITYAZ' P.A. (Minsk, Belarus)

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

d.en.s., prof. EMEL'YANOV S.G. (Kursk)

d.en.s., prof. ZUBAREV Yu.M. (St. Petersburg)

d.en.s., prof. KIRICHEK A.V. (Bryansk)

d.en.s., prof. KLIMENKO S.A. (Kiev, Ukraine)

Acad. RAS LYSAK V.I. (Volgograd)

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

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

d.en.s., prof. MIHAJLOV A.N. (Doneck, Ukraine)

d.en.s., prof. MOROZOV V.V. (Vladimir)

d.en.s., prof. MOTRENKO P.D. (Rostov-on-Don)

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

d.en.s., prof. POLETAEV V.A. (Rybinsk)

d.en.s., prof. SITNIKOV A.A. (Barnaul)

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

d.p.s., prof. SHIRTLADZE A.G. (Moscow)

d.en.s., prof. FATYUKHIN D.C. (Moscow)

d.en.s., prof. HANDOZHKO A.V. (Bryansk)

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

d.en.s., prof. HUDOBIN L.V. (Ul'yanovsk)

d.en.s., prof. CHIGIRINSKY Yu.L. (Volgograd)

d.en.s., prof. SHAVRIN O.I. (Izhevsk)

## Deputy chief editor

DJUBKOVA N.V.

DOI:10.12737/issn.2223-4608

Journal is spreaded on a subscription, witch can be issued in any post office (index on the catalogues: «Rospechat» 79195).  
Editorial office Ph: 8-903-592-87-39  
E-mail: naukadm@yandex.ru  
www.ntmash.tu-bryansk.ru

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications of Russian Federation (ROSKOMNADZOR).

Registration certificate  
ПИ № ФС77-66087 от 10.06.2016

## CONTENTS

### SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

Morgunov Yu.A., Science metering analysis of science intensive technologies development for physic-chemical treatment . . . . . 3

### SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF MACHINING

Nosenko V.A., Fetisov A.V., Nosenko S.V., Kharlamov V.O. Contact interaction intensity and material transfer at grinding and refractory metal micro-scratching . . . . . 9

Morozov A.V., Gusev V.G. Stressed state simulation of discrete abrasive disk cutting surface. . . . . 18

### SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF FINISHING AND HARDENING PROCESSING

Lebedev V.A., Serga G.V., Chaava M.M., Demin G.V. Arrangement circuits of small-size of rotor-helical vibration technological systems for parts finish-strengthening . . . . . 24

### TECHNOLOGIES OF PROTOTYPING AND LASER PROCESSING

Shiganov I.N., Shamov E.M., Begunov I.A., Shelestova A.K. Steel 09G2S laser bonding on flux layer . . . . . 28

Bogdanov A.V., Sokolov V.I., Shmelyov S.A. Optimum pattern choice of optical circuits for problems of steel products laser thermal processing by example of railway wheels . . . . . 32

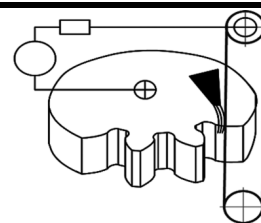
### SCIENCE INTENSIVE MATERIALS PROCESSING AND NANOTECHNOLOGIES

Vornacheva I.V., Gadalov V.N., Makarova I.A., Filonovich A.V. Inner friction of cast alloy with nickel-chrome matrix after thermal treatment . . . . . 39

Moiseyev A.A. Criterion model of chemical stability under static conditions . . . . . 42

A Journal is included in the list of editions approved by HEB at the Ministry of Education and Science of Russia for the publication of competitors' works for agademic degrees in the direction of 05.02.00 – Mechanical Engineering and Science of Machines.

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



УДК 621.9.048

DOI: 10.12737/article\_59d496ea793738.95693360

**Ю.А. Моргунов**, к.т.н.

(Московский политехнический университет, 107023, Москва, ул. Б.Семеновская, 38)

E-mail: morgunov56@mail.ru

## **Наукометрический анализ развития наукоёмких технологий физико-химической обработки**

*Приведен наукометрический анализ динамики развития наукоёмких технологий машиностроения. Показано, что сформировалось новое научное направление – кластер методов и технологий физико-химической обработки материалов. Показано, что в условиях ограниченных ресурсов выбор приоритетных направлений развития становится, как никогда, актуальным. Отсутствие объективных критериев оценки и процедуры выбора приоритетных направлений сказывается на финансировании научно-исследовательских работ и темпах развития отдельных технологических направлений.*

**Ключевые слова:** технологический кластер; физико-химические методы и технологии; наукоёмкие технологии.

**Yu.A. Morgunov**, Can. Eng.

(Moscow Polytechnic University 38, Bolshaya Semenovskaya Str., Moscow 107023)

## **Science metering analysis of science intensive technologies development for physic-chemical treatment**

*A science metering analysis of the dynamics of science intensive technologies development in mechanical engineering is shown. It is shown, that a new scientific direction – a cluster of methods and technologies of material physic-chemical treatment is formed. It is shown, that under conditions of limited resources a choice of priority directions of development becomes urgent as never before. The absence of objective criteria in the assessment and procedure of the priority directions choice affects financing research works and rates of separate technological directions development.*

**Keywords:** technological cluster; physic-chemical methods and techniques; science intensive technologies.

Технологии физико-химической обработки материалов относят к ключевым наукоёмким технологиям машиностроительного производства [1]. Анализ динамики их развития позволяет выявить основные пути совершенствования этого технологического кластера, очертить сферу эффективного промышленного использования и сделать обоснованные прогнозы.

Статистические исследования проведены методом малых выборок путем анализа материалов авторитетного международного сим-

позиума по электрической обработке материалов (International Symposium for Electromachining, ISEM), проводимого раз в три года (табл. 1) [2].

Материалы этого симпозиума рецензируются, отражают важнейшие результаты, полученные мировым технологическим сообществом за указанный период и отличаются высоким уровнем представления. С целью оценки достоверности результатов проводились также анализ публикаций по выделенной тематике по материалам реферативного российского

журнала «Технология машиностроения» и сопоставление полученных результатов [3].

**1. Динамика количества стран-участниц и количества представленных докладов по материалам ISEM**

Симпозиум	Число докладов	Число стран-участниц
ISEM–III (1970)	54	12
ISEM –IV (1974)	38	10
ISEM –V (1977)	76	15
ISEM –VI (1980)	77	16
ISEM –VII (1983)	24	13
ISEM –VIII (1986)	48	11
ISEM –IX (1989)	111	17
ISEM –X (1992)	81	16
ISEM –XI (1995)	97	17
ISEM –XII (1998)	67	15
ISEM –XIII (2001)	89	20
ISEM –XIV (2004)	105	19
ISEM –XV (2007)	115	16
ISEM –XVI (2010)	127	20
ISEM –XVII (2013)	109	21
ISEM –XVIII (2016)	162	22

Уровень научного потенциала стран мира в рассматриваемой области мирового технологического пространства оценивался по степени их участия в этом форуме (количество

представленных докладов). Продолжительный период времени (50 лет) позволяет нивелировать случайные факторы.

Около 20 стран мира, обладающих необходимым научно-техническим потенциалом, развитым производством соответствующего уровня и квалифицированными кадрами активно развивают и используют технологии физико-химической обработки для создания наукоемкой продукции.

Анализ имеющихся данных показал устойчивое возрастание во времени числа стран-участниц Международного симпозиума (ISEM), количества новых технологических направлений и общего числа представленных докладов. Под технологическим направлением в нашем случае понимают не только технологии, основанные на новом методе обработки [4], но и новые применения известных методов, например, аддитивные технологии [5], технологии микро- и нанообработки [6] и пр.

До 1970 г. к технологиям физико-химической обработки материалов относили только технологии электроэрозионной (ЭЭО) и электрохимической (ЭХО) обработки. На симпозиуме ISEM-XVIII (2016 г.) было представлено уже 10 разветвленных технологических направлений (рис. 1), (в работе участвовали 22 страны, представившие 162 доклада).

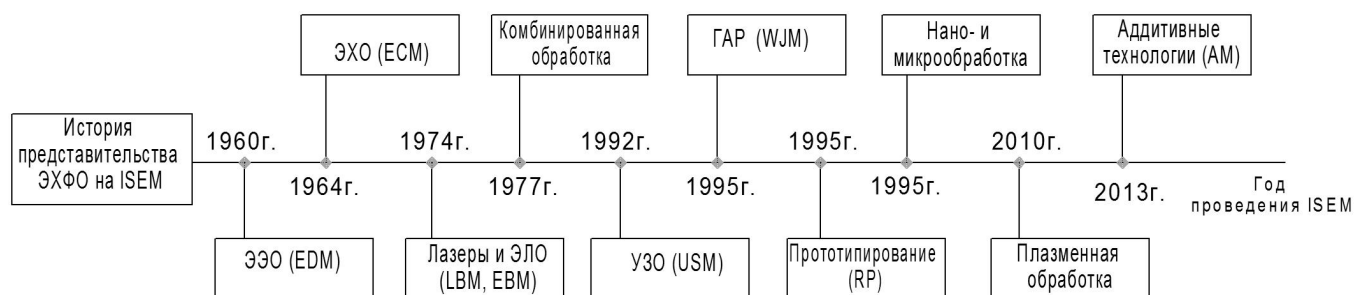


Рис. 1. Представление новых технологических направлений на симпозиумах ISEM

Снижение числа стран-участниц ISEM-1986 связано с тем, что симпозиум проходил в Москве и по времени совпал с Чернобыльской катастрофой. Спады 1998 г. (Аахен, Германия) и 2007 г. (Питсбург, США) являются, прежде всего, следствием мирового экономического кризиса.

Если число научных направлений возрастает монотонно, то изменение числа стран-участниц и количества представленных докладов носит циклический характер с периодом 9 – 15 лет. На рис. 2 показано распределение представленных докладов по отдельным направлениям физико-химической обработки.

Видно, что электроэрозионная обработка, доля которой составляет 50... 55 %, занимает стабильное и доминирующее положение. Напротив, доля работ по электрохимической обработке в начале 1980-х резко снизилась, а затем стабилизировалась на уровне 15... 20 %.

Анализ научных публикаций по этой тематике по данным реферативного журнала «Технология машиностроения», проведенный за период с 1980 по 2016 гг. показал примерно те же результаты, что подтверждает взаимосвязь динамики развития физико-химических методов и технологий в странах мира с их уровнем публикационной активности. Это указывает

на правомерность используемой нами выборки (ISEM) и подтверждает достоверность об-

суждаемых результатов.

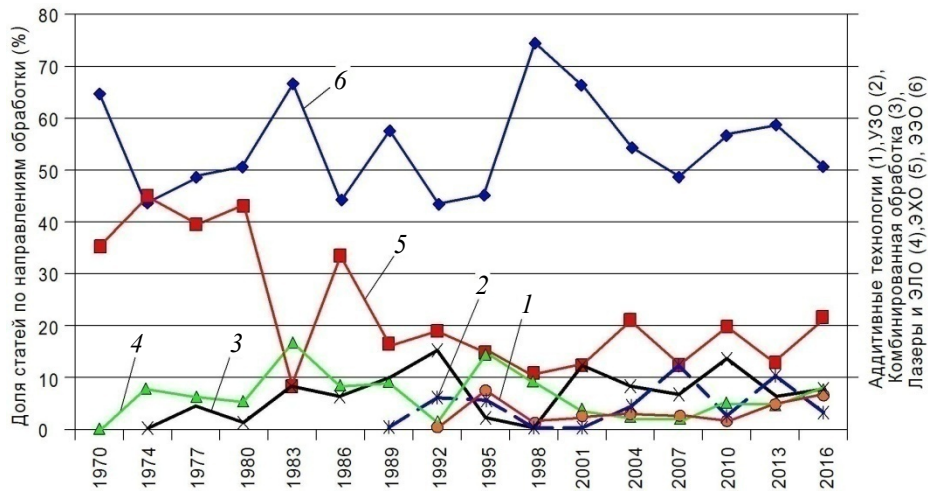


Рис. 2. Динамика развития отдельных методов и технологий физико-химической обработки по данным ISEM

Спад публикационной активности в области ЭХО начала 1980-х гг. связан с повышением конкурентоспособности технологий обработки резанием в результате появления относительно дешевых и эффективных систем ЧПУ и оснащения ими многокоординатных фрезерных станков. В связи с этим обострился один из основных недостатков технологий, основанных на методе прямого копирования, – *низкий уровень унификации технологий ЭХО.*

Это приводит к увеличению ресурсозатрат при технологической подготовке производства новых изделий, малой фондоотдаче из-за недостаточной загруженности станочного парка электрохимических станков, снижению производительности труда.

Увеличилась доля комбинированных и гибридных технологий. В начале 1990-х гг. отчетливо проявился интерес индустриально развитых стран к освоению новых направле-

ний рассматриваемого технологического кластера: технологиям быстрого прототипирования (RP), различным вариантам ультразвуковой обработки, аддитивным технологиям. Следует заметить, что относительно небольшая, но стабильная, доля публикаций по лазерным технологиям в материалах ISEM объясняется наличием профильных специализированных изданий и конференций по этому направлению.

В начале 21 века заметно изменяется вектор направления развития и применения отдельных методов и технологий физико-химической обработки. Так, значительная доля опубликованных научных работ по ЭЭО, ЭХО, лазерной обработке приходится на технологии микро- и нанообработки изделий. Динамику развития и совершенствования ТФХО можно проследить на примере развития электроэрозионной обработки (рис. 3).

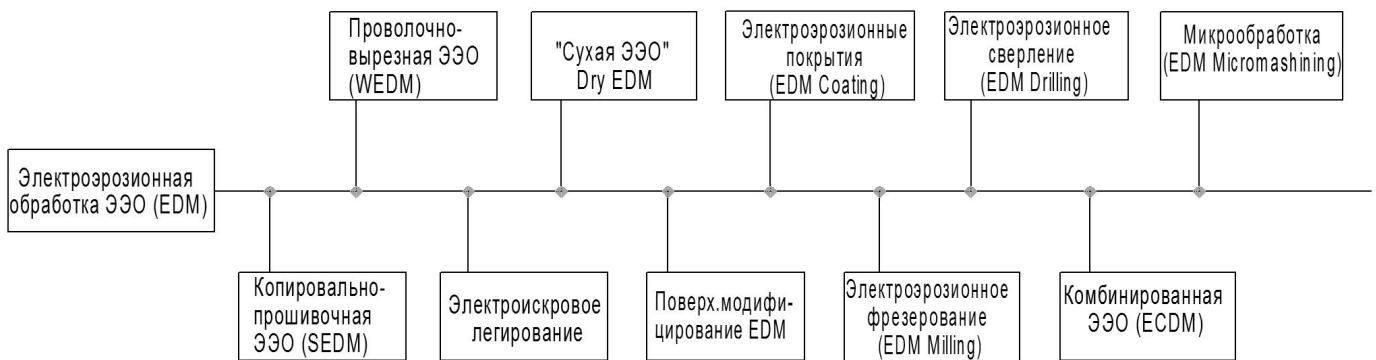


Рис. 3. Тенденции в развитии технологий электроэрозионной обработки

По мере развития технологий ЭЭО широкое распространение получают комбинированные методы обработки с использованием ЭЭО, развиваются новые и совершенствуются существующие направления.

Среди стран-участниц можно выделить страны с высоким промышленным потенциалом в области ТФХО, которые регулярно участвовали и участвуют в этом всемирном форуме. И если доля публикаций таких стран как Польша, Швейцария, Англия за рассматриваемый период в среднем составляет 5...6 %, то Тайвань, Япония и Китай в последние 15–20 лет сделали существенный рывок в области этих технологий. Это хорошо согласуется с заметным повышением индекса индуст-

риального развития передовых стран Азиатско-тихоокеанского региона в указанный период.

Для того чтобы нивелировать разброс полученных результатов по годам проведения ISEM, который обусловлен различными причинами политического, экономического, экологического характера, выбраны четыре периода для оценки публикационной активности стран в области ТФХО: 1 – с 1970 по 1980 г., 2 – с 1980 по 1992 г., 3 – с 1992 по 2004 г., 4 – с 2004 по 2016 г. Это позволило наглядно увидеть тенденции развития этих технологий в различных странах мира.

На рис. 4 представлена публикационная активность ведущих индустриальных стран мира за указанный период времени.

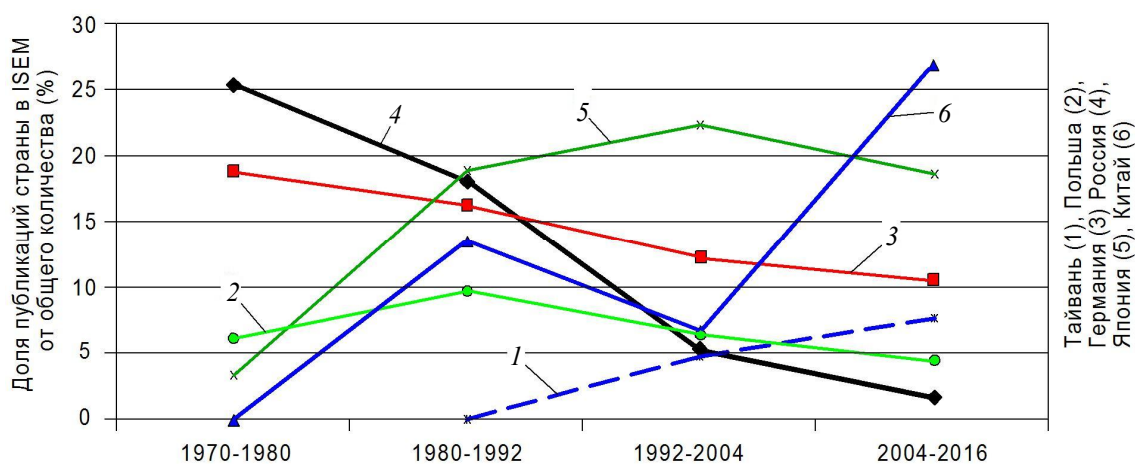


Рис. 4. Динамика развития ТФХО в различных странах мира

На каждом временном этапе были выбраны 9–11 стран, суммарная доля публикаций которых была не менее 80...85 % от общего числа публикаций. Полученные результаты позволили выполнить ранжирование наиболее развитых стран в области этих технологий (рис. 5). Эти результаты хорошо коррелируются с данными, приведенными в [7], где рассматривается динамика производства металлообрабатывающего оборудования (МОО) в странах мира за период с 1995 по 2015 г. Считают, что уровень производства металлообрабатывающего оборудования является объективным показателем индустриального развития страны, а динамика таких показателей отражает состояние мировой экономики.

В [7] приведен также рейтинг стран-лидеров в производстве МОО и их процентная доля в мировом производстве станков и кузнечно-прессового оборудования за последние 50 лет. Показано, что развитие мирового станкостроения также имеет циклический

характер.

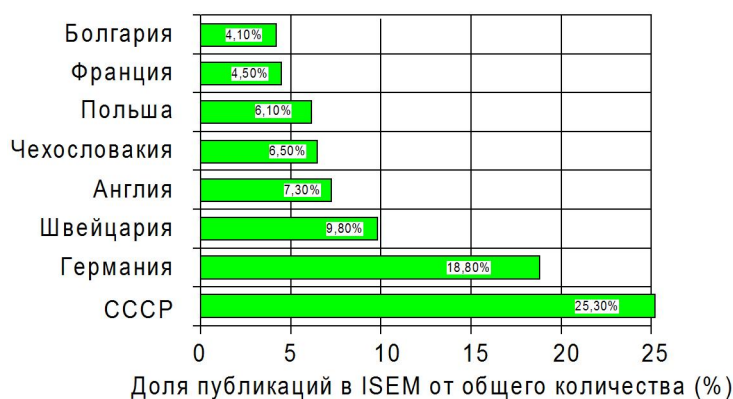
Отметим резкое снижение рейтинга России с 1–2 до 15 места и доли ее публикаций по тематике ТФХО с 25 % до 1–2 %, что указывает на угрозу потери нашей страной технологического суверенитета в этой области. На возможность подобного развития событий указывал академик К.В. Фролов в конце 1990-х гг. Деградация наукоёмких технологий в России является следствием заметного снижения социально-экономических показателей развития страны, вызванного гуманитарным коллапсом 1990-х гг. В результате состояние дел в России в области развития научного потенциала машиностроения выглядит удручающе – появилась, как технологическая зависимость от передовых индустриально развитых стран в области наукоёмких технологий, так и импортная зависимость от них в высокотехнологичном оборудовании. В настоящее время доля импорта наукоёмкой продукции составляет более 80 %.

**ТФХО**

1 период:  
с 1970 г. по 1980 г.

Рейтинг стран:

1. СССР
2. ФРГ
3. Швейцария

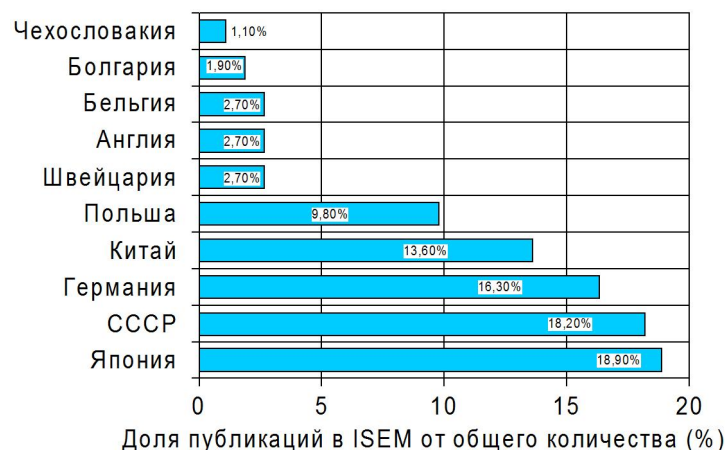


**ТФХО**

2 период:  
с 1980 г. по 1992 г.

Рейтинг стран:

1. Япония
2. СССР
3. ФРГ

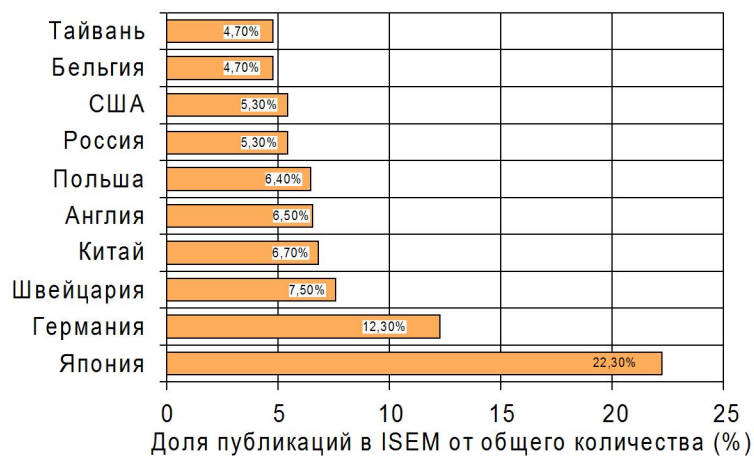


**ТФХО**

3 период:  
с 1992 г. по 2004 г.

Рейтинг стран:

1. Япония
2. Швейцария
3. Германия
4. Китай
- .....
7. Россия



**ТФХО**

4 период:  
с 2004 г. по 2016г.

Рейтинг стран:

1. Китай
2. Япония
3. Германия
- .....
15. Россия

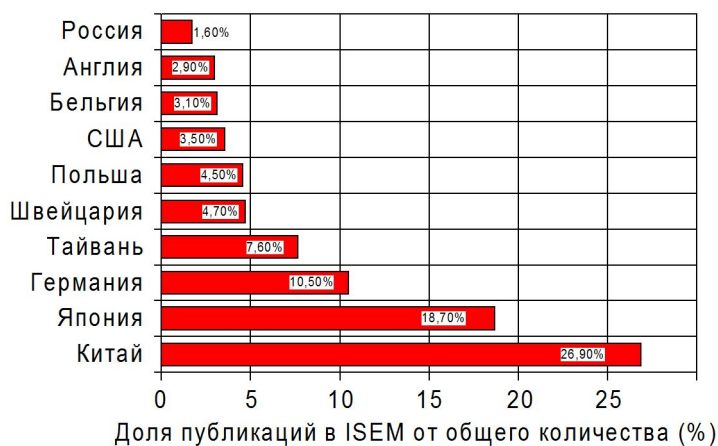


Рис. 5. Сопоставление рейтингов стран в области ТФХО (по данным ISEM)

Одним из реальных путей сохранения присутствия России на рынке наукоемких технологий является концентрация усилий и ресурсов на тех технологических направлениях, которые наиболее востребованы и перспективны. К сожалению, к настоящему времени критерии оценки и процедуры выбора приоритетных направлений развития разработаны недостаточно или просто отсутствуют. Все это сказывается на финансировании научно-исследовательских работ и темпах развития отдельных технологических направлений.

В сложившейся геополитической ситуации и в условиях ограниченных ресурсов вопросы выбора приоритетных направлений развития наукоемких технологий становятся, как никогда, актуальными.

### Выводы:

1. В 1960–70-е гг. в мировом технологическом пространстве сформировалось новое научное направление в технологии машиностроения – кластер методов и технологий физико-химической обработки материалов. Это направление интенсивно развивается, увеличивается научный задел, появляются новые и развиваются существующие методы и технологии, осваиваются новые области их эффективного применения.

2. Электроэрозионная обработка демонстрирует стабильный уровень конкурентоспособности, сформулирована и четко очерчена область эффективного применения соответствующих технологий. Метод широко применяется в комбинированных и гибридных технологиях обработки.

3. За последние тридцать лет заметно снизился уровень конкурентоспособности электрохимической размерной обработки, что связано с наличием ряда нерешенных научных, технических и организационных проблем, например, с относительно низким уровнем унификации технологий. Вместе с тем, этот метод основан на удалении материала на атомном уровне, и, по всей видимости, его инновационный потенциал далеко не исчерпан.

4. Физико-химические процессы и методы лежат в основе большинства известных технологий размерного аддитивного формообразования. Расширение области применения таких технологий, особенно при изготовлении изделий из металлов и сплавов, требует создания опережающего научного задела в этой области.

5. В условиях ограниченности ресурсов, выделяемых на технологические нововведения и высоких рисков, связанных с коммерциализацией результатов необходим тщательный и глубоко обоснованный подход к выбору технологических объектов и направлений, инвестирование которых наиболее эффективно.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Наукоемкие** технологии машиностроительного производства: физико-химические методы и технологии: учебное пособие / Ю.А. Моргунов, Д.В. Панов, Б.П. Саушкин, С.Б. Саушкин; под ред. Б.П. Саушкина. – М.: Издательство «Форум», 2013. – 928 с.

2. **Proceeding of International Symposium for Electromachining (ISEM)**. 1970–2016.

3. **Реферативный журнал** «Технология машиностроения». 1980–2016 гг.

4. **Моргунов, Ю.А., Саушкин, Б.П., Шандров, Б.В.** Развитие понятийного аппарата технологии машиностроения // Справочник. Инженерный журнал. – 2016. – № 4(58). – С. 3–7.

5. **Моргунов, Ю.А., Саушкин, Б.П.** Технологические аспекты аддитивного формообразования // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2016. – № 7(61) – С. 4–8.

6. **Астахов, Ю.П., Кочергин, С.А., Митрюшин, Е.А., Моргунов, Ю.А., Саушкин, Г.Б., Саушкин, Б.П.** Микрообработка поверхностных рельефов с применением физико-химических методов воздействия на материал // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2012. – № 7(13). – С. 33–38.

7. **Воеводов, А.А.** Мировое станкостроение -2015 // Комплект «ИТО». – 2016. – №5. – С. 58–92.

### REFERENCES

1. *Science Intensive Technologies of Mechanical Engineering: Physic-Chemical Methods and Techniques: manual* / Yu.A. Morgunov, D.V. Panov, B.P. Saushkin, S.B. Saushkin; under the editorship of B.P. Saushkin. – M.: Publishing House “Forum”, 2013. – pp. 928.

2. *Proceeding of International Symposium for Electromachining (ISEM)*. 1970–2016.

3. *Summary journal “Engineering Techniques”*. 1980–2016.

4. Morgunov, Yu.A., Saushkin, B.P. Shandrov, B.V. Engineering technique conceptual apparatus development // *Reference Book. Engineering Journal*. – 2016. – No. 4(58). – pp. 3–7.

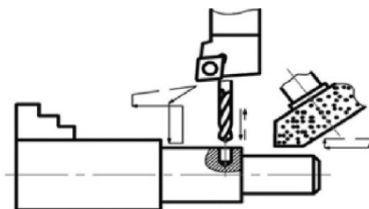
5. Morgunov, Yu.A. Saushkin, B.P. Technological aspects of additive shaping // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – No.7(61) – pp. 4–8.

6. Astakhov, Yu.P. Kochergin, S.A. Mitryushin, E.A. Morgunov, Yu.A. Saushkin, G.B. Saushkin, B.P. Surface profile micro-treatment using methods of physic-chemical impact upon material // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2012. – No.7. – pp. 33–38.

7. Voevodov, A.A. *World Engineering Tools – 2015* // Complect “ITO”. – 2016. – No.5. – pp. 58–92.

Рецензент д.т.н. В.П. Смоленцев





УДК 621.923

DOI: 10.12737/article\_59d496eb7ba532.91441180

**В.А. Носенко**, д.т.н.,

**А.В. Фетисов**, к.т.н.,

(Волжский политехнический институт (филиал)

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»,

Россия, 404121, Волгоградской обл., г. Волжский, ул. Энгельса, 42а)

**С.В. Носенко**, к.т.н.,

(SIA "BBC-R", Atbrīvošanas aleja 155A, Rēzekne, LV-4604, Latvija)

**В.О. Харламов**, к.т.н.,

(ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»,

Россия, 400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д. 28)

E-mail: nosenko@volpi.ru

## **Интенсивность контактного взаимодействия и перенос материалов при шлифовании и микроцарапании тугоплавких металлов**

*Эксперименты выполнены при микроцарапании кристаллом карбида кремния и шлифовании кругом из карбида кремния тугоплавких d-переходных металлов. Рассмотрены особенности морфологии и химического состава контактируемых поверхностей, перенос материалов, износ шлифовального круга с учетом электронного строения атомов тугоплавких металлов.*

**Ключевые слова:** карбид кремния; тугоплавкие металлы; шлифование; микроцарапание; морфология; химический состав; перенос материала.

**V.A. Nosenko**, D. Eng.,

**A.V. Fetisov**, Can. Eng.,

(Volzhsky Polytechnic Institute (Branch) FSBEI VE "Volgograd State Technical University",

42a, Engels Str., Volzhsky, Volgograd reg., 404121 Russia)

**S.V. Nosenko**, Can. Eng.,

(SIA "BBC-R", Atbrīvošanas aleja 155A, Rēzekne, LV-4604, Latvija)

**V.O. Kharlamov**, Can. Eng.

(FSBEI VE "Volgograd State Technical University", 28, Lenin Avenue, Volgograd, 400005 Russia)

## **Contact interaction intensity and material transfer at grinding and refractory metal micro-scratching**

*Peculiarities in the contact surfaces formation and material transfer at micro-scratching and grinding of refractory metals are investigated. There is shown a connection of metal quantity transferred to the area of crystal wear, a degree of ground surface charging with silicon carbide crystals and wear of an abrasive tool with the electron structure of atoms in refractory metals. It is defined, that the intensity of metal transfer in a crystal surface layer decreases with the increase of a principle quantum number of metal valence electrons. According to the intensity of the interaction silicon carbide during grinding and micro-cutting the refractory metals are classified into adhesion-active metals of IVB, VB sub-groups and inert metals of VIB subgroup of the Periodic Table.*

**Keywords:** silicon carbide; refractory metals; grinding; micro-scratching; morphology; chemical composition; material transfer.

Прогрессивное развитие техники и технологии требует постоянного совершенствования конструкционных материалов. Повышаются требования к прочности, жаростойкости, химической стойкости, устойчивости при облучении и другим эксплуатационным параметрам материалов, что достигается с использованием тугоплавких металлов.

Заключительной операцией обработки тугоплавких металлов и сплавов на их основе в большинстве случаев является шлифование. Одна из отличительных особенностей процесса – высокая активация контактируемых поверхностей, переводящая поверхностные слои абразивного и обрабатываемого материалов в неравновесное, возбужденное состояние. За активацией следует пассивация, в частности, в результате адгезионного взаимодействия. В общем случае под адгезией понимают все виды межатомного или межмолекулярного взаимодействия твердых тел [1].

Результатом адгезионного взаимодействия является перенос материалов. Обрабатываемый материал налипает на рабочую поверх-

ность шлифовального круга, кристаллы абразивного материала внедряются в обработанную поверхность, что снижает режущие свойства абразивного инструмента, показатели надежности и долговечности детали. Тем не менее, процессы контактного взаимодействия при шлифовании тугоплавких металлов изучены недостаточно.

Цель работы – исследование особенностей контактного взаимодействия и взаимопереноса материалов при шлифовании тугоплавких металлов.

Из тугоплавких металлов выбраны сплавы титана, циркония, гафния, ванадия, ниобия, тантала, хрома, молибдена и вольфрама. Для сравнения взяты сплавы железа, кобальта и никеля. Содержание основного металла в большинстве сплавов не менее 99,5 %, кроме сплава гафния, где почти один процент приходится на сопутствующий элемент – цирконий (табл. 1). Основой рассмотренных сплавов являются *d*-переходные металлы IVB, VB, VIB и VIIB подгрупп Периодической системы химических элементов.

### 1. Содержание основного элемента в сплавах

Сплав	BT1-00	КТЦ-100	ГФИ1	ВНМ-1	Нб1	ЭЛП-3
Основа	Ti	Zr	Hf	V	Nb	Ta
% масс.	99,47	99,70	98,8*	99,90	99,78	99,96
Сплав	RECr99,6	МШЧ-2	ВРН	Э12	К0	НПОЭви
Основа	Cr	Mo	W	Fe	Co	Ni
% масс.	99,60	99,77	99,93	99,04	99,98	99,80
Примечание. * Не более 1 % Zr						

Все сплавы, кроме Э12, относятся к цветным металлам, поэтому в качестве абразивного материала выбран карбид кремния. Исследования проведены при шлифовании кругами и микроцарапании кристаллами из карбида кремния. Микроцарапание осуществляли кристаллами конической формы: угол конуса 120°, радиус вершины 19...22 мкм. Подготовку поверхности металлов и микроцарапание осуществляли на прецизионном профилешлифовальном станке CHEVALIER с ЧПУ мод. Smart-B1224III или универсальном плоскошлифовальном станке ЗГ71 [2].

Состояние рельефа и химический состав в нанослоях поверхности исследовали с использованием последних мировых достижений в области физических методов контроля качества поверхности на растровом двулуче-

вом электронном микроскопе FEI Versa 3D LoVac. Микроскоп оснащен электронной и ионной колоннами, позволяющими осуществлять всестороннее визуальное исследование объектов и химический анализ поверхности. Распределение химических элементов по глубине поверхностного слоя определяли методом послойного травливания или в микросечениях, подготавливаемых непосредственно в камере прибора [3, 4].

В результате химического взаимодействия металлов с карбидом кремния при шлифовании возможно образование карбидов или силицидов переходных металлов. Анализ химического взаимодействия выполнен в соответствии с положениями равновесной термодинамики. Взаимодействие в неравновесной системе рассматривается как химический

процесс, достигший равновесия в тонком при-  
контактном слое.

Для нормальных условий термодинамиче-  
ская вероятность протекания химической ре-  
акции определяется значением изобарно-  
изотермического потенциала  $\Delta G^0_T$ . Расчеты  
 $\Delta G^0_T$  выполнены графическим методом в ин-  
тервале температур 300... 2000 К для реакций  
образования карбидов и силицидов металлов:



Основным принципом выбора конкретных  
химических реакций является наличие необ-  
ходимых термодинамических данных, кото-  
рые взяты из справочников Зефинова А.П.,  
Гельда П.В. и Сидоренко Ф.А. По реакциям  
(1) и (2) рассчитаны  $\Delta G^0_T$  образования  
20 карбидов и 29 силицидов металлов [5].

Для большинства реакций  $\Delta G^0_T$  имеет от-  
рицательное значение, что свидетельствует о  
принципиальной возможности протекания  
данных реакций. Исключение составляют ре-  
акции образования карбидов с участием ме-  
таллов VIIIВ подгруппы, имеющие положи-  
тельные значения  $\Delta G^0_T$  (рис. 1). Силициды и  
карбиды металлов IVB подгруппы имеют  
близкую термодинамическую вероятность  
протекания химических реакций. Однако в  
связи с большей энергетической устойчи-  
востью  $sp^3$ -конфигураций углерода в карбидах,  
они более устойчивы по сравнению с силици-  
дами. При высокой энергии активации про-  
цесса, характерной для шлифования, предпо-  
чтение следует отдать реакциям образования  
карбидов.

С переходом от металлов IVB к VB под-  
группе уровень локализации валентных элек-  
тронов в стабильные  $d^5$ -конфигурации увели-  
чивается, донорская способность металлов  
уменьшается [6]. Поэтому вероятность обра-  
зования карбидов с участием металлов IVB  
подгруппы выше. Термодинамическая вероят-  
ность образования силицидов ванадия и нио-  
бия выше, чем соответствующих карбидов.  
Для тантала, в связи с близкими значениями  
 $\Delta G^0_T$ , реакции образования карбидов и сили-  
цидов равновероятны.

У металлов VIIIВ подгруппы донорская  
способность атомов начинает уступать акцеп-  
торной. Такой металл, как никель, становится  
настолько сильным акцептором, что способен  
изменить акцепторную способность атомов  
неметалла на донорскую. Термодинамическая

вероятность образования этих карбидов очень  
низка,  $\Delta G^0_T$  во всем интервале температур  
имеет положительное значение. В связи с бо-  
лее низкой стабильностью конфигураций ва-  
лентных электронов в атоме кремния, термо-  
динамическая вероятность образования сили-  
цидов металлов выше карбидов.

Титан относится к числу наиболее адгези-  
онно активных металлов [5], поэтому при  
микроцарапании интенсивно налипают на  
вершину кристалла (рис. 2, а). Направление  
главного движения индентора слева направо.  
Состояние площадки износа на вершине кри-  
сталла при увеличении 10000 крат показано на  
рис. 2, б.

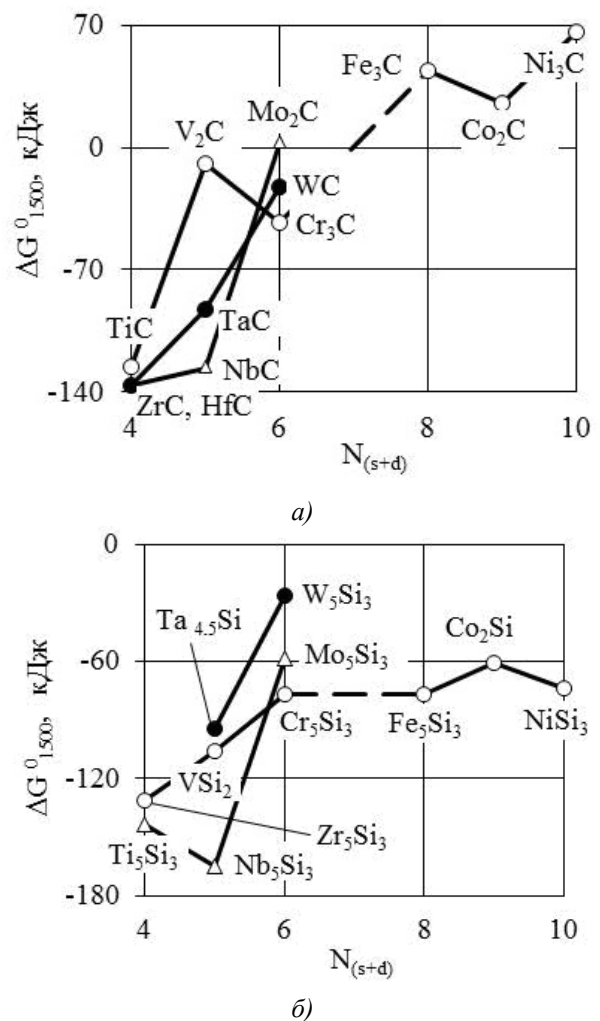
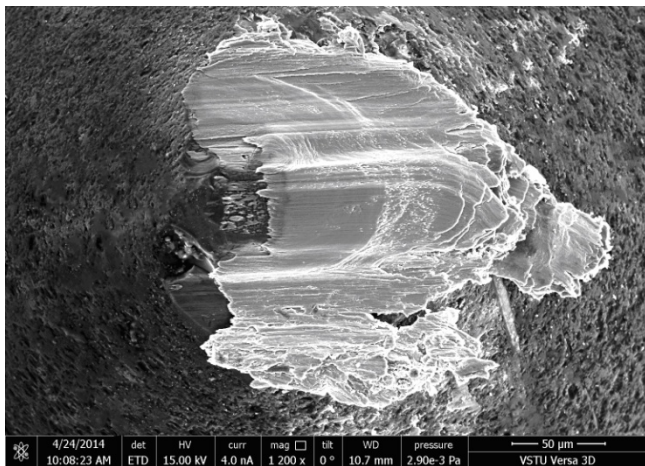


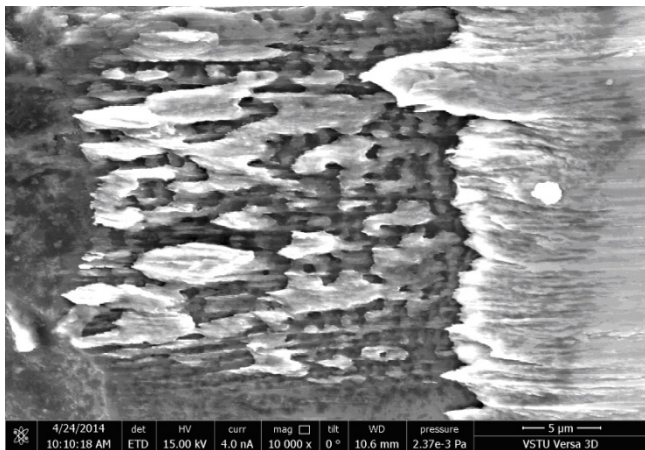
Рис. 1. Зависимость  $\Delta G^0_{1500}$  химических реакций об-  
разования карбидов (а) и силицидов (б) от числа  
валентных электронов  $N_{(s+d)}$

Химический состав площадки износа опре-  
деляли в нижней её части методом сканирова-  
ния по линии 1 в направлении сверху вниз  
(рис. 3, а), по линии 2 (рис. 3, б) в направле-  
нии слева направо, шаг сканирования –

50 мкм. В диапазоне до 1,5 мкм по линии 1 наблюдается повышенная концентрация титана (рис. 3, в). В интервале 1,7...4,0 мкм электронный луч сканирует относительно чистый участок поверхности. Средняя концентрация титана в данном интервале  $1,7 \pm 0,3$  % атом. Сканирование по линии 2 начинается с относительно чистого участка, средняя концентрация титана около  $1,4 \pm 0,4$  % атом. Далее следует участок с налипшим титаном, концентрация которого доходит до 98 % атом. На рис. 3, в линия сканирования 2 ограничена 6 мкм.



а)



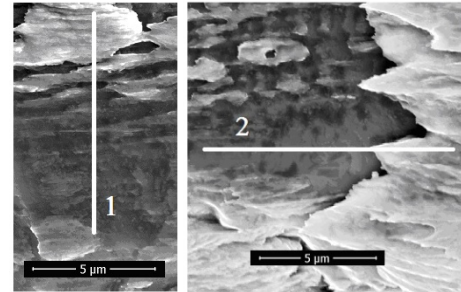
б)

Рис. 2. Вершина кристалла с налипшим металлом (а) и площадка износа (б) после микроцарапания титана

Средняя концентрация титана на поверхности площадки износа определена методом сканирования по площади и достигает 10 % атом.

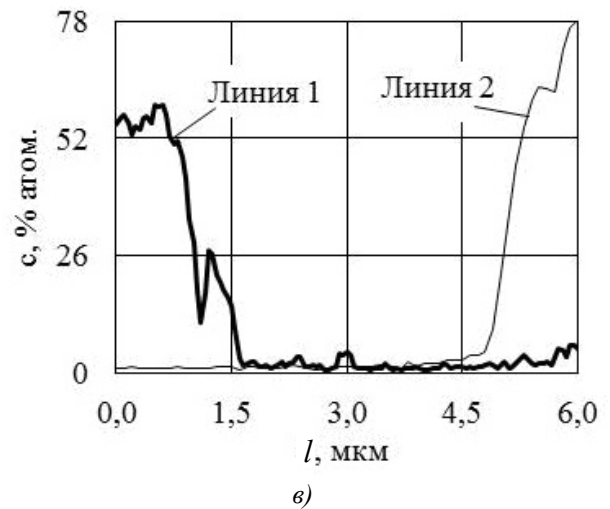
При микроцарапании ниобия на вершине кристалла формируется площадка износа, покрытая налипшим металлом. Металл налипает непосредственно на площадку износа, переднюю и боковые поверхности вершины. В ре-

зультате механического воздействия и адгезивно-усталостных процессов происходит хрупкое разрушение площадки износа с отделением макро- и микрокристаллов карбида кремния, некоторые из которых переносятся на поверхность царапины, что подтверждено микрорентгеноспектральным анализом.



а)

б)



в)

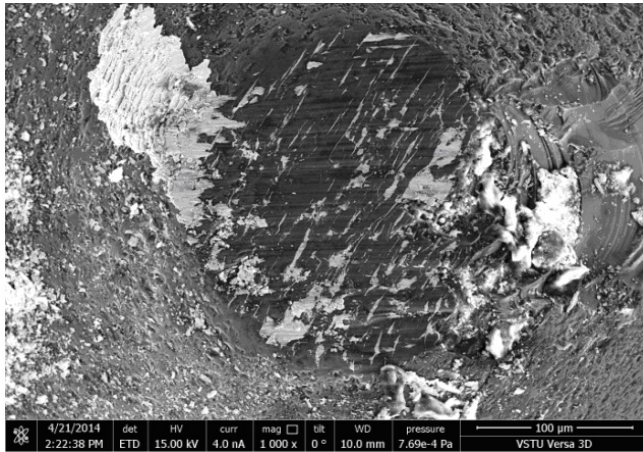
Рис. 3. Участки поверхности с линиями сканирования (а, б) и концентрация титана с по длине сканирования l (в)

На вершине кристалла при микроцарапании молибдена формируется относительно плоская отполированная площадка износа, покрытая микротрещинами и следами выкрашивания (рис. 4, а). Металл концентрируется в микротрещинах и других дефектах поверхности. При сканировании по линии АВ (рис. 4, б) пики концентраций молибдена (рис. 4, в) соответствуют положению центра трещины на линии сканирования. Концентрация молибдена на относительно чистых участках поверхности снижается почти до нуля, что свидетельствует о невысокой адгезионной активности молибдена к карбиду кремния.

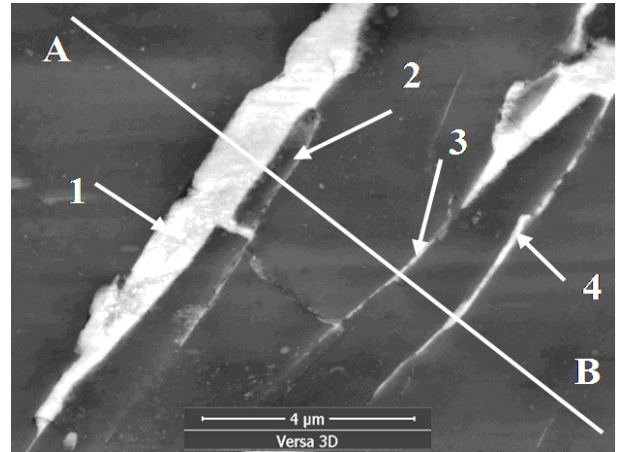
По линии сканирования АВ методом ионного травления подготовлено микросечение, проходящее через трещины 2 и 3. Предварительно, на выделенную поверхность наносили платина содержащее металлоорганическое со-

единение шириной около 2 мкм. Затем сфокусированным пучком ионов галлия осуществляли черновое травление. На сформированном поперечном срезе проводили чистовую обработку плоскости, находящуюся под защитным слоем платинового покрытия.

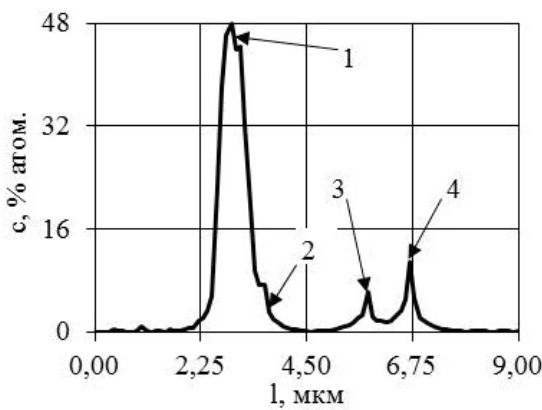
На рис. 4, *з* трещины 2 и 3 обозначены соответственно А и В, платиновое покрытие выделяется белым цветом. Глубина трещины А составляет около 2,7 мкм, трещины В – 4,5 мкм. Трещина В на глубину около 2,6 мкм заполнена материалом светлого тона.



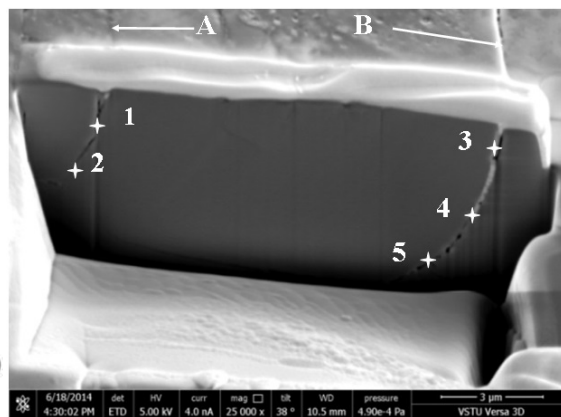
*а)*



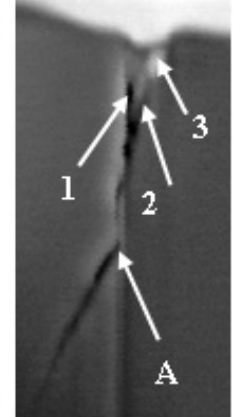
*б)*



*в)*



*з)*



*д)*

**Рис. 4.** Площадка износа кристалла карбида кремния после микроцарапания молибдена (*а, б*), микросечение поверхности (*з, д*) и диаграмма распределения молибдена по линии сканирования *AB* (*в*)

Содержание молибдена определяли в точках 1 – 5 по траектории внутренних трещин А и В. В точках 1 и 2 трещины А молибден не обнаружен. В точке 3 трещины В концентрация молибдена около 9 % атом. В точке 4, на границе предполагаемого проникновения молибдена в трещину (глубина около 2,6 мкм), концентрация снижается до 4 % атом. Ширина трещины на границе проникновения материала 35...40 нм. В точке 5 молибдена нет.

Более детальные исследования трещины А показали, что перед выходом на поверхность трещина разделяется на две составляющие 1 и 2 (рис. 4, *д*). На участке разделения ширина трещины 90...100 нм. На поверхность площадки износа выходит только трещина 2, ши-

рина которой в месте выхода около 100 нм. На глубину 130 нм трещина заполнена металлом. Об этом свидетельствуют результаты микро-рентгеноспектрального анализа: концентрация молибдена на глубине около 70 нм достигает 10 % атом. На глубине 130...150 нм ширина трещины 2 уменьшается до 30 нм.

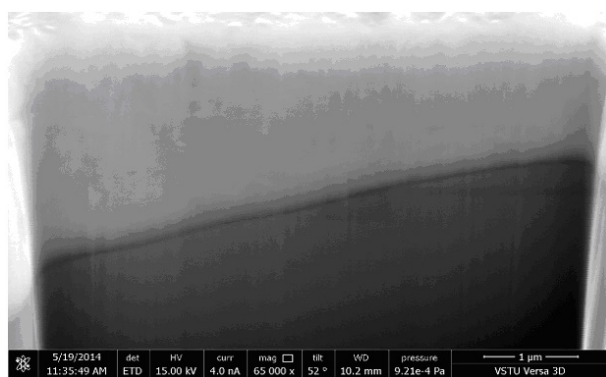
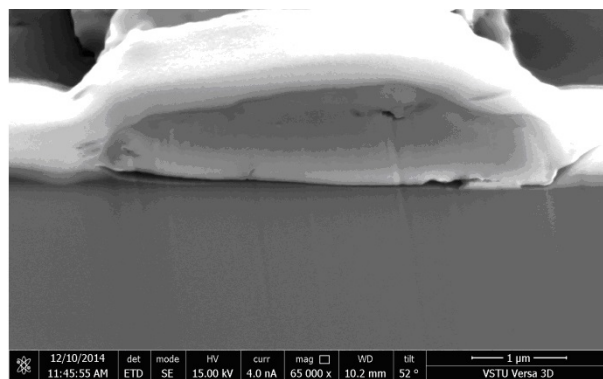
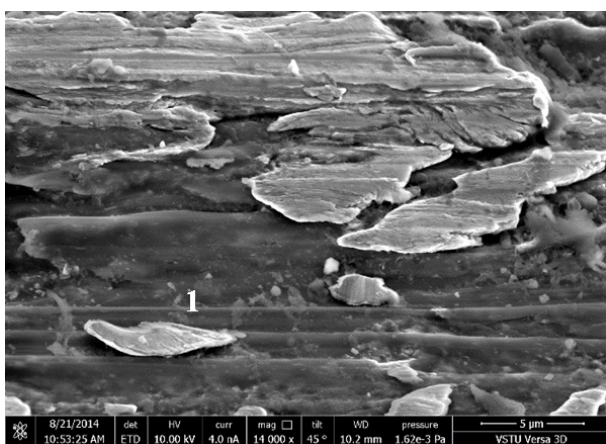
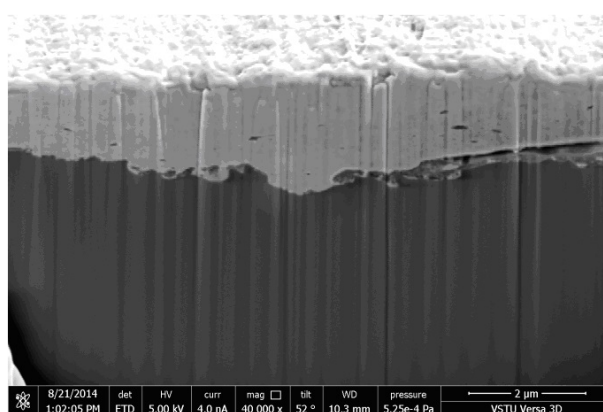
Очевидно, что через щель шириной 30...40 нм дальнейшее продвижение металла затруднено.

Аналогичным образом проведены исследования морфологии и химического состава площадки износа карбида кремния при микроцарапании остальных металлов. Установлено, что затекание металла внутрь трещины происходит еще при микроцарапании вольфрама.

Интенсивность схватывания налипшего металла с кристаллом оценивали качественно по плотности прилегания налива. Состояние контакта анализировали при наклоне предметного столика на угол до  $52^\circ$  и методом микросечений налива и кристалла.

Налипы титана прилегают к площадке износа карбида кремния плотно, без зазоров (рис. 5, *а*). Подобным образом ведут себя цирконий и ванадий. Налипы ниобия не столь

плотно прилегают к поверхности кристалла и на участках имеются зазоры (рис. 5, *б*). Налипы кобальта на поверхности корунда выглядят отдельными лепестками, разбросанными на поверхности площадки износа карбида кремния (рис. 5, *в*). Состояние торцевой части микросечения 1 свидетельствует об отсутствии сплошного контакта металла с кристаллом (рис. 5, *г*).


*а)*

*б)*

*в)*

*г)*

**Рис. 5. Состояние поверхности контакта налива металла с площадкой износа:**

*а* – титан; *б* – ниобий; *в*, *г* – кобальт

По степени прилегания налива к поверхности площадки износа кристалла металлы классифицированы на две группы: прилегающие плотно (титан, цирконий, ванадий) и с зазором (остальные металлы).

Суммарную интенсивность переноса металла на поверхность площадки износа кристалла оценивали сканированием по площади (рис. 6, *а*). Результаты получены как среднее арифметическое измерение концентрации металла на 3 – 4-х площадках износа.

В связи с достаточно большой дисперсией значимое отличие между металлами IVB подгруппы титаном и цирконием не получено. В подгруппе VB концентрация ванадия на пло-

щадке износа больше концентрации ниобия. Наименьший перенос металла наблюдается при микроцарапании тантала. Из этого следует, что перенос металла в подгруппе уменьшается с увеличением главного квантового числа валентных электронов атома металла.

В периодах концентрация титана значительно не отличается от концентрации ванадия, концентрация ниобия от концентрации циркония. В подгруппе VIB концентрация вольфрама больше концентрации молибдена, т.е. с увеличением главного квантового числа валентных электронов атомов металла перенос металла на площадку износа возрастает.

Как было показано ранее, при микроцара-

паний молибдена и вольфрама металлы оседают в основном в трещинах и других разрушениях поверхности кристалла. При микроцарапании вольфрама, в связи с его высокой твердостью, формируется более развитая поверхность площадки износа с большим количеством дефектов, где в основном сосредотачиваются металлы подгруппы VIB. Данный факт следует рассматривать, как основную причину более высокой концентрации вольфрама на поверхности площадки износа карбида кремния.

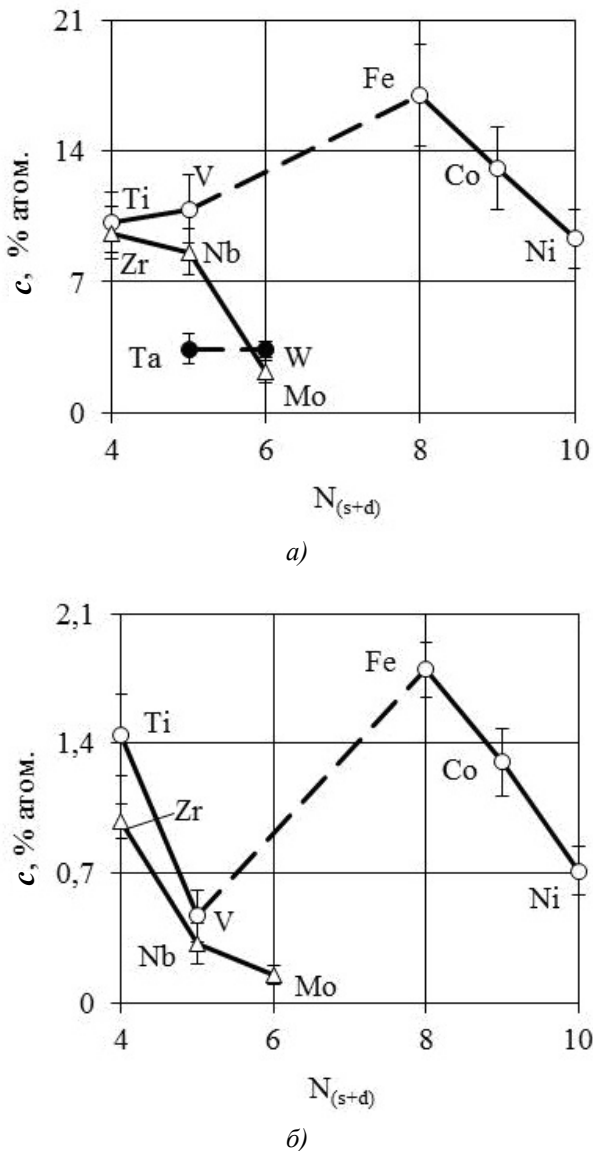


Рис. 6. Зависимость концентрации атомов металла *c* от числа  $N_{(s+d)}$ -валентных электронов в периодах после микроцарапания (а) и после удаления налипшего металла (б):

○ – 4 период; Δ – 5 период; ● – 6 период

Методом химического травления в растворах кислот металл был удален с поверхности

кристаллов. После травления концентрация металла снижается почти на порядок (рис. 6, б). Произошли изменения закономерности переноса металла в периодах. С переходом от металлов подгруппы IVB к VB наблюдается снижение переноса металла на площадку износа карбида кремния. В подгруппах с увеличением числа валентных (s+d)-электронов количество металла, оставшегося после травления в поверхностном слое площадки износа, также снижается. С переходом от металла первой половины 4-го периода к железу наблюдается более существенное, почти трехкратное повышение содержания металла.

Перенос карбида кремния на обработанную поверхность металлов исследовали при шлифовании без охлаждения кругом из карбида кремния 64CF60MB. Режим обработки: скорость шлифования – 30 м/с; продольная подача стола – 12 м/мин; подача на глубину – 0,01 мм/ход. Интенсивность контактного взаимодействия оценивали по количеству перенесенного кремния [7].

На основании статистического анализа (сравнение дисперсий и средних арифметических) можно утверждать, что в подгруппе IVB содержания кремния на шлифованной поверхности уменьшается от титана к гафнию, т.е. с увеличением главного квантового числа *n*-валентных электронов атомов металла (рис. 7, а). Такая же закономерность наблюдается и для металлов подгруппы VIB, но количество переносимого кремния почти на порядок меньше, чем при шлифовании металлов подгруппы IVB. В подгруппе VB содержание кремния увеличивается с ростом главного квантового числа. В периодах содержание кремния возрастает от металлов подгруппы IVB к металлам подгруппы VB и снижается у металлов подгруппы VIB.

С переходом от последнего элемента первой половины периода хрома к первому металлу восьмой подгруппы второй половины периода железу содержание кремния не изменяется. С увеличением количества валентных электронов на *d*-подоболочке концентрация кремния снижается у кобальта и возрастает у никеля, превосходя содержание кремния на поверхности железа [8].

Из сопоставления результатов по переносу металлов на площадку износа карбида кремния (см. рис. 6) и кристаллов карбида кремния на шлифованную поверхность (см. рис. 7, а) следует, что в подгруппе IVB с увеличением главного квантового числа взаимоперенос материалов снижается. Подобная закономер-

ность просматривается и в подгруппе VIB, кроме переноса вольфрама, содержание атомов которого больше атомов молибдена. Но причина данного факта не в более высокой адгезионной активности вольфрама к карбиду кремния, а в большем количестве дефектов на площадке износа карбида кремния, где оседает металл в результате механического защемления. На поверхности кристалла без трещин и выкрашивания концентрация вольфрама меньше.

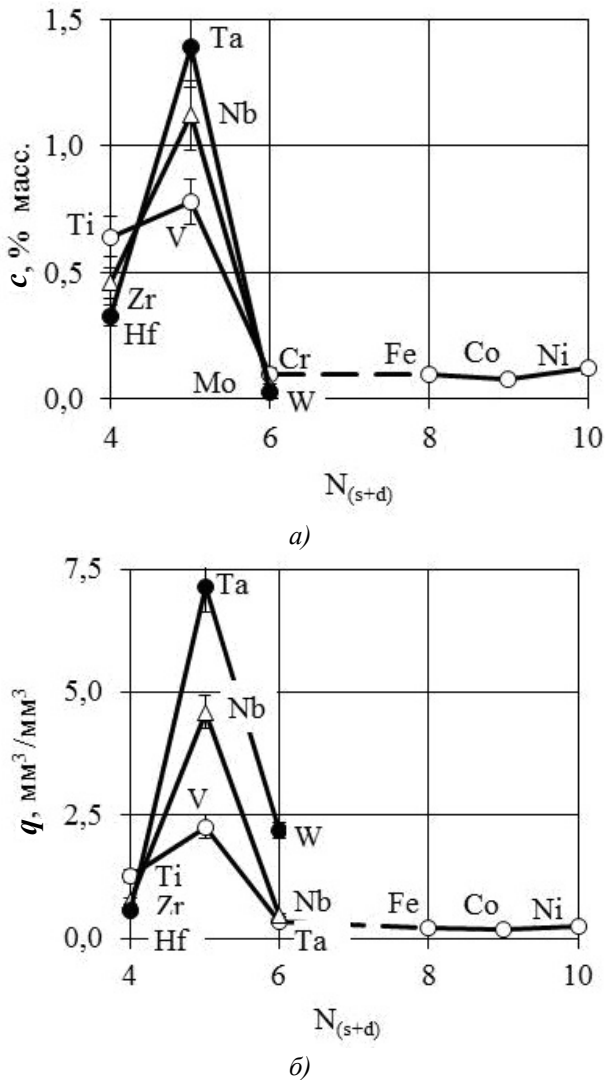


Рис. 7. Зависимость концентрации кремния  $c$  на шлифованной поверхности (а) и удельного износа круга  $q$  (б) от числа валентных электронов  $N_{(s+d)}$

Различия в закономерностях взаимопереноса материалов наблюдаются при микроцарапании и шлифовании металлов подгруппы VB: количество металла, переносимого на площадку износа карбида кремния, с увеличением главного квантового числа валентных электронов атомов металлов снижается, пере-

нос абразивного материала на обработанную поверхность возрастает.

Удельный износ круга  $q$  в каждом периоде с увеличением количества валентных электронов возрастает при переходе от металлов IVB к металлам VB подгруппы и снижается к металлам подгруппы VIB (рис. 7, б). С увеличением главного квантового числа валентных электронов  $q$  уменьшается в IVB подгруппе и увеличивается в подгруппах VB и VIB. Таким образом, износ круга при шлифовании  $d$ -переходных металлов находится также в периодической зависимости от числа валентных электронов.

Для металлов IVB и VB подгрупп наблюдается одинаковый характер изменения удельного износа круга и количества переносимого кремния: в подгруппе IVB износ круга и содержание кремния на поверхности металла уменьшаются с увеличением  $n$ , в подгруппе VB – увеличиваются. Таким образом, при шлифовании адгезионно-активных металлов в подгруппах износ круга снижается с уменьшением содержания кремния на шлифованной поверхности, характеризующего интенсивность суммарного адгезионно-когезионного взаимодействия пары абразив–металл [9].

У металлов VIB подгруппы наблюдается обратная зависимость удельного износа круга от главного квантового числа валентных электронов: с ростом  $n$  перенос абразивного материала снижается,  $q$  – увеличивается (см. рис. 7, б).

С увеличением  $n$  возрастает атомная стабильность электронной конфигурации, соответственно уменьшается склонность атомов к различного рода взаимодействиям. Поэтому в направлении от хрома к вольфраму уменьшается коэффициент трения карбида кремния по металлам при склерометрировании [5] и перенос кремния при шлифовании металлов кругом из карбида кремния. Но данный фактор, как показывают результаты экспериментов, не будет определять изнашивание круга.

Адгезионные процессы при шлифовании металлов VIB подгруппы практически не развиваются, о чем убедительно свидетельствуют оптические и электронно-микроскопические исследования морфологии площадок износа карбида кремния и обработанной поверхности металлов. Например, рельеф и субмикрорельеф поверхности металлов VIB подгруппы после шлифования достаточно чистый и совершенно не сопоставим с состоянием поверхности металлов IVB и VB подгрупп.

Таким образом, при шлифовании металлов



VIB подгруппы физико-химическое взаимодействие зерна с металлом не является определяющим фактором в изнашивании абразивного материала.

На изнашивание инструмента в данном случае существенное влияние оказывает связующая стабильность электронной конфигурации, контролирующая силы сцепления атомов в конденсированном состоянии. Например, в нормальных условиях предел прочности на разрыв  $\sigma_b$  хрома, молибдена и вольфрама равен соответственно 380, 560 и 1470 МПа. У металлов подгрупп титана и ванадия  $\sigma_b$  изменяется в интервале, соответственно, 250...440 МПа и 250...500 МПа [10]. Почти четырехкратный рост прочности металлов в подгруппе VIB существенно увеличивает энергетические затраты на разрушение металла. В связи с этим, при шлифовании металлов подгруппы VIB с увеличением  $n$  износ инструмента возрастает.

### Выводы

По интенсивности взаимопереноса материалов тугоплавкие металлы подразделяются на адгезионно-активные (титан, цирконий, гафний, ванадий, ниобий, тантал) и инертные (хром, молибден, вольфрам).

При обработке металлов IVB (титан, цирконий, гафний) и VIB (хром, молибден, вольфрам) подгрупп Периодической системы интенсивность взаимопереноса материалов снижается с увеличением главного квантового числа  $n$  валентных электронов атомов металла. В подгруппе VB (ванадий, ниобий, тантал) с увеличением  $n$  интенсивность переноса металла на площадку износа кристалла снижается, абразивного материала на шлифованную поверхность – возрастает.

При обработке адгезионно активных металлов износ шлифовального круга во многом зависит от интенсивности адгезионного взаимодействия пары абразив–металл и возрастает с увеличением содержания кремния, перенесенного на поверхность металла. При обработке инертных металлов подгруппы VB износ круга определяется связующей стабильностью электронных конфигураций атомов металла и возрастает с увеличением главного квантового числа валентных электронов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Бернлинер, Э.Д.

Браун и др.; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение. – 2003. – 576 с.

2. Носенко, В.А. Испытательный комплекс на базе прецизионного профилешлифовального станка с ЧПУ мод. Smart-B1224 III / В.А. Носенко, Р.А. Белухин, А.В. Фетисов, Л.К. Морозова // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2016. – №5 (184). – С. 35-39.

3. Носенко, В.А. Морфология поверхности корунда после микроцарапания титанового сплава / В.А. Носенко, С.В. Носенко, А.В. Авиллов, В.И. Бахмат // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 66-71. – Режим доступа: <http://indust-engineering.ru/issues/2014/2014-3-11.pdf>.

4. Носенко, В.А. Морфология поверхности карбида кремния после микроцарапания молибдена / В.А. Носенко, А.В. Авиллов, В.О. Харламов, В.И. Бахмат // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2015. – №6. – С. 66-73.

5. Носенко, В.А. Шлифование адгезионно активных металлов. – М.: Машиностроение. – 2000. – 262 с.

6. Самсонов, Г. В. Электронная локализация в твердом теле / Г.В. Самсонов, И.Ф. Прядко, Л.Ф. Прядко. – М.: Наука. 1976. – 339 с.

7. Носенко, В.А. Критерий интенсивности взаимодействия обрабатываемого и абразивного материалов при шлифовании // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2001. – №5. – С. 85-91.

8. Носенко, В.А. К вопросу об интенсивности контактного взаимодействия d-переходных металлов с карбидом кремния при шлифовании // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2002. – №5. – С. 78-84.

9. Носенко, В.А. Влияние контактного взаимодействия на износ абразивного инструмента при шлифовании // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – №1. – С. 73-77.

10. Свойства элементов: справочник / под ред. М.Е. Дрица. – М.: Металлургия. – 1985. – 672 с.

### REFERENCES

1. Chichinadze, A.V. *Friction, Wear and Lubrication (Tribology and Triboengineering)* / A.V. Chichinadze, E.M. Bernliener, E.D. Brown et al.; under the general editorship of A.V. Chichinadze. – M.: Mechanical Engineering. – 2003. – pp. 576.

2. Nosenko, V.A. Test complex based on NC precision profile grinding machine of model Smart-B1224 III / V.A. Nosenko, R.A. Belukhin, A.V. Fetisov, L.K. Morozova // *Proceedings of Volgograd State Technical University*. – 2016. – No. 5 (184). – pp. 35-39.

3. Nosenko, V.A. Corundum surface morphology after titanium alloy micro-scratching / V.A. Nosenko, S.V. Nosenko, A.V. Avilov, V.I. Bakhmat // *Mechanical Engineering: network digital scientific journal*. – 2014. – No. 3. – pp. 66-71. – Access mode: <http://indust-engineering.ru/issues/2014/2014-3-11.pdf>.

4. Nosenko, V.A. Silicon carbide surface morphology after molybdenum micro-scratching / V.A. Nosenko, A.V. Avilov, V.O. Kharlamov, V.I. Bakhmat // *Proceedings of Higher Education Institutions. Mechanical Engineering*. – 2015. – No. 6. – pp. 66-73.

5. Nosenko, V.A. *Adhesion-Active Metal Grinding*. – M.: Mechanical Engineering. – 2000. – pp. 262.

6. Samsonov, G.V. *Electron Localization in Solids* / G.V. Samsonov, I.F. Pryadko, L.F. Pryadko. – М.: Science. 1976. – pp. 339.

7. Nosenko, V.A. Interaction intensity criterion of worked and grinding materials at grinding / V.A. Nosenko // *Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*. – 2001. – No. 5. – pp. 85-91.

8. Nosenko, V.A. To problem of contact interaction intensity of d-transition metals with silicon carbide at grinding /

V.A. Nosenko, // *Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*. – 2002. – No. 5. – pp. 78-84.

9. Nosenko, V.A. Contact interaction impact upon abrasive tool wear at grinding / V.A. Nosenko // *Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*. – 2005. – No. 1. – pp. 73-77.

10. *Elements Properties: Reference Book* / under the editorship of M.E. Drits. – М.: Metallurgy. – 1985. – pp. 672.

Рецензент д. ф-м.н. В.Г. Кульков

УДК 62-1/-9

DOI: 10.12737/article\_59d496ebddec57.65109772

А.В. Морозов, к.т.н.,

В.Г. Гусев, д.т.н.

(Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых  
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87)

E-mail: prof\_gusev@mail.ru; ntk\_2005@rambler.ru

## Моделирование напряженного состояния режущей поверхности дискретного шлифовального круга

*Выполнено компьютерное моделирование в современном САЕ-комплексе Cosmos Works напряженного состояния режущей поверхности и центрального отверстия шлифовального инструмента с высокочастотной дискретизацией режущей поверхности. На основе результатов моделирования разработан прочный инструмент, позволяющий проводить дискретное шлифование на интенсивных режимах резания.*

**Ключевые слова:** шлифовальный круг; высокочастотная дискретизация; компьютерное моделирование; режущая поверхность; напряженное состояние; механическая прочность.

A.V. Morozov, Can. Eng.,

V.G. Gusev, D. Eng.

(Stoletovs State University of Vladimir 87, Gorky Str., Vladimir 600000)

## Stressed state simulation of discrete abrasive disk cutting surface

*Grinding disks with high frequency discretization of a cutting surface allow not only breaking a cutting process and decreasing its thermal intensity, but decreasing a vibration level of a technological system which has a positive effect upon quality of a surface worked. But, for realization of intensive grinding modes these tools should possess a mechanical strength not only in the central hole, but that of a discrete cutting surface. In this connection in modern CAE-complex CosmosWorks a computer simulation of a stressed state of a cutting surface and a central hole of the grinding disk subjected to a high-frequency discretization is carried out. On the basis of the simulation results there is developed a durable tool allowing the fulfillment of discrete grinding in intensive modes.*

**Keywords:** grinding disk; high-frequency discretization; computer simulation; cutting surface; stressed state; mechanical strength.

Применение новых способов шлифования [1, 2] и конструкций шлифовальных инструментов [3, 4] с высокочастотной дискретизацией режущей поверхности позволяет уменьшить уровень вибрации системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка», износ абразивного и алмазного правящего инструмента [5, 6], а также назначать более высокие режимы резания при отсутствии термического повреждения обработанного поверхностного слоя [7, 8].

Шлифовальный круг с высоко частотной

дискретизацией режущей поверхности представляет собой абразивную основу 1, в которой с помощью лазерного луча или абразивно-жидкостной струи высокого давления вырезано большое количество отверстий 2 малого радиуса  $r = 0,25 \dots 2,5$  мм (рис. 1, а, б). Окружной шаг  $T_0$  и радиус  $r$  малых отверстий определяются исходя из степени снижения температуры шлифуемой поверхности заготовки, а осевой шаг  $T_{oc}$  – неравенством  $3r < T_{oc} < 4r$ , что обеспечивает отсутствие сплошного резания в течение каждого оборота

инструмента.

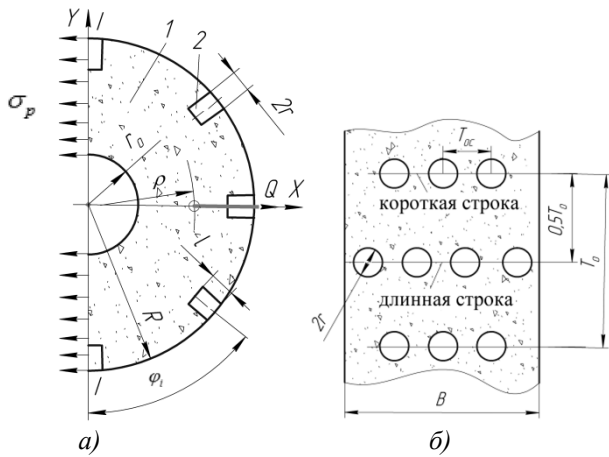


Рис. 1. Дискретный шлифовальный круг под действием центробежной силы  $Q$  с отверстиями, расположенными:

$a$  – радиально;  $b$  – строками

Вырезание отверстий на небольшом расстоянии друг от друга приводит к возникновению тонких стенок, снижающих механическую прочность режущей поверхности, к перераспределению масс, изменению площадей несущих сечений в инструменте, значений инерционных центробежных сил, действующих на технологическую систему. В этих условиях изменяются также напряжения в абразивном материале круга, уровень которых характеризует его механическую прочность.

В этой связи актуальным является конечно-элементный анализ напряженного состояния шлифовальных кругов с высокочастотной дискретизацией режущей поверхности в современном САЕ-комплексе Cosmos Works, поскольку на основании результатов анализа возможно прогнозирование механической прочности и разработка новых высокопрочных шлифовальных кругов, выдерживающих рабочую нагрузку в процессе интенсивного шлифования изделий.

Малые отверстия, выполненные в шлифовальном круге, являются концентраторами напряжений, что усложняет проектные расчеты инструмента, поэтому при прочностном анализе высоко частотных дискретных кругов использовали как аналитический метод, так и метод конечных элементов.

По требованиям безопасной работы на шлифовальном оборудовании (ГОСТ 12.3.028-82) абразивные и эльборовые круги на керамической и органической связках с наружным диаметром более 150 мм необходимо подвергать испытаниям на механическую прочность путем вращения на частоте в 1,5 раза превы-

шающей рабочую частоту инструмента. При полуторакратной перегрузке шлифовального круга по частоте вращения на него действуют значительные инерционные центробежные силы, которые могут вызвать его разрыв.

Задачей компьютерного моделирования являлось создание шлифовального инструмента с высоко частотной дискретизацией режущей поверхности, обеспечивающего реализацию интенсивных режимов шлифования без его разрушения. Конечно-элементная модель включала в себя шлифовальный круг и ось симметрии, связанные между собой контактными элементами, средний размер конечного элемента в модели (средняя величина ребра) составляла 1 мм. Для рационального использования ресурсов программного обеспечения САЕ-комплекса Cosmos Works расчетная модель представляла собой четвертую часть шлифовального круга. Влияние отброшенных частей шлифовального инструмента компенсировалось граничными условиями.

Компьютерное моделирование проведено для широко распространенного в промышленности шлифовального круга из белого электрокорунда зернистостью  $F(40-46)$  и твердостью  $L$ , подвергнутого высоко частотной дискретизации. Физико-механические характеристики инструмента, необходимые для моделирования: наружный диаметр режущей поверхности  $D = 250$  мм; диаметр посадочного отверстия  $d = 76$  мм; высота  $B = 20; 32$  мм; плотность абразивного материала  $\gamma = 2500$  кг/м<sup>3</sup>; модуль упругости  $E = 3 \cdot 10^4$  МПа; предел прочности на растяжение 16 МПа; сжатие 35 МПа; изгиб 25 МПа; рабочая частота вращения 2880 мин<sup>-1</sup>; коэффициент теплопроводности  $\lambda = 4$  Вт/м<sup>2</sup>К; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,22$  [4]. Оценка прочности шлифовального круга с высоко частотной дискретизацией режущей поверхности основывалась на гипотезе максимального нормального напряжения Мизеса.

Результаты моделирования показали, что максимальные напряжения Мизеса 6,13 МПа (рис. 2) меньше допускаемых и находятся на поверхности центрального (посадочного) отверстия круга. Минимальные напряжения распределяются вдоль вырезанных радиальных отверстий, что свидетельствует о повышении механической прочности полезного слоя абразивного материала инструмента.

Согласно ГОСТ 52588-2006 коэффициент запаса прочности  $n$  шлифовального круга при работе в закрытой рабочей зоне с механиче-

ской подачей должен быть не менее 1,75. Запас прочности  $n$  определяли для двух опасных сечений дискретного шлифовального круга: центрального отверстия и плоскости перехода от сплошной части круга к дискретной. Моделирование показало, что запас прочности  $n_d$  центрального отверстия дискретного круга примерно на 20 % больше запаса прочности  $n_c$  сплошного ( $n_d = 2,6 > n_c = 2,1$ ), что обусловлено выполнением радиальных отверстий на глубину полезно используемого абразивного слоя, уменьшением массы дискретного инструмента по сравнению со сплошным и инерционной нагрузки на технологическую систему.

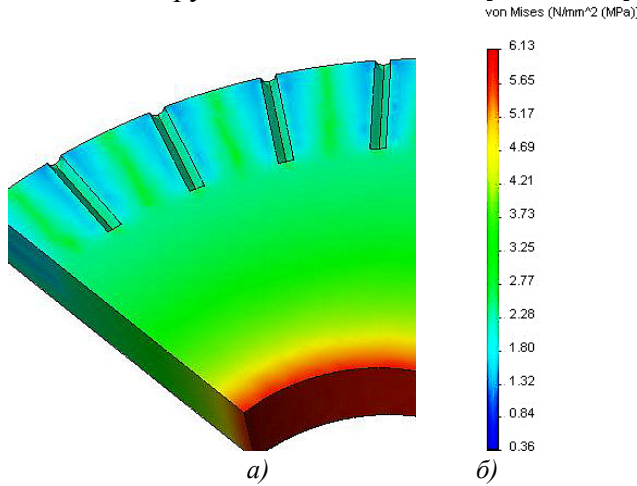


Рис. 2. Распределение напряжений в дискретном шлифовальном круге (а) и поле интенсивности напряжений Мизеса (б)

В диаметральной плоскости дискретного и сплошного кругов значения радиальных и окружных напряжений, вызванных центробежными силами, примерно одинаковы и меньше допускаемых напряжений. Для плоскости перехода от сплошной части круга к дискретной запас прочности  $n = 4,8$ . Приведенные данные свидетельствует о высокой механической прочности, как центрального отверстия, так и полезно используемого абразивного слоя инструмента с высоко частотной дискретизацией режущей поверхности.

На режущей поверхности, подвергнутой высоко частотной дискретизации, максимальные напряжения Мизеса находятся на периферийных площадках стенок между вырезанными соседними отверстиями (рис. 3, а), при этом в процессе дискретного шлифования, согласно полю напряжений, наибольшие их значения достигают 9,39 МПа (рис. 3, б), которые меньше допускаемых. При входе режущих абразивных зерен, расположенных на кромках вырезанных отверстий, возникают напряже-

ния сжатия, а при выходе из материала – напряжения растяжения, которые также меньше допускаемых.

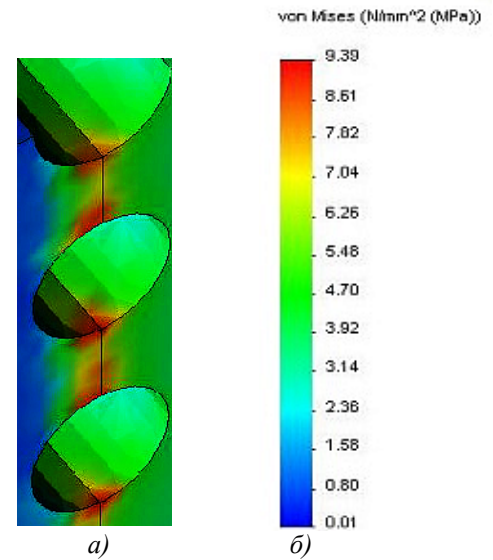


Рис. 3. Напряжение дискретного шлифовального круга в стенках между соседними отверстиями (а), поле напряжений режущей поверхности (б)

Кроме компьютерного моделирования, для оценки прочности дискретного инструмента разработана аналитическая модель прочности, которая основана на уравнениях теории упругости в осесимметричной постановке. Для разработки аналитической модели необходима информация о геометрических размерах дискретного инструмента, числе отверстий в короткой и длинной строках, а также на всей режущей поверхности.

Число отверстий, уместяющихся по окружности шлифовального круга,  $n_o = \pi D / T_o$ , в длинной строке  $n_d = B / T_{oc}$  и короткой строке  $n_k = n_d - 1$ . Суммарное число отверстий, размещенных на всей режущей поверхности круга,  $n_\Sigma = n_o (n_d + n_k)$ . Масса абразивного материала, удаленного из половины круга в результате вырезания отверстий вычисляется по формуле

$$m_0 = \frac{\pi r^2 l \gamma n_o (n_d + n_k)}{2}, \quad (1)$$

где  $r, l$  – радиус и длина вырезанного отверстия соответственно;  $\gamma$  – плотность абразивного материала.

Масса половины дискретного круга с радиальными отверстиями:

$$m = \frac{\pi(D^2 - d^2)B\gamma}{8} - m_0 \quad (2)$$

где  $D, d, B$  – диаметр режущей поверхности, центрального отверстия и высота шлифовального круга соответственно.

Радиус центра тяжести половины круга с радиальными отверстиями (рис. 1, а):

$$\rho = \frac{F_1 \rho_1 - F_2 \rho_2 - \sum_{i=1}^{n_{0/2}} F_3 \rho_3 \cos \varphi_i}{F_1 - F_2 - \sum_{i=1}^{n_{0/2}} F_3}, \quad (3)$$

где  $F_1, F_2$  – площадь полукруга диаметром  $D$  и  $d$  соответственно;  $F_3$  – площадь продольного сечения вырезанного отверстия;  $\rho_1 = \frac{2D}{3\pi}$ ,

$\rho_2 = \frac{2d}{3\pi}$ ,  $\rho_3 = \frac{D-l}{2}$  – радиус центра тяжести полукруга диаметром  $D$  и  $d$  соответственно, а также радиус окружности, на которой располагаются центры вырезанных отверстий;  $\varphi_i$  – угол между осью  $x$  и радиально расположенной осью рассматриваемого вырезанного отверстия.

Неуравновешенная центробежная сила, действующая на половину дискретного круга в процессе вращения на рабочей частоте равна

$$Q = m\omega^2 \rho, \quad (4)$$

где  $\omega \approx 0,105n_p$  – угловая скорость круга;  $n_p$  – рабочая частота вращения круга.

Напряжения растяжения в опасном сечении I – I дискретного круга (рис. 1, а):

$$\sigma_p = \frac{Q}{F_p} = \frac{m\omega^2 \rho}{(D-d)B - 2n_d r l}, \quad (5)$$

где  $F_p$  – площадь опасного сечения, работающего на разрыв;  $l$  – длина вырезанного отверстия.

Число оборотов дискретного инструмента, при котором происходит его разрушение, определяют исходя из предположения, что в момент разрыва во всех точках расчетного сечения окружные напряжения  $\sigma_o$  равны пределу прочности материала круга при растяжении  $[\sigma_p]$ . С учетом этого определена разрушающая угловая скорость дискретного шлифовального инструмента:

$$\omega_o = \sqrt{\frac{[\sigma_p]((D-d)B - 2n_d r l)}{m \rho}}. \quad (6)$$

Запас прочности дискретного круга по разрушающим оборотам определяли по формуле

$$k = \frac{\omega_o}{\omega}. \quad (7)$$

Для упрощения расчетов по формулам (1) – (7) построены графики зависимости количества вырезанных отверстий от радиуса  $r$ , наружного диаметра  $D$  и высоты  $B$  инструмента.

При увеличении радиуса  $r$  число отверстий в короткой  $n_k$ , длинной  $n_d$  строках и на всей режущей поверхности  $n_\Sigma$  уменьшается (рис. 4, а, б), так как с ростом  $r$ , увеличивается площадь поперечного сечения вырезанного отверстия, в то время как площадь режущей поверхности при неизменных габаритных размерах круга остается постоянной. С увеличением диаметра  $D$  и высоты  $B$  дискретного круга суммарное число отверстий  $n_\Sigma$  возрастает по линейной зависимости (рис. 5, а, б).

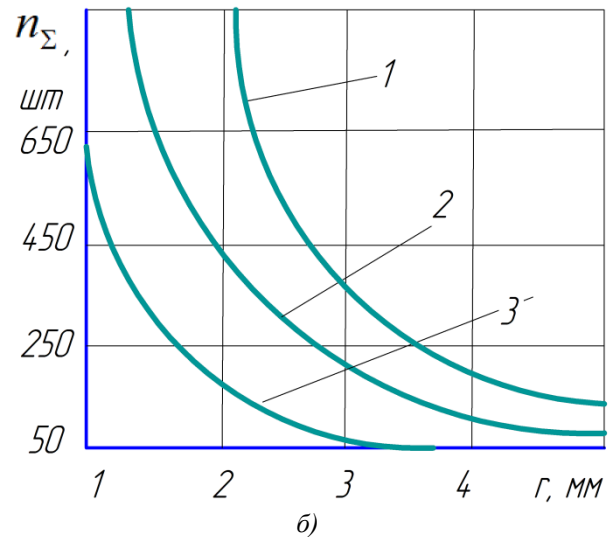
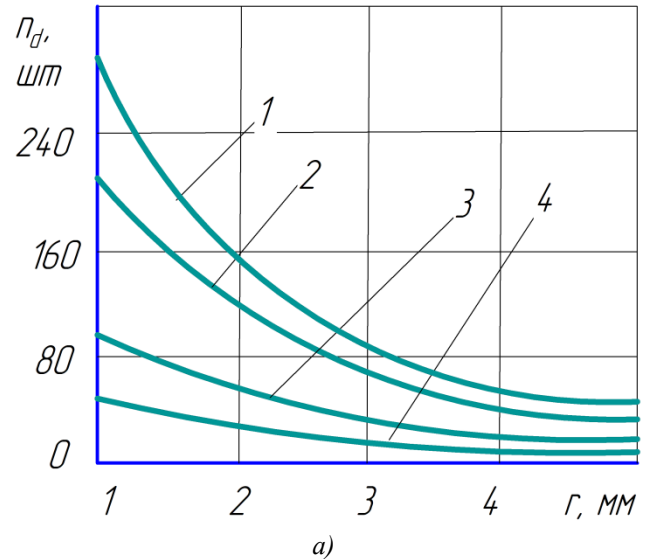
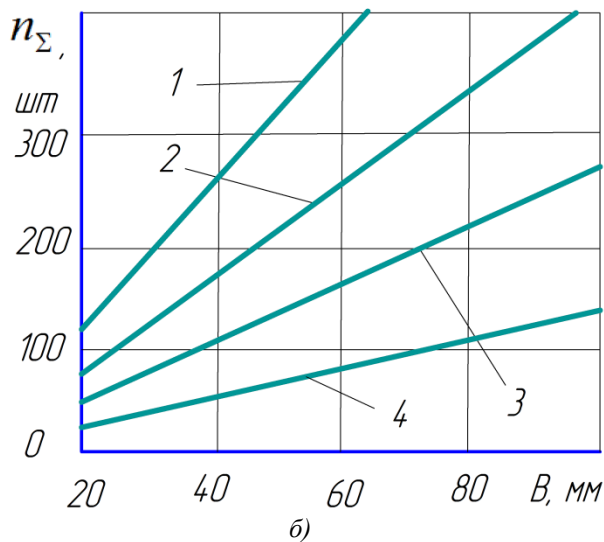
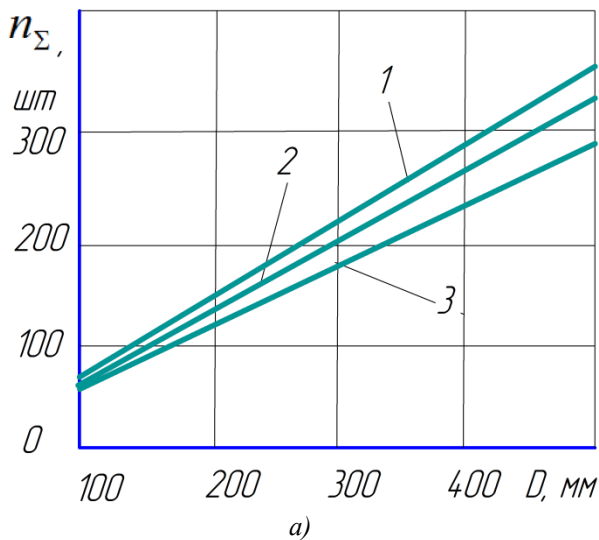


Рис. 4. Влияние радиуса  $r$ :

а) на число отверстий в длинной строке: 1 –  $n_d = 300r^{-1}$ ,  $D = 700$  мм; 2 –  $n_d = 214r^{-1}$ ,  $D = 500$  мм; 3 –  $n_d = 86r^{-1}$ ,  $D = 200$  мм; 4 –  $n_d = 42r^{-1}$ ,  $D = 100$  мм; б) на число отверстий режущей поверхности круга: 1 –  $n_\Sigma = \frac{3303-107r}{r^2}$ ,  $D = 500$  мм; 2 –  $n_\Sigma = \frac{1980-20r}{r^2}$ ,  $D = 300$  мм; 3 –  $n_\Sigma = \frac{660-21r}{r^2}$ ,  $D = 100$  мм



**Рис. 5. Изменение суммарного числа отверстий на режущей поверхности:**

а) в функции её диаметра  $D$ : 1 –  $n_{\Sigma} = 0,71D$ ,  $r = 1$  мм; 2 –  $n_{\Sigma} = 0,66D$ ,  $r = 3$  мм; 3 –  $n_{\Sigma} = 0,61D$ ,  $r = 5$  мм;  
 б) в функции её высоты  $B$ : 1 –  $n_{\Sigma} = 7,3B - 36$ ,  $D = 500$  мм; 2 –  $n_{\Sigma} = 4,5B - 21$ ,  $D = 300$  мм; 3 –  $n_{\Sigma} = 3,0B - 14$ ,  $D = 200$  мм; 4 –  $n_{\Sigma} = 1,5B - 7$ ,  $D = 100$  мм

Окружные и радиальные напряжения сплошного круга, нагруженного центробежной силой, определяются по формулам

$$\sigma_r = \frac{3 + \mu}{8} \rho \omega^2 (R^2 + r_o^2 + \frac{R^2 r_o^2}{R_i^2} - R_i^2), \quad (8)$$

$$\sigma_o = \frac{3 + \mu}{8} \rho \omega^2 (R^2 + r_o^2 + \frac{R^2 r_o^2}{R_i^2} - \frac{1 + 3\mu}{3 + \mu} R_i^2), \quad (9)$$

где  $\rho$  – плотность абразивного материала;  $\omega$  – угловая скорость шлифовального круга;  $R$ ,  $r_o$ ,  $R_i$  – радиус режущей поверхности, поса-

дочного отверстия и текущий радиус шлифовального круга соответственно.

Результаты расчета окружных и радиальных напряжений в сплошном круге по (8) и (9) показали хорошую сходимость данных, полученных при моделировании и аналитическом расчете. Так, максимальные значения радиальных напряжений, полученных при использовании сравниваемых методов, составили соответственно 1,45 и 1,47 МПа (расхождение 1,3 %), а максимальные значения окружных напряжений – 6,12 и 6,22 МПа (расхождение 1,6 %). Хорошее совпадение результатов подтверждают корректность конечно-элементной модели, а именно: задания кинематических граничных условий, условий приложения нагрузки, свойств абразивного материала шлифовального круга и геометрических параметров конечных элементов.

Таким образом, результаты компьютерного моделирования и аналитического расчета показали, что для шлифовального круга с высокочастотной дискретизацией режущей поверхности, выполненной в соответствии с рекомендациями [3], напряжения в центральном отверстии круга и на его режущей поверхности меньше по сравнению со сплошным кругом, что объясняется уменьшением его массы из-за большого количества выполненных радиальных отверстий.

Уменьшение массы приводит к снижению рабочей нагрузки на шпиндель шлифовального станка и дискретный инструмент, что обеспечивает запас прочности центрального отверстия дискретного круга  $n = 2,6$  и плоскости перехода от сплошной части круга к дискретной  $n = 4,8$  при требуемом по стандарту запасу прочности  $n \geq 1,75$ .

Приведенные результаты исследований свидетельствуют о высокой механической прочности разработанных шлифовальных инструментов с высоко частотной дискретизацией режущей поверхности и возможности использования в процессах интенсивного дискретного шлифования без опасения их разрушения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. № 2520169 РФ. Способ дискретизации абразивного инструмента // Гусев В.Г., Морозов А.В., Метелкин О.Ю., заявл. 02.11.2012, опубл. 20.04.2014. Бюл. №9.
2. Пат. № 2589993 РФ. Способ дискретизации режущей поверхности шлифовального инструмента /Морозов А.В, Гусев В.Г., заявл. 05.12.2014, опубл. 14.06.2016 Бюл. № 19.

3. Гусев, В.Г., Морозов, А.В. Технология дискретизации рабочих поверхностей шлифовальных кругов лазером и гидроабразивной струей // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – №9(73). – С. 20–27.

4. Пат. № 2582841 РФ. Шлифовальный инструмент с дискретной режущей поверхностью // Морозов А.В., Гусев В.Г., Швагирев П.С., заявл. 05.12.2014, опубл.27.04.2016. Бюл. №12.

5. Gusev V.G., Morozov A.V., Shvagirev P.S. Evaluating discrete wheels and their influence on grinding dynamics (2009). Russian Engineering Research, 29(8), pp.835 – 837.

6. Морозов, А.В. Износ алмазного инструмента при правке дискретных шлифовальных кругов // Вестник машиностроения. – 2016. – № 3. – С. 59–64.

7. Gusev V.G., Morozov A.V. Distribution of Thermal Fields in Face Grinding by Slotted Abrasive Segments (2016). Russian Engineering Research, Vol. 36, No3, pp. 169–173. ISSN 1068-798X.

8. Гусев В.Г., Морозов А.В. Плоское периферийное шлифование дискретными кругами: монография.– Йошкар-Ола: Коллоквиум, 2012. – 222 с. ISBN 978-5-905371-38-7.

## REFERENCES

1. Pat. No.2520169 the RF. *Method for Abrasive Tool Discretization* // Gusev V.G., Morozov A.V., Metelkin O.Yu.,

applied 02.11.2012, published 20.04.2014. Bull. No. 9.

2. Pat. No.2589993 the RF. *Method for Discretization of Grinding Tool Cutting Surface* // Morozov A.V., Gusev V.G., applied 05.12.2014, published 14.06.2016. Bull. No. 19.

3. Gusev, V.G., Morozov, A.V. Technology of abrasive disk working surface discretization with laser and hydro-abrasive jet // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – No. 9(73). – pp. 20-27.

4. Pat. No.2582841 the RF. *Polishing Tool with Discrete Cutting Surface*// Morozov A.V., Gusev V.G., Shvagirev P.S., applied 05.12.14, published 27.04.2016. Bull. No.12.

5. Gusev V.G., Morozov A.V., Shvagirev P.S. Evaluating discrete wheels and their influence on grinding dynamics (2009). Russian Engineering Research, 29(8), pp.835 – 837.

6. Morozov, A.V. Diamond tool wear at discrete grinding disks dressing // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2016. – No.3. – pp. 59-64.

7. Gusev V.G., Morozov A.V. Distribution of Thermal Fields in Face Grinding by Slotted Abrasive Segments (2016). Russian Engineering Research, Vol. 36, No3, pp. 169–173. ISSN 1068-798X.

8. Gusev V.G., Morozov A.V. Flat Peripheral Grinding with Discrete Disks: monograph. – Yoshkar-Ola: Colloquium, 2012. – pp. 222 ISBN 978-5-905371-38-7.

Рецензент д.т.н. В.И. Денисенко

ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО  
И ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЖУРНАЛА

**«Научно-технические технологии в машиностроении»**  
объявляет подписку на 2018 год

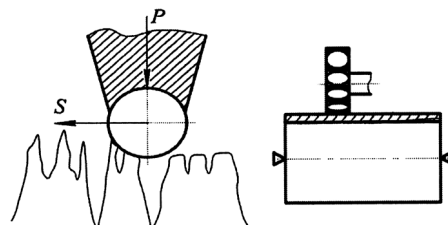
Подписной индекс **79195**  
по объединенному каталогу  
**«Пресса России. Газеты и журналы»**

Журнал выходит с 2011 г.

Почтовый адрес издательства:

241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7,

**Редакция издания приглашает авторов публикаций к совместной работе.**



УДК 621.924

DOI: 10.12737/article\_59d496ec40df54.66288140

**В.А. Лебедев**<sup>1</sup>, к.т.н.,

**Г.В. Серга**<sup>2</sup>, д.т.н.,

**М.М. Чаава**<sup>1</sup>, к.т.н.,

**Г.В. Дёмин**<sup>1</sup>, магистр

<sup>1</sup>Донской государственной технической университет,  
344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1;

<sup>2</sup>Кубанский государственный аграрный университет,  
350044, г. Краснодар, ул. Калинина 13, кв. 64)

E-mail: va.lebedev@yandex.ru

## **Компоновочные схемы малогабаритных роторно-винтовых вибрационных технологических систем для отделочно-упрочняющей обработки деталей**

*Представлены преимущества и область практического применения роторно-винтовых вибрационных технологических систем. Приведены компоновочные схемы малогабаритных роторно-винтовых вибрационных станков для отделочно-упрочняющей обработки деталей, полученные методами инженерной геометрии и компьютерной графики.*

**Ключевые слова:** роторно-винтовые вибрационные технологические системы; отделочно-упрочняющая обработка; малогабаритные станки; производительность процесса.

**V.A. Lebedev**<sup>1</sup>, Can. Eng.,

**G.V. Serga**<sup>2</sup>, D. Eng.,

**M.M. Chaava**<sup>1</sup>, Can. Eng.,

**G.V. Demin**<sup>1</sup>, M. Sc.

<sup>1</sup>Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., Rostov-upon-Don 344010,

<sup>2</sup>Kuban State Agricultural University, 64, Kalinin Str., Krasnodar, 350044)

## **Arrangement circuits of small-size of rotor-helical vibration technological systems for parts finish-strengthening**

*Advantages and a field of the actual application of rotor-helical vibration technological systems are presented. Arrangement circuits of small-size rotor-helical vibration machines for parts finish-strengthening obtained through the methods of engineering geometry and computer graphic are shown.*

**Keywords:** rotor-helical vibration technological systems; finish-strengthening; small-size machines; process capacity.

Технико-экономические преимущества применения роторно-винтовых вибрационных технологических систем (РВВТС) для отделочно-упрочняющей обработки деталей обусловлено тем, что по сравнению с широко известными в отечественной и зарубежной

практике вибрационными технологиями, они позволяют повысить производительность процесса за счет расширения диапазона изменений результирующих векторов перемещения частиц рабочих сред и обрабатываемых деталей, повышения интенсивности их сме-



шивания и переориентации, а также увеличения скорости их движения от загрузки к выгрузке.

Применение в РВВТС рабочего органа в виде винтовых роторов обеспечивает обрабатываемым деталям и частицам рабочих сред сложное пространственное движение с большой амплитудой и одновременное воздействие на них колебаний в трех взаимно перпендикулярных направлениях, в результате чего увеличивается энергоёмкость взаимодействия обрабатываемых деталей и частиц рабочих сред как между собой так и со стенками винтового ротора, и как следствие повышается интенсивность обработки.

С целью обеспечения эффекта виброожижения и как следствие активации массы загрузки (обрабатываемые детали и частицы рабочих сред) в РВВТС реализуется принцип комбинированного воздействия на неё низкочастотных колебаний большой амплитуды и низкочастотных колебаний малой амплитуды путем установки рабочих органов на виброопоры.

Для практического использования РВВТС в технологии изготовления деталей машин на операциях отделочной и упрочняющей обработки на основе использования методов инженерной геометрии и компьютерной графики разработаны компоновочные схемы малогабаритных станков. Такие станки позволяют, используя технологические возможности РВВТС, повысить производительность и эффективность вышеназванных технологических процессов, значительно сократить производственные площади, а также автоматизировать производственные циклы обработки деталей.

Разработка малогабаритных РВВТС осуществлялась в трёх основных направлениях:

1. Совершенствование формы рабочих органов станков.

2. Совершенствование форм рабочих органов станков в сочетании с оптимальной компоновкой рабочих органов по высоте и уменьшением рабочих площадей.

3. Совершенствование формы рабочих органов станков в сочетании с оптимизацией рабочих площадей под эти станки.

На рис.1 представлена **РВВТС с наклонным цилиндрическим ротором**. Общий вид станка содержит рабочий орган – цилиндрический ротор 1, средство для загрузки 2, средство для разгрузки 3 и привода (не показан).

Цилиндрический ротор 1 (рис. 2) снабжен торцевыми стенками эллиптической формы. Торцевая стенка 14 у загрузочной втулки 4

выполнена плоской и смонтирована под углом  $\alpha$  к оси вращения рабочего органа. Торцевая стенка 15 у разгрузочной втулки 5 выполнена в виде эллиптического конуса, установленного под углом  $\beta$  к оси вращения ротора, при этом  $\beta$  не равен  $\alpha$ .

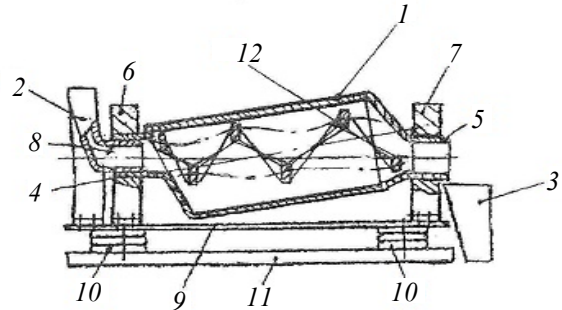


Рис. 1. Станок с наклонным цилиндрическим ротором:

1 – рабочий орган – ротор; 2 – загрузочное приспособление; 3 – разгрузочное приспособление; 4 и 5 – втулки рабочего органа; 6 и 7 – подшипниковые опоры; 8 – носок загрузочного устройства; 9 – рама; 10 – виброопоры; 11 – станина; 12 – пружина

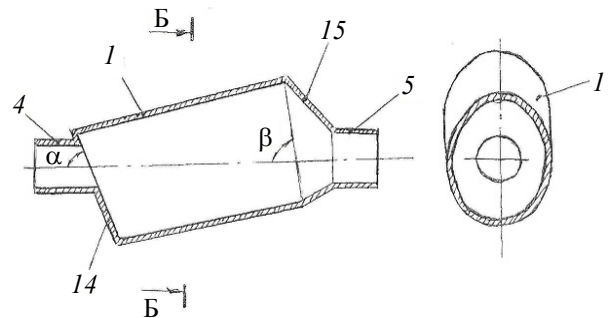


Рис. 2. Конструкция ротора

Станок работает следующим образом. Обрабатываемые детали и частицы рабочих сред в виде или абразивных гранул или металлических шариков (рис. 1) подаются через загрузочное приспособление 2, носок 8 во внутрь вращающегося ротора 1. Обработанные детали и частицы рабочей среды через втулку 5 выгружаются в разгрузочное приспособление 3. При вращении ротора 1 обрабатываемые детали и частицы рабочей среды осуществляют асимметричное пространственное движение и низкочастотные колебания с большой амплитудой, в результате чего обеспечивается последовательное уплотнение и разряжение массы загрузки, а также продвижение её от загрузки к выгрузке.

Колебания деталей и частиц рабочей среды в трех взаимно перпендикулярных направлениях активизирует сам рабочий орган, установ-

ленный на виброопорах рамы за счет конструктивного исполнения наклонных торцевых стенок и расположения их под разными углами к оси вращения. Такое расположение наклонных торцевых стенок образует эксцентриситет, обусловленный смещением оси камеры относительно оси её вращения.

Создание дополнительных низкочастотных колебаний приводит к нарушению стационарности движения массы загрузки. В результате нарушения упорядоченности процесса движения массы загрузки, движение её становится более активным, ликвидируются зоны малой подвижности, возрастает энергоёмкость соударений рабочих частиц с обрабатываемыми деталями, и как следствие повышается эффективность обработки.

Процесс нестационарности движения частиц масс загрузки усугубляется расположением торцевых стенок 14 и 15 эллиптической формы, что существенно меняет направление движения частиц массы загрузки вдоль оси вращения ротора 1 и создает зоны различного давления на них торцевых стенок 14 и 15. Поэтому, частицы масс загрузки под воздействием геометрического уклона ротора 1 и разности давления торцевых стенок эллиптической формы 14 и 15, расположенных под углом друг к другу и к оси вращения ротора 1, имеют возможность не только двигаться по сложным траекториям, но и перемещаться в осевом направлении от загрузки к выгрузке, создавая при этом турбулентные потоки.

В процессе движения порционные массы загрузки периодически поднимаются вверх и падают вниз на противоположные стенки рабочего органа. Наличие смонтированной внутри ротора цилиндрической пружины 12 позволяет управлять интенсивностью процесса обработки путём изменения направления витков пружины по отношению к направлению вращения ротора.

**РВТС с ярусным расположением роторов по высоте** показан на рис 3. Станок состоит из загрузочного устройства 1, разгрузочного устройства 2, корпуса 3, упруго установленного на основании 4. В нижней части корпуса 3 смонтирован вибратор 5.

Станок включает три жестко установленных винтовых ротора 6, 7, 8. Патрубок загрузочного устройства 1 вмонтирован во входное отверстие винтового ротора 6. Выходное отверстие винтового ротора 6 закрыто крышкой 9, которая не только перекрывает одновременно и входное отверстие винтового ротора 7, но и обеспечивает перемещение массы за-

грузки из верхнего винтового ротора 6 в нижележащий второй винтовой ротор 7 через его входное отверстие 11. Выходное отверстие 12 второго винтового ротора 7 закрыто крышкой 13, которая перекрывает одновременно и входное отверстие 14 нижележащего третьего винтового ротора 8, обеспечивает передачу массы загрузки их второго винтового ротора 7 в нижележащий винтовой ротор.

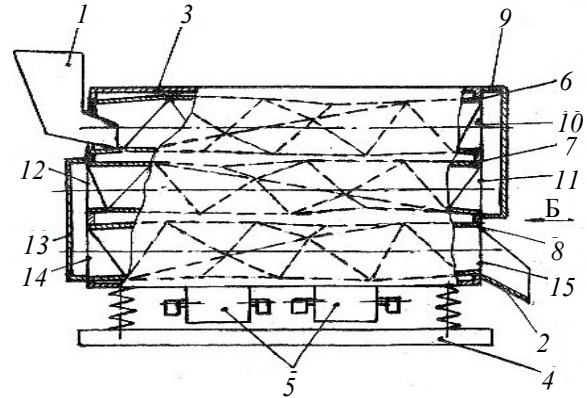


Рис. 3. Станок с ярусно расположенными винтовыми роторами

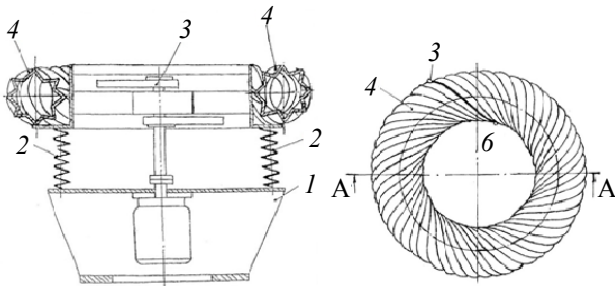
Под выходным отверстием 15 третьего винтового ротора 8 смонтировано разгрузочное отверстие 2. Винтовые роторы 6, 7, 8 изготовлены винтовыми пустотелыми с направленными по периметру навстречу друг другу плоскими или криволинейными пластинами (стенками).

Станок для отделочно-упрочняющей обработки деталей с ярусно установленными винтовыми роторами работает следующим образом. Посредством загрузочного устройства 1 внутрь верхнего винтового ротора 6 загружаются обрабатываемые детали и рабочая среда. Под воздействием возмущающих сил вращающегося вибратора 5 массам загрузки передаются через стенки винтовых роторов 6, 7, 8 низкочастотные колебания. Массы загрузки под влиянием вибраций совершают вращательное движение в плоскостях, перпендикулярных оси симметрии винтовых роторов 6, 7, 8. Плоские стенки винтового ротора 6, 7, 8 изменяют и придают дополнительное движение массам загрузки, а также перемещают их от загрузки к выходным отверстиям каждого винтового ротора и выгружают за пределы станка.

В процессе перемещения масс загрузки от загрузочного устройства 1 к разгрузочному устройству 2 массы загрузки совершают сложное пространственное движение, так как направление их движения под воздействием вибрации изменяются под воздействием раз-

нонаклоненных стенок винтовых роторов 6, 7, 8, что интенсифицирует процесс обработки. При ярусном расположении винтовых роторов 6, 7, 8 не только интенсифицируется процесс обработки, но и сокращаются габариты станка по длине.

Совершенствование формы рабочих органов станков методами инженерной геометрии и компьютерной графики в сочетании с оптимизацией рабочих площадей под эти станки реализовано в *РВВТС с кольцевым винтовым ротором* (рис. 4) [3].



**Рис. 4. Малогабаритный станок с кольцевым винтовым ротором:**

1 – станина; 2 – пружины; 3 – вибратор; 4 – рабочий орган

В малогабаритном станке с кольцевым винтовым ротором частицы рабочих сред и обрабатываемые детали совершают одновременно поступательное по кольцу и винтовое вращательное движение, при котором и происходит процесс отделочно-зачистной обработки.

В результате совершенствования форм рабочих органов РВВТС методами инженерной геометрии и компьютерной графики можно успешно осуществлять не только отделочно-упрочняющую обработку, но и транспортировку предметов, перемешивание, разрушение предметов, сепарацию, сушку, измельчение, например:

- в машиностроении при выполнении отделочно-зачистной обработки на отдельных ее разновидностях (черновая обработка, снятие заусенцев) удается повысить производительность в 1,2–1,5 раза [1];

- в химической промышленности при изготовлении краски удается повысить производительность в 1,1–1,3 раза [2];

- в пищевой и легкой промышленности при выполнении отдельных операций, например, сепарации сыпучих сред, галтовки пельменей, можно добиться повышения производительности в 1,4–1,5 раза [3];

- в сельском хозяйстве для уборки зерновых, приготовления кормов, сушки куриного помета, мойки корнеплодов можно повысить

производительность в 1,8–2,0 раза [4];

- в строительстве и производстве строительных материалов использование винтовых роторов обеспечивает повышение производительности в 1,1–1,5 раза, [5].

В настоящее время проведены модельные испытания и исследованы первые два направления создания малогабаритных станков для роторно-винтовой отделочно-упрочняющей обработки. В результате моделирования процессов создана методика расчета привода таких станков, предложены расчётные зависимости для определения продольной скорости движения масс загрузки в рабочих органах.

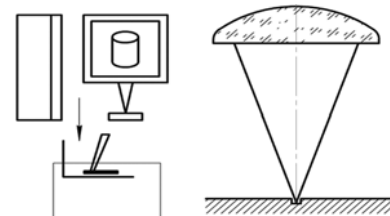
## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2542222 РФ, МПК В24В 31/023. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки / Г.В. Серга, С.Г. Кочубей, Л.Н. Луговая, Е.А. Горячева, И.О. Горинов; – № 2013150241/02; заявл. 11.11.2013; опубл. 20.02.2015, Бюл. № 5. – 3 с.
2. Пат. 2209670 РФ, МПК В02С17/04. Трубная мельница / Г.В. Серга, С.М. Резниченко, Ф.Ф. Кремянский; – № 2002101217/03; заявл. 08.01.2002; опубл. 08.01.2002. – 3 с.
3. Пат. 2121890 РФ, МПК В07В 1/22. Машина для сепарации сыпучих сред / Л.Н. Луговая, И.И. Табачук, Э.В. Кравченко, Г.В. Серга, А.В. Ляу; – № 97113113/03; заявл. 16.07.1997; опубл. 20.11.1998. – 3 с.
4. Пат. 2494601 РФ, МПК А01D 41/00, А01F 7/06, А01F 12/18. Комбайн зерноуборочный прямоточный / В.Д. Таратута, В.В. Цыбулевский, Г.В. Серга; – № 2012121216/13; заявл. 23.05.2012; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 28. – 3 с.
5. Пат. 2220896 РФ, МПК В65G33/26. Устройство для транспортирования материалов / Г.В. Серга, Н.Н. Довжикова, Ф.Ф. Кремянский, Р.А. Диков. № 2002112173/03; заявл. 06.05.2002; опубл. 10.01.2004. – 3 с.

## REFERENCES

1. Pat. 2542222 the RF, IPC B24B 31/023. *Device for Finish-Strengthening*/ G.V. Serga, S.G. Kochubey, L.N. Lugovaya, E.A. Goryacheva, I.O. Gorinov; - No.2013150241/02; applied 11.11.2013; published 20.02.2015, Bull. No.5. – pp. 3.
2. Pat. 2209670 the RF, IPC B02C17/04. *Tube Mill*/ G.V. Serga, S.M. Reznichenko, F.F. Kremyansky; - No. 2002101217/03; applied 08.01.2002; published 08.01.2002. – pp. 3.
3. Pat. 2121890 the RF, IPC B07B 1/22. *Machine for Loose Media Separation*/ L.N. Lugovaya I.I. Tabachuk E.V. Kravchenko, G.V. Serga, A.V. Lyau; - No. 97113113/03; applied 16.07.1997; published 20.11.1998. – pp. 3.
4. Pat. 2494601 the RF, IPC A01D 41/00, A01F 7/06, A01F 12/18. *Direct-Flow Grain Harvester* / V.D. Taratuta, V.V. Tzybulevsky, G.V. Serga; - No. 2012121216/13; applied 23.05.2012; published 10.10.2013, Bull. No. 28. – pp. 3.
5. Pat. 2220896 the RF, IPC B65G33/26. *Device for Material Transportation* / G.V. Serga, N.N. Dovzhikova, F.F. Kremyansky, R.A. Dikov. No. 2002112173/03; applied 06.05.2002; published 10.01.2004. – pp. 3.

Рецензент д.т.н. Н.И. Бойко



УДК 621.791.725

DOI: 10.12737/article\_59d496ec867e42.06170710

**И.Н. Шиганов**<sup>1</sup>, д.т.н.,  
**Е.М. Шамов**<sup>1,2</sup>, инженер,  
**И.А. Бегунов**<sup>2</sup>, инженер,  
**А.К. Шелестова**<sup>2</sup>, инженер

(<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1;

<sup>2</sup>ООО «НТО «ИРЭ-Полус», МО, г. Фрязино,  
пл. им. академика Б.А. Введенского, д. 1, стр. 3)

E-mail: eShamov@ntoire-polus.ru

## Лазерная сварка стали 09Г2С по слою флюса

*Предложен способ лазерной сварки, направленный на устранение дефектов формы шва. Изложены результаты экспериментов, подтверждающие, что ведение процесса лазерной сварки по слою флюса оказывает влияние на формирование структуры и качество сварного шва. Представлены результаты измерений твердости металла сварных соединений, полученных предложенным способом, дуговым и лазерным. Приведены результаты механических испытаний сварных соединений, полученных способом лазерной сварки по слою флюса.*

**Ключевые слова:** лазерная сварка; присадочная проволока; флюс.

**I.N. Shiganov**<sup>1</sup>, D. Eng.,  
**E.M. Shamov**<sup>1, 2</sup>, Engineer,  
**I.A. Begunov**<sup>2</sup>, Engineer,  
**A.K. Shelestova**<sup>2</sup>, Engineer

(<sup>1</sup>Bauman STU, Building 1, 5, Baumanskaya Str., Moscow,

<sup>2</sup>PC "STC "IRE-Pole", Building, 1, Academician Vvedensky Sq., Fryazino, Moscow reg.)

## Steel 09G2S laser bonding on flux layer

*A method of laser bonding aimed for the elimination of welding seam form defects is offered. The results of experiments confirming the impact of laser bonding on a flux layer upon the formation of a structure and quality of a welding seam are stated. The measurement results of metal hardness in welding joints obtained by an offered method and also by arc welding and laser bonding are shown. The results of the mechanical tests of welds obtained by laser bonding on a flux layer are presented.*

**Keywords:** laser bonding; filler wire; flux.

Внешнее формирование сварных соединений, отсутствие дефектов в виде провисаний, подрезов и раковин оказывает существенное влияние на работоспособность сварного соединения в целом [1].

Подобные дефекты часто встречаются в технологии лазерной сварки [2, 3]. Помимо физических особенностей протекания процесса лазерной сварки и дисбаланса сил, определяющих форму расплава, образование дефектов обусловлено заполнением зазоров при не-

качественной сборке и потерей жидкого металла сварочной ванны на разбрызгивание, что отрицательно сказывается на стабильности формирования сварного шва. Брызги, попадая на оптику сварочной головки, искажают пропускную способность луча, что сказывается на качестве шва. Также разбрызгивание приводит к рассеиванию лазерного излучения и расфокусировке луча.

В случае обеспечения прилегания свариваемых кромок с минимальным зазором друг

к другу (менее 0,1 мм), сварка ведется за счет плавления только основного металла. Ведение процесса с глубоким проплавлением позволяет исключить из технологического процесса операцию скоса кромок. В то же время, обеспечение высокой точности при сборке деталей больших толщин (более 4,0...5,0 мм) накладывает дополнительные требования к качеству подготовки кромок.

Формирование шва при однопроводной лазерной сварке с гарантированным проваром на всю глубину стыка сопровождается его занижением с лицевой стороны (рис. 1). Такой дефект недопустим и требует дополнительных операций по его устранению.

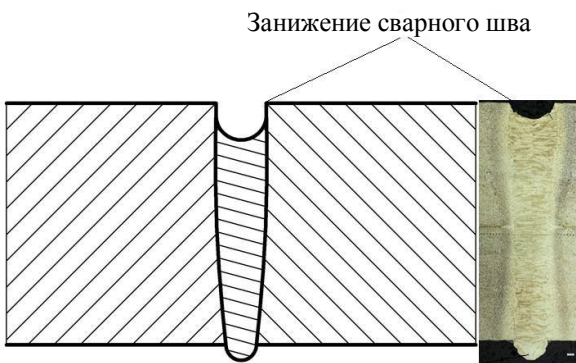


Рис. 1. Дефект лазерной сварки с глубоким проплавлением – занижение сварного шва

Устранение подобного дефекта возможно при использовании гибридного метода лазерно-дуговой сварки (рис.2). Гибридный метод также позволяет увеличивать допуски на зазор при сборке свариваемых кромок. Плавящиеся сварочные материалы в процессе лазерно-дуговой сварки компенсируют затраты на разбрызгивание основного металла, заполняют сборочные зазоры и устраняют занижение сварного шва [4, 5].

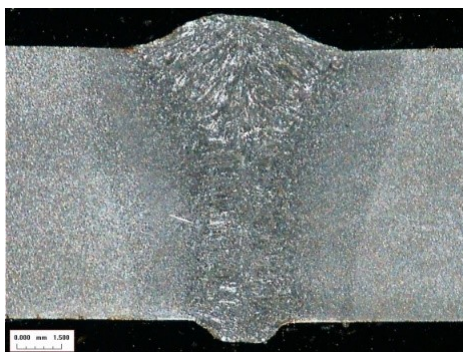


Рис. 2. Макрошлиф сварного шва, полученного гибридным лазерно-дуговым способом сварки, толщина 10 мм

Однако лазерно-дуговые процессы имеют и ряд недостатков, осложняющих производственные и технологические процессы сварки. В первую очередь, комбинация двух источников – лазерного луча и дуги, удваивает затраты на настройку процесса, подбор технологического режима. Оборудование и технологическая оснастка требуют высокого уровня конструкторской проработки. Соблюдение всех правил техники безопасности при наличии двух источников осложняет слежение за процессом непосредственно в момент сварки, а интенсивное разбрызгивание требует принятия дополнительных мер по защите дорогостоящей лазерной оптики от искр, усложняя конструкцию оборудования.

Другим эффективным методом устранения поверхностных дефектов и расширения допусков при сборке стыков под лазерную сварку является способ сварки с применением присадочной проволоки [2, 6]. Подача присадочной проволоки способствует получению завышения сварного шва и придания ему необходимой геометрии.

К недостаткам способа можно отнести необходимость подачи дорогостоящего защитного газа (аргон, гелий, сварочная смесь) в зону расплавленного и остывающего металла. Также следует отметить, что стабильность и повторяемость процесса лазерной сварки зависит от тщательности подготовки облучаемых поверхностей [2] и контролируемой высоты плазменного факела [7]. В противном случае наблюдаются большие потери мощности лазерного излучения на рассеивание и отражение.

Для устранения перечисленных недостатков авторами статьи было предложено проводить лазерную сварку с применением присадочной проволоки, а в качестве защиты от окисления использовать керамические флюсы.

Процесс заключается в подаче присадочной проволоки 1 в сварочную ванну, формируемую лазерным лучом 2 (рис. 3). При сварке присадочный материал 1 направляется в точку пересечения лазерного луча 2 с поверхностью свариваемых деталей 3, 4. Лазерный луч располагается нормально к поверхности свариваемых деталей или под углом 10...25°. Проволока подается под углом 10...80° относительно поверхности. Предварительно на свариваемый стык наносится флюс 5. В процессе сварки лазерное излучение проходит сквозь флюс, попадая на состыкованные кромки и конец присадочной проволоки.

Подача присадочной проволоки в зону из-

лучения позволяет формировать шов *б* с усилением с лицевой стороны. При этом размеры облицовочного и обратного валиков можно регулировать количеством присадочного материала расплавленного в единицу времени. Сварочный флюс выполняет функцию защиты сварного шва от взаимодействия с окружающей атмосферой.

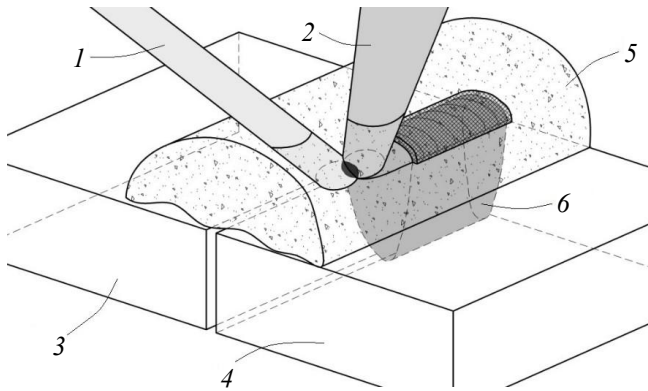


Рис. 3. Условная схема процесса лазерной сварки по слою флюса

Сварку проводили с использованием волоконного лазера модели ЛС-10 на стали 09Г2С и флюса АН-47.

Эксперименты показали, что применение флюса ограничивает рост плазменного факела и исключает разбрызгивание.

Исследовано влияние флюса на проплавляющую способность лазерного излучения. Проплавляли чистые пластины и покрытые флюсом. Установлено, что затраты тепла на расплавление флюса снижают эффективность передачи тепла лазерным излучением к металлу и уменьшают глубину проплавления (рис.4).

Как видно на графиках и макроструктурах рис.4, применение флюса не оказывает существенного влияния на форму проплавления и качество сварного соединения, глубина проплавления снижается при этом на величину около 20 %.

Для оценки эффективности, предлагаемого в данной работе метода, были проведены сравнительные эксперименты по лазерной сварке стали 09Г2С: без применения сварочных материалов, с проволокой, а также с проволокой по слою флюса. Макроструктуры полученных соединений, а также графики измерения микротвердости представлены на рис. 5.

Сваренные лазерным лучом по предложенной технологии с присадочной проволокой по слою флюса образцы стали 09Г2С были испытаны на растяжение. Во всех случаях разрушение образцов проходило по основному ме-

таллу (рис.6). Данный результат свидетельствует о высоком уровне прочностных характеристик сварных соединений, полученных по предлагаемой технологии.

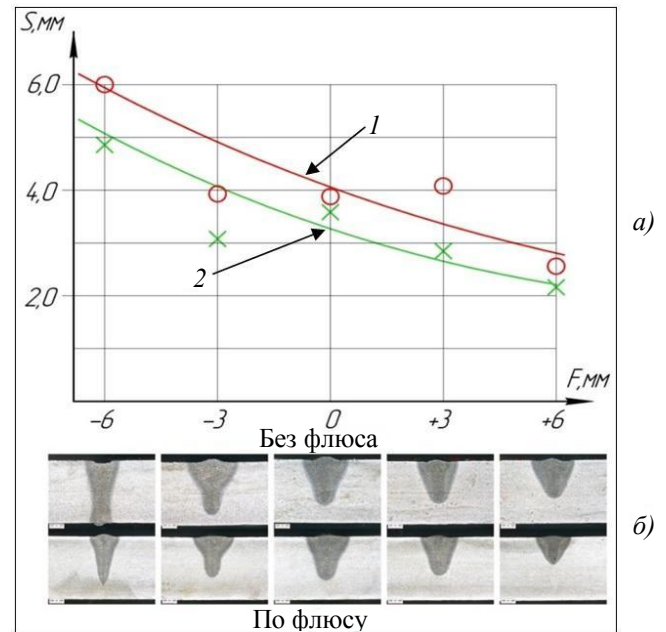


Рис. 4. Зависимости глубины проплавления от положения фокусного пятна при наличии флюса на поверхности пластины и без него:

*а* – графические зависимости; *б* – макроструктура проплавлений

Как видно на макроструктурах (см. рис. 5) занижение сварного шва, образуемого в случае отсутствия присадочных материалов, можно устранить подачей присадочной проволоки под лазерный луч. Применение флюса и присадочной проволоки сглаживает поверхностные дефекты, делает плавным переход от усиления к основному металлу и защищает сварной шов от окисления. Меньший уровень микротвердости, зафиксированный для образца, сваренного по слою флюса, свидетельствует о влиянии флюса на скорость охлаждения сварного шва и формирование благоприятных структур, что крайне важно для лазерной сварки закаляющихся сталей типа 09Г2С.

Сварка с присадкой по слою флюса может быть использована как облицовочный шов, который закрывает занижение, возникающее при сварке больших толщин за один проход (см. рис.1). Эта технология была опробована авторами при сварке сталей толщиной 8 и 12 мм за один проход. Макроструктура полученных соединений показана на рис. 7.

Как наглядно видно на макрошлифах, занижение от первого прохода полностью заправляется, образуя требуемое завышение шва с плавным переходом к основному материалу.

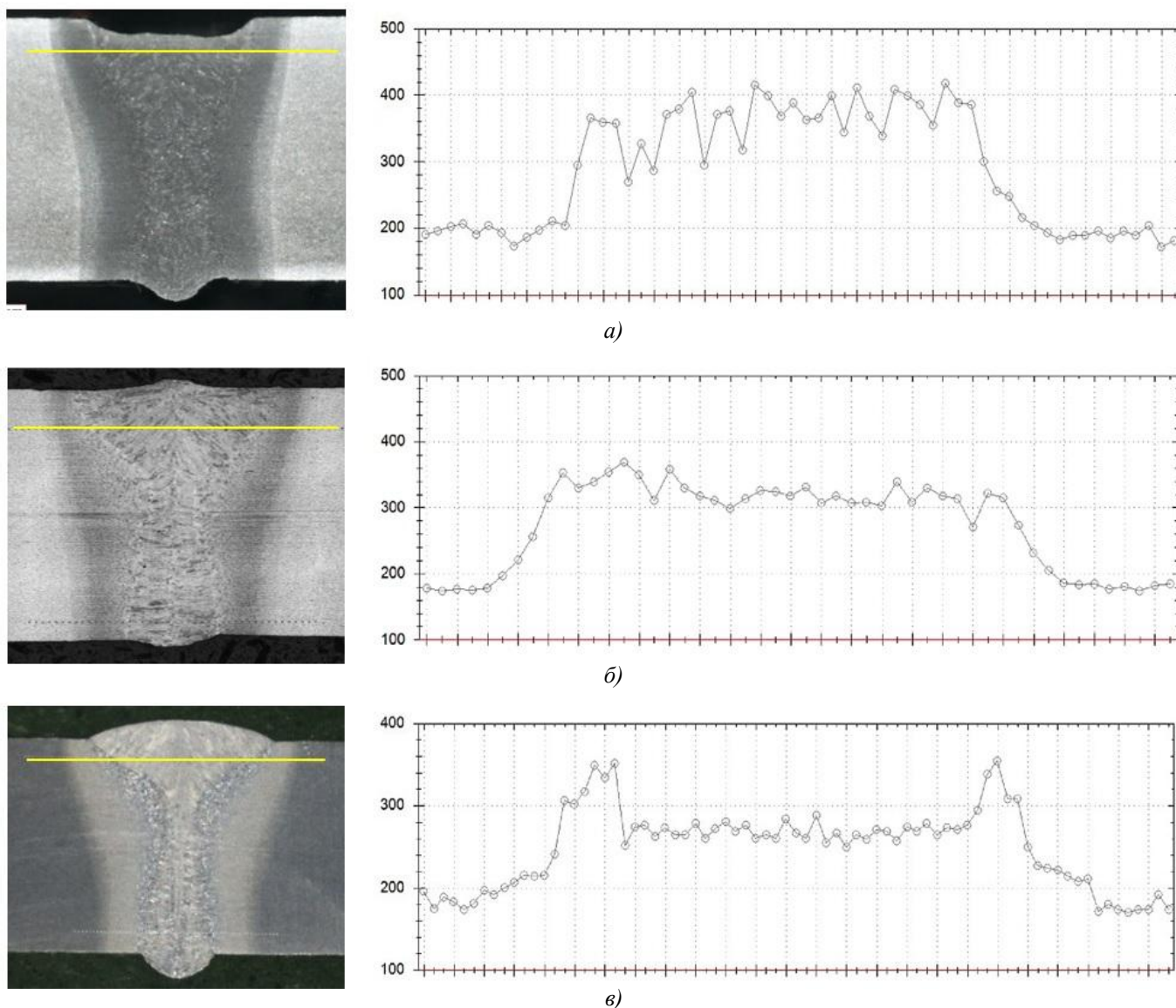


Рис. 5. Макроструктуры лазерных сварных соединений и графики микротвердости:

*а* – сварка без сварочных материалов; *б* – сварка с присадочной проволокой в среде защитного газа; *в* – сварка с присадочной проволокой по слою флюса



Рис. 6. Образцы после механических испытаний на статическое растяжение

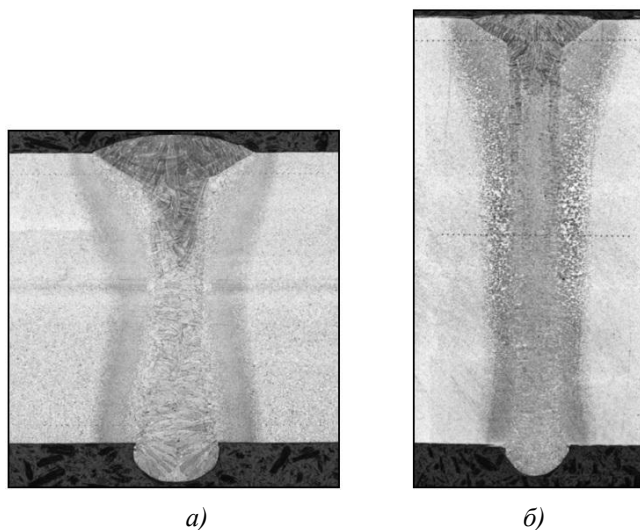


Рис. 7. Макрошлифы сварных швов, выполненных с подачей присадочной проволоки под слоем флюса:  
*а* – сталь 40, толщина 8 мм; *б* – сталь Ст3, толщина 12 мм

Опробованный способ лазерной сварки с подачей присадочной проволоки по слою флюса может использоваться как альтернатива гибридной лазерно-дуговой сварке в защитном газе и лазерной сварке с подачей присадочной проволоки в среде защитных газов для устранения занижения сварного шва.

Применение флюса вместо защитного газа устраняет чрезмерное разбрызгивание и рассеивания лазерного излучения при сварке, а твердость металла шва, получаемая при сварке по слою флюса, указывает на более благоприятные структуры, чем при сварке в защитном газе.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Сварка. Резка. Контроль:** справочник. В 2-х томах / Под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2004. Т.1 / Н.П. Алешин, Г.Г. Чернышов, Э.А. Гладков и др. – 624 с.
2. **Григорьянц, А.Г., Шиганов, И.Н., Мисюров, А.И.** Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
3. **LIA Handbook of Laser Materials Processing / J.F. Ready (et al.).** – Orlando: Laser Institute of America, 2001. – 704 p.
4. **Григорьянц, А.Г., Шиганов, И.Н., Чирков, А.М.** Гибридные технологии лазерной сварки: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 52 с.
5. **Пат. РФ № 2010139611/02,** 23.09.2010. Туричин Г.А., Цибульский И.А. Способ лазерно-дуговой сварки плавящимся электродом алюминия и алюминиевых сплавов // Патент России № 2440221. 2012. Бюл. №2.
6. **Patent US № 09/738363.** 14.02.2001. I. Haschke. Process and device for joining of workpiece parts by means of

an energy beam, in particular by means of a laser beam. // United States patent № 6595962. 2001.

7. **Щеглов, П.Ю., Успенский, С.А., Петровский, В.Н. и др.** Исследование паро-плазменного факела при сварке мощным волоконным лазером // Сборник научных трудов конференции "Научная сессия МИФИ-2011". 2011. Т.2, с. 90.

## REFERENCES

1. *Welding. Cutting. Control: Reference Book.* In 2 Volumes / under the general editorship of N.P. Aleshin, G.G. Chernyshov. – M.: Mechanical Engineering, 2004. Vol. 1/ N.P. Alyoshin, G.G. Chernyshov, E. A. Gladkov et al. – pp. 624.
2. Grigoryants, A.G., Shiganov, I.N., Misyurov, A.I. *Technological Processes of Laser Treatment: manual for colleges / under the editorship of A.G. Grigoryants.* – M.: Publishing House of Bauman STU, 2006. – pp. 664.
3. *LIA Handbook of Laser Materials Processing / J.F. Ready (et al.).* – Orlando: Laser Institute of America, 2001. – 704 p.
4. Grigoryants, A.G., Shiganov, I.N., Chirkov, A.M. *Hybrid Technologies of Laser Bonding: manual.* – M.: Publishing House of Bauman STU, 2004. – pp. 52.
5. Pat. RF No. 2010139611/02, 23.09.2010. Turichin G.A., Tsybul'skiy I.A. Method of laser bonding with melting electrode of aluminum and aluminum alloys // *Russia Patent No. 2440221.* 2012. Bull. No.2.
6. Patent US № 09/738363. 14.02.2001. I. Haschke. Process and device for joining of work-piece parts by means of an energy beam, in particular by means of a laser beam. // United States patent № 6595962. 2001.
7. Shcheglov, P.Yu., Uspenskiy, S.A., Petrovskiy, V.N. et al. Plasma torch investigation at bonding with power fiber laser // *Proceedings of the Conf. "Scientific Session of MEPI-2011"*. 2011. Vol. 2, pp. 90.

*Рецензент д.ф.-м.н. Н.Н. Евтихийев*

УДК 621.78

DOI: 10.12737/article\_59d496ecea5154.22425645

**А.В. Богданов,** к.т.н.

(МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1),

**В.И. Соколов,** к.ф.-м.н.,

**С.А. Шмелев,** начальник сектора

(ООО НТО «ИРЭ-Полюс», Московская обл., г. Фрязино),

E-mail: mtbmstu@mail.ru

## Выбор оптимальных конфигураций оптических схем для задачи лазерной термообработки стальных изделий

*В рамках статьи выполнен сравнительный анализ различных конфигураций оптических схем, которые совместно с волоконными лазерами могут использоваться для задачи лазерной термообработки габаритных тел вращения.*

**Ключевые слова:** волоконный лазер; упрочнение; оптическая схема; износостойкость; контактно-усталостная прочность.



**A.V. Bogdanov**, Can. Eng.,  
(Bauman STU, Building 1, 5, Baumanskaya Str., Moscow)  
**V.I. Sokolov**, Can. Ph-Math.,  
**S.A. Shmelyov**, Sector Head  
(PC STC "IRE-Pole", Fryazino, Moscow reg.)

## Optimum pattern choice of optical circuits for problems of steel products laser thermal processing by example of railway wheels

*Within the limits of the paper a comparative analysis of optical circuit different patterns which can be used jointly with fiber lasers for the problem of laser thermal treatment of dimension solids of rotation.*

**Keywords:** fiber laser; hardening; optical circuit; wear-resistance; contact-fatigue strength.

Проблема бокового износа колес и рельсов является одной из первостепенных и самых значимых для железнодорожной отрасли [1]. Более 20 лет данная проблема активно решается и не решена до сих пор [2]. Множество факторов в той или иной степени влияют на боковой износ железнодорожных колес. Называется до 50 различных причин, суммарно приведших к повышению бокового износа гребней железнодорожных колес [3]. Особую остроту данная проблема приобрела во второй половине XX в. в период уменьшения ширины колеи, замены подшипников качения на подшипники скольжения в буксовых узлах, применения гребнесмазывания, повышения нагрузки на ось, увеличения объемов перевозок и т.д. [4–7].

В последние 10 лет на рынке появились мощные волоконные лазеры мульткиловаттного диапазона, которые произвели настоящую революцию в области обработки материалов. Уже сегодня многие промышленные лидеры производственного сектора сделали выбор в пользу волоконных лазеров [7, 13].

Лазерная поверхностная обработка имеет следующие преимущества по сравнению с традиционными способами упрочнения материалов: низкий уровень напряжений и деформаций, вносимых в изделие, высокая скорость обработки, возможность обработки на большую глубину, низкие затраты на обслуживание оборудования, возможность локальной обработки поверхности, возможность осуществлять термообработку без нанесения поглощающих покрытий, компактные размеры лазерного оборудования, отсутствие необходимости в применении газовых смесей, передача излучения по транспортному волокну без юстировки.

В большинстве технологических задач лазерный генератор не является конечным инст-

рументом. Лазерные технологические головки предназначены для преобразования расходящегося пучка лазера в коллимированный и последующей фокусировки в пятно с необходимой плотностью мощности и геометрией. Также оптические головки ведущих мировых производителей лазерного оборудования (IPG, Precitec, ScanSonic, Kugler) обеспечивают функции адаптивности процесса, имеют обратную связь, камеры видеонаблюдения для отслеживания стыка, датчики контроля температуры корпуса и оптических элементов головки и давления технологических газов, системы сканирования заготовки [8]. Основой любой технологической головки является оптическая схема. Рассмотрим более подробно некоторые оптические схемы, предназначенные для технологической задачи лазерного термоупрочнения.

Примером классической оптической схемы, применяемой в лазерной термообработке, может служить 2-х линзовый коллиматор и фокусирующая линза (рис. 1).



**Рис. 1. Моделирование оптической схемы с 2-х линзовым коллиматором**

Преимущества данной системы заключаются в простоте и надежности оптической схемы, а также низкой стоимости оптических элементов. Суммарный коэффициент отражения при использовании данной оптической схемы ниже более сложных схем, поскольку

меньше количество поверхностей, пропускающих лазерное излучение.

В случае использования 2-х линзового коллиматора плотность мощности на одной линзе коллиматора существенно ниже, чем при использовании 3-х линзовой системы. Это положительно влияет на периодичность замены оптических элементов. В качестве недостатков указанной оптической системы можно отметить необходимость проведения термообработки с перекрытием пятен, образование зон отпуска из-за сниженной плотности мощности на краях пятна и работа с расфокусиро-

ванным лазерным пятном для увеличения производительности, что влечет за собой повышение мощности лазера.

Для задачи лазерной термообработки возможно применение микролинзовых растров, состоящих из цилиндрических линз. Возможно ортогональное расположение на противоположных плоскостях заготовки. Сформированные микрооптические элементы в сочетании с собирающей плоско-выпуклой линзой могут быть использованы в целях гомогенизации лазерного излучения [9] (Рис. 2).

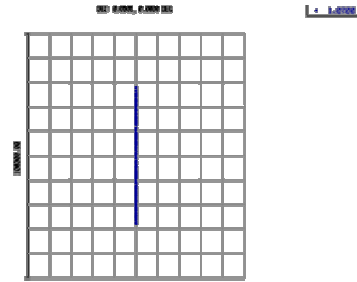
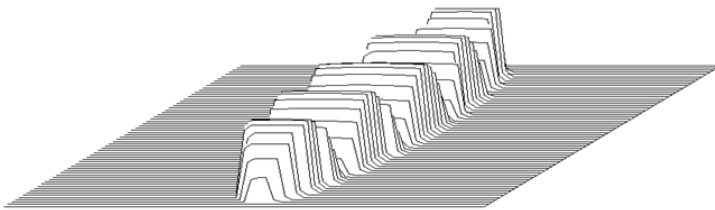


Рис. 2. Моделирование оптической схемы на базе раstra цилиндрической линзы и пятно, получаемое в фокальной плоскости

К недостаткам данной оптической системы стоит отнести высокую стоимость изготовления классическими методами. В настоящее время растры цилиндрических линз можно изготовить способом лазерной абляции с использованием CO<sub>2</sub> лазера. Данный способ является производительным и приводит к удешевлению конечного изделия. Однако основные технологические параметры оптических элементов, такие как стрелки прогиба и радиусы микролинз, имеют размеры от 1 до 10 мкм. При длине волны CO<sub>2</sub> лазера 10,6 мкм точное изготовление данных изделий затруднено, что приводит к неточностям геометрии,

влекущим за собой дифракционное рассеивание и перегрев стенок корпуса оптической головки.

Растр цилиндрических линз можно изготовить классическими методами и с высокой точностью на базе медных зеркал с отражающим золотым покрытием. Главным недостатком такой системы является высокая стоимость и трудоемкость производства.

Получение стабильного линейного профиля возможно при использовании формирователя на базе классической оптической схемы для гауссовых пучков: цилиндрическая линза и ортогонально расположенная ей призма Френеля [10, 11] (Рис. 3).

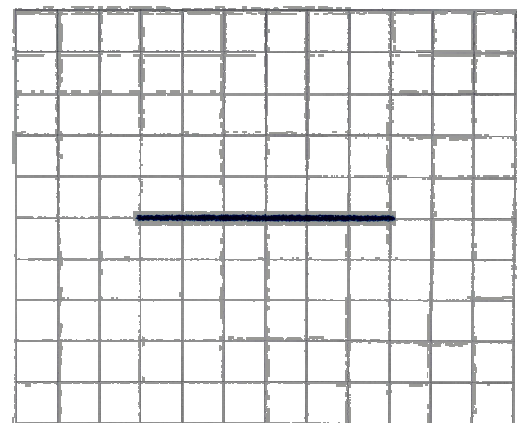
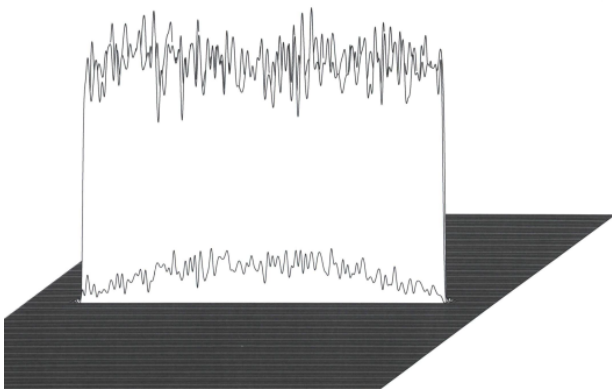
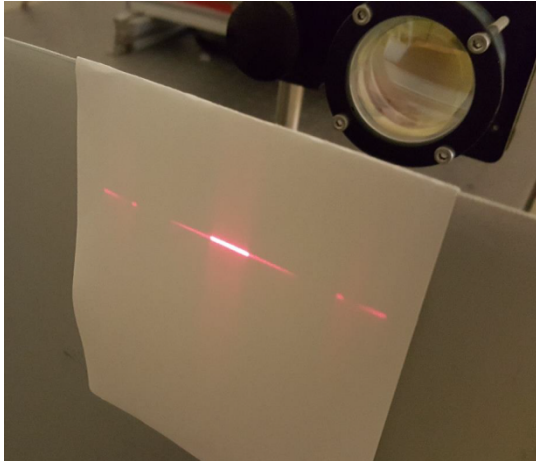


Рис. 3. Моделирование оптической схемы на базе цилиндрической линзы и ортогонально расположенной ей призмы Френеля и пятно, получаемое в фокальной плоскости

В результате тестирования данной схемы в ООО НТО «ИРЭ-Полус» получен стабильный линейный профиль излучения пилотного лазера на выходе формирователя. Размер плоской вершины профиля составляет 11 мм. Паразитные блики (рис. 4) возникают вследствие использования пилотного излучения с длиной волны 658 нм с оптическими элементами,



просветленными под рабочую длину волны волоконного лазера, составляющую 1070 нм. Увеличенный до 55 мм профиль излучения формирователя удалось получить, используя стандартный картридж коллиматора IPGP D50 F120, производимого ООО НТО «ИРЭ-Полус». Расстояние от картриджа до увеличенного профиля составляет 700 мм.

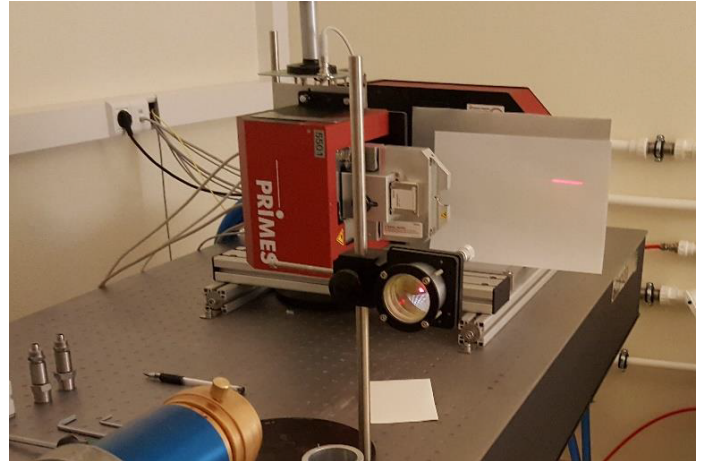


Рис. 4. Результаты тестирования формирователя на базе цилиндрической линзы и ортогонально расположенной ей призмы Френеля

При проведении измерений в ООО НТО «ИРЭ-Полус» параметров излучения непосредственно после линейного формирователя использовался волоконный лазер ЛС-5 с диаметром жилы волокна 200 мкм и ВРР = 8 мм·град. Результаты измерений показывают равномерность профиля вдоль длинной стороны (неравномерность плоской части профиля менее  $\pm 5\%$ ). Радиус поперечного сечения профиля вдоль оси  $X$  равен 174 мкм. Расчетный радиус, равный коэффициенту увеличения (отношение фокусов цилиндрической линзы формирователя и коллиматора – 200/120), умноженному на радиус волокна равен 167 мкм.

Параметры линейного профиля соответствуют расчетным, что свидетельствует о возможности хорошей аппроксимации коллимированного излучения волоконного лазера гауссовским пучком. В результате измерения крутизны боковых фронтов линейного профиля излучения непосредственно после линейного формирователя обнаружен пик излучения на краю профиля, возникающий вследствие дифракции излучения на ребре призмы Френеля.

Величина выброса составляет около 15 %. Боковой фронт от 10 до 100 % уровня плоской части профиля не более 250 мкм вследствие специфической формы и размеров пучка на его входе. Максимальная мощность лазера,

направленная на линейный формирователь, составляла 2500 Вт. Более высокую мощность нельзя было использовать из-за невозможности поглотить всю мощность прибора Primes PM48 без его деградации. При данной мощности излучения температура, зафиксированная тепловизором на призме Френеля, не превышала 29 °С, что вполне соответствует рабочим режимам (рис. 5).

Для оценок возможностей использования линейных профилей излучения волоконных лазеров в технологических целях на рис. 6 представлена зависимость пиковых плотностей мощности от размеров сформированного профиля при различных диаметрах жилы волокна лазера при мощности излучения 5000 Вт. Пиковые интенсивности излучения описанных выше линейных профилей, при использовании волоконного лазера 5 кВт, находятся в диапазоне  $2 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, что позволяет успешно использовать данную оптическую схему в термообработке.

По мнению авторов благодаря получению стабильного линейного профиля, возможности использования проходной оптики и пропорциональному увеличению размеров пятна, а также низкой стоимости изготовления формирователя данная оптическая схема является одним из оптимальных решений для задачи лазерной термообработки.

Для поверхностной термообработки также возможно использование сканирующей оптической головки IPG 2D High Power Scanner или аналога. Данная оптическая головка рас-

считана на работу с волоконными лазерами, имеющими выходную мощностью до 12 кВт (рис. 7).

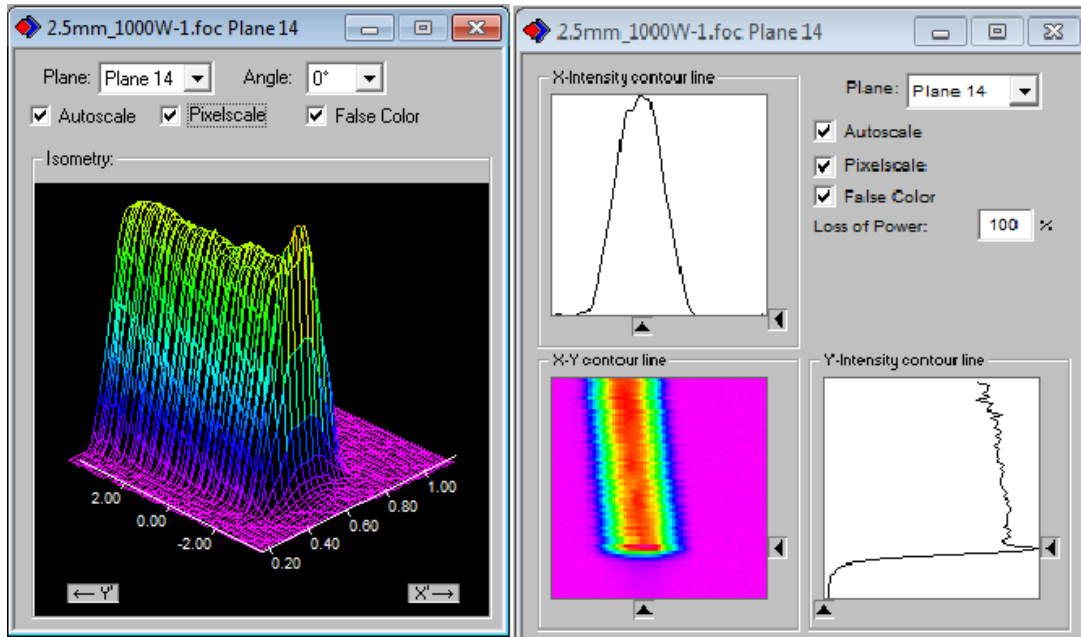


Рис. 5. Измерение параметров излучения после линейного формователя с помощью прибора Primes PM48

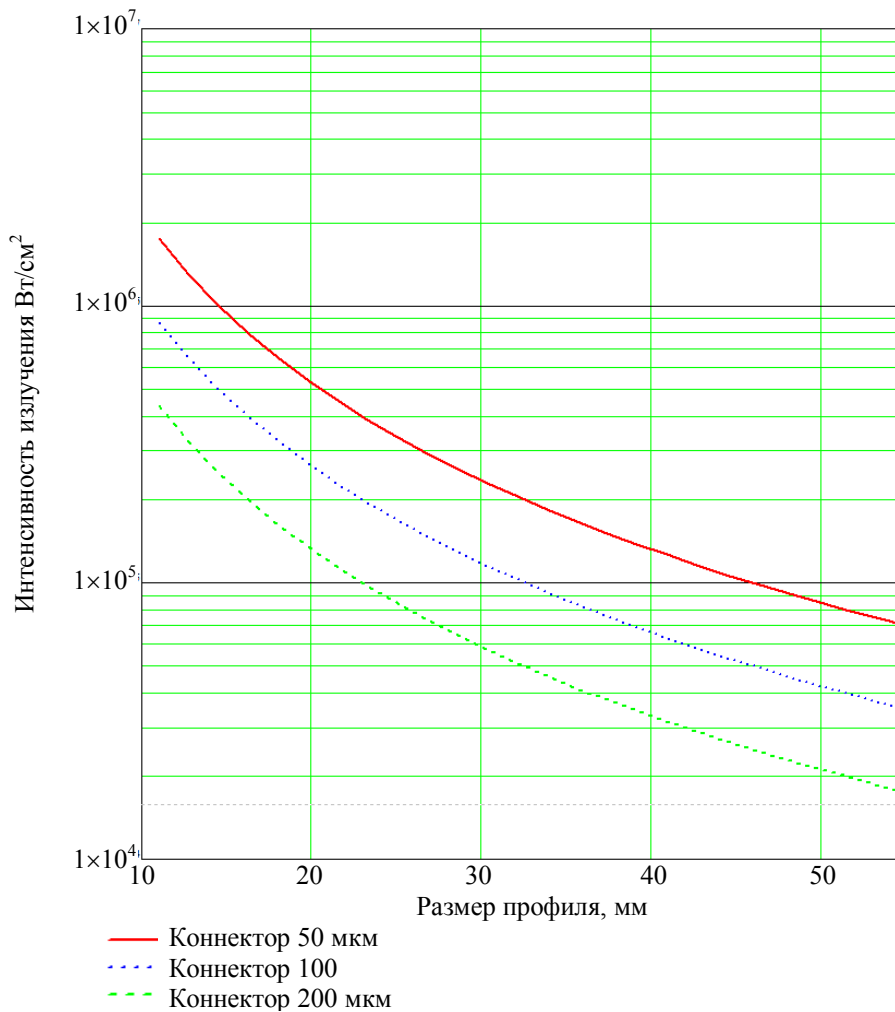


Рис. 6. Зависимость интенсивности излучения от размеров профиля при различных диаметрах жилы волокна лазера



Рис. 7. Сканирующая оптическая головка IPG 2D High Power Scanner

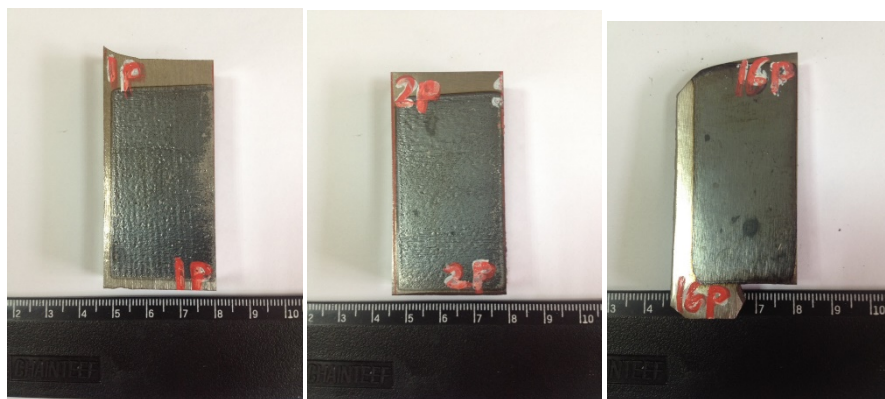


Рис. 8. Внешний вид дорожек после упрочнения волоконным лазером с использованием оптической головки 2D High Power Scanner IPG. Материал – колесная сталь 2

Преимущества данной оптической системы в быстрой корректировке параметров, важных для технологического процесса термообработки. Максимальная частота сканирования IPG 2D High Power Scanner составляет 300 Гц, ширина дорожки сканирования может составлять до 200 мм за один проход при размере рабочего поля системы 200×200 мм.

Скорости термообработки различных материалов могут варьироваться в широких диапазонах и составлять в среднем 30...70 мм/с. Глубина упрочненного слоя при использовании IPG 2D High Power Scanner может составлять более 1 мм без оплавления поверхности. На рис. 8 представлены образцы колесной стали марки 2, упрочненной с использованием волоконного лазера ЛС-6 и сканирующей оптической головки IPG 2D High Power Scanner. Поверхностная микротвердость лежит в диапазоне от 750 до 850 HV, что выше твердости основного металла в 2,9–3,3 раза. Глубина упрочненного слоя на оптимальном режиме без оплавления поверхности составила от 0,9 до 1,2 мм.

### Заключение

Проведен сравнительный анализ различных оптических схем, которые, в сочетании с волоконными лазерами IPG, могут использоваться для поверхностной термообработки металлических изделий. Отмечено, что классическая оптическая схема в виде 2-х линзового коллиматора и фокусирующей линзы, дающей в фокальной плоскости круглое пятно, а также применение микролинзовых растров имеет ряд недостатков, препятствующих широкому распространению данных схем для решения задач, связанных с поверхностной термообработкой в промышленности.

Однако при использовании сканирующей оптической головки IPG 2D High Power Scanner или формирователя на базе цилиндрической линзы и ортогонально расположенной ей призмы Френеля достигаются технологические режимы, близкие к оптимальным, что позволяет рекомендовать данные системы для успешного решения задачи лазерной термообработки различных деталей и узлов техники, в том числе железнодорожных колесных пар.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марков, Д. П. Механика и трибология бокового износа колес и рельсов. // Вестник РГУПС. – 2003.-№3. – С. 16-23.
2. Балановский, А.Е., Глазков, В.С., Мороз, Б.А. Плазменное упрочнение гребней колесных пар подвижного состава // Сб. тр. СГУПС «Новые технологии на ВСЖД». Новосибирск: СГУПС, 1999, С. 57-65.
3. Марков, Д. П. Закалка гребней колес подвижного состава на высокую твердость для снижения бокового износа // Вестник ВНИИЖТ. – 1997. – №. 1. – С. 36-42.
4. Петров, С.Ю., Костюкевич, А.И., Рябов, А.А. Упрочнение гребней и снижение износа колесных пар // Мир транспорта. 2013. № 2.
5. Киселев, С.Н., Саврухин, А.В., Кузьмина, Г.Д. Влияние плазменной обработки на напряженно-деформированное и структурное состояние гребней бандажей колес локомотивов // Сварочное производство. – 2001. - №6. – С.9-17.
6. Буйнов, А. П. Основные причины интенсивного износа бандажей колесных пар подвижного состава и методы их устранения // Екатеринбург: Изд-во УрГУПС. – 2009.
7. 100 kW CW fiber laser for industrial applications // Gaponov, V.; Shcherbakov, E.; Abramov, A. Laser Optics, 2014 International Conference Saint Petersburg, Russia.
8. Скрипченко, А.И. Технологические головки для волоконных лазеров. // Ритм. – 2010. - №2. – С. 22-27.
9. Вейко, В.П. Опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий». Тема: Лазерное формирование микрооптических элементов. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 133 с.

10. **Основы** оптики. Борн М., Вольф Э. Перевод с английского. Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1970.-855 с.

11. **Введение** в Фурье-оптику. Дж. Гудмен. Издательство «Мир», 1970.- 364 с.

12. **Богданов, А.В., Грезев, Н.В., Шмелев, С.А.** Применение волоконных лазеров для повышения износостойкости и контактно-усталостной прочности железнодорожных колес. // Научноёмкие технологии в машиностроении – 2015. - №6. – С. 30-34.

13. **Богданов, А.В., Голубенко, Ю.В.** Волоконные технологические лазеры и их применение. — СПб. : Лань, 2016. — 208 с.

## REFERENCES

1. Markov D.P. Mechanics and tribology of wheels and rails side wear. // *Bulletin of RSUC*. – 2003. – No. 3. – pp. 16-23.

2. Balanovsky A.E. Glazkov V.S. Moroz B.A. Wheel pair plasma strengthening of rolling stock / *Proceedings of SSUC “New Techniques on E-SR”*. Novosibirsk: SSUC, 1999, pp 57-65.

3. Markov D.P. Wheel flange hardening for rolling stock for high hardness to reduce side wear // *Bulletin of RRIC*. – 1997. – No. – pp. 36-42.

4. Petrov S.Yu., Kostyukevich A.I., Ryabov A.A. Flange hardening and wheel pair wear decrease // *World of Transport*. 2013. No. 2.

5. Kiselyov S.N., Savrukhin A.V., Kuzmina G.D. Plasma treatment impact upon stress-strain and structural state of wheel tread flanges of locomotives // *Welding Engineering*. – 2001. – No.6. – pp. 9-17.

6. Buinosov A.P. *Basic Reasons of Flange Intensive Wear in Wheel Pairs of Rolling Stock and Methods for Their Elimination* // Ekaterinburg: Publishing House of UralsSUC. – 2009.

7. 100 kW CW fiber laser for industrial applications // Gaptontsev, V.; Shcherbakov, E.; Abramov, A. *Laser Optics, 2014 International Conference Saint Petersburg, Russia*.

8. Skripchenko A.I. *Technological Heads for Fiber Lasers* // Rhythm. – 2010. – No.2. – pp. 22-27.

9. Veiko V.P. *Basic lecture notes for course “Physical-Technical Fundamentals of Laser technologies”*. Theme: *Laser Formation of Micro-optic Elements*. – S-Pb: S-PbSU ITMO, 2008. – pp. 133.

10. *Optics Fundamentals*. Born M., Wolf E. Transl. from Engl. Main Redaction of Physic-Mathematical Literature of “Science” Publishing House, 1970.- pp. 855.

11. *Introduction in Fourier Optics*. J. Goodman. “Mir” Publishing House, 1970. – pp. 364.

12. A.V. Bogdanov, N.V. Grezev, S.A. Shmelyov. Fiber laser application for increase of wear-resistance and contact-fatigue strength of railway wheels. // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering* – 2015. – No.6. – pp. 30-34.

13. A.V. Bogdanov, Yu.V. Golubenko. *Fiber Technological Lasers and Their Use*.-S-Pb.: Lan, 2016. – pp. 208.

Рецензент д.т.н. В.В. Васильцов

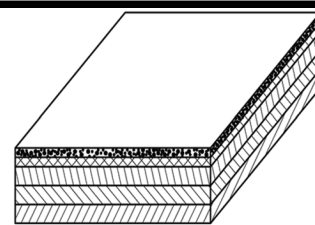
## Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Научноёмкие технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и стран ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

**Обращайтесь в редакцию! E-mail: [naukatm@yandex.ru](mailto:naukatm@yandex.ru)**



УДК 669.018.44

DOI: 10.12737/article\_59d496ed88af13.99343265

**И.В. Ворначева**, ассистент,  
**В.Н. Гадалов**, д.т.н.,  
**И.А. Макарова**, аспирант,  
**А.В. Филонович**, д.т.н.  
(ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»,  
Курск, ул. 50 лет Октября, 94)  
E-mail: gadalov-vn@yandex.ru; filon8@yandex.ru

## **Внутреннее трение литого сплава с никель-хромовой матрицей после термической обработки**

*Рассмотрены результаты измерений внутреннего трения сплава с никель-хромовой матрицей, изучена температурная зависимость внутреннего трения от термической обработки.*

**Ключевые слова:** никель-хромовый сплав; термическая обработка; внутреннее трение; дислокация; эффект Финкельштейна–Розина.

**I.V. Vornacheva**, Assistant,  
**V.N. Gadalov**, D.Eng.,  
**I.A. Makarova**, Post graduate student,  
**A.V. Filonovich**, D. Eng.  
(FSBEI VE “South-Western State University”, 94, October 50 Years Str., Kursk)

## **Inner friction of cast alloy with nickel-chrome matrix after thermal treatment**

*The results of inner friction measurements of alloy with nickel-chrome matrix are considered, an inner friction temperature dependence upon thermal treatment are considered.*

**Keywords:** nickel-chromium alloy; thermal treatment; inner friction; dislocation; Finkelstein-Rosin effect.

Жаропрочные сплавы на никель-хромовой основе широко используются для изготовления ответственных изделий, работающих при повышенных температурах, при наложении сложного поля напряжений. В результате воздействия температуры в таких изделиях протекают релаксационные процессы, существенно изменяющие структуру и свойства металла [1–2].

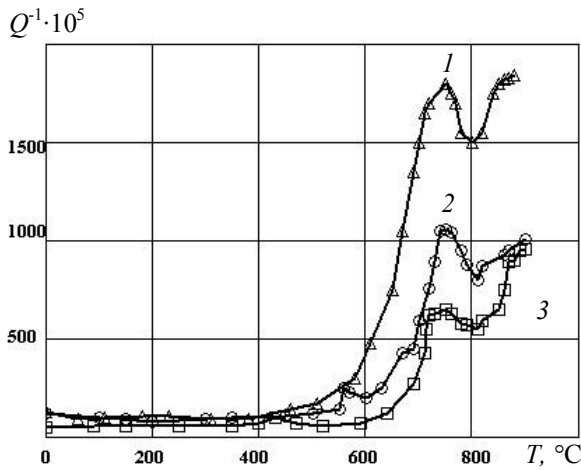
Релаксационные свойства сплава в литом состоянии будут отличаться от свойств после термической обработки. Их сопоставление позволит получить важную информацию о процессах, обуславливающих формирование структуры и свойств исследуемого материала.

В работе приведены результаты измерений внутреннего трения сплава (0,05 % C; 19,6 % Cr; 9,8 % Fe; 5,2 % Mo; 1,4 % Al; 2,8 % Ti, остальное Ni) в интервале температур 20...900 °C после различных режимов термической обработки с обсуждением некоторых релаксационных явлений. Внутреннее трение изучали на крутильном маятнике с автоматической регистрацией данных. Низкочастотные измерения 1,5...2,5 Гц проводили на образцах сечением 1,0x1,0 мм и длиной 120 мм. Относительная деформация сдвига не превышала  $5 \cdot 10^{-5}$ .

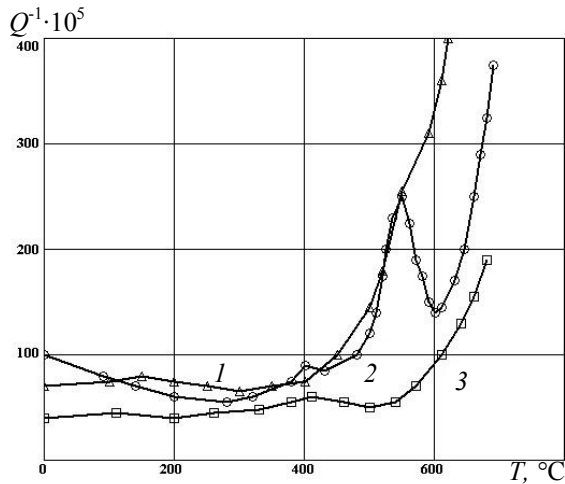
Нагрев образцов под закалку и последующее старение осуществляли в запаянных кварцевых

ампулах, остаточное давление внутри составляло  $3 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст. Выдержка при нагреве под закалку составляла 4 ч. Температурную зависимость внутреннего трения  $Q^{-1}(T)$  снимали через 10 мин после соответствующей термической обработки. Погрешность в определении внутреннего трения не превышала 3 %.

На рис. 1 а, б приведены кривые  $Q^{-1}(T)$  исследуемого сплава после стандартной термообработки. В литом (исходном) состоянии на кривой  $Q^{-1}(T)$  имеется пик при 180 °С с энергией активации  $25 \pm 2$  ккал/г·атом.



а)



б)

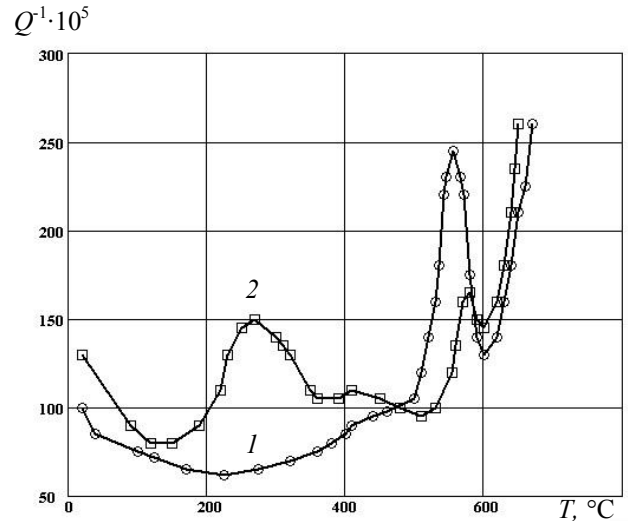
**Рис. 1. Температурная зависимость внутреннего трения в интервалах 20...900 °С (а) и 20...700 °С (в увеличенном масштабе  $Q^{-1}$ ) (б):**

1 – исходное состояние; 2 – закалка при 1150°С (4 ч), охлаждение на воздухе; 3 – закалка при 1150°С (4 ч), охлаждение на воздухе плюс старение при 710°С (16 ч)

Это связано с его неупругостью, вызванной атомами углерода в г.ц.к. решетке твердого раствора (пик Финкельштейна–Розина) [3]. Ме-

ханизм возникновения этого пика связан с миграцией атомов внедрения в поле напряжений в аустените. В закаленном от 1150 °С (охлаждение на воздухе) сплаве в области температур 200...400 °С никаких аномалий не наблюдается.

Охлаждение в воде повышает плотность дислокаций в аустените, что приводит к формированию четкого пика при 280 °С с энергией активации  $30 \pm 2$  ккал/г·атом (рис. 2).



**Рис. 2. Влияние скорости охлаждения (температура закалки 1150 °С, 4 ч) на температурную зависимость внутреннего трения:**

1 – охлаждение на воздухе; 2 – охлаждение в воде

Энергия активации релаксационных процессов определяли по формуле Верта-Маркса. Появление аналогичного пика наблюдается при температуре 310 °С в образце, закаленном на воздухе с 1200 °С (рис. 3). При понижении температуры закалки до 1100 °С пик в этом интервале температур не наблюдается. С повышением температуры до 1250 °С резко возрастает фон внутреннего трения, на кривой  $Q^{-1}(T)$  имеется ярко выраженный максимум при 200 °С (эффект Финкельштейна–Розина). Значительная высота его объясняется увеличением количества свободного углерода за счет растворения карбидных частиц, обогащающих твердый раствор с повышением температуры закалки.

Эта зависимость для образцов, закаленных на воздухе с 1200 °С, и для образца, прошедшего закалку в воду с 1150 °С, имеет максимумы. Такое аномальное поведение амплитудной зависимости внутреннего трения в аустенитных сталях и в твердых растворах с г.ц.к. структурой связана с наличием широких дефектов упаковки, что даже приводит к ярко выраженной аномалии кривой  $Q^{-1}(T)$ , проявляющейся в из-



менении пика Финкельштейна–Розина, за счет появления дополнительно пика, который накладывается на указанный.

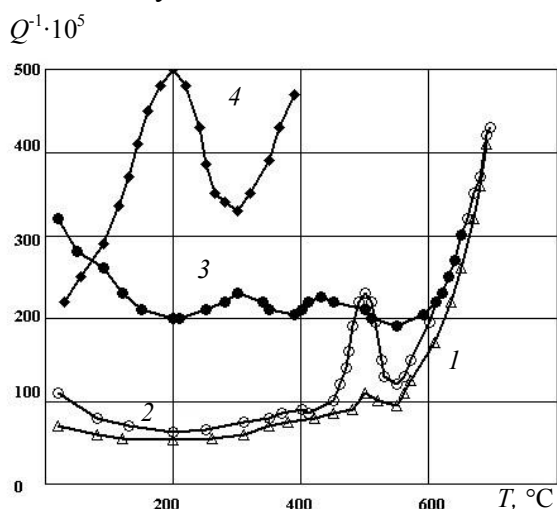


Рис. 3. Влияние температуры закалки (охлаждение на воздухе) на температурную зависимость внутреннего трения:

1 – 1100 °C; 2 – 1150 °C; 3 – 1200 °C; 4 – 1250 °C

В исследуемом сплаве такая связь между 300 °C максимумом и аномалией кривой  $Q^{-1}(\epsilon)$  наблюдается, но с одним отличием, касающимся природы релаксации, вызвавшей пик. В аустенитных сталях образование пика связано с суперпозицией двух процессов: миграцией атомов углерода в аустените и взаимодействием внедренных атомов с дислокациями [4]. В рассматриваемом случае максимум затухания объясняется этим же механизмом, однако взаимодействие внедренных атомов происходит с расщепленными дислокациями, которые характерны для твердых растворов с г.ц.к. структурой [5].

В пользу того, что взаимодействие атомов внедрения происходит с расщепленными дислокациями, говорит появление аномалии на кривых  $Q^{-1}(\epsilon)$ , которые связаны с широкими дефектами упаковки. Для закаленных образцов характерно появление максимума в области комнатных температур. При нагреве до 200 °C фиксируется его нисходящая ветвь (см. рис. 2, 3). При старении пик полностью устраняется.

Рассматривая температурный интервал 400...600 °C закаленных образцов, следует отметить два максимума затухания, которые в результате последующего старения уменьшаются. Энергии активации первого и второго пиков соответственно равны 39 и 46±2 ккал/г·атом. Пик обусловлен вязким течением по границам зерен. Высота его, ширина и температура появления характеризуют подвижность атомов, рас-

положенных на границах зерен в поле напряжений, что дает возможность представить состояние границ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гадалов, В.Н. Электроискровое легирование поверхности сплавов на основе никеля и титана / В.Н. Гадалов, С.Г. Емельянов, Н.М. Игнатенко, И.В. Ворначева, В.И. Савельев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2016. – № 1 (18). – С. 9–20.
2. Гадалов, В.Н. Уточнение эффективности стандартной термической обработки стали марки 30ХГСА / В.Н. Гадалов, А.В. Фролов, В.И. Муравьев, И.В. Ворначева, Т.Н. Розина // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – № 2 (50). – С. 121–128.
3. Головин, С.А., Головин, И.С. Внутреннее трение и механическая спектроскопия металлов и сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – №5. – С. 3–11.
4. Гадалов, В.Н. Особенности полигонизации и рекристаллизации в медных микрокристаллах: монография / В.Н. Гадалов, А.В. Филонович, Д.Н. Романенко, И.В. Ворначева. – Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга». 2016. – 92 с.
5. Гадалов, В.Н. Упрочнение и разупрочнение кристаллов меди и алюминия / В.Н. Гадалов, А.В. Филонович, И.В. Ворначева. – Deutschland, Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing. 2016. – 110 с.

## REFERENCES

1. Gadalov, V.N. Alloy surface electro-spark alloying based on nickel and titanium / V.N. Gadalov, S.G. Yemeliyanov, N.M., Ignatenko, I.V. Vornachyova, V.I. Saveliev // *Proceedings of South-Western State University. Series: Techniques and Engineering*. – 2016. – No. 1(18). – pp. 9-20.
2. Gadalov, V.N. Updating of common thermal treatment efficiency of steel 30HGSA / V.N. Gadalov, A.V. Frolov, V.I. Muraviyov, I.V. Vornachyova, T.N. Rozina // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2016. – No. 2 (50). – pp. – 121-128.
3. Golovin, S.A., Golovin, I.S. Inner friction and mechanical spectroscopy of metals and alloys // *Metal Science and Metal Thermal Treatment*. – 2012. – No.5. – pp. 3-11.
4. Gadalov, V.N. *Peculiarities of Cell Formation and Recrystallization in Copper Micro-Crystals*: monograph / V.N. Gadalov, A.V. Filonovich, D.N. Romanenko, I.V. Vornachyova. – Kursk: Publishing House of CC “University Book”. 2016. – pp. 92.
5. Gadalov, V.N. *Strengthening and Softening of Copper and Aluminum Crystals* / V.N. Gadalov, A.V. Filonovich, I.V. Vornachyova. - Deutschland, Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing. 2016. – pp. 110.

Рецензент д.т.н. Н.А. Корневский

УДК 531.001.362

DOI: 10.12737/article\_59d496ee025461.04790377

А.А. Моисеев, к.т.н.,

(ГосНИИ химмотологии, 121467, Россия, г. Москва, ул. Молодогвардейская, 10)

E-mail: slow.coach@yandex.ru

## Критериальная модель химической стабильности в статических условиях

*Определены параметры квалификационных экспресс-испытаний химической стабильности окисляющихся смесей углеводородов в статических условиях. Построена критериальная модель, предназначенная для пересчета результатов экспресс-испытаний к эксплуатационным условиям и включающая критерии геометрического, термодинамического и кинетического подобия. Разработана методика параметризации указанной модели, а также синтезирована методика указанного пересчета, базирующаяся на модели бимолекулярного взаимодействия углеводородной смеси с кислородом.*

**Ключевые слова:** экспресс-испытания; ускоренное окисление; искусственное старение; геометрическое подобие; термодинамическое подобие; кинетическое подобие; бимолекулярное взаимодействие; факторное планирование; квалификационные нормативы.

A.A. Moiseev, Can. Eng.

(State RI of Chemmatology, 10, Molodogvardeyskaya Str., Moscow, Russia, 121467)

## Criterion model of chemical stability under static conditions

*The purpose of the investigation carried out is a definition of qualification express-tests parameters of chemical stability of hydrocarbon oxidation mixtures under static conditions. There was formed a criterion model assigned for the recalculation of express-tests results to operation conditions and including criteria of geometrical, thermo-dynamic and kinetic similarity. There was developed a procedure for parameterization of the model mentioned and synthesized a procedure of the recalculation mentioned based on the model of the bimolecular interaction of a hydrocarbon mixture with oxygen. A method for the account of the additional factors impact based on the factor planning of an experiment and allowing the choice of extremal conditions for maximum oxidation acceleration is offered. There is developed a procedure for a comparative check of the efficiency of the most efficient catalyst based on the application of Grubbs criterion. A similar approach may be used at the assessment of the significance of an irradiation impact, and in whole – for the transformation of multi-level planning into two-level one.*

**Keywords:** express-tests; accelerated oxidation; artificial ageing; geometrical similarity; thermo-dynamic similarity; kinetic similarity; bimolecular interaction; factor planning; qualification standards.

С точки зрения теории подобия моделирование физических процессов сводится к построению их безразмерных инвариантов – критериев подобия, а также соотношений между ними. Как правило, указанные инварианты формируются либо путем нормализации уравнений физических процессов, либо по результатам априорного анализа параметров с использованием  $\pi$ -теоремы [1]. Целью данного исследования являлось определение параметров квалификационных экспресс-испытаний химической стабильности окисляющихся смесей углеводородов в статических условиях. Для решения этой задачи применяются лабораторные реакторы, позволяющие изменять условия окисления в сравнении с эксплуатационными для достижения приемлемой длительности указанных испытаний. Используемые при этом методы подразделяются на методы *ускоренного окисления* и *искусственного старения* [2].

Методы первой группы предназначены для экспресс-оценки стабильности в ситуации, когда длительность испытаний является решающим фактором. Они предусматривают значительное повышение температуры процесса в сравнении с эксплуатационной, а также воздействие иных факторов, которое рассматривается далее. В рамках методов второй группы осуществляется лабораторное хранение исследуемых продуктов в строго регламентированных условиях при умеренно повышенных температурах. Преимущество этих методов перед методами искусственного окисления состоит в наиболее близком соответствии условиям реального хранения. Однако считается, что наилучшие оценки химической стабильности достигаются комплексированием методов обеих групп.

В соответствии с вышесказанным в дальнейшем будут исследоваться методы ускоренного окисления. Их применение требует пере-

счета результатов экспресс испытаний к эксплуатационным условиям, что обуславливает необходимость применения критериальной модели. Проведенные предварительные исследования показали, что указанная модель включает [3]:

- критерий *геометрического подобия* лабораторного и натурального реакторов вида  $\frac{S}{V^{\frac{2}{3}}}$ ,

где  $S, V$  – поверхность и объем реактора;

- критерий *термодинамического подобия* температур и давлений процесса вида  $\frac{P}{c\rho T}$ , где  $P, T$  – гидростатическое давление и температура смеси, а  $c, \rho$  – ее удельная теплоемкость и плотность.

Критерий геометрического подобия может быть использован для выбора габаритов лабораторного реактора. Критерий термодинамического подобия выполняется при произвольной величине температурного приращения  $\Delta T$  только для идеальных газов в изохорическом процессе [4]. Для жидкостей указанный критерий представляет собой условие выбора возможного температурного приращения. В частности, на его основе в [3] были установлены условия

предельного заполнения герметизированного лабораторного реактора, допускающие в дальнейшем заданное повышение температуры смеси в нем.

Для формирования критерия кинетического подобия была принята известная модель бимолекулярного взаимодействия смеси с кислородом [5]. Схема реализации критерия приведена на рис. 1.

Соответствующее кинетическое уравнение имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_{ox}}{dt} &= k\rho_m\rho_o \\ k &= k_0T \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \\ \rho_m &= \frac{\rho}{\mu} \\ \rho_o &= \frac{p}{RT} \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\rho_{ox}$  – молярная плотность осаждаемого окисла;  $k_0, E_a$  – опорный коэффициент и энергия активации реакции окисления;  $\rho_m, \rho_o$  – молярные плотности смеси и кислорода;  $\rho, \mu$  – плотность и молярная масса смеси;  $p, T$  – парциальное давление и температура окисления.

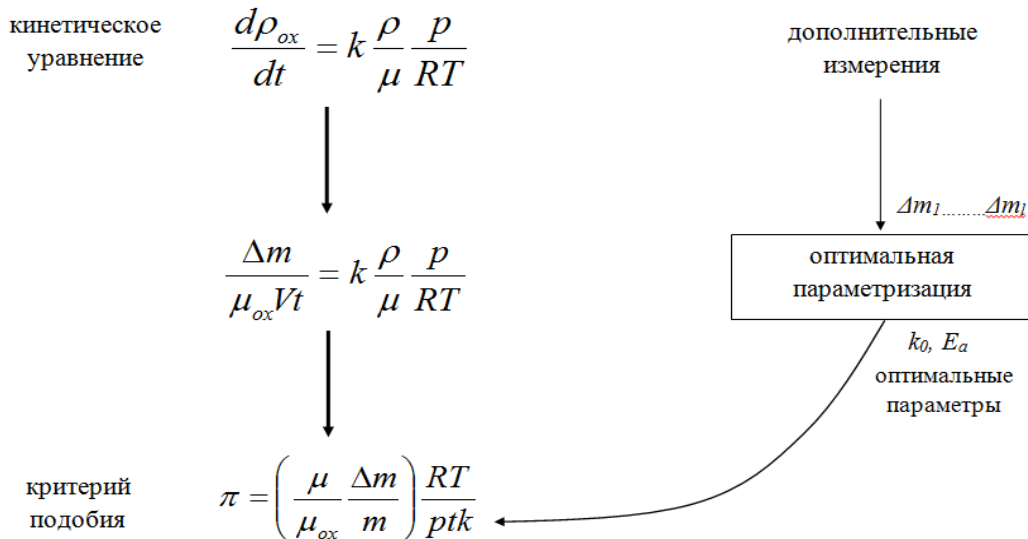


Рис. 1. Критерий химической стабильности

Из уравнения (1) получаем в соответствии с [1]:

$$\frac{\rho_{ox}}{t} = k \frac{\rho}{\mu} \frac{p}{RT} \quad \text{или} \quad \frac{\Delta m}{\mu_{ox} V t} = k \frac{\rho}{\mu} \frac{p}{RT},$$

где  $t$  – длительность испытаний или эксплуатации;  $V$  – объем реактора;  $\Delta m, \mu_{ox}$  – масса осаждаемого окисла и его молярная масса.

Учитывая, что исходная масса смеси  $m = \rho V$ , получаем критерий химической стабильности:

$$\pi = \left( \frac{\mu}{\mu_{ox}} \frac{\Delta m}{m} \right) \frac{RT}{ptk} = 1. \quad (2)$$

Критерий (2) позволяет рассчитать потенциальную плотность  $\frac{\Delta m}{V}$  для эксплуатационных

условий. Решение о приемлемой стабильности смеси принимается при этом в соответствии с требованиями к потенциальной плотности, упоминаемыми в [2]. Указанные требования с помощью критерия (2) можно также пересчитать в квалификационные нормативы и использовать для принятия решения непосредственно по результатам квалификационных испытаний.

Проблемой на пути реализации описанного подхода является неопределенность величины кинетического коэффициента  $k$ . Для ее определения предлагается использовать следующие соображения. Измерения массы осадка  $\Delta m$  проводятся для исследуемой смеси в нескольких температурных точках  $T_i$ . Величины  $k_0$ ,  $E_a$  находим при этом из условия минимума

$$\Delta = \sum_i \left( \frac{ptk_0}{R} \exp\left(-\frac{E_a}{RT_i}\right) - \frac{\mu}{\mu_{ox}} \frac{\Delta m_i}{m} \right)^2 \rightarrow \min_{k_0, E_a}$$

вытекающего из (2).

Представляет также интерес оценка параметров скорости реакции не для одной, а для класса близких по свойствам смесей. Для ее реализации необходимо провести измерения массы осадка для этих смесей в различных температурных точках и/или в различные моменты времени. Общее условие минимума для определения параметров скорости при этом приобретает вид

$$\Delta = \sum_i \left( \frac{pt_i k_0}{R} \exp\left(-\frac{E_a}{RT_i}\right) - \frac{\mu_i}{\mu_{ox}} \frac{\Delta m_i}{m} \right)^2 \rightarrow \min_{k_0, E_a}$$

Решение данных задач минимизации осуществляется каким-либо численным методом, например, методом случайного поиска [6], схема которого приведена на рис. 2. Полученные при этом величины  $k_0$ ,  $E_a$  используются для расчета  $k$  для исследуемой смеси при использовании описанной выше процедуры пересчета массы осадка в потенциальную плотность окисла.

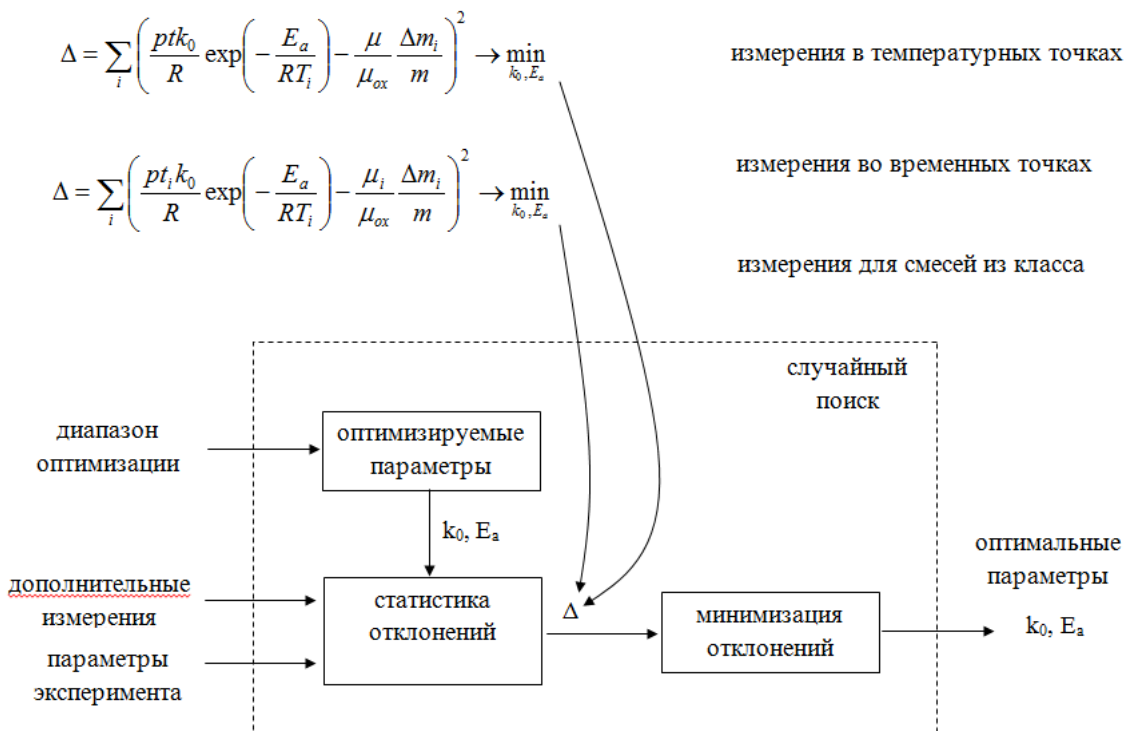


Рис. 2. Оптимальная параметризация

Наряду с изменением температуры и парциального давления кислорода для ускорения процесса окисления можно использовать дополнительные факторы. В этих условиях возникает задача выбора экстремальных условий квалификационных испытаний, позволяющих их максимально ускорить.

Для ее решения может быть использовано двухуровневое факторное планирование экспе-

римента [7] с использованием следующих факторов [2]:

- применяется катализатор или нет;
- используется перемешивание или нет;
- используется повышение давления воздуха или его обогащение кислородом для повышения парциального давления последнего;
- используется облучение зоны реакции в видимом или ультрафиолетовом диапазоне.

По результатам спланированных экспериментов формируется линейно-регрессионная модель, статистический анализ которой, отображенный на рис. 3, дает возможность оценить [8]: воспроизводимость проводимых измерений; значимость факторов в составе регрессионной модели; адекватность регрессионной модели в целом.

Оценке воспроизводимости кратных измерений предшествует их усреднение и расчет их дисперсий  $s_1^2, \dots, s_N^2$ . Решение о воспроизводимости принимается по критерию Кохрейна [9].

Решающей при этом является статистика Кохрейна  $C = \frac{\max(s_1^2, \dots, s_N^2)}{s_1^2 + \dots + s_N^2}$ , имеющая распре-

деление вида  $F_C = F^N(NC, m-1, N(m-1))$ ,

где  $F$  – распределение Фишера;  $m$  – кратность измерений;  $N$  – общее число факторов. Для расчетного значения статистики вычисляется вероятность его реализации, которое сравнивается с доверительной.

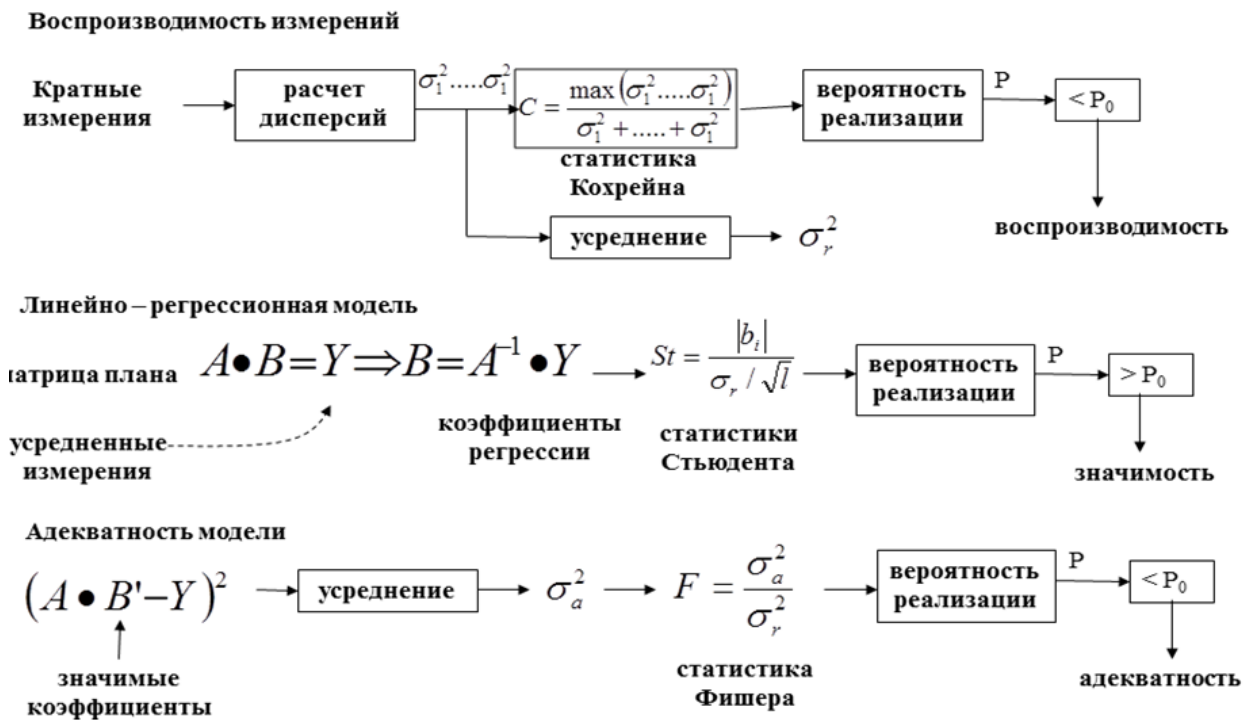


Рис. 3. Статистический анализ

Решение о воспроизводимости принимается, если расчетная вероятность оказывается ниже доверительной. При этом дисперсию воспроизводимости можно оценить как результат усреднения дисперсий отдельных кратных измерений  $\sigma^2 = \frac{s_1^2 + \dots + s_N^2}{N}$ . В противном случае серия измерений, соответствующая максимальной дисперсии считается аномальной и должна быть повторена.

Расчет коэффициентов линейно-регрессионной модели осуществляется из следующих соображений. Матрица двухуровневого плана является невырожденной матрицей системы линейных уравнений относительно коэффициентов регрессии  $b_1, \dots, b_N$ , модули которых (нагрузки факторов) определяют зна-

чимность факторов в составе модели. Правой частью этой системы является вектор усредненных измерений. При этом вектор коэффициентов представляет собой результат перемножения обращенной матрицы плана на вектор усредненных измерений.

Нагрузки фиктивных факторов в модели считаются нулевыми, а отсеивание незначимых факторов осуществляется по критерию Стьюдента. Для этого используются статистики Стьюдента  $\frac{|b_1|}{s_b}, \dots, \frac{|b_l|}{s_b}$ , где  $s_b = \frac{\sigma}{\sqrt{I}}$  – СКО оценки нагрузок нефиктивных факторов.

Решение о значимости соответствующих факторов принимается по критерию Стьюдента с принятой доверительной вероятностью. При этом незначимым считается фактор, вероят-

ность реализации статистики Стьюдента для которого оказывается ниже доверительной. Соответствующий коэффициент регрессии в модели должен быть при этом обнулен. Прочие коэффициенты регрессии для значимых факторов сохраняются в модели.

Решение об адекватности линейно-регрессионной модели определяется по критерию Фишера с использованием решающей статистики, представляющей собой отношение дисперсий адекватности и воспроизводимости.

Дисперсия воспроизводимости определена ранее, а дисперсия адекватности представляет собой результат усреднения квадратов рассогласования значений регрессии и усредненных измерений. Значения регрессии при этом рассчитываются путем умножения матрицы плана на вектор коэффициентов регрессии, в котором обнулены коэффициенты, соответствующие незначимым и фиктивным факторам.

Отношение  $F$  дисперсии адекватности к дисперсии воспроизводимости представляет собой статистику Фишера, распределение которой имеет вид  $F_F = F(F, N, l)$ , где  $F$  – распределение Фишера с  $N$  и  $l$  степенями свободы. Решение об адекватности принимается, если вероятность реализации статистики Фишера ниже доверительной. В противном случае делается вывод о неполноте выбранной системы факторов или нелинейном вхождении некоторых из них.

При использовании линейно-регрессионной модели поиск экстремума представляет собой задачу линейного программирования для замкнутой области факторных значений в виде многомерного симплекса. Локальный экстремум линейной регрессии достигается при этом в одной из вершин области и, следовательно, равен экстремальному усредненному измерению, соответствующему одной из строк плана эксперимента.

Симплекс-планирование предусматривает включение в факторную область также симплекса, симметричного рассмотренному. Ему соответствует план эксперимента с инвертированной матрицей факторов, а общая область поиска экстремума образуется исходным, симметричным и дополнительными симплексами, примыкающими к началу координат.

При расширенном планировании, схема которого приведена на рис. 4, для формирования таблиц параметров используются исходный и инвертированный планы. В соответствии с этими таблицами проводятся квалификационные испытания, в ходе которых осуществляются кратные измерения. В ходе обработки этих измерений осуществляется поиск экстремального усредненного измерения, которому соответствует набор параметров или факторов, интерпретируемый как искомые экстремальные условия квалификационных испытаний.

При планировании эксперимента для выбора экстремальных условий испытаний желательно использовать наиболее эффективный катализатор, процедура анализа влияния которого отображена на рис. 5.

С этой целью кратные измерения массы осадка проводятся для каждого из катализаторов, а также для ситуации отсутствия катализатора. Решение о выборе и значимости влияния наиболее эффективного катализатора принимается по критерию Граббса [9]. С этой целью рассчитываются усредненные значения  $\Delta m_1, \dots, \Delta m_i$  масс осадка для исследуемых ситуаций и формируется статистика Граббса вида  $G = \max_i \left( \frac{\Delta m_i - y}{\sigma} \right)$ , где  $y$  – среднее арифметическое усредненных измерений, а  $\sigma$  – СКО этих измерений.



Рис. 4. Расширенное планирование

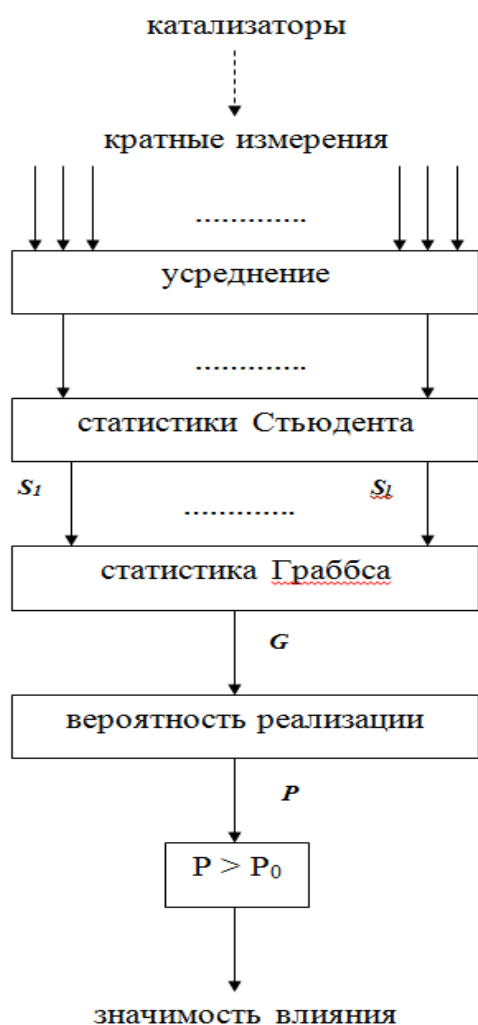


Рис. 5. Анализ влияния катализаторов/ингибиторов

Расчет вероятности реализации данной статистики осуществляется с использованием распределения Граббса [9]. Решение о значимости влияния наиболее эффективного катализатора принимается, если рассчитанная вероятность реализации превышает доверительную. В этом случае указанный катализатор вводится в число упомянутых выше факторов планирования. Заметим, что аналогичный подход можно использовать при оценке значимости влияния облучения, а в целом – для трансформации многоуровневого планирования в двухуровневое.

Параметризация критериальной модели по результатам квалификационных испытаний в экстремальных условиях позволяет провести в этих условиях оценку параметров кинетического коэффициента в соответствии с изложенной выше методикой. Рассчитывая по ним кинетический коэффициент для условий эксперимента и используя его значение для штатных условий, можно, используя критерий (2), оценить массу

окисленного осадка и потенциальную плотность окислов для штатных условий. Используя затем нормативы для потенциальной плотности [2], можно принять решение об удовлетворительности окислительных свойств смеси.

### Выводы

1. Разработана критериальная модель химической стабильности углеводородных смесей, предназначенная для пересчета результатов квалификационных экспресс-испытаний к эксплуатационным условиям и включающая критерии геометрического, термодинамического и кинетического подобия. Критерий геометрического подобия может быть использован для выбора габаритов лабораторного реактора, а критерий термодинамического подобия для жидкостей представляет собой условие выбора возможного температурного приращения.

2. На базе кинетического уравнения окисления углеводородов в бимолекулярном приближении синтезирован критерий химической стабильности, представляющий собой условие динамического равновесия указанного окисления. На этой основе разработана процедура параметризации критериальной модели, а также методика пересчета к эксплуатационным условиям.

3. Предложен метод учета влияния дополнительных факторов, основанный на факторном планировании эксперимента и позволяющий выбрать экстремальные условия испытаний для формирования гарантированных нормативов стабильности. Синтезированная по результатам спланированных экспериментов линейно-регрессионная модель позволяет осуществить статистический анализ этих результатов, включая оценку воспроизводимости измерений, а также оценку значимости и полноты введенных в модель факторов.

4. Линейность модели позволяет осуществить выбор экстремальных условий квалификационных испытаний методом последовательных приближений с использованием линейного программирования. Для расширения факторной области поиска экстремума предложено использовать расширенное планирование эксперимента, использующее для выбора параметров эксперимента как прямого, так и инвертированного факторного плана.

5. Предложен метод оценки влияния наиболее эффективного катализатора, базирующийся на критерии Граббса. Он предусматривает предварительное усреднение измерений, относящихся к разным катализаторам и ситуа-

ции отсутствия катализатора, и формирование статистики Граббса по усредненным измерениям. Решение о значимости влияния наиболее эффективного катализатора принимается по вероятности реализации указанной статистики, если она превышает доверительную. В противном случае указанное влияние считается несущественным. Аналогичный подход можно использовать при оценке значимости влияния облечения, а в целом – для трансформации многоуровневого планирования в двухуровневое.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гухман, А.А. Введение в теорию подобия. – М.: Высшая школа, 1973. – 296 с.
2. Саблина, З.А. Состав и химическая стабильность моторных топлив. – М.: Химия, 1972. – 280 с.
3. Моисеев, А.А. Моделирование химической стабильности методом теории подобия // Информационные технологии. – 2015. – Т.21. – №9. – С. 666.
4. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. – М.: Наука. 1990. Т.2. – 592 с.
5. Эмануэль, Н.М., Кнорре, Д.Г. Курс химической кинетики. – М.: Высшая школа, 1984. – 463 с.
6. Теория и применение случайного поиска/ под ред. Растригина. – Рига: «Зинатне», 1969. – 307 с.
7. Моисеев, А.А. Факторное планирование в последовательной оптимизации // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». – 2016. – Т. 5. – № 5. – С. 414.

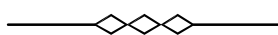
8. Ахназарова, С.Л., Кафаров, В.В. Методы оптимизации экспериментов в химической технологии. – М.: Высшая школа, 1985. – 327 с.

9. Моисеев, А.А. Модифицированные критерии статистической однородности // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2015. – №11. – С. 20.

### REFERENCES

1. Gukhman, A.A. *Introduction in Similarity Theory*. – M.: Higher School, 1973. – pp. 296.
2. Sablina, Z.A. *Composition and Chemical Stability of Motor Fuels*. – M.: Chemistry, 1972. – pp. 280.
3. Moiseyev, A.A. Chemical stability simulation by method of similarity theory // *Information Techniques*. – 2015. – Vol. 21. – No.9. – pp, 666.
4. Sivukhin, D.V. *General Physics Course*. – M.: Science. 1990. Vol.2. – pp. 592.
5. Emmanuel, N.M., Knorre, D.G., *Chemical Kinetics Course*. – M.: Higher School, 1984. – pp. 463.
6. *Theory and Application of Random Search/* under the editorship of Rastrigin. Riga: “Zinatne”, 1969. – pp. 307.
7. Moiseyev, A.A. Factor planning in successive optimization // *Bulletin of National Research Nuclear University “MEPI”*. – 2016. Vol. 5. – No. 5. – pp. – 414.
8. Akhnazarova, S.L., Kafarov, V.V. *Methods of Experiment Optimization in Chemical Technology*. – M.: Higher School, 1985. – pp. 327.
9. Moiseyev, A.A. Modified criteria of statistical uniformity // *Industrial ACS and Controllers*. – 2015. No.11. – pp. 20.

Рецензент д.т.н. Н.Н. Гришин



Учредитель: 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. E-mail: naukatm@yandex.ru  
 Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбокова.

Сдано в набор 08.09.2017. Выход в свет 31.10.2017.  
 Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88.  
 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