

**Том 5 № 1–2 2018**

ISSN 2313-1020 (Print)  
ISSN 2542-1093 (Online)

# **АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ**

**МАТЕРИАЛЫ ПЯТОЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**г. Новосибирск, 28 марта 2018 г.**

# **ACTUAL PROBLEMS IN MACHINE BUILDING**

**SCIENTIFIC, TECHNICAL AND INDUSTRIAL ARTICLES**

**Proceedings of the Fifth International  
Scientific and Practical Conference**

**Novosibirsk, 28 March 2018**

**НОВОСИБИРСК**



# ОБРАБОТКА

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

# О МЕТАЛЛОВ

## ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

«Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» – рецензируемый научно-технический и производственный журнал, издающийся с 1999 года с периодичностью 4 раза в год.

В журнале публикуются в основном результаты оригинальных фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований и аспирантских работ. Значительное внимание уделяется публикациям обзорных, проблемных и дискуссионных работ по актуальным вопросам машиностроения, материаловедения и современной металлургии. Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование. **Публикация статей бесплатная.**

Журнал предназначен для профессорско-преподавательского состава и научных работников высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов, инженерно-технических работников производственных предприятий и проектных организаций.

Присутствуют разделы: «Технология», «Оборудование», «Инструменты», «Материаловедение», «Научно-техническая информация» и др.



В 2017 году журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» вошел в индекс цитирования *Emerging Sources Citation Index (ESCI) базы Web of Science*. Журналы, представленные в индексе цитирования *ESCI*, отвечают большинству базовых критериев *Core Collection* и расцениваются компанией *Clarivate Analytics* как наиболее влиятельные и востребованные издания, имеющие большую вероятность высокого научного интереса.



Полный текст журнала «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» можно найти в базах данных компании EBSCO Publishing) на платформе EBSCOhost. EBSCO Publishing является ведущим мировым агрегатором научных и популярных изданий, а также электронных и аудиокниг.



Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук».

**Правила представления статей для публикации и другая информация о журнале размещены на сайте научного издания:**



[http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, корп. 5, к. 137 ВЦ



+7 (383) 346-17-75



[metal\\_working@mail.ru](mailto:metal_working@mail.ru)

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-23961 от 05 апреля 2006 г.

Print ISSN: 1994-6309 Online ISSN: 2541-819X

Индекс журнала в каталоге агентства «Роспечать» – 70590



НОВОСИБИРСК

# АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ISSN 2313-1020 (Print)  
ISSN: 2542-1093 (Online)

5 1-2 2018 .

«

2014 .

- 1

«

»

«

»

31.10.2016 .

( ).  
77-67566.

eLIBRARY.RU.

630073, . . . , 20,

( ), . 5, . 137 , . .  
. (383) 346-17-75

http://journals.nstu.ru/machine-building  
E-mail: machine-building@mail.ru

# ACTUAL PROBLEMS IN MACHINE BUILDING

ISSN 2313-1020 (Print)  
ISSN: 2542-1093 (Online)

Volume 5 Number 1-2 2018 SCIENTIFIC, TECHNICAL AND INDUSTRIAL JOURNAL

## EDITORIAL BOARD

### EDITOR-IN-CHIEF:

**Vadim Y. Skeeba**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor,  
Department of Industrial Machinery Design,  
Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*, Russian Federation

### DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF:

**Dmitry V. Lobanov**, D.Sc. (Engineering), Professor,  
Machine-Building Faculty,  
I.N. Ulianov Chuvash State University, *Cheboksary*, Russian Federation

**Tatyana G. Martynova**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor,  
Department of Industrial Machinery Design,  
Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*, Russian Federation

**Natalia V. Plotnikova**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor,  
Department of Material Science in Mechanical Engineering,  
Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*, Russian Federation

## EDITORIAL COUNCIL

### CHAIRMAN:

**Anatoliy A. Bataev**, D.Sc. (Engineering), Professor,  
Rector, Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*, Russian Federation

### MEMBERS:

#### *The Federative Republic of Brazil:*

**Alberto Moreira Jorge Junior**, Dr.-Ing., Full Professor, Federal University of Sao Carlos, *Sao Carlos*

#### *The Federal Republic of Germany:*

**Moniko Greif**, Dr.-Ing., Professor, Hochschule RheinMain University of Applied Sciences, *Russelsheim*

**Florian Nurnberger**, Dr.-Ing., Chief Engineer and Head of the Department "Technology of Materials",  
Leibniz Universitat Hannover, *Garbsen*

**Thomas Hassel**, Dr.-Ing., Head of Underwater Technology Center Hanover, Leibniz Universitat Hannover, *Garbsen*

#### *The Republic of Belarus:*

**Fyodor I. Panteleenko**, D.Sc. (Engineering), Professor, First Vice-Rector,  
Corresponding Member of National Academy of Sciences of Belarus, Belarusian National Technical University, *Minsk*

#### *The Ukraine:*

**Sergiy V. Kovalevskyy**, D.Sc. (Engineering), Professor, Donbass State Engineering Academy, *Kramatorsk*

#### *The Russian Federation:*

**Gennadiy E. Anisimenko**, Director, Scientific and Production company «Sigma-instrument», *Novosibirsk*;

**Vladimir G. Atapin**, D.Sc. (Engineering), Professor, Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*;

**Victor P. Balkov**, Deputy general director, Research and Development Tooling Institute «VNIINSTRUMENT», *Moscow*;

**Vladimir A. Bataev**, D.Sc. (Engineering), Professor, Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*;

**Vladimir G. Burov**, D.Sc. (Engineering), Professor, Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*;

**Aleksandr N. Gerasenko**, Director, Scientific and Production company «Mashservispribor», *Novosibirsk*;

**Vladimir V. Ivancivsky**, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*;

**Sergey V. Kirsanov**, D.Sc. (Engineering), Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, *Tomsk*;

**Aleksandr N. Korotkov**, D.Sc. (Engineering), Professor, Kuzbass State Technical University, *Kemerovo*;

**Evgeniy A. Kudryashov**, D.Sc. (Engineering), Professor, Southwest State University, *Kursk*;

**Aleksey V. Makarov**, D.Sc. (Engineering), Senior Researcher, M.N. Miheev Institute of Metal Physics,  
Russian Academy of Sciences (Ural Branch), *Yekaterinburg*;

**Aleksandr G. Ovcharenko**, D.Sc. (Engineering), Professor, Biysk Technological Institute, *Biysk*;

**Kharis M. Rakhimyanov**, D.Sc. (Engineering), Professor, Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*;

**Yuriy N. Saraev**, D.Sc. (Engineering), Professor, Institute of Strength Physics and Materials Science,  
Russian Academy of Sciences (Siberian Branch), *Tomsk*;

**Alexander S. Yanyushkin**, D.Sc. (Engineering), Professor, I.N. Ulianov Chuvash State University, *Cheboksary*

The journal is issued since 2014

Publication frequency - 1 volume a year

Data on the journal are published in eLIBRARY.RU

Edition address: Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,  
Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Tel.: (383) 346-17-75

<http://journals.nstu.ru/machine-building>; E-mail: [machine-building@mail.ru](mailto:machine-building@mail.ru)



# ACTUAL PROBLEMS IN MACHINE BUILDING

## Proceedings of the Fifth International Scientific and Practical Conference Novosibirsk, 28 March 2018

### CONFERENCE ORGANIZERS

- ] Novosibirsk State Technical University, Scientific, Technical and Industrial Journal "Obrabotka Metallov", Novosibirsk, Russian Federation
- ] Exhibition company "ITE Siberia", Novosibirsk, Russian Federation

### CO-ORGANIZERS

- ] Hochschule RheinMain University of Applied Sciences, Rüsselsheim, Germany;
- ] Leibniz Universität Hannover, Garbsen, Germany;
- ] Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine;
- ] Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus;
- ] JSC Novosibirsk Technological, Designing and Experimental Institute "Orgstankinprom", Novosibirsk, Russian Federation;
- ] LLC Research-and-production and commercial company "Mashservispribor", Novosibirsk, Russian Federation;
- ] Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, Russian Federation;
- ] Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation;
- ] I.I. Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation;
- ] Biysk Technological Institute, Branch of Polzunov Altai State Technical University, Biysk, Russian Federation;
- ] Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS, Tomsk, Russian Federation;
- ] National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation;
- ] Bratsk State University, Bratsk, Russian Federation.
- ] I.N. Ulianov Chuvash State University, Cheboksary, Russian Federation

### HONORARY COMMITTEE

**COMMITTEE MEMBERS:** *Monico Greif*, Professor, DSc, High School of the Rhine-Main, University of Applied Sciences (Rüsselsheim, Germany), *Thomas Hassell*, Professor, DSc, Wilhelm Leibniz University of Hannover (Garbsen, Germany), *Florian Nürnberger*, Professor, DSc, Hanover Wilhelm Leibniz University (Garbsen, Germany), *Kovalevsky S.V.*, Professor, DSc, DSEA (Kramatorsk, Ukraine), *Panteleenko F.I.*, Professor, DSc, member of the National Academy of Sciences of Belarus, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus), *Afanasyev V.K.*, Academy of Natural Sciences, Professor, DSc, SibSIU (Novokuznetsk, Russia), *Burov V.G.*, Professor, DSc., NSTU (Novosibirsk, Russia), *Gerashenko A.N.*, Director of the LLC Research-and-production and commercial company "Mashservispribor" (Novosibirsk, Russia), *Guriev A.M.*, Professor, DSc. AltSTU (Barnaul, Russia), *Kirsanov S.V.*, Professor, DSc, TPU (Tomsk, Russia), *Markov A.M.*, Professor, DSc. Vice Rector of AltSTU (Barnaul, Russia), *Ovcharenko A.G.*, Professor, DSc, Head of Department in BTI AltSTU (Biysk, Russia), *Rassohin V.A.*, General director of the JSC "Shvabe - defense and protection", *Rakhimyanov Kh.M.*, Professor, DSc., Head of Department in NSTU (Novosibirsk, Russia), *Saraev Yu.N.*, Professor, DSc., ISPMS SB RAS (Tomsk, Russia), *Sitnikov A.A.*, Professor, DSc, AltSTU (Barnaul, Russia), *Stetsovsky A.S.*, Exhibition Director, «ITE Siberia» (Novosibirsk, Russia), *Yanyushkin A.S.*, Professor, DSc, Corresponding Member SAN VSH, Academician IHEAS, ChSU (Cheboksary, Russia).

### PROGRAMME COMMITTEE

- ] *Bataev A.A.*, editor in chief of Scientific, Technical and Industrial Journal "Obrabotka Metallov", Professor, D.Sc. (Engineering), Rector of Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia), Chairman;
- ] *Korotkov A.N.*, Academician of RAE, Professor, D.Sc. (Engineering), KuzSTU (Kemerovo, Russia), co-chair;
- ] *Atapin V.G.*, Deputy Chief Editor of "Obrabotka Metallov", Professor, D.Sc. (Engineering), NSTU (Novosibirsk, Russia), co-chair.

**COMMITTEE MEMBERS:** *Ivancivsky V.V.*, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, NSTU (Novosibirsk, Russia), *Lobanov D.V.*, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, ChSU (Cheboksary, Russia), *Tregubchak P.V.*, Manufacturing manager, JSC "Novosibirsk Switch Plant" (Novosibirsk, Russia), *Yanpolskiy V.V.*, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Dean, Faculty of Mechanical Engineering and Technologies, NSTU (Novosibirsk, Russia).

### ORGANIZING COMMITTEE

- ] *Skeeba V.Yu.*, Deputy Chief Editor of "Obrabotka Metallov", Ph.D. (Engineering), Associate Professor, NSTU (Novosibirsk, Russia);
- ] *Lashutina E.N.*, Head of Directorate Industry Exhibitions, «ITE Siberia» (Novosibirsk, Russia).

### SUBJECT OF THE CONFERENCE

- ] Innovative Technologies in Mechanical Engineering;
- ] Technological Equipment, Machining Attachments and Instruments;
- ] Materials Science in Machine Building;
- ] Economics and Organization of the Business Innovative Processes in Engineering.

. . ., Стариков А.И., Темпель Ю.А., Темпель О.А.	9
. . . - . . . . .	15
Сараев Ю.Н., Лунев А.Г., Тригуб М.В., Перовская М.В.	20
Марков А.М., Лебедев П.В., Салман А.М.	26
Бабаев А.С., Лаптев Н.В., Столов Е.В., Семёнов А.Р.	31
Гаар Н.П., Рахимьянов К.Х., Иванова М.В., Мураткозиев П.Е.	37
. . . . .	42
. . . . .	48
. . . . .	54
. . . . . -1 «	60
» . . . . .	65
. . . . .	72
. . . . .	78

• ”	• ”	• ”	• •	85
• ”	• ”	• ”	• •	93
• •				100
• ”	• •			106
-	• ”	• ”	• ”	112
• •				121
• ”	• •			126
• ”	• •	Al-(20÷40)% Si		132
• ”	• ”	• •		139
				145
				147
				149

## CONTENTS

**Innovative Technologies in Mechanical Engineering**

- Nekrasov R.Yu., Starikov A .I., Tempel Yu.A, Tempel O.A.** Numerical studies to determine spatial deviations of a workpiece that occur when machining on CNC machines 9
- Tokarev A.O., Mironenko I.G., Fedotova E.S., Makagon L.D.** Analysis of welding efficiency-surfacing works in repair Analysis of welding efficiency-surfacing works in repair 15
- Saraev Y.N., Lunev A. G., Trigub M. V., Perovskaya M. V.** The investigation technique of heat-and-mass transfer during arc welding with consumable electrode using laser lighting for video recording 20
- Markov A.M., Lebedev P.V., Salman A.M.** Dependence strenght of internal thread in carbon fibered plastics from technological parameters of the process its manufacture 26
- Babaev A.S., Laptev N.V., Stolov E.V., Semyonov A.R.** Application of robotized finish treatment in a free abrasive for aluminum cylinders 31
- Gaar N.P., Rakhimyanov K.Kh., Ivanova M.V., Muratkoziyev P.E.** Potentiodynamic researches electrochemical dissolution of the soft magnetic nanocrystalline alloy 5BDPR in water solutions of salts sodium nitrite and sulfate 37
- Gayst S.V., Markov A.M., Salman A.M.** The influence of wear of cutting tools on the process of chip formation during milling of the composite material 42

**Technological Equipment, Machining Attachments and Instruments**

- Rykov .A.** Improvement of vibration defense for mechanical systems 48
- Kudryashov E.A., Smirnov I.M., Grishin D.V., Khizhnyak N.A.** Technological features of different materials packages machining 54
- Litsin K.V., Kovalchuk T.V.** Modernization of the electric drive system diverter of ice-clean cooling installation SLS 1 JSC Ural Steel 60
- Firsov A.M., Ovcharenko A.G., Smirnov V.V.** Analysis of plane vector dimensional chain for modernized pivot unit of car UAZ 65
- Cha G.O., Skeebeba V.Yu.** Induction hardening kinematic features of integrated processing 72
- Lobanov D.V., Muliukhin N.V.** Methodology for predicting the damage of a solid alloy at the tooling of a tool for processing nonmetallic composites 78
- Ovcharenko A.G, Romashev A.N., Smirnov V.V., Firsov A.M.** Data processing methods in monitoring and diagnosis of cutting tool 85

---

---

<b>Materials Science in Machine Building</b>	
<b>Butukhanov V.A., Lygdenov B.D., Guryev A.M., Tsydypov B.S.</b> A study of thermocycling effect on structure and properties of eutectoid steel after thermochemical treatment	93
<b>Stolyarov V. V.</b> Surface and bulk nanostructuring of Ti-based alloys	100
<b>Alfyorova E.A., Lychagin D.V.</b> Pack slip bands formation in FCC single crystals	106
<b>Belotserkovskii M.A., Grigorichik A.N., Kukareko V.A., Konstantinov V.M.</b> Structural-phase state of thermal sprayed coatings from high-chromium steels deposited using high-enthalpy combustible gas	112
<b>Kul'kov V.G.</b> Migration in the model of incommensurate grain boundary	121
<b>Prudnikov A.N., Prudnikov V.A.</b> Production of pressed billets from hypereutectic silumin and their properties	126
<b>Popova M.V., Malyuh M.A.</b> Modification effects on microstructure and physical properties of AL-(20÷40)% SI alloys	132
<b>Lychagin D.V., Novitskaya O.S., Filippov A.V.</b> Use of acoustic emission for wear control of Gadfield steel	139
<b>Guidelines for Writing a Scientific Paper</b>	145
<b>Abstract requirements</b>	147
<b>Rules for authors</b>	149

УДК 621

**ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ  
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ЗАГОТОВКИ, ВОЗНИКАЮЩИХ  
ПРИ ОБРАБОТКЕ НА СТАНКАХ С ЧПУ**

**Р.Ю. НЕКРАСОВ**, канд. техн. наук, доцент  
**А.И. СТАРИКОВ**, ст. преподаватель  
**Ю.А. ТЕМПЕЛЬ**, ассистент  
**О.А. ТЕМПЕЛЬ**, ассистент  
(ФГБОУ ВО ТИУ, г. Тюмень)

**Некрасов Р.Ю.**– 625000, Тюменская обл., г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38  
Тюменский индустриальный университет,  
e-mail: syncler@mail.ru

В статье рассмотрена проблема повышения точности обработки заготовок на станках с числовым программным управлением. В рамках выявленной проблемы рассматривается роль метода конечных элементов для ее решения. Причем применение численного моделирования в основном используется для получения оценок эксплуатационных и технологических характеристик разрабатываемого изделия, а в представленной работе предлагается использовать метод конечно-элементного анализа как одного из инструментов при обеспечении точности формообразования поверхности предмета труда в технологических системах, для определения деформации заготовки под действием сил резания и трансформации ее геометрической формы до непосредственной обработки с учетом выявленных отклонений. То есть рассматривается возможность применения метода конечных элементов при разработке управляющих программ для деталей типа тел вращения.

**Ключевые слова:** точность металлообработки, математическое моделирование, численные исследования, CAD-система, станки с числовым программным управлением.

**Введение**

Среди значительных направлений в исследованиях авторов в области повышения точности и качества обработки являются программная коррекция перемещений исполнительных рабочих органов станка, разработка и исследование интеллектуальных систем управления, автоматическое управление геометрической точностью и регулирование силовых параметров в процессе обработки [1 - 5]. Но, так как на процесс обработки влияет множество факторов, то актуальная задача на сегодняшний день – пополнение уже имеющейся базы знаний в рассматриваемой области и повышение эффективности и результативности современного производства машиностроения.

Кроме того, требования к проектированию в машиностроении постоянно повышаются, в связи с внедрением новых технологических процессов, режимов, материалов при изготовлении деталей с высокими требованиями к размерной точности и эксплуатационному ресурсу, поэтому наиболее выгодным становится применение численного моделирования.

Одним из методов численного моделирования, который нашел широкое применение в области инженерного анализа, является метод конечных элементов (МКЭ) [6 - 13].

Поскольку служит более совершенным инструментом для проведения расчетов при решении задач обеспечения надежности проектов в области машиностроения.

В связи с вышесказанным, целью исследования является: использование методов численных исследования и рассмотрение возможности их применения при разработке управляющих программ для обработки деталей типа тел вращения с целью повышения точности их формообразования.

### **Методика экспериментального исследования**

Для выполнения задач исследования использовались теоретические основы и научные положения, сформулированные в трудах отечественных ученых в области технологии машиностроения, автоматизации и управления технологическими процессами, резания металлов. При выполнении работы использованы методы вычислительной математики, математического моделирования, матричного анализа, статистической обработки результатов экспериментов. Для конечно-элементного моделирования воздействия составляющих сил резания на объект исследования использовался программный продукт *SolidWorks Simulation*.

### **Результаты и обсуждение**

При точении деталей инструмент выполняет функцию формообразования, то есть должен обеспечивать получение поверхностей заданных размеров и формы. Решение таких задач во многом определяется кинематикой процесса резания. Кинематика формообразования точением рассматривается как сочетание четырех составляющих: формы полученной поверхности детали; формы производящей поверхности режущего инструмента; формообразующих движений резца относительно заготовки; положения резца и заготовки относительно друг друга.

С целью назначения необходимых технологических условий формообразования детали в заданных пределах допуска реализуется ряд следующих задач: построение математической модели формообразования поверхности детали с помощью кромки РИ, а также проведение численных исследований с помощью метода конечных элементов для определения пространственных отклонений заготовки, возникающих в процессе обработки на станках с ЧПУ под действием составляющих сил резания и возможности их компенсации.

В процессе обработки детали станок подвергается интенсивному воздействию целого комплекса эксплуатационных нагрузок, имеющих случайную природу, вследствие чего траектории формообразующих элементов изменяются в широких пределах, что в свою очередь ведет к изменению формы детали и ее показателей точности. А, как известно, повышение точности изготовления деталей увеличивает срок службы машин и оборудования. При недостаточной точности изготовления составляющих машину частей качество ее функционирования будет невысоким и в процессе работы могут возникать существенные динамические нагрузки, которые приводят к ускоренному износу оборудованию и его разрушению.

Многие отечественные авторы [1 - 4, 12 - 15] считают критическим влияние погрешностей на обработку, вызванных силами резания, тепловыми явлениями, износом режущего инструмента, которые приводят к изменению формы и пространственного положения, как исполнительных органов станка, так и обрабатываемой заготовки.

Поскольку резание представляет собой многофакторный процесс, и полное аналитическое описание его в настоящее время практически невозможно [4, 5], поэтому в

настоящей работе была решена узкая задача, направленная на моделирование трансформации модели детали при воздействии на нее упругих силовых деформаций в ходе реализации токарной обработки и оценку их влияния на размерную точность готового продукта.

Неограниченные возможности реализации компьютерных моделей на основе МКЭ обусловили разработку новых методов математической физики для решения задач динамики, устойчивости, физической и геометрической нелинейности [6].

Так как в общем объеме механической обработки на долю изготовления корпусных деталей и деталей типа тела вращения приходится около 55%, то объектом исследования послужил вал из стали марки Сталь 40Х (ГОСТ 4543-71). В качестве примера рассмотрена заготовка при точении, закрепленная в токарном патроне без заднего центра (см. рис. 1).

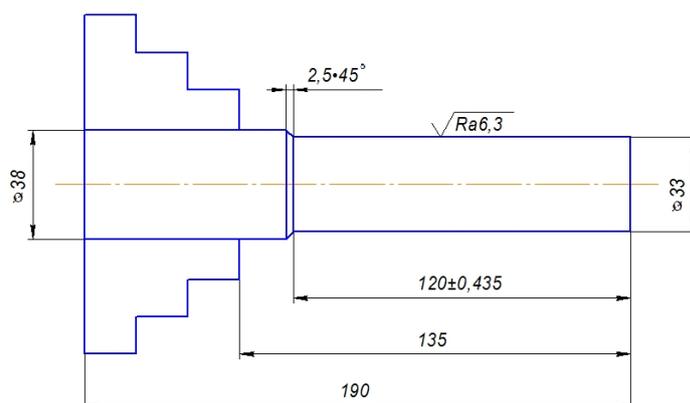


Рис. 1. Эскиз детали

Для конечно-элементного анализа, рассчитав составляющие силы резания, возникающие в процессе точения цилиндрической поверхности детали диаметром 33 мм и длиной 120 мм при однократном черновом точении, с глубиной резания  $t=2,5$  мм, режущим инструменте – проходным резце Т15К6 ГОСТ 18878-73 с размером державки 16×25 и следующими геометрическими элементами резца: главный угол в плане  $\varphi^{\circ}=45^{\circ}$ ; передний угол  $\gamma^{\circ}=0^{\circ}$ ; угол наклона главного лезвия  $\lambda^{\circ}=0^{\circ}$ , создается расчетная модель с физико-механическими свойствами выбранного материала. Свойства выбранного материала следующие: модуль упругости  $E=1,76 \cdot 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона  $\nu=0,25$ ; плотность  $\rho=7670$  кг/м<sup>3</sup>. Задаваемая нагрузка – составляющие силы резания  $P_{z,y,x} = 2798/1392/1392$  Н.

Результаты конечно-элементного анализа показывают изменение пространственной формы исследуемого объекта. После обтачивания форма детали получится не цилиндрической, а седлообразной в результате деформации от приложенных сил резания.

В связи с вышесказанным, на основании проведенного численного моделирования, следующим этапом являлось внесение изменений в исходную геометрическую модель, записанную в STEP формате. Для подтверждения результативности предлагаемого способа управления геометрической точностью заготовки на станках с ЧПУ проведены экспериментальные исследования двух партий деталей, каждая из которых состояла из пяти штук, обработанных на токарном центре SMTCL CAK50135 проходным резцом Т15К6 ГОСТ 18882-73 с размером державки 16×25. Первая партия обрабатывалась без учета возникающих погрешностей, вторая партия деталей подлежала обработке по программе с измененной траекторией перемещения вершины резца на основе трансформированной CAD-модели.

Для оценки показателей надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции в зависимости от вида технической системы и целей оценки использовались опытно-статистические методы. При сравнении результатов измерений и определения

надежности технологической операции при обработке деталей без изменения управляющей программы и обработанных по предлагаемому способу управления геометрической точностью обработки, можно сказать, что эффективность и результативность способа подтверждена экспериментом и анализом полученных при эксперименте данных. Поскольку по результатам анализа распределения случайной величины наблюдается постоянство смещения математического ожидания в партии деталей, обработанных по управляющей программе с трансформируемой *CAD*-моделью, кроме того среднее квадратическое отклонение уменьшилось на 40,9%, а размаха варьирования почти в два раза.

### Выводы

В современной научной литературе большое внимание уделено качеству и точности металлообработки на станках с числовым программным управлением, в связи с этим актуальной задачей являлось выявление основных тенденций и проблем, возникающих в данном направлении познавательной деятельности научного сообщества.

В представленном исследовании достигнута следующая цель: повышение размерной точности формообразования деталей типа тел вращения, качества их металлообработки, эффективности использования производственной точности технологического оборудования при точении на станках с числовым программным управлением.

Для реализации поставленной цели проанализированы факторы, которые влияют на качество и точность обработки на станках с ЧПУ. На основании этого анализа, а также с учетом того, что резание представляет собой достаточно сложный процесс, в работе была решена узкая задача по моделированию трансформации *CAD*-модели детали ступенчатый вал, с учетом компенсации погрешности, возникающей в процессе действия на заготовку силы резания при обтачивании.

Предложен подход к определению упругих деформаций заготовки под действием сил резания и управления точностью обработки на станках с ЧПУ с использованием метода конечных элементов.

Достоверность полученных результатов подтверждается численными и физическим экспериментами.

Проведена оценка надежности технологической операции механической обработки двух партий деталей, с помощью применения методов статистического анализа. Первая партия – детали, изготовленные по управляющей программе с измененной *CAD*-моделью заготовки и, вторая партия – без изменения. Сравнение результатов оценки подтверждает эффективность и результативность предлагаемого способа управления геометрической точностью обработки деталей типа вал на станках с ЧПУ.

### Список литературы

1. Лысенко А.Ф., Изюмов А.И., Гончаров О.В. К оценке погрешности обработки деталей при интеллектуальном управлении станком // Вестник Донского государственного технического университета. – 2014. – Т. 14, № 3 (78). – С. 96–102.
2. Структура и принципы работы интеллектуальной системы управления обработкой на станках с ЧПУ / Р.Ю. Некрасов, А.И. Стариков, И.В. Соловьев, О.В. Бекарева // Технология и материалы. – 2015. – № 4. – С. 41–48.

3. *Щуров И.А., Болдырев И.С.* Моделирование процесса резания заготовок из композитных материалов с применением метода конечных элементов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение». – 2012. – № 12. – С. 143–149.
4. *Кузнецов А.С., Дроздов А.А.* Технологическое обеспечение точности при обработке на станках с ЧПУ // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. – С. 165–170.
5. *Соловьев И.В., Темпель Ю.А., Темпель О.А.* Применение метода конечных элементов для управления размерной точностью обработки деталей на станках с ЧПУ // Международная научно-техническая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDM-2017: сборник трудов. – СПб.: С.-Петербург. горный ун-т, 2017. – 378 с.
6. *Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Ферзалиев И.А.* Применение метода конечных элементов при расчете трехслойных балок // Наука в цифрах. – 2016. – № 1. – С. 14–16.
7. *Шаламов В.Г.* Математическое моделирование при резании металлов: учебное пособие. – Челябинск: Изд-во ЮжУрГУ, 2007.
8. *Ласуков А.А., Дурев В.В.* Стружкообразование при обработке конструкционных материалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – Т. 2, № 12. – С. 314–322.
9. Совершенствование технологических процессов машиностроительных производств / А.С. Янюшкин, С.О. Сафонов, Д.В. Лобанов и др. – Братск: Изд-во БрГУ, 2006. – 302 с.
10. *Lasukov A.A., Mikhovikov A.A.* 2012 Influence of modified layer of tool on stress – Strain state of cutting wedge // Proceedings of the 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012. – Tomsk, 2012. – doi: 10.1109/IFOST.2012.6357720.
11. *Putilova U.S., Nekrasov Yu.I., Lasukov A.A.* Loading of the manufacturing systems elements in the process of unsteady mode cutting and the models of their arrangement deviations// Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 682. – P. 192–195.
12. *Григорьев А.С., Никишечкин П.А.* Практические аспекты разработки модуля диагностики и контроля режущего инструмента в системе ЧПУ // Вестник МГТУ Станкин. – 2013. – № 4 (27). – С. 65–70.
13. Технологическое обеспечение точности и математическое моделирование процессов механообработки в машиностроении: учебное пособие / В.А. Иванов, В.В. Новоселов, Ю.И. Некрасов, Ю.И. Шаходанов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2001. – 194 с.
14. *Иващенко А.П.* Методы и средства контроля состояния режущего инструмента // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 12-3. – С. 393–396.
15. *Неизвестных А.Г., Крылов Е.Г.* Анализ точности обработки деталей на станках с ЧПУ // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2008. – Т. 4, № 9 (47). – С. 89–91.

**NUMERICAL STUDIES TO DETERMINE SPATIAL DEVIATIONS OF A WORKPIECE  
THAT OCCUR WHEN MACHINING ON CNC MACHINES**

**Nekrasov R.Yu.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: 1syncler@mail.ru

**Starikov A.I.**, Senior Lecturer, e-mail: hapsai@rambler.ru

**Tempel Yu.A.**, Assistant, e-mail: tempeljulia@mail.ru

**Tempel O.A.**, Assistant, e-mail: tempel\_o@mail.ru

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Industrial University of Tyumen», 38 Volodarsky st., Tyumen, 625000, Russian Federation

**Abstract**

The article discusses the problem of increasing the accuracy of machining workpieces on machines with computer numerical control. Within the framework of the problem identified, the role of the finite element method for solving it is considered. Moreover, numerical simulation is primarily used for receiving estimates of operational and technological characteristics of the developed product, and in the present work we propose to use a method of the finite element analysis as a tool for ensuring the accuracy of shaping the surface of a workpiece in process systems for determining the deformation of the workpiece under the action of cutting forces and transformation of its geometric shape prior to direct machining based on identified deviations. That is, the possibility of applying the finite element method in the development of control programs for details such as bodies of revolution is considered.

**Keywords**

Precision of metal working, mathematical modeling, numerical studies, CAD-system, CNC machines

УДК 621.793.71.620.192.4

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВАРОЧНО-НАПЛАВОЧНЫХ РАБОТ  
В СУДОРЕМОНТЕ**

*А.О. ТОКАРЕВ, доктор техн. наук, доцент  
И.Г. МИРОНЕНКО, доктор техн. наук, доцент  
Е.С. ФЕДОТОВА, аспирант  
Л.Д. МАКАГОН, ст. преподаватель  
(СГУВТ, г. Новосибирск)*

**Токарев А.О.** – 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, д. 33  
Сибирский государственный университет водного транспорта,  
e-mail: aot51@ngs.ru

Дан анализ причин поломок гребных валов: собранного сваркой, восстановленных наплавкой, подвергнутого воздействию случайной дуги.

Установлено, что поломки произошли вследствие инициирования трещин различными дефектами сварки: несплавлением сварного шва с основным металлом, кратерами в начале и конце швов, подрезами, наплывами, порами, а также несоответствием качества механической, термической обработки и др. Фактором, способствующим распространению трещин, явились: наличие закалочных структур в зоне термического влияния сварного шва, неметаллические включения в основном металле, разнородность структуры.

Предложены меры по предупреждению дефектов сварки.

**Ключевые слова:** усталостное разрушение, микротрещина, сварной шов, микроструктура, зона термического влияния сварки, дефекты сварки, гребной вал.

**Введение**

Сварочно-наплавочные работы являются одним из самых распространенных способов изготовления и ремонта деталей на речном флоте и других видах транспорта, а также в строительстве, сельском хозяйстве, горно-металлургической промышленности и других видах монтажных и ремонтно-восстановительных работ. При этом сварочное производство – весьма ответственный технологический процесс, требует высокой квалификации исполнителя и строгой технологической дисциплины. Несоблюдение технологии наплавки и сварки часто приводит к последующему аварийному повреждению сваренных или восстановленных наплавкой деталей.

Целью данной работы явилось исследование характерных видов повреждений деталей судовой техники, изготовленных с применением сварочных технологий, а также восстановленных методами наплавки при судоремонте, для определения типичных причин, вызывающих аварии и их предупреждение.

**Материалы и методики исследований**

Анализ выполнялся на гребных валах, претерпевших аварийное разрушение при эксплуатации. Для выявления внутренних дефектов типа несплошностей применялась ультразвуковая дефектоскопия. Для поиска зон концентрации напряжений (ЗКН), вызванных

искажением кристаллической решётки материала сварного шва, был использован метод магнитной памяти металла (ММП-контроль) ГОСТ Р ИСО 24497-2-2009 (Общие требования) и ГОСТ Р ИСО 24497-3-2009 (Контроль сварных соединений). Методика исследований достаточно подробно описана в работе [1].

В обнаруженных местах зон концентрации напряжений (ЗКН) вырезали образцы для микроструктурных исследований. Структуру выявляли травлением 5% раствором азотной кислоты в спирте.

### Результаты и обсуждение

При исследовании обстоятельств систематических поломок вертикальных валов винто-рулевых колонок судов типа «Балтфлот» было установлено, что местом возникновения микротрещин являются зоны непровара в корне сварного шва. В местах зон концентрации напряжений, определённых с помощью магнитограмм, были обнаружены такие дефекты как: непровары, микротрещины, поры, шлаковые включения. В зоне термического влияния сварного шва в материале шлицевых втулок валов (сталь 42ХМ) обнаружены участки с мартенситной закалочной структурой. Микротрещины возникают в процессе эксплуатации вала в местах несплавления материала сварного шва. Распространению трещин способствует закалочная структура, полученная в результате сварки без подогрева.

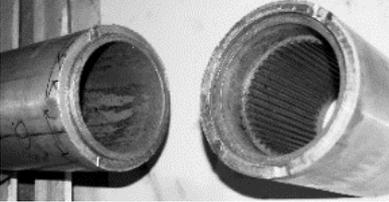
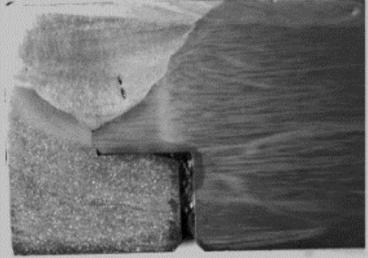
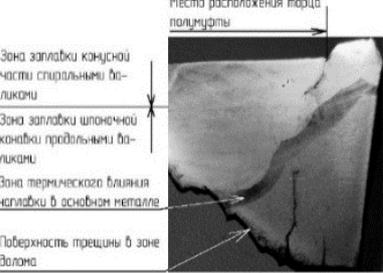
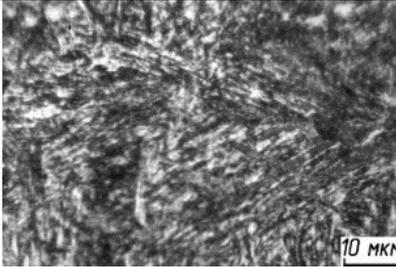
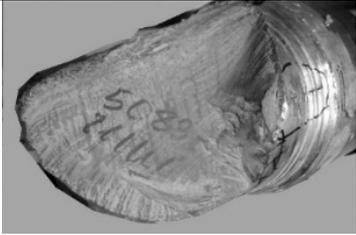
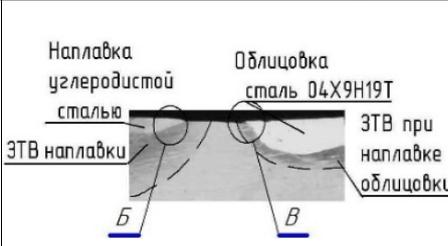
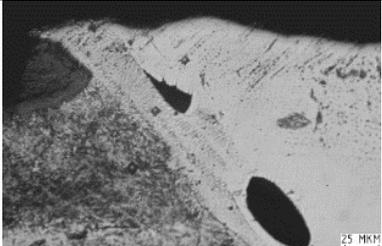
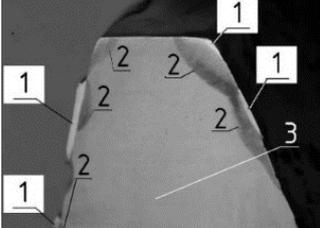
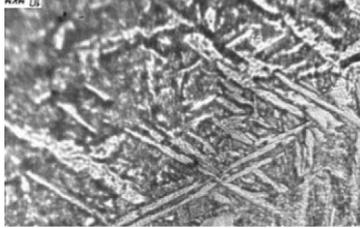
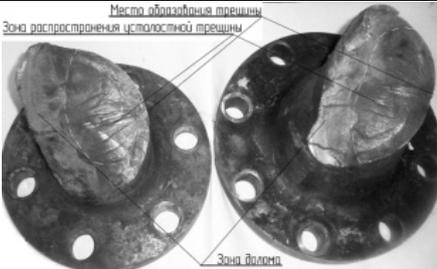
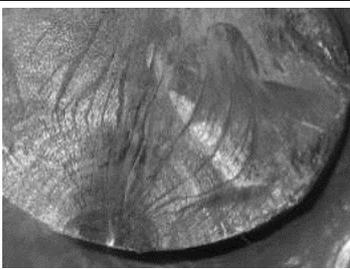
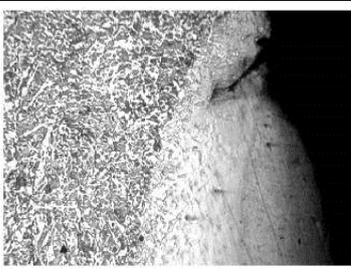
Гребной вал теплохода «Волго-Нефть 142», диаметром 210 мм вышел из строя вследствие усталостного повреждения в первую навигацию после его восстановления методом электродуговой наплавки. Усталостная трещина, разрушившая вал, прошла по посадочной конической части вала, распложенной под полумуфтой. При микроструктурных исследованиях в плоскость шлифа, вырезанного по прилегающему к трещине сечению, закономерно попал край заваренной при ремонте шпоночной канавки. Строение стали в зоне термического влияния ЗТВ сварного шва представляет собой продукт распада мартенсита. Мартенсит, структура закалки, образовался при наплавке первого слоя в результате ускоренного охлаждения. Высокая скорость охлаждения была вызвана интенсивным теплоотводом в объём холодного металла основы. То есть, в нарушение технологии наплавка производилась на холодный вал без его предварительного подогрева. Как следствие, возникшие при закалке структурные напряжения, а также закалочные микротрещины инициировали развитие усталостных трещин от краёв заваренной шпоночной канавки [2].

Разрушение гребного вала правого борта на теплоходе «Кварцит» началось с образования усталостной трещины от продольной зарубки на поверхности галтели сопряжения шейки и тела вала. Микроструктурными исследованиями подтверждается, что местом образования трещины является край наплавленного металла носовой облицовки, на котором обнаружены дефекты сварки в виде напыла металла и разрозненных флюсовых включений. Развитие усталостной трещины вызвало увеличение механических напряжений в сохранившемся сечении и возникновение ещё одной усталостной трещины от необработанного края наплавки облицовки, показанного в таблице.

Отслаиванию наплавленного металла с поверхности зубьев венца механизма поворота портального крана «Альбатрос» способствовало не полное соответствие рабочей поверхности, полученное при обработке ручным абразивным инструментом, эвольвентному профилю зуба. Подогрева зубьев венца перед наплавкой не производилось, либо его температура была недостаточной, отдельной заключительной термообработки для снятия закалочных и термических напряжений также не производилось. В результате этого сталь 50Г и сварочный шов в зоне их контакта получили хрупкие закалочные структуры. По этим участкам легко распространялись трещины между основным и наплавленным металлом.

Таблица

Развитие усталостной трещины

Наружный вид	Макроструктура	Микроструктура
<b>Вертикальный вал винторулевой колонки судна типа «Балтфлот»</b>		
		
<b>Гребной вал теплохода «Волго-нефть 142»</b>		
		
<b>Гребной вал теплохода «Кварцит»</b>		
		
<b>Зубчатый венец механизма поворота порталного крана «Альбатрос»</b>		
		
<b>Вал-проставка теплохода «Волго-нефть-152»</b>		
		

Излом вала – проставки судна «Волго-Нефть 152» произошел в его средней части. Местом возникновения усталостной трещины явился наплавленный сварочный шов. Выполнение этого небольшого фрагмента наплавки технической документацией не предусмотрено. Как показали микроструктурные исследования, эти короткие, 20-35 мм

длиной, участки наплавленных швов имеют многочисленные дефекты сварки: кратеры в начале и конце швов, подрезы, наплывы, поры, непровар. Шов, который непосредственно явился местом начала усталостного разрушения, имел горячую трещину. Наплавленные участки являются следствием воздействия, так называемой по ГОСТ 30242-97, случайной дуги. И именно многочисленные дефекты, недопустимые по Правилам Российского Речного Регистра [3], привнесённые случайной дугой, явились причиной возникновения и развития усталостных трещин.

## Выводы

Причиной всех расследованных аварий явилось отклонение режимов сварки при изготовлении и наплавке валов от оптимального. Особого внимания требует выбор и соблюдение технологических параметров при сварке и наплавке сталей с ограниченной и плохой свариваемостью, являющихся материалом для изготовления гребных валов, баллеров и других ответственных деталей судовой техники. Необходимость подогревать детали для сварки и выполнять последующий отжиг для снятия внутренних термических и структурных повреждений усложняет и удорожает технологию. Особые сложности организации технологии возникают при ремонте крупногабаритных изделий. Высокие требования предъявляются к квалификации сварщика.

Альтернативой технологии наплавки является напыление защитных и износостойких покрытий на рабочие поверхности деталей различных машин и механизмов, исключая операцию последующего оплавления. Применение усовершенствованных плазмотронов (генераторов термической плазмы) для напыления порошковых материалов, разработанных в ИТПМ СО РАН совместно со СГУВТ, позволяет формировать покрытия с уникальными свойствами, не требующими операции их оплавления [4-8].

## Список литературы

1. Токарев А.О., Мироненко И.Г., Федотова Е.С. Причина и профилактика отказов сварных баллеров винт-рулевых колонок // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4, № 4. – С. 74–83.
2. Токарев А.О., Иванчик И.С., Иванчик С.Н. Анализ условий обеспечения жизненного цикла деталей судовой техники // Речной транспорт (XXI век). – 2011. – № 3. – С. 78–79.
3. Российский Речной Регистр. Правила. В 5 т. Т. 2. – М., 2015. – 437 с.
4. Плазменное напыление порошковых покрытий при газодинамической фокусировке дисперсной фазы / В.И. Кузьмин, Е.В. Картаев, Д.В. Сергачев, Е.Е. Корниенко, А.О. Токарев, Е.Ю. Лапушкина // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 482–488.
5. Токарев А.О., Кузьмин В.И., Малыгина Я.К. Повышение качества металлического порошкового покрытия при плазменном напылении с кольцевой инжекцией порошка // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 370–377.
6. Плазменное напыление покрытия на лопасти гребных винтов речных судов для защиты от кавитационного и гидроабразивного износа / В.И. Кузьмин, А.О. Токарев, С.В. Титов, Е.С. Федотова, С.В. Павлушкин // Речной транспорт (XXI век). – 2017. – № 1. (81). – С. 58–60.
7. Защита от кавитационного и гидроабразивного изнашивания поверхности плазменно-напылёнными покрытиями // А.О. Токарев, В.И. Кузьмин, Е.С. Федотова, Я.К. Малыгина, А.И. Сохранич // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 1–2. – С. 118–125.

8. Equipment and technologies of air-plasma spraying of functional coatings / V. Kuzmin, I. Gulyaev, D. Sergachev, S. Vaschenko, E. Kornienko, A. Tokarev // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129. – P. 01052.

### **ANALYSIS OF WELDING EFFICIENCY-SURFACING WORKS IN REPAIR**

**Tokarev A.O.**, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: aot51@ngs.ru

**Mironenko I.G.**, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: mig60@ngs.ru

**Fedotova E.S.**, Post-graduate Student, e-mail: ekaterina-lin@mail.ru

**Makagon L.D.**, Senior Lecturer

Siberian State University of Water Transport, 33 Schetinkina st., Novosibirsk, 630099, Russian Federation

#### **Abstract**

Analysis of the causes of breakdowns propeller shaft: assembled by welding, the restored coating is subjected to an accidental arc.

It is established that the damage occurred as a result of initiation of cracks with various welding defects: no fusion of the weld with the base metal, craters at the beginning and end of seams, undercuts, ridges, pores, as well as the inconsistency of quality mechanical, thermal processing and others. A contributing factor to the spread of cracks, were: the presence of hardening structures in heat affected zone of the weld, non-metallic inclusions in mostly metal.

Proposed measures on prevention of welding defects.

#### **Keywords**

Fatigue destruction, mikrocrack, weld, heat-affected zone microstructure, welding, welding defects, propeller shaft

УДК 621.791.03

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА  
ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ С ВИДЕО  
РЕГИСТРАЦИЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЛАЗЕРНОГО КОГЕРЕНТНОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ\****Ю.Н. САРАЕВ<sup>1</sup>, доктор техн. наук, доцент**А.Г. ЛУНЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук**М.В. ТРИГУБ<sup>2</sup>, канд. техн. наук**М.В. ПЕРОВСКАЯ<sup>1</sup>, канд. техн. наук**(<sup>1</sup> ИФПМ СО РАН, г. Томск,**<sup>2</sup> ИОА СО РАН, г. Томск)*

**Сараев Ю.Н.** – 634055, г. Томск, пр. Академический, д. 2/4  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
e-mail: litsin@ispms.tsc

В работе приводится методика, применяемая при исследовании быстропротекающих процессов при электродуговой сварке плавящимся электродом. Обсуждаются основные проблемы, связанные с видео-регистрацией и пути решения данных проблем. Показаны эффективные направления совершенствования применяемого исследовательского оборудования за счет увеличения интенсивности лазерного когерентного излучения, разработки и применения специальных программ, облегчающих статистическую обработку получаемых результатов и их визуализацию. Приведены результаты, полученные с использованием усовершенствованного оборудования и программного обеспечения.

**Ключевые слова:** сварка, наплавка, тепломассоперенос, видео съемка, лазерное когерентное излучение, дуга, плавление, перенос.

**Введение**

Анализ причин и характера разрушений многих металлоконструкций, показывает, что их разрушение, часто, происходит в зонах сварных соединений. Это неминуемо приводит к снижению уровня допустимых эксплуатационных нагрузок в экстремальных условиях и низких температурах окружающей среды [1]. Известно, что изготовление металлоконструкций с высокой прочностью сильно затруднено вследствие действия целого ряда специфических факторов: температуры окружающей среды, типов и технических характеристик применяемого для сварки оборудования, качества и технологических свойств сварочных материалов, и ряда других показателей [2]. Отмеченное обстоятельство оказывает существенное влияние на стабильность плавления и переноса электродного металла в сварочную ванну, что требует дополнительных усилий по контролю быстропротекающих процессов формирования неразъемных соединений, и, в первую очередь, за изменением в процессе сварки характеристик тепломассопереноса [3]. Нестабильность характеристик тепломассопереноса в процессе сварки или наплавки, приводит ухудшению формирования металла шва, что отрицательно сказывается на надежности металлоконструкций в целом [4].

\* Работа выполнена в 2017 году за счет средств гранта РФФИ по проекту №16-19-10010.

**Цель работы:** исследование характеристик тепломассопереноса при дуговой сварке плавящимся электродом с применением высокоскоростных методов видео регистрации этапов плавления и переноса электродного металла в сварочную ванну.

### Структура экспериментального исследовательского комплекса

Для регистрации кинетики плавления и переноса электродного металла в сварочную ванну применяют различные методы визуализации, осуществляемые синхронно с регистрацией основных энергетических параметров: тока дуги и напряжения на дуговом промежутке. Для решения сформулированных выше задач был разработан диагностический комплекс, который позволяет производить визуально-оптический контроль сварочного процесса, а также регистрировать электрические и энергетические параметры [5], структурная схема которого представлена на рисунке 1.

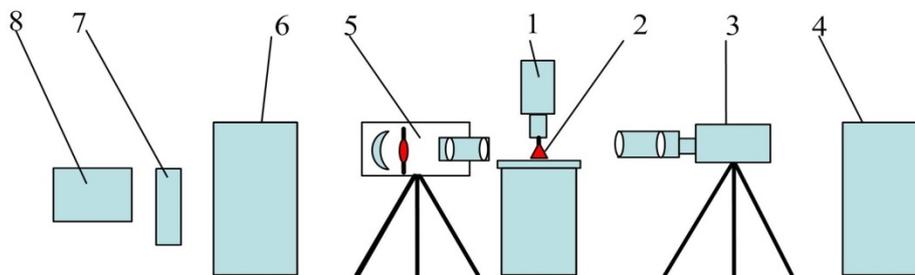


Рис. 1. Исследовательский комплекс:

1 – подвесная сварочная головка; 2 – изучаемый объект тепломассопереноса; 3 – скоростная видеокамера; 4 – сварочный источник питания; 5 – источник когерентного излучения; 6 – блок регулирования процесса; 7 – блок измерения энергетических параметров режима; 8 – персональный компьютер со специальным программным обеспечением (ПО).

### Анализ особенностей регистрации быстропротекающих процессов при электродуговой сварке плавящимся электродом

Опыт применения диагностических систем представленного типа показывает, что регистрация характеристик тепломассопереноса имеет ряд специфических особенностей. В частности, качество видео изображений очень сильно зависит от технических характеристик видео камер. Необходим источник интенсивного излучения, обеспечивающий режим «пересвечивания» дуги и способствующий улучшенной визуализации характеристик тепломассопереноса. Первоначально, в ходе экспериментов, был применен CuBr-лазер [6]. Очевидными преимуществами его являлись высокая импульсная мощность и малая длительность импульса (40 наносекунд), что позволяло осуществлять временную фильтрацию изображения. Высокая частота следования импульсов (до 700 кГц), обеспечивала временное разрешение до единиц микросекунд. Совокупность указанных свойств позволяла полностью избавиться от фоновой засветки, рисунок 2.

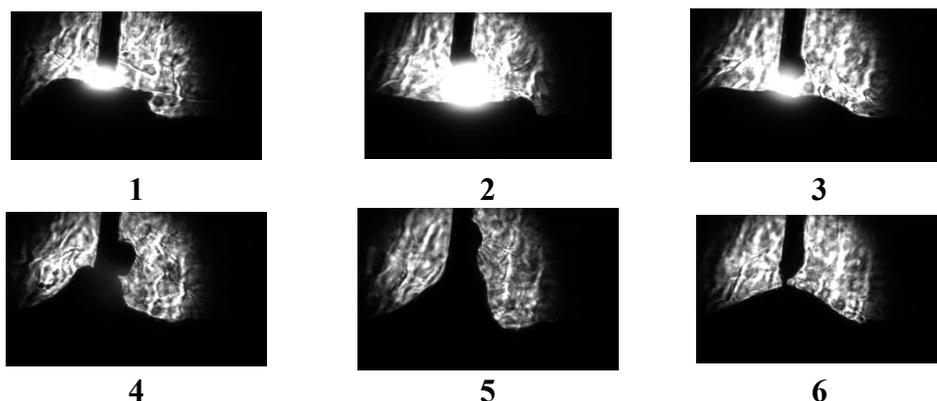


Рис. 2. Видеокадры сварочного микроцикла (период плавления и переноса одной капли электродного металла), последовательность кадров: 1 - 2 - 3(интервал горения дуги), 4 -5 -6 (интервал короткого замыкания).

Анализ представленных на рисунке 2 изображений показывает, что их качество существенно уступает качеству изображений, получаемых ранее, с использованием высокоскоростных кинокамер [7]. По-видимому, это связано с техническими характеристиками применяемой видео камеры и недостаточностью имеющейся подсветки.

#### **Модернизация исследовательского комплекса для решения задач выше сформулированной цели**

Для комплексного исследования процессов плавления и переноса электродного металла в сварочную ванну необходима синхронизация всех блоков и компонентов – лазера, высокоскоростной камеры, осциллографа, сварочного оборудования. С учетом перечисленных особенностей, в составе комплекса, был применен модифицированный *CuBr*-лазер, со следующими параметрами: средняя мощность генерации регулируется в диапазоне от 1 до 3 Вт; частота следования импульсов излучения от 10 до 25 кГц. Лазер выполнен в виде двух блоков – активного элемента (АЭ) и источника питания (ИП). Активный элемент включает в себя газоразрядную трубку с длиной активной зоны 40 см, диаметром 2 см, высоковольтный коммутатор (тиратрон ТГИ1-270/12), схему запуска тиратрона с оптической развязкой, блоки термостабилизации. Конструкция лазера предусматривает различные режимы работы: режим генератора и усилителя. Это достигается использованием съемных резонаторов. Данный активный элемент может быть использован для реализации схемы лазерного монитора для диагностики процессов в ванне расплава с полным подавлением влияния излучения сварочной дуги.

На рисунке 3 приведены видеокадры процесса плавления и переноса электродного металла в сварочную ванну, полученные исследовании с применением модернизированного источника когерентного излучения. Оборудование, сварочные материалы и режимы аналогичны случаю, видеокадры которого приведены на рисунке 2 (сварка проволокой сплошного сечения СВ-08Г2С, диаметр 1,2 мм, источник питания ФЭБ - 315 «Магма», механизм подачи ФЭБ-09, защитная среда - углекислый газ; напряжение на дуге 22,3 В; скорость подачи электродной проволоки 2,3 м/мин; регистрация изображений осуществлялась камерой *Vaumer*, скорость съемки 1500 кадров/сек, экспозиция 5 мкс). Для визуального анализа процессов тепломассопереноса осуществлялась теневая съемка при подсветке лазером и применением одновременной спектральной и временной фильтрацией для детального изучения процессов, протекающих в ванне расплава.

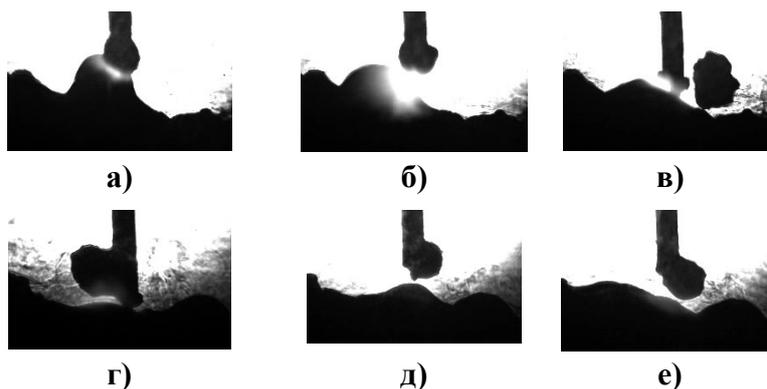


Рис. 3. Видеокадры плавления и переноса электродного металла в сварочную ванну различных интервалов сварочного микроцикла с применением *CuBr*-лазера.

Для полного подавления фонового излучения и получения изображений с минимальной экспозицией была использована фильтрация, которую обеспечивали непосредственно средой разработанного лазера – реализация активной оптической системы (лазерного монитора).

Важной составляющей полученных результатов процесса тепломассопереноса является возможность одновременной синхронной регистрации энергетических параметров сварочной дуги.

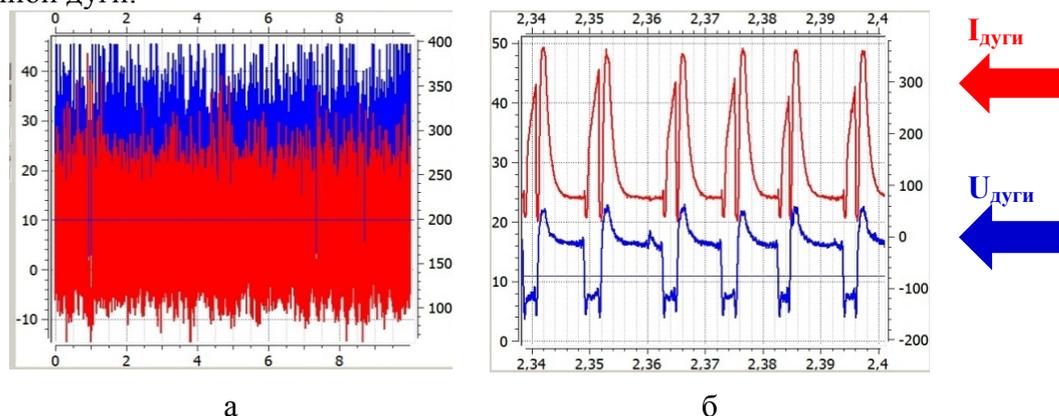


Рис. 4. Осциллограммы тока и напряжения дуги при работе лазера в режиме видеосъемки: а – до обработки, б – после обработки изображений

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что работа лазера создает помехи, воздействующие на регистрирующие энергетические параметры аппаратуру. Данные помехи затрудняют анализ полученных осциллограмм тока и напряжения дуги. Характерные осциллограммы в условиях помехи представлены на рисунке 4а.

Для фильтрации осциллограмм тока и напряжения дуги от помех импульсного лазера, а также их статистической обработки с целью получения энергетических параметров было разработано специальное программное обеспечение (ПО) *WeldStat*, которое позволяет:

- 1) Обеспечить чтение файлов осциллограмм тока и напряжения дуги, записанных цифровыми осциллографами производства Актаком и Owon, выполнять фильтрацию от помех (результат фильтрации на рисунке 4б);
- 2) Осуществлять визуальный просмотр и масштабирование осциллограмм тока и напряжения;
- 3) Осуществлять визуальный просмотр и масштабирование осциллограмм тока и напряжения;

4) Производить статистическую обработку осциллограмм с получением данных о среднем токе, среднем напряжении, средней амплитуде тока короткого замыкания, средней длительности короткого замыкания, коэффициентах вариации тока и длительности короткого замыкания, средней мощности дуги [8].

## Выводы

1. Анализ представленных видео изображений подтвердил эффективность предложенной методики для проведения исследований быстропротекающих процессов, сопровождающих плавление и перенос электродного металла при дуговой сварке в защитных газах плавящимся электродом.

2. Качество изображений контуров переносимых капель повышается в случае увеличения генерации мощности лазерного когерентного излучения при одновременной фильтрации получаемых изображений применением специальных светофильтров.

3. Разработано специальное программное обеспечение (ПО) WeldStat, которое позволяет проводить обработку осциллограмм основных энергетических параметров режима и осуществлять последующую статистическую обработку характеристик тепломассопереноса.

## Список литературы

1. Ehlers S., Østby E. Increased crashworthiness due to arctic conditions –The influence of sub-zero temperature // Marine Structures. – 2012. – Vol. 28. – P. 86–100.

2. Физико-технические проблемы современного материаловедения. В 2 т. Т. 1. / редкол.: И.К. Походня и др.; НАН Украины. – Киев: Академперіодика, 2013. – 583 с. – ISBN 978-966-360-235-6. – ISBN 978-966-360-236-3.

3. Ogino Y., Hirata Y. Numerical simulation of metal transfer in argon gas-shielded GMAW // Welding in the World. – 2015. – Vol. 59, iss. 4. – P. 465–473. – doi: 10.1007/s40194-015-0221-8.

4. Influence of the soft zone on the strength of welded modern HSLA steels / F. Hochhauser, W. Ernst, R. Rauch, R. Vallant, N. Enzinger // Welding in the World. – 2012. – Vol. 56, iss. 5–6. – P. 77–85.

5. Поисковые исследования повышения надежности металлоконструкций ответственного назначения, работающих в условиях экстремальных нагрузок и низких климатических температур / Ю.Н. Сараев, С.В. Гладковский и др. // Научные технологии в проектах РНФ. Сибирь / под ред. С.Г. Псахье и Ю.П. Шаркеева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2017. – Гл. 5. – С. 134–202.

6. Copper bromide vapor brightness amplifiers with 100 kHz pulse repetition frequency / M.V. Trigub, G.S. Evtushenko, S.N. Torgaev, D.V. Shiyarov, T.G. Evtushenko // Optics Communications. – 2016. – Vol. 376. – P. 81–85.

7. Сараев Ю.Н. Обоснование концепции повышения безопасности и живучести технических систем, эксплуатируемых в регионах Сибири и Крайнего Севера, на основе применения адаптивных импульсных технологий сварки // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 8. – С. 14–19.

8. Исследование влияния энергетических параметров режима дуговой сварки покрытыми электродами на стабильность тепломассопереноса / Ю.Н. Сараев, А.Г. Лунев, А.С. Киселев, А.С. Гордынец, Д.А. Нестерук, А.А. Хайдарова, Д.А. Чинахов, В.М. Семенчук // Сварочное производство. – 2018. – № 2. – С. 3–13.

## THE INVESTIGATION TECHNIQUE OF HEAT-AND-MASS TRANSFER DURING ARC WELDING WITH CONSUMABLE ELECTRODE USING LASER LIGHTING FOR VIDEO RECORDING

**Saraev Y.N.**<sup>1</sup>, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: litsin@ispms.tsc

**Lunev A. G.**<sup>1</sup> Ph.D. (Engineering), e-mail: agl@ispms.ru

**Trigub M. V.**<sup>2</sup>, Ph.D. (Engineering), e-mail: trigub@tpu.ru,

**Perovskaya M. V.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), e-mail: mv\_perovskaya@inbox.ru

<sup>1</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

<sup>2</sup> V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (IAO SB RAS), 1 Academician Zuev square, Tomsk, 634055, Russian Federation

### Abstract

In this work, a technique is applied that is used in the study of fast processes in arc welding with a consumable electrode. The main problems of video capturing are discussed. It is offered ways for used equipment improvement. One of the ways is the increase of laser coherent radiation intensity. The second one is the development and application of special software that facilitate noise reduction and statistical processing of recorded data, as well as visualization. New obtained results have shown that the offered ways have allowed improving the quality of video flow and the power characteristics of welding process.

### Keywords

welding, surfacing, heat and mass transfer, video shooting, laser coherent radiation, arc, melting, transfer

УДК 621.993.2

**ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТИ ВНУТРЕННЕЙ РЕЗЬБЫ В ДЕТАЛЯХ  
ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА  
ЕЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

*А.М. МАРКОВ, доктор техн. наук, профессор*  
*П.В. ЛЕБЕДЕВ, канд. техн. наук, научный сотрудник*  
*А.М. САЛМАН, аспирант*  
*(АлтГТУ, г. Барнаул)*

**Лебедев П.В.** – 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 46  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
e-mail: pavel.lebedev@mail.ru

В работе приводится анализ факторов, оказывающих влияние на геометрическую точность внутренней резьбы в деталях из углепластика. Описана взаимосвязь режимных параметров процесса резбонарезания и прочности внутренней резьбы, с учетом физико-механических свойств материала и специфических дефектов, возникающих при обработке углепластиков. Обоснована необходимость применения методов контроля геометрических параметров витков внутренней резьбы и отверстий под нарезание резьбы, отличных от общепринятых. Предложено уточненное условие прочности внутренней резьбы, учитывающие специфические, для обработки углепластика дефекты поверхностного слоя. Рассмотрены способы определения коэффициента, учитывающего распределение нагрузки по виткам резьбы, методом конечных элементов.

**Ключевые слова:** внутренняя резьба, прочность внутренней резьбы, высокопрочные полимерные композиционные материалы, углепластик, нарезание резьбы.

**Введение**

Благодаря своим свойствам углепластики - композиционные материалы на основе полимерного связующего, упрочненного нитями углеродного волокна, широко используются в различных отраслях промышленности, успешно заменяя традиционные конструкционные материалы, такие как сталь, алюминий и т.д. Основным достоинством композитов, обуславливающим их широкое применение, является низкий вес, сочетающийся с физико-механическими свойствами, не уступающими ряду общеприменимых конструкционных материалов.

Широкое применение узлов и отдельных деталей из углепластиковых композитов в составе сложных механизмов (более 50% веса боинг 787 составляют различные композиты [1]) приводит к необходимости наличия в конструкции элементов крепления в виде внутренней резьбы. При всей простоте изготовления внутренней резьбы, особенности физико-механических свойств углепластиков, а именно: высокие абразивные свойства армирующих волокон и связанный с этим интенсивный износ инструмента; низкая термостойкость полимерного наполнителя, который начинает разлагаться при температуре около 400 градусов [2-3]; специфические разрушения связей между волокнами и полимерной матрицей (деламинация слоев в начале резания и на выходе инструмента из заготовки, разломачивание волокон в зоне стружкообразования [8-15]) в процессе механической обработки, осложняют получение требуемых параметров точности резьбы. А поскольку

прочность резьбового соединения в случае сопряжения композита и металла будет определяться прочностью, и следовательно, геометрической точностью изготовления витков внутренней резьбы, задача обеспечения заданных параметров ее геометрической точности на этапе изготовления является достаточно актуальной.

## Теория

Многочисленные исследования, посвященные механической обработке композиционных материалов, носят разрозненный характер и зачастую применимы для узкого круга обрабатываемых материалов. Несмотря на достаточное количество исследований, отсутствуют систематизированные подходы к проектированию, как технологических процессов изготовления деталей из углепластика, так и к проектированию отдельных операций механической обработки.

Операция резбонарезания зачастую не рассматривается, как одна из наиболее важных частей технологического процесса. Хотя, как правило, резбонарезание является одной из финальных стадий технологического процесса, соответственно наличие брака на этапе изготовления резьбы приводит к отбраковке всего изделия в целом. А недостаточная прочность внутренней резьбы, вследствие низкой геометрической точности витков, негативно сказывается на служебном предназначении детали. Существующие методики оценки прочности не учитывают различные дефекты материала, а так же большие (по сравнению с конструкционными сталями) погрешности изготовления витков внутренней резьбы.

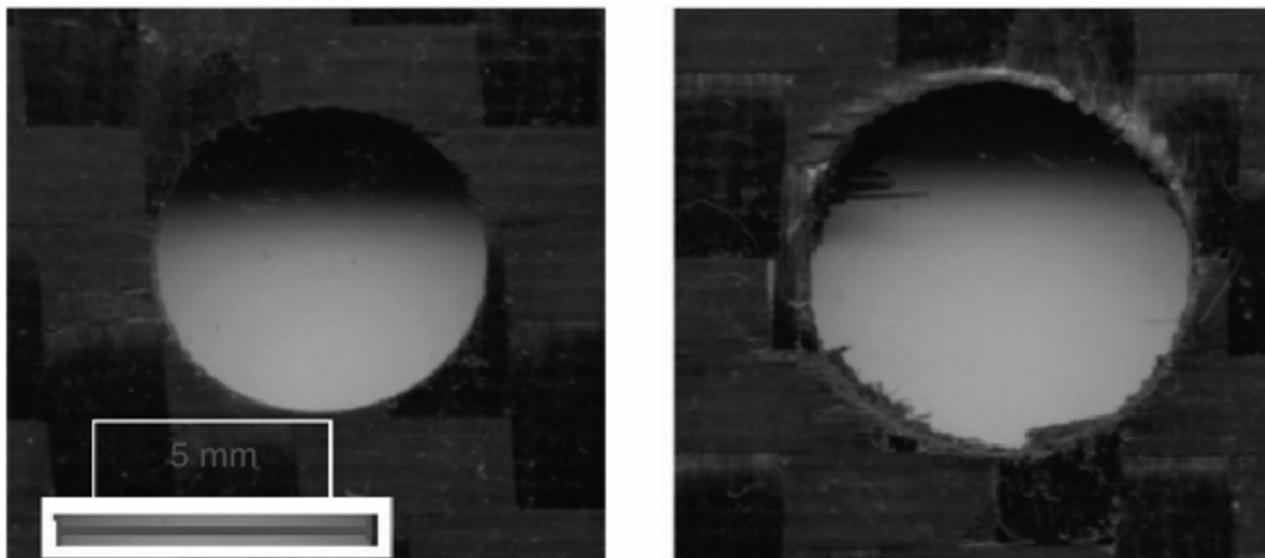


Рис. 1. Профиль отверстия в углепластике при различной величине подачи. [2]

Прочность внутренней резьбы в деталях из углепластика определяется точностью изготовления витков профиля резьбы [12], состоянием полимерного связующего и армирующих волокон в витках и расположением армирующих волокон. При этом внутренний диаметр резьбы и состояние поверхностного слоя определяется на этапе изготовления отверстия под нарезание резьбы. Таким образом, при оценке прочности резьбы необходимо учитывать факторы, влияющие на ее точность не только при резбонарезании,

но и при сверлении отверстия на предыдущей операции процесса ее изготовления. С учетом того, что нагрузка на витках резьбы распределяется неравномерно [5-15] и наиболее нагруженными оказываются первые пять витков резьбы [12-14], при оценке прочности следует учитывать не только величину отклонения от номинального отверстия под нарезание резьбы, но и распределение отклонений по всему отверстию. Методы контроля размера цилиндрических отверстий, применяемые при исследовании механической обработки композиционных материалов (оптические и инструментальные), не позволяют оценить картину распределения отклонений на всем протяжении отверстия. Таким образом, существующие исследования могут не достаточно точно учитывать влияние режимов резания на геометрическую точность. С другой стороны развитие современных технологий, и в частности 3D сканирования позволяет получить данные о профиле отверстия с точностью до 0,05-0,03 мм на всем его протяжении. С учетом этого можно представить уточненное условие прочности резьбы [6] в виде:

$$\sigma_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{F_p}{\pi \cdot d_n \cdot \xi \cdot H \cdot k_m},$$

где  $\xi$  - коэффициент полноты резьбы;  $k_m$  - коэффициент, учитывающий распределение нагрузки по виткам резьбы;  $d_n$  - наружный диаметр резьбы для n-го витка; H - высота внутренней резьбы;  $F_p$  - расчетная сила на витках резьбы.

Для уточнения коэффициента, учитывающего распределение нагрузки по виткам резьбы, возможно выполнить расчет напряженно-деформированного состояния внутренней резьбы методом конечных элементов. При этом данные об отклонениях диаметра витков по всей длине отверстия позволят получить его точное значение.

## Результаты и обсуждение

Полученное условие прочности внутренней резьбы позволяет учитывать специфические дефекты, возникающие при обработке углепластика, и повышает точность расчета резьбовых соединений. В результате дальнейших исследований, связывающих режимные параметры процесса изготовления внутренней резьбы и точность геометрических характеристик ее профиля, на основании полученной зависимости, возможно будет установить взаимосвязь между технологическими параметрами процесса резбонарезания и прочностью внутренней резьбы.

## Выводы

В результате проведенного литературного обзора и анализа результатов исследований ряда авторов установлено, что процесс нарезания резьбы в углепластике сопровождается рядом специфических (для обработки данного класса материалов) дефектами. Особенности формирования параметров точности обработки не позволяет применять существующие условия прочности при проектировании и оценке резьбовых соединений в деталях из углепластика. Авторами работы предложено уточненное условие прочности внутренней резьбы с учетом особенностей физико-механических свойств обрабатываемого материала.

## Список литературы

1. *Wong T.L., Wu S.M., Groy G.M.* An analysis of delamination in drilling of composite materials // Proceedings of the 14th SAMPE Technology Conference. – Atlanta, 1982. – P. 471–483.
2. *Chen W.C.* Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced composite laminations // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1997. – Vol. 37 (8). – P. 1097–1108.
3. *Davim J.P., Reis P.* Study of delamination in drilling carbon fiber-reinforced plastics (CFRP) using design experiments // Composite Structures. – 2003. – Vol. 59. – P. 481–487.
4. *Степанов А.А.* Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. – Л.: Машиностроение, 1987. – 176 с.
5. *Балакишин Б.С.* Основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1969. – 559 с.
6. *Бургер И.А., Шор Б.Ф., Иосилевич Г.Б.* Расчет на прочность деталей машин: справочник.
7. *Prasanna J., Karunamoorthy L., Venkat M.* Optimization of process parameters of small hole dry drilling in Ti-6Al-4V using Taguchi and grey relational analysis // Measurement. – 2014. – Vol. 48. – P. 346–354.
8. Drilling machinability evaluation on new developed high-strength T800S/250F CFRP laminates / *J. Xu, Q. An, X. Cai, M. Chen* // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2013. – Vol. 14 (10). – P. 1687–1696.
9. *Senthilkumar M., Prabukarthi A., Krishnaraj V.* Study on tool wear and chip formation during drilling carbon fiber reinforced polymer (CFRP)/Titanium Alloy (Ti6Al4 V) Stacks // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 64. – P. 582–592.
10. *Santiuste C., Olmedo A., Soldani X.* Delamination prediction in orthogonal machining of carbon long fiber-reinforced polymer composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2012. – Vol. 31. – P. 875–885.
11. *Durão L.M.P., De Moura M.F.S.F., Marques A.T.* Numerical prediction of delamination onset in carbon/epoxy composites drilling // Engineering Fracture Mechanics. – 2008. – Vol. 75. – P. 2767–2778.
12. *Марков А.М., Лебедев П.В., Маркин В.Б.* Обеспечение качества изготовления внутренней резьбы в деталях из композиционных материалов // Ползуновский вестник. – 2012. – № 1-1. – С. 200–203.
13. *Марков А.М., Лебедев П.В.* Определение величины крутящего момента при нарезании резьбы в деталях из высокопрочных композиционных полимерных материалах // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 1. – С. 8–11.
14. *Марков А.М., Лебедев П.В.* Зависимость силовых характеристик процесса нарезания внутренней резьбы в деталях из высокопрочных полимерных композиционных материалов // Технология машиностроения. – 2014. – № 12. – С. 22–25.
15. *Karnika S.R., Gaitonde V.N., Campos J.* Rubiolic delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model // Materials & Design. – 2008. – Vol. 29. – P. 1768–1776.

**DEPENDENCE STRENGTH OF INTERNAL THREAD IN CARBON FIBERED PLASTICS  
FROM TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE PROCESS ITS MANUFACTURE**

**Markov A. M.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: andmarkov@inbox.ru

**Lebedev P.V.**, Ph.D. (Engineering), Scientific associate, e-mail: pavel.lebedev@mail.ru

**Salman A. M.**, Ph.D. student, e-mail: azharmansoor76@gmail.com

I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038,  
Russian Federation

**Abstract**

The article analyses factors influencing on internal thread's geometric accuracy in carbon fiber details. The article describes the dependence of operating condition of thread cutting process and internal thread strength in view of physical and mechanical properties of material and specific defects, arising during carbon fiber processing. The necessity of using control methods of geometric parameters of turns of internal thread and holes for thread cutting, other than the conventional is stated. The authors offered a refined condition for the internal thread strength, taking into account the specific defects of the surface layer for carbon fiber processing. The methods for coefficient determination, considering load distribution on thread turns by means of finite element method are examined.

**Keywords**

Internal thread, internal thread strength, high-strength polymer composite materials, carbon fiber, thread cutting.

УДК 621.923.9; 621.865.8

**ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ  
В СВОБОДНОМ АБРАЗИВЕ ДЛЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ЦИЛИНДРОВ**

*А.С. БАБАЕВ, канд. техн. наук, доцент  
Н.В. ЛАПТЕВ, магистрант  
Е.В. СТОЛОВ, аспирант  
А.Р. СЕМЁНОВ, магистрант  
(ТПУ, г. Томск)*

**Бабаев А.С.** – 634030, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
e-mail: babaevartyom@tpu.ru

В статье рассмотрена технология финишной центробежной обработки цилиндрических деталей с применением промышленного робота фирмы «КУКА» в среде свободного абразива. Проанализированы данные по изменению линейных размеров и шероховатости, полученные при обработке алюминиевых цилиндров на различных режимах.

**Ключевые слова:** промышленный робот, финишная обработка, свободный абразив, конусность, шероховатость.

**Введение**

В настоящее время одной из главных сложностей для машиностроительного производства остаётся автоматизация и минимизация времени и затрат на трудоемкие и низкопроизводительные финишные операции. Такие операции выполняются с целью скругления острых кромок, удаления заусенцев после механической обработки, снижения шероховатости или фактурирования поверхности. В свою очередь финишные операции подразделяются на обработку жесткозакрепленным абразивом (круг, бумага, лента и т.п.) и в среде свободного абразива. В статье рассмотрен второй вариант обработки и его совмещение с промышленным роботом.

Существуют несколько методов обработки свободным абразивом, таких как галтовка (обработка деталей в «навал») [1], объемная вибрационная обработка [2], центробежно-ротационная обработка [3], турбоабразивная обработка [4], обработка деталей уплотненным абразивом [5] и др. В нашем случае были проведены эксперименты по центробежной кинематике, для обеспечения эффективности и автоматизации которой в оборудование был применён промышленный робот.

**Методика и материалы экспериментального исследования**

В качестве абразива для данного эксперимента был использована смесь электрокорунда белого марки 25А и нормального марки 16А, фракция F16 в соотношении 1:1 по массе (рис.1).

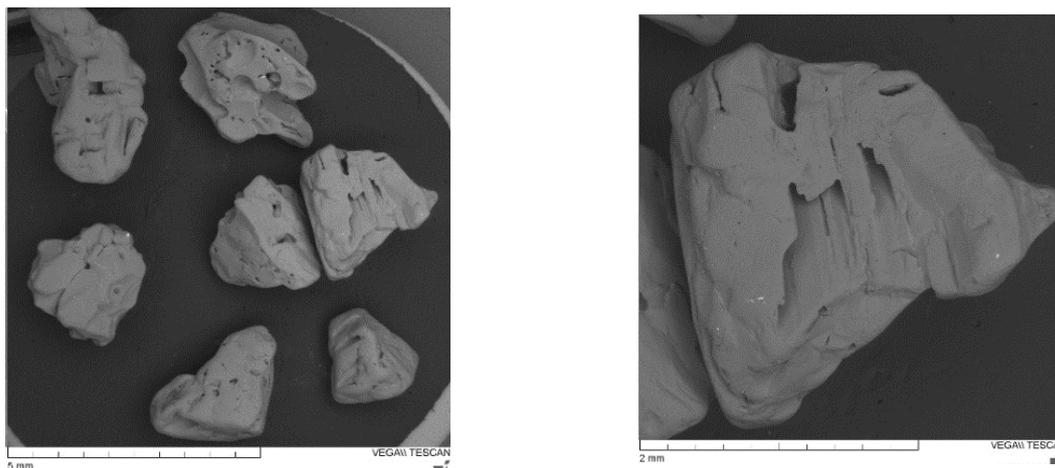


Рис. 1. Зёрна абразивного материала – электрокорунд

В качестве образцов использовались цилиндры из алюминия марки Д16Т твердостью 130-150НВ и исходной шероховатостью  $Ra=0,4...0,5$  мкм. Габаритные размеры: диаметр  $35^{+0,02}$  мм, длина  $100\pm 0,1$  мм. Выбранная пара «электрокорунд/Д16Т» была взята произвольно и использовалась для сокращения времени экспериментальных работ, а также сбора данных по величине интенсивности износа и отслеживания изменения размеров/шероховатости.

Работа выполнялась в Научно-образовательной лаборатории промышленной робототехники. В эксперименте использовался робот марки «КУКА» (Германия) модели KR 120 R2700 (рис. 3). Робот оснащён высокоскоростным фрезерным шпинделем, что позволило обеспечивать точное позиционирование образца в абразиве и придание ему вращения вокруг собственной оси. Технические характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики

Максимальная полезная нагрузка, кг	Число осей	Повторяемость линейных перемещений, мм	Тип защиты	Максимальное число оборотов шпинделя, об/мин
120	6	$\pm 0,06$	IP 65	24000

Для задания кинетической энергии абразивной среде она была помещена в цилиндрический контейнер 650x300 мм, который устанавливался на повторный стол и непрерывно вращался вокруг общей оси «стол-контейнер» с постоянной скоростью.

Работа была разделена на два эксперимента. Обработка образцов осуществлялась параллельно и под углом к вертикальной оси OZ барабана в трех положениях удаления от оси до стенок и на различной частоте вращения (рис. 2).

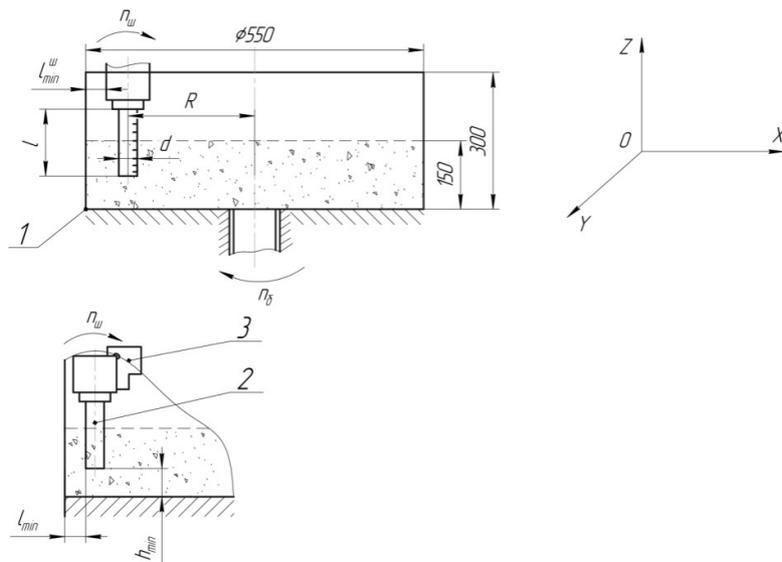


Рис. 2. Принципиальная схема обработки

Варьируемые параметры эксперимента приведены в таблице 2.

Таблица 2

Варьируемые параметры эксперимента			
№ эксперимента	R, мм	$\alpha, \text{°}$	n, об/мин
1	100	0	3000
	135		
	170		
2	100	20	3000-4000
	135		
	170		

Обработка осуществлялась следующим образом: барабан (1) (рис. 2), засыпанный абразивом на высоту 210 мм приводится во вращательное движение частотой 18 об/мин с помощью электропривода. Затем деталь (2), закрепленная в шпинделе робота посредством трехкулачкового патрона (3), также приводится во вращательное движение и опускалась в барабан с абразивом. Для отслеживания изменений размеров и шероховатости были выбраны отрезки времени обработки в 1; 2; 4; 7; 11 минут, после которых осуществлялся контроль параметров согласно схеме (рис. 3). Диаметральные размеры контролировали при помощи рычажной скобы с ценой деления 1 мкм, а шероховатость поверхности – с использованием профилометр SJ-210 Mitutoyo (Япония).

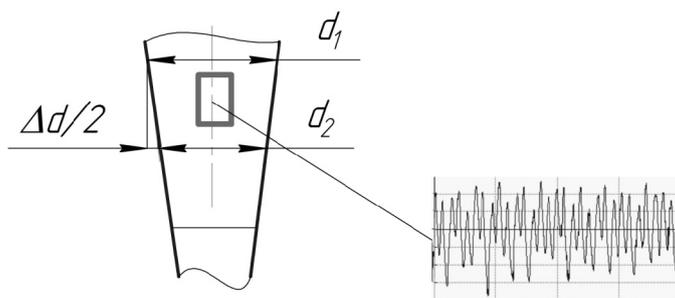


Рис. 3. Схема контроля изменения диаметра и шероховатости поверхности

## Результаты и обсуждение

В результате проделанной работы по первому эксперименту, были построены графики зависимости изменения диаметра детали от длины погружения в абразив и зависимости конусности от времени обработки. Из графиков можно увидеть, что изменение диаметра детали по длине неравномерно и возрастает по мере длины погружения ее в абразивную среду (рис. 4, а), о чем свидетельствует один из характерных графиков конусности детали после обработки (рис. 5). Это объясняется тем, что давление абразива, действующее на поверхность детали, распределяется неравномерно относительно глубины погружения. И, как следствие, на поверхности насыпи можно наблюдать малые изменения диаметра после обработки, когда при таких же условиях на максимальной глубине погружения наблюдается значительный сьем материала. Результаты второго эксперимента, где обработка осуществлялась при угле наклона  $\alpha=20^\circ$  (рис 4, б), дали численно близкие результаты как по конусности, так и по изменению диаметра образцов.

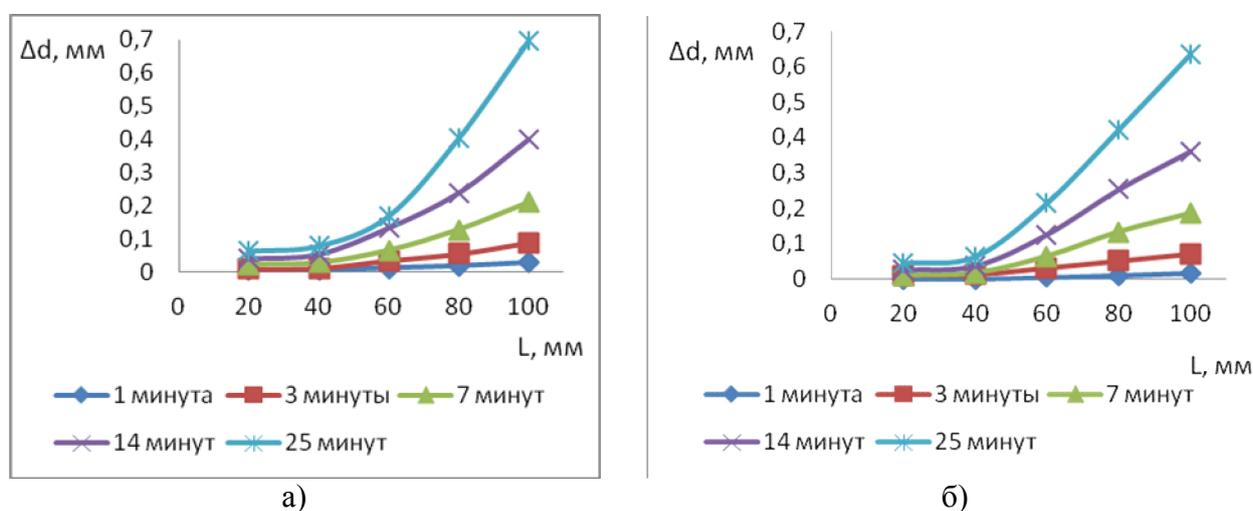


Рис. 4. Изменения диаметра образцов:

а) угол наклона относительно OZ  $\alpha=0^\circ$ ; б) угол наклона относительно OZ  $\alpha=20^\circ$

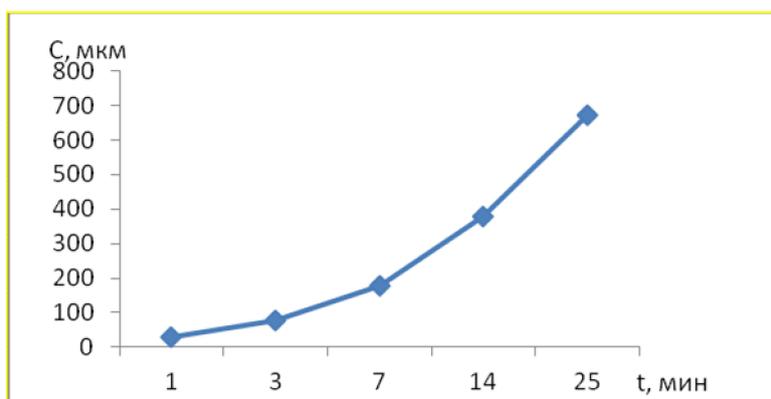


Рис. 5. График изменения конусности от времени обработки

Измерения шероховатости поверхности при обработке показали, что при отдалении от торца вала к поверхности абразивной среды высота неровностей  $R_a$  уменьшается, но по отношению к исходной шероховатости увеличивается в 2-2,5 раза. Это можно объяснить

тем, что на глубине барабана (высоте насыпки абразивной смеси) при большем давлении и большой скорости вращения детали имеет место значительная ударная нагрузка и резание, что приводит к периодическому перенаклепу поверхности, то есть поверхностный слой подвергается значительным пластическим деформациям и начинает разрушаться. Что касается увеличения высоты неровностей по отношению к исходной, то здесь, сказывается размер абразивного зерна.

## Выводы

Технология обработки в среде свободного абразивного зерна на высоких скоростях и по предложенной авторами схеме мало изучена, но в условиях современного машиностроительного производства может обеспечить автоматизацию и увеличить производительность процесса обработки изделий на финишных операциях. Особое внимание необходимо уделять корректному выбору технологической среды для обработки изделий, а также режимов. Данная технология финишной обработки имеет возможности высокой гибкости и при необходимости может выполнять различные производственные задачи, такие как слесарные операции (удаление заусенцев, зачистка и снятие дефектного слоя), размерная обработка с контролируемым съёмом, доводка, получение нужных параметров качества поверхностного слоя и др. Это поможет значительно снизить производственные площади обрабатывающих цехов, штат сотрудников, затраты на оборудование и операции. Авторы считают, что перспективность и дальнейшее развитие данной роботизированной технологии заключается в последовательном решении спектра задач: 1) изучение процесса обработки с применением различных режимов и пар «обрабатываемый/абразивный материалы», подбор зернистости и обеспечение влажной обработки; 2) введение в роботизированную финишную обработку различных траекторий движения заготовки для обеспечения равномерности съёма материала и формирования требуемой шероховатости; 3) создание математических моделей динамического воздействия абразивной среды на поверхность детали для возможности прогнозирования и управления процессом обработки.

## Список литературы

1. Кулаков Ю.М., Хрульков В.А. Отделочно-зачистная обработка деталей. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.
2. Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей машин.– М.: Машиностроение, 1974. – 134 с.
3. Трилисский В.Д. Технология и оборудование для объемной центробежно-ротационной обработки деталей. – М.: НИИМАШ, 1983. – 53 с.
4. Кремень З.И., Масарский М.Л. Турбоабразивная обработка деталей – новый способ финишной обработки // Вестник машиностроения. – 1977. – № 28. – 163 с.
5. Зверовщиков А.В. Совершенствование технологии шпиндельной обработки деталей при уплотнении шлифовального материала внешним давлением: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.08 / Пензенский государственный университет. – Пенза, 2004. – 270 с.

**APPLICATION OF ROBOTIZED FINISH TREATMENT IN A FREE ABRASIVE  
FOR ALUMINUM CYLINDERS**

**Babaev A.S.**, Ph.D (Engineering), Assistant professor, e-mail: babaevartyom@tpu.ru

**Laptev N.V.**, Graduate students, e-mail: nikitalaptev77@gmail.com

**Stolov E.V.**, Post-graduate Student, e-mail: evs39@tpu.ru

**Semyonov A.R.**, Graduate students, e-mail: asemenov2102@gmail.com

National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

**Abstract**

In the article the technology of finishing centrifugal processing of cylindrical parts with application of industrial robot of firm "KUKA" in the environment of free abrasive is considered. The data on changes in linear dimensions and roughness, obtained during the processing of aluminum cylinders in different modes, are analyzed.

**Keywords**

Industrial robot, finishing, free abrasive, taper, roughness

УДК 621.9.047

**ПОТЕНЦИОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО РАСТВОРЕНИЯ МАГНИТОМЯГКОГО НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА 5БДСР В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ НИТРАТА И СУЛЬФАТА НАТРИЯ**

*Н.П. ГААР, канд. техн. наук  
К.Х. РАХИМЯНОВ, канд. техн. наук, доцент  
М.В. ИВАНОВА, аспирант  
П.Е. МУРАТКОЗИЕВ, магистрант  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

**Мураткозиев П.Е.** - 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: kolinkertis@gmail.com

Проведены потенциодинамические исследования электрохимического растворения магнитомягкого нанокристаллического сплава 5БДСР в 10% водных растворах нейтральных солей  $\text{NaNO}_3$  и  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  в диапазоне потенциалов от 0 до 12 В. Установлено, что растворение материала в водном растворе нитрата натрия происходит при потенциале 1,5 В, а в водном растворе сульфата натрия при потенциале – 2 В. Области активного растворения являются диапазон потенциалов свыше 1,5 В до 4,5 В для нитрата натрия и свыше 2 В до 6,5 В для сульфата натрия. Оставшиеся области потенциалов относятся к областям пассивного растворения для обоих электролитов.

**Ключевые слова:** электрохимическое растворение, поляризационные исследования, магнитомягкий нанокристаллический сплав, пассивация, электролиты.

**Введение**

Магнитомягкий нанокристаллический сплав 5БДСР, выпускаемый Ашинским металлургическим заводом (г. Аша) является, благодаря своим магнитным свойствам, одним из перспективных материалов для создания магнитопроводов. Особенности изготовления данного материала определяет форму его выпуска – ленты шириной около 10 мм и толщиной в 25 мкм. Таким образом, для создания изделия из данного материала потребуется его формообразование.

Традиционно для изготовления и обработки деталей применяют различные методы механического резания – точение, сверление, фрезерование и т.д. Однако, металлы, характеризующиеся высокой твердостью, вязкостью, пластичностью или хрупкостью трудно поддаются обработке механическим резанием или не поддаются вовсе. К данным материалам относится исследуемый нанокристаллический сплав 5БДСР, который обладает высокой хрупкостью. Одним из перспективных методов формообразования деталей из такого материала является электрохимическая обработка (ЭХО) [1]. Данный метод обработки сам по себе и в комбинации с другими физическими процессами доказал свою эффективность в различных схемах формообразования [2-6]. Метод основан на анодном растворении обрабатываемого материала в условиях высокой локализации процесса в токопроводящей среде, и характеризуется минимальными изменениями в поверхностном слое обрабатываемого материала [7].

## Методика проведения экспериментов

Определение возможности электрохимического растворения материала при ЭХО основывается на снятии поляризационных кривых при помощи потенциодинамического метода. Сущность данного метода заключается в развертке потенциала с регистрацией при этом значения тока на аноде (исследуемом образце). Анализ графика зависимости плотности тока ( $j$ ) от потенциала ( $\phi$ ) позволяет определить области активного растворения материала, характеризующиеся ростом плотности тока с увеличением потенциала, и области пассивации, где увеличение потенциала не приводит к росту плотности тока или сопровождается его снижением.

Для проведения потенциодинамических исследований используется потенциостат, который служит для задания развертки потенциала и регистрации значения тока, и трехэлектродная электрохимическая ячейка. В данной работе был использован потенциостат модели Elins P-20X, нестандартная трехэлектродная ячейка с платиновым электродом сравнения, описание конструкции которой подробно представлено в работе [8]. Развертка потенциала осуществлялась в диапазоне от 0 до 12 В со скоростью 100 мВ/с, зазор между платиновым электродом сравнения и образцом составил 0,1 мм.

К образцу исследуемого материала предъявляются следующие требования: контактная площадь образца должна быть постоянной в процессе исследования. Образец исследуемого материала устанавливается в оправку и заливается диэлектриком - эпоксидной смолой марки ЭДП-2. Перед каждым опытом с рабочей поверхности образца удалялись оксидная пленка с помощью наждачной бумаги с последующим ее обезжириванием. Каждый опыт повторялся 5 раз.

В качестве электролита были выбраны 10% водные растворы  $\text{NaNO}_3$  и  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Выбор электролитов производился на основании их распространенности при ЭХО других материалов на основе железа, а также их дешевизны, экологической безопасности и безопасности для человека [9, 10].

## Результаты и обсуждение экспериментов

Поляризационная кривая, полученная при помощи потенциодинамического метода для магнитомягкого нанокристаллического сплава 5БДСР в водном растворе  $\text{NaNO}_3$ , представлена на рисунке 1.

Анализ представленной поляризационной кривой указывает на тот факт, что на ней можно выделить на три характерных участка. Первый участок находится в диапазоне потенциала от 0 до 1,5 В, характеризуемый нулевым значением плотности тока, что свидетельствует об отсутствии процесса электрохимического растворения. Второй участок в диапазоне потенциалов от 1,5 В до 4,5 В характеризуется ростом плотности тока с увеличением потенциала (от 0 до  $10,5 \text{ А/см}^2$ ). Данный участок является участком активного растворения материала. Третий участок поляризационной кривой, находится в диапазоне потенциалов от 4,5 В до 12 В (с  $10,5 \text{ А/см}^2$  до  $2 \text{ А/см}^2$ ) и характеризуется снижением плотности тока с ростом потенциала, является участком пассивации. Причиной пассивации может быть возникновение на поверхности образца пленок различной природы.

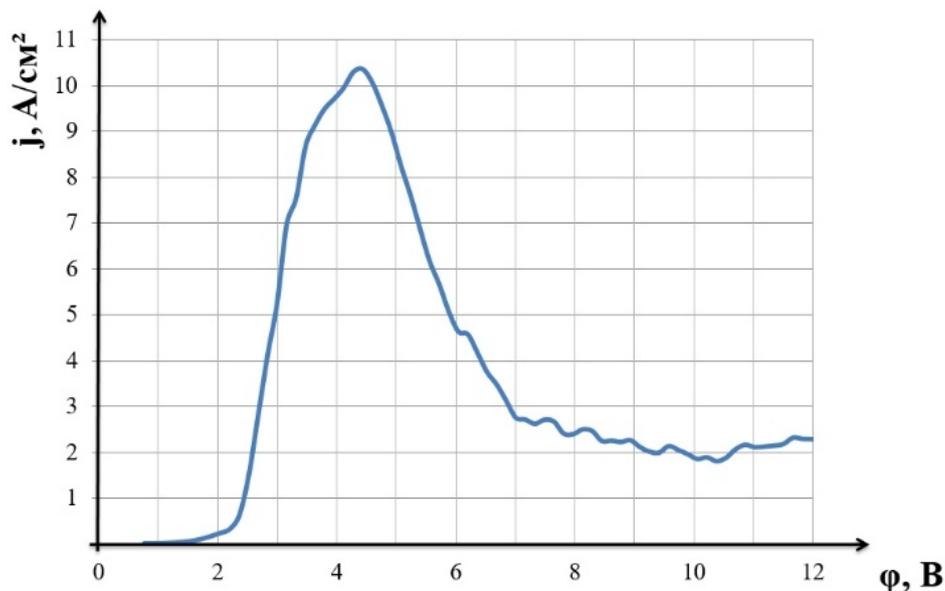


Рис.1. Потенциодинамическая поляризационная кривая анодного растворения сплава 5БДСР в 10% водном растворе нитрата натрия

Несколько по иному выглядит поляризационная кривая, полученная для исследуемого материала в 10% водном растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (Рис. 2).

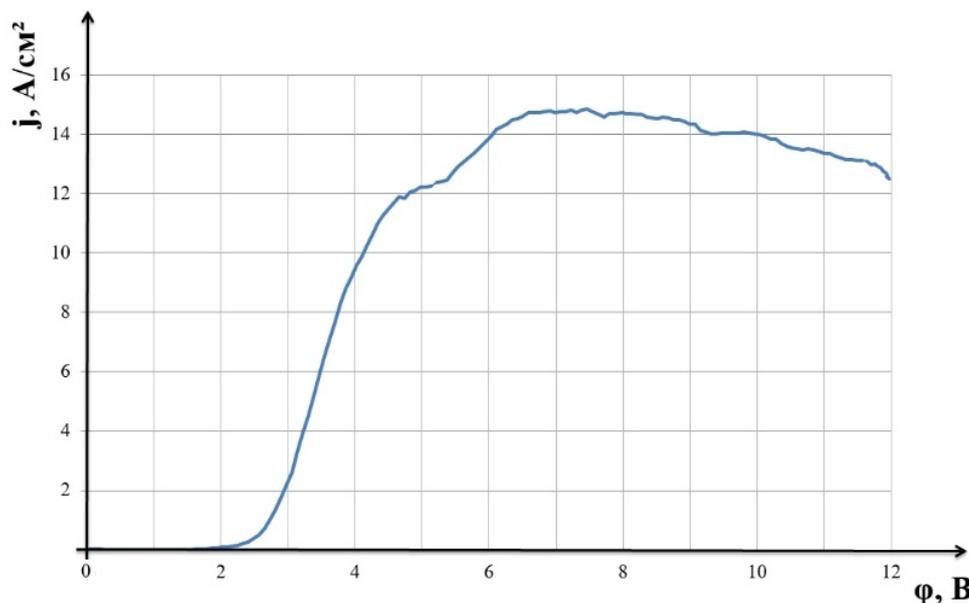


Рис.2. Потенциодинамическая поляризационная кривая анодного растворения сплава 5БДСР в 10% водном растворе сульфата натрия

Как и в случае поляризационных исследований в водном растворе нитрата натрия, поляризационную кривую для 10% водного раствора сульфата натрия можно разделить на три характерных участка. Первый участок располагается в диапазоне потенциалов от 0 до 2 В – участок, на котором электрохимического растворения материала не происходит. Второй участок, участок активного растворения, соответствует диапазону потенциалов от 2 В до 6,5 В и характеризуется ростом значения плотности тока (от 0 до 15  $\text{A}/\text{cm}^2$ ) с ростом потенциала. Третий участок находится в диапазоне потенциалов от 6,5 В до 12 В и характеризуется

падением значения плотности тока (от 15 А/см<sup>2</sup> до 12,5 А/см<sup>2</sup>) с ростом потенциала, что свидетельствует о пассивном растворении материала.

### Выводы

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что электрохимическое растворение магнитомягкого нанокристаллического сплава 5БДСР в 10% водных растворах NaNO<sub>3</sub> и Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> происходит как в стадии активного, так и пассивного растворения, о чем свидетельствуют кривые зависимости плотности тока от потенциала. Дальнейшие исследования должны быть направлены на выявление природы пассивации поверхности материала и поиска путей ее устранения.

### Список литературы

1. Рахимьянов Х.М. Современные электрофизические технологии в машиностроении // Инновации в машиностроении (ИнМаш-2017): сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции, 28–30 сентября 2017 г. – Новосибирск, 2017. – С. 266–276.
2. Рахимьянов Х.М., Василевская С.И. Технологические возможности электрохимической обработки отверстий неподвижным катодом-инструментом // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 2 (71). – С. 12–20.
3. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Василевская С.И. Степень локализации процесса при интенсификации анодного растворения меди // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015. – № 3 (68). – С. 58–65.
4. Рахимьянов Х.М., Леонтьев И.А., Василевская С.И. Технологические перспективы комбинирования электроэрозионных и электрохимических процессов в обработке отверстий малого диаметра // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – № 10 (64). – С. 7–13.
5. Rakhimyanov K.M., Gaar N.P., Loktionov A.A. Role of laser radiation in activating anodic dissolution under electrochemical machining of metals and alloys // MATEC Web of Conferences: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017). – 2017. – Vol. 129. – Art. 01070. – P. 1–4. – doi: 10.1051/mateconf/201712901070.
6. Rakhimyanov K.M., Gaar N.P. Possible ways for intensification of dimensional electrochemical machining (DECM) // Proceedings of the 3rd International Forum on Strategic Technologies IFOST, Novosibirsk–Tomsk, Russia, June 23–29, 2008. – Novosibirsk, 2008. – P. 106–107.
7. Вишиницкий А.Л., Ясногородский И.З., Григорьчук И.П. Электрохимическая и электромеханическая обработка металлов. – Л.: Машиностроение, 1971. – Вып. 3. – 211 с.
8. Рахимьянов Х.М., Гаар Н.П. Электрохимическая ячейка для исследования интенсификации ЭХРО лазерным излучением // Современные пути развития машиностроения и автотранспорта Кузбасса: труды I Всероссийской научно-технической конференции. – Кемерово, 2007. – С. 251–254.
9. Байсутов И.А. Электрохимическая обработка металлов: учебник для СПТУ. – М.: Высшая школа, 1988. – 184 с.
10. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Василевская С.И. Исследование электролитов, обеспечивающих точность электрохимической обработки меди М1 // Инновации в машиностроении – основа технологического развития России: материалы VI международной научно-технической конференции, Барнаул, 23–26 сентября 2014 г. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 100–104.

**POTENTIODYNAMIC RESEARCHES ELECTROCHEMICAL DISSOLUTION  
OF THE SOFT MAGNETIC NANOCRYSTALLINE ALLOY 5BDPR IN WATER  
SOLUTIONS OF SALTS SODIUM NITRITE AND SULFATE**

**Gaar N. P.**, Ph.D. (Engineering), e-mail: gaar@corp.nstu.ru

**Rakhimyanov K. Kh.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: backtof79@mail.ru

**Ivanova M. V.**, Ph.D. student, e-mail: m.ivanova.2010@stud.nstu.ru

**Muratkoziyev P. E.**, Graduate students, e-mail: kolinkertis@gmail.com

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

**Abstract**

Potentiodynamic researches of electrochemical dissolution was conducted of the soft magnetic nanocrystalline alloy 5BDSR in water solutions of neutral salts 10%  $\text{NaNO}_3$  and  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  in the range of potentials from 0 to 12 V. It was established that dissolution of the alloy happened at of potential 1,5 V and 2 V in water solutions of neutral salts sodium nitrite and sodium sulfate. Dissolution of area at of salts sodium nitrite and of sodium sulfate was happened in an active state at the range of potentials from above 1,5 to 4,5 V and 2 to 6,5 V. In both electrolytes of potentials the remained areas were belonging under of passive dissolution.

**Keywords**

electrochemical dissolution, polarization studies, soft magnetic nanocrystalline alloy, passivation, electrolytes

УДК 621.9.06:678.5

**ВЛИЯНИЕ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ПРОЦЕСС  
СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ КОМПОЗИЦИОННОГО  
МАТЕРИАЛА**

*С.В. ГАЙСТ, аспирант, ассистент  
А.М. МАРКОВ, доктор техн. наук, профессор  
А.М. САЛМАН, аспирант  
(АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Барнаул)*

**Гайст С.В.** – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
e-mail: sergei\_gaist@mail.ru

В статье рассматривается вопрос влияния износа режущих лезвий инструмента на процесс стружкообразования композиционного материала, в частности стеклопластика, полученного косослойной продольной поперечной намоткой. Показано, что при фрезеровании композиционного материала на различных стадиях износа режущего инструмента (начальный износ, нормальный износ, износ, близкий к критическому) одновременно образуется стружка всех трех типов (сливная, элементная, пылевидная) с превалированием одного из них. На основе экспериментальных исследований получены графические и аналитические зависимости для расчета значения износа, величины силы резания, превалирующего типа стружки. Представленные результаты могут найти применение при автоматизированном проектировании операций механической обработки композиционных материалов в условиях группового производства.

**Ключевые слова:** стеклопластик, режущий инструмент, фрезерование, стружкообразование, износ, тип стружки, проектирование операции механической обработки.

**Введение**

Композиционные материалы нашли широкое распространение во всех сферах машиностроения. Технологический процесс изготовления таких деталей может включать механическую обработку, в частности фрезерование [1, 2, 3], которое обеспечивает удаление литников, заусенцев, остающихся на заготовке после операций формообразования. Механическая обработка композиционных материалов имеет ряд особенностей (анизотропия, низкая теплопроводность, абразивное воздействие на режущий инструмент, высокие упругие характеристики обрабатываемого материала и т.д.) [4,5,6], которые требуют дальнейшего изучения: требует исследования процесс образования стружки при фрезеровании. Целью работы является установление взаимосвязи между износом режущего инструмента и типом стружки.

Полученные результаты могут быть использованы в системах автоматизированного проектирования групповых операций механической обработки [7] композиционных материалов для прогнозирования выходных параметров [8, 9].

## Теория

Известно, что стружкообразование, являясь составной частью процесса резания, определяет его основные характеристики, такие как сила резания, количество выделяемой теплоты, точность и качество обработанной поверхности. Сравнивая процесс стружкообразования при резании металлов с процессом стружкообразования композиционного материала, можно отметить, что во многом он несет в себе признаки образования элементной стружки и одновременно стружки надлома. Однако по мере увеличения ширины площадки износа по задней поверхности инструмента связь между отдельными элементами стружки становится менее прочной. При достижении определенной степени износа инструмента стружка начинает распадаться на мелкие элементы разной величины.

Вопросы стружкообразования при механической обработке композиционных материалов рассматривались в работах Королева А.А., Руднева А.В., Степанова А.А., Штучного Б.П., Ярославцева В.М. и др. Анализ работ показывает, что процесс резания композиционного может быть представлен следующими основными стадиями деформирования и разрушения (рисунок 1).

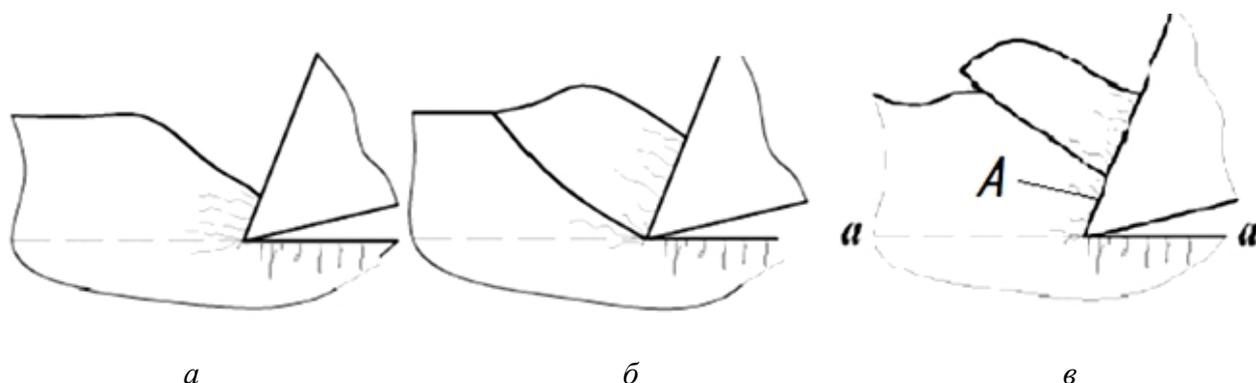


Рис. 1. Процесс образования стружки при резании композиционного материала: а, б, в – последовательные стадии стружкообразования [1, 10]

Начальная стадия – сжатие материала, приводящее к смятию контактных слоев и образованию микротрещин, вызывающих местное разупрочнение связующего (рисунок 1. а). Но во втором этапе (образование зоны сдвига) происходит хрупкое разрушение матрицы (рисунок 1. б), и смещение вдоль плоскости скалывания образовавшегося элемента стружки. На заключительном этапе в области А (рисунок 1. в) осуществляется смятие материала и образование следующего элемента стружки. Далее процесс повторяется.

Особенностью процесса стружкообразования при обработке стеклопластика является систематическое образование на обработанной поверхности микротрещин типа надрезов, которые направлены примерно перпендикулярно линии среза а-а (рисунок 1 в), образуя, так называемый, дефектный слой. Это связано с высокими упругими деформациями обрабатываемого материала в зоне стружкообразования. В области контакта задней поверхности инструмента с обрабатываемой заготовкой возникают высокие контактные давления и температура, которые сопровождаются большими касательными напряжениями в направлении движения резания и, как следствие, разрушение поверхностного слоя материала, испытывающего растягивающие напряжения. Значительную роль в процессе стружкообразования композиционного материала играет износ инструмента: увеличение площадки износа приводит к возрастанию контактных напряжений, приводящих к

разрушению связей между элементами стружки. По мере увеличения износа стружка изменяется от сливной к пылевидной.

Процесс стружкообразования при фрезеровании стеклопластика с расположением волокон с косой продольно-поперечной намоткой остается недостаточно изученным, что затрудняет изучение формирования поверхностного слоя обработанной поверхности, от состояния которого зависят качество изделия и его эксплуатационные характеристики в целом.

### Методика экспериментальных исследований

В качестве экспериментальных образцов взята заготовка из стеклопластика косослойной продольно поперечной намотки (КППН) -Д СТП 001-98. Матрица представляет собой эпоксидную смолу типа сложный виниловый эфир бисфенол А (SWANCOR 901). Наполнитель - высокопрочное стекло марки ВМП (хим. состав: 55–60 %  $\text{SiO}_2$ , 24–27 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 11–16 %  $\text{MgO}$ ). Экспериментальные исследования проводились согласно методике факторного эксперимента. В процессе экспериментов контролировали износ режущего инструмента ( $h$ , мкм) [5] и силу резания ( $P$ , Н) [11].

Исследования проводились на фрезерном станке модели Challenger RH-20. В качестве режущего инструмента выбрана 3-х зубая цельная концевая фреза диаметром 10 мм (твердый сплав ВК8), имеющая следующие геометрические параметры: передний угол  $\gamma = 10^\circ$ , задний угол  $\alpha = 15^\circ$ , угол подъема винтовой канавки  $\omega = 10^\circ$  [12].

Контроль износа инструмента по задней поверхности зубьев осуществляется с помощью прибора, разработанного на основе микроскопа МПБ-2, цена деления которого составляет 0,05 мм.

Для измерения составляющих силы резания на кафедре «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «АлтГТУ им И. И. Ползунова» была разработана оригинальная конструкция многокомпонентного динамометра (патент на полезную модель № 169315)

За критерий износа согласно рекомендациям ОСТ 5.9569-74 был принят износ по задней поверхности величиной 0,3 мм.

### Результаты и обсуждение

В ходе проведенных экспериментальных исследований были получены зависимости влияния износа режущего инструмента на тип стружки и изменение силы резания.

$$P = 1576 \cdot h - 8,142 \quad (1)$$

где  $P$  - сила резания, Н;  $h$  - износ режущего инструмента по задней поверхности, мкм.

Как видно из графика (рисунок 2) на начальном периоде от 0,05 до 0,15 мм тип стружки преобладает сливной (рисунок 3 а), размеры которой составляют порядка 5-10 мм. В момент износа режущего инструмента от 0,15 до 0,25 мм – элементная (рисунок 3 б), а при приближении износа в критическому образуются пылевидная стружка (рисунок 3 в).

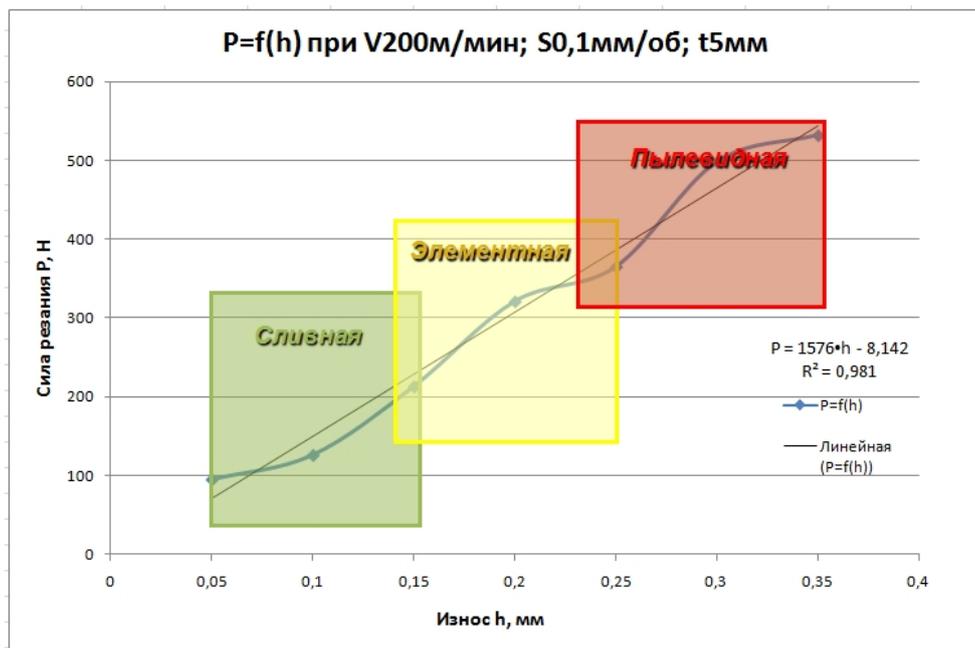


Рис. 2. График зависимости изменения типа стружки от износа режущего инструмента и силы резания



Рис. 3. Виды стружки на различных стадиях износа фрезы: а - остригаточенный инструмент; б - износ по задней поверхности от 0,15 до 0,25мм; в - износ по задней поверхности от 0,25 до 0,35 мм.

### Выводы

Исследование показало, что тип стружки при механической обработке композиционных материалов, в частности, стеклопластика, полученного методом косослойно продольно поперечной намотки, определяется износом инструмента. При этом все три типа стружки могут присутствовать при любом значении износа. Однако на начальных стадиях износа преобладает сливной тип. При среднем износе образуется преимущественно элементная стружка. При износе, близком к критическому – пылевидная.

Представленные графические и аналитические зависимости могут использоваться при проектировании операции механической обработки композиционного материала. Исследование показало, что тип стружки при механической обработке композиционных материалов, в частности, стеклопластика, полученного методом косослойно продольно поперечной намотки, определяется износом инструмента. При этом все три типа стружки могут присутствовать при любом значении износа. Однако на начальных стадиях износа преобладает сливной тип. При среднем износе образуется преимущественно элементная стружка. При износе, близком к критическому – пылевидная. Представленные графические и аналитические зависимости могут использоваться при проектировании операции механической обработки композиционного материала.

### Список литературы

1. Ярославцев В.М. Обработка резанием полимерных композиционных материалов: учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 184 с.
2. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. – Л.: Машиностроение, 1987. – 176 с.
3. Ширинкин В.В., Макаров В.Ф., Мешкас А.Е. Обзор международных исследований и изучение процесса стружкообразования при сверлении композиционных материалов // Научные технологии на современном этапе развития машиностроения: материалы VIII Международной научно-технической конференции. – М.: МАДИ, 2016. – С. 260–262.
4. Мозговой Н.И., Марков А.М., Мозговая Я.Г. Проектирование операций изготовления отверстий в деталях из стеклопластика // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 1. – С. 45–49.
5. Исследование процесса фрезерования стеклопластиков / Е.Ю. Лапенков, С.А. Катаева, С.В. Гайст, П.О. Черданцев, А.М. Марков // Вестник алтайской науки. – 2015. – № 3–4 (25–26). – С. 39–44.
6. Марков А.М., Макарова Н.А., Гайст С.В. Износ инструмента при фрезеровании стеклопластика // Научные технологии в машиностроении. – 2017. – № 4 (70). – С. 25–30.
7. Марков А.М., Маркова М.И., Плетнева Е.М. Алгоритм проектирования группового технологического процесса механической обработки деталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 4. – С. 5–9.
8. Forecasting of machined surface waviness on the basis of self-oscillations analysis / E.B. Belov, S.L. Leonov, A.M. Markov, A.A. Sitnikov, V.A. Khomenko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 50 (1). – P. 012053.
9. Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V. Surface quality of the fiberglass composite material after milling // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 682. – P. 183–187.
10. Ярославцев В.М. Процесс образования стружки при резании полимерных композиционных материалов с волокнистыми наполнителями // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2012. – № 2. – С. 81–87.
11. Rychkov D.A., Yanyushkin A.S. The methodology of calculation of cutting forces when machining composite materials // Innovative Technologies in Engineering: VII International Scientific Practical Conference. Conference Proceedings. – Tomsk, 2016. – P. 12088.
12. Конструкции фрез для обработки стеклопластиков / С.А. Катаева, А.М. Марков, П.О. Черданцев, С.В. Гайст, Е.Ю. Лапенков // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 307–312.

## THE INFLUENCE OF WEAR OF CUTTING TOOLS ON THE PROCESS OF CHIP FORMATION DURING MILLING OF THE COMPOSITE MATERIAL

**Gayst S.V.**, Post-graduate Student, Assistant, e-mail: sergei\_gaist@mail.ru

**Markov A.M.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: andmarkov@inbox.ru

**Salman A.M.**, Post-graduate Student, e-mail: azharmansoor76@gmail.com

I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

### Abstract

The article discusses the process of grinding composite materials. The workpiece is a composite material. A method of manufacturing a workpiece is the oblique longitudinal cross-winding. The cutting process is a end milling. There are many features of milling composite material: large tool friction on the workpiece, high temperature, high wear. Wear affects the type of chips. Can be three types of chips: chip shavings, fine chip, dust chips at the same time. The predominant type of chips depends on the state of the cutting blade. The cutter blade may be new, to have normal wear, have a critical wear. Influence of wear of blades of the cutting tool on process of formation of a shaving is studied. Experimental studies have been carried out. The cutting force, the amount of wear of the cutting blade, the type of chips were measured. Graphic and analytical relations for calculation of values of values of wear of cutting forces of the prevailing type of chip are made. The presented results will be used for CAD/CAM systems for designing operations of mechanical processing of composite materials.

### Keywords

Fiberglass, cutting tool, milling, chip formation, wear, chip type, machining operation design

УДК 534

**СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ ВИБРОЗАЩИТЫ МАШИН И  
ОБОРУДОВАНИЯ***А.А. РЫКОВ, канд. техн. наук, доцент  
(НГТУ, г. Новосибирск)***Рыков А.А.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: teormech@ngs.ru

В работе предлагается способ преобразования механической системы из состояния, описываемого произвольными обобщенными координатами в состояние, в котором они становятся главными координатами. Достигается это путем введения в систему упругого элемента с отрицательной жесткостью. В этом случае колебательные движения по нескольким координатам разделяются, и появляется возможность возбуждать и наблюдать гармонические колебания как отдельно по каждой координате, так и одновременно по всем координатам. Это позволяет также изменять величины собственных частот. В результате появляется возможность повышение виброзащиты колебательной системы путем сужения коридора между частотами, снижения наибольшей собственной частоты, то есть удается сместить частотный диапазон влево, что приводит к улучшению показателей виброзащиты системы. Это проявляется в увеличении возможности отстройки от резонанса и снижению металлоемкости конструкции.

**Ключевые слова:** дизель-генератор, обобщенные координаты, упругий элемент, отрицательная жесткость, собственная частота.

**Введение**

Анализ колебательных систем предполагает написание дифференциальных уравнений движения, определение собственных частот и форм колебаний. Известны некоторые приемы для упрощения математических моделей колебательных систем [1-5], в частности, иногда целесообразно представить систему дифференциальных уравнений в главных координатах, когда связи между координатами, описывающими положение механической системы, отсутствуют.

Но разделение колебательного движения в главных координатах является недостаточным. С нашей точки зрения, целесообразно провести разделение колебательных движений в исходных координатах, сделав их тем самым главными. Для этого в колебательную систему следует ввести упругий элемент с отрицательной жесткостью. Такой пример известен в литературе, когда в качестве этого элемента вводится двухопорная балка-рессора, работающая на поперечный изгиб при одновременном сжатии ее осевой сверхкритической силой [6-11].

Мы обобщаем и развиваем этот подход, причем не только в плане виртуальной модели, но и физической, в реальном исполнении. При этом определяются абсолютная величина жесткости вводимых элементов и координаты присоединения их к системе. Таким образом, можно возбуждать и наблюдать гармонические независимые колебания отдельно по каждой координате или по обеим одновременно.

**Теоретические исследования**

В качестве обобщенных координат возьмем координату  $y$ , определяющую вертикальное перемещение центра тяжести и угол поворота  $\theta$  вокруг центра тяжести, отсчитываемых от равновесного положения системы. Первоначально виброизоляция системы предусматривается с помощью двух упругих элементов пружинами с жесткостью  $c_1$  и  $c_2$ , закрепленными как показано на рис.1. Кинетическая энергия системы будет равна

$$T = \frac{1}{2}(m\dot{y}^2 + J\dot{\theta}^2) \tag{1}$$

где  $m$  – масса системы,  $J$  – момент инерции системы относительно центра масс.

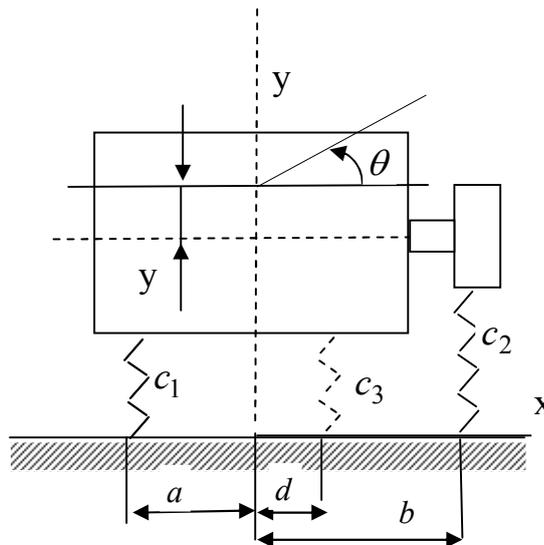


Рис.1. Схема подвески дизель-генератора (2-е степени свободы)

Потенциальная энергия системы:

$$\Pi = \frac{1}{2}[c_1(y - a\theta)^2 + c_2(y + b\theta)^2] = \frac{1}{2}[(c_1 + c_2)y^2 + 2(c_2b - c_1a)y\theta + (c_1a^2 + c_2b^2)\theta^2] \tag{2}$$

Согласно теории колебаний коэффициенты инерции и жесткости в этой системе равны:

$$a_{11} = m, \quad a_{22} = J, \quad c_{11} = c_1 + c_2, \quad c_{12} = c_{21} = c_2b - c_1a, \quad c_{22} = c_1a^2 + c_2b^2 \tag{3}$$

Найдем собственные частоты:

$$k_{1,2}^2 = \frac{S \pm \sqrt{S^2 - 4Q}}{2} \tag{4}$$

где

$$S = \frac{a_{11}c_{22} + a_{22}c_{11}}{a_{22}a_{11}}, \quad Q = \frac{c_{11}c_{22} - c_{12}^2}{a_{11}a_{22}} \tag{5}$$

Дифференциальные уравнения движения системы при возбуждении по координате  $\theta$  моментом  $M_0$  для вынужденных колебаний имеют вид:

$$\begin{aligned} a_{11}\ddot{y} + c_{11}y + c_{12}\theta &= 0, \\ a_{22}\ddot{\theta} + c_{12}y + c_{22}\theta &= M_0 \cos pt \end{aligned} \tag{6}$$

Для устойчивости движения системы необходимо, чтобы частоты  $k_{1,2}$  были вещественными числами [12-15]. Это означает, что  $k_{1,2}^2$  должно быть числом, во-первых, вещественным и, во-вторых, – положительным. Условие вещественности  $k_{1,2}^2$ :

$$S^2 \geq 4Q \quad (7)$$

а условие положительности

$$Q \geq 0 \quad (8)$$

Из условия (8) следует:

$$c_1 > 0, c_2 > 0 \quad (9)$$

Условие (7) требует, чтобы

$$\left(\frac{c_{22}}{a_{22}} - \frac{c_{11}}{a_{11}}\right)^2 + 4 \frac{c_{12}^2}{a_{11}a_{22}} \geq 0,$$

которое всегда выполняется, так как  $a_{11} \cdot a_{22} > 0$ .

Зададим параметры системы:  $m=4000$  кг,  $c_1=2400000$  Н/м,  $c_2=800000$  Н/м,  $a=0,2$  м,  $b=0,9$  м,  $J=1000$  кг·м<sup>2</sup>,  $M_0=5000$  Н·м

В этом случае собственные частоты будут равны:  $k_1=25,47$  с<sup>-1</sup>,  $k_2=29,92$  с<sup>-1</sup>.

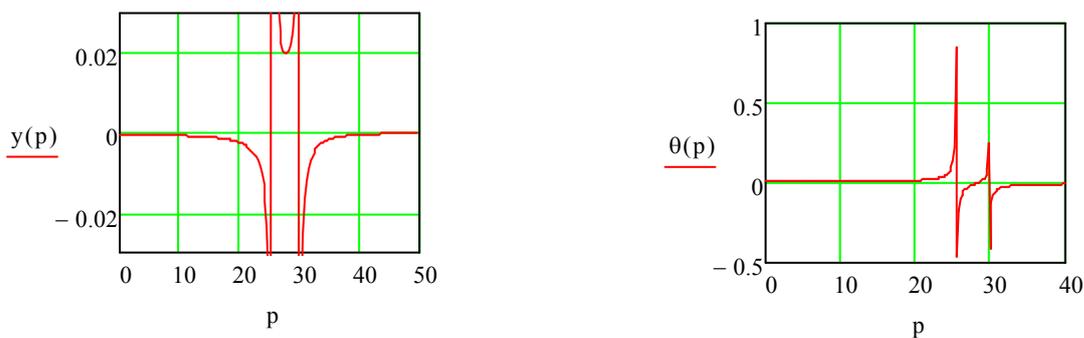


Рис. 2. Зависимости  $y(p)$  и  $\theta(p)$  от частоты

Под действием возмущающего момента  $M=M_0 \cos pt$ , в системе изменяется и линейная так и угловая координаты одновременно (рис.2).

Поставим задачу разделить колебательные движения по этим двум координатам.

Введем в систему дополнительный упругий элемент жесткостью  $c_3$  с координатой точки крепления  $d$  (рис.1). Потребуем, чтобы выполнялось следующее условие

$$c_2b - c_1a + c_3d = 0 \quad (10)$$

Очевидно, что в этом случае потенциальная энергия примет вид:

$$\Pi = \frac{1}{2}[(c_1 + c_2 + c_3)y^2 + (c_1a^2 + c_2b^2 + c_3d^2)\theta^2] \quad (11)$$

Уравнения движения станут независимыми с частотами

$$k_1^2 = \frac{c_1 + c_2 + c_3}{m}, k_2^2 = \frac{c_1a^2 + c_2b^2 + c_3d^2}{I} \quad (12)$$

Из (12) видно, чтобы уменьшить частоты  $k_1$  и  $k_2$  для повышения эффективности виброизоляции необходимо жесткость третьего упругого элемента взять отрицательной. Так, если взять  $c_3=-400000$  Н/м, то из (10) получим  $d=0,6$  м. В этом случае тело получает только крутильные колебания вокруг центра масс, перемещения по координате  $y$  не будет. Амплитудно-частотная характеристика имеет вид (рис. 3)

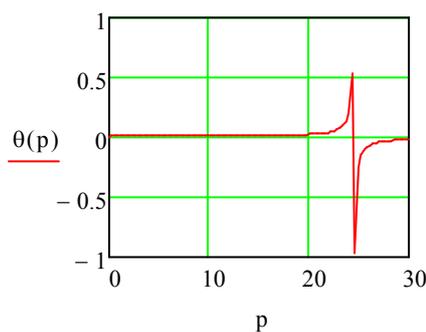


Рис.3. Амплитудно-частотная характеристика системы с дополнительным упругим элементом

### Результаты и обсуждение

После введения дополнительного упругого элемента с отрицательной жесткостью собственные частоты станут равными:  $k_1=24,498 \text{ c}^{-1}$ ,  $k_2=26,46 \text{ c}^{-1}$ . То есть интервал между независимыми частотами, также как наибольшая из них уменьшаются, что улучшает характеристики виброзащиты, так как увеличивается диапазон безрезонансного изменения частоты возмущаемого воздействия.

Разделение движений позволяет возбуждать и наблюдать гармонические независимые колебания по каждой координате.

Если же сделать частоты независимыми, не добавляя третий упругий элемент, а полагая, что  $a \cdot c_1 - c_2 \cdot b = 0$ , то при тех же значениях  $b$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  приходится увеличить габарит  $a$  до 0,3 м и возрастет также наибольшая из частот, диапазон частот сдвинется вправо, что ухудшит виброзащиту системы. Заметим, что предложенный способ улучшения виброзащиты мы применили и для системы с 3-мя степенями свободы.

### Выводы

На примере дизель-генератора, как системы с 2-мя степенями свободы, показано, что введением в нее упругого элемента с отрицательной жесткостью получены следующие результаты:

- обобщенные координаты можно сделать главными, а значит, колебательное движение по двум координатам разделяется. Это позволяет отдельно возбуждать и наблюдать независимые гармонические колебания по каждой координате;
- интервал между независимыми частотами, также как наибольшая из них уменьшаются, что улучшает виброзащиту системы, так как увеличивается диапазон безрезонансных частот возмущаемого воздействия;
- достигнутые результаты получены без увеличения металлоемкости конструкции.

### Список литературы

1. Динамические свойства линейных виброзащитных систем / А.В. Синев, Ю.Г. Сафронов, В.С. Соловьев и др. – М.: Наука, 1982. – 206 с.
2. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.

3. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. – М.: Высшая школа, 1980. – 406 с.
4. Вульфсон И.И. Краткий курс теории механических колебаний. – М.: ВНТР – 2017. – 241 с. – (Библиотека ВНТР).
5. Рыков А.А., Куриленко Г.А., Юрьев Г.С. Синтез активной виброзащитной системы // Вестник машиностроения. – 2014. – № 4. – С. 47–49.
6. Блехман И.И. Теория вибрационных процессов и устройств. – СПб: Руда и металлы, 2013. – 640 с.
7. Mondrus V.L., Smirnov V.A. Probability analysis of precision equipment vibration isolation system // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 467. – P. 410–415.
8. Smirnov V.A. Parallel integration using OpenMP and GPU to solve engineering problems // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 475–476. – P. 1190–1194.
9. Mondrus V.L., Smirnov V.A. Application of energy method for determining loss factor in dynamic systems with hysteretic damping // Applied Materials Research. – 2014. – Vol. 580–583. – P. 2978–2982.
10. Smirnov V.A. Numerical modeling of nonlinear vibration isolation system free oscillations // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1025–1026. – P. 80–84.
11. Yurev G.S., Rykov A.A. Passive automatic control of a vibrationally protected object // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35, iss. 8. – P. 575–579. – doi: 10.3103/S1068798X15080183.
12. Rykov A.A., Kyrilenko G.A., Yur`ev G.S. Synthesis of an active vibrational-protection system // Russian Engineering Research. – 2014. – Vol. 34, iss. 7. – P. 440–443. – doi: 10.3103/S1068798X1407007.
13. Рыков А.А., Куриленко Г.А., Юрьев Г.С. Виброзащита станочного оборудования при низкочастотном возмущающем воздействии // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 4 (57). – С. 31–33.
14. Рыков А.А., Юрьев Г.С., Ненев Ю.В. Выбор нелинейно-упругих и демпфирующих элементов нелинейной виброзащитной системы // Вестник машиностроения. – 2005. – № 11. – С. 79–81.
15. Мондрус В.Л., Смирнов В.А. Виброзащита высокоточного оборудования от низкочастотных колебаний // ACADEMIA. Архитектура и строительство. – 2011. – № 1. – С. 109–111.

## IMPROVEMENT OF VIBRATION DEFENSE FOR MECHANICAL SYSTEMS

Rykov A.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: teormech@ngs.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

### Abstract

We suggest method allowing to transform the mechanical system state, is described by arbitrary generalized coordinates, in the state, to which these coordinates will be main. It is achieved by installation of elastic element with negative hardness in the mechanical system. In that case the oscillations for some coordinates are separated and somebody can excite and watch harmonic oscillations both separately for every coordinates and simultaneously for all its. This elastic element allows also to change the values of natural frequencies. It gives the chance to reduce the maximal natural frequency and to draw together values of natural frequencies. As a result diapason of all frequencies is displaced to the left. It increases opportunity to go out from resonance and thereby improves the defense of mechanical system from vibration. Besides it allows to decrease weight of system.

### Keywords

Elastic element, Diesel-generator, Negative hardness, Natural frequency

УДК 621.9

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
ПАКЕТОВ РАЗНОКОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Е.А. КУДРЯШОВ, доктор техн. наук, профессор  
И.М. СМИРНОВ, доктор техн. наук, доцент  
Д.В. ГРИШИН, аспирант  
Н.А. ХИЖНЯК, аспирант  
(АО «НИИИ», г. Балашиха)*

**Кудряшов Е.А.** – 143912, Московская обл., г. Балашиха, шоссе Энтузиастов, 6  
Научно-исследовательский инженерный институт,  
e-mail: kea-swsu@mail.ru

Целью исследования является производительное формообразование глубоких отверстий в пакете деталей из разноконструкционных материалов с соединением их в сборочную единицу посредством специального инструмента. Приведен пример пакетной конструкции изделия, состоящего из деталей (алюминий, полиуретан) сложной конструктивной формы, предназначенного для заброса на местности при значительных динамических нагрузках на его конструкцию. Проведен анализ трудностей, связанных с изготовлением глубокого отверстия в пакете из разноконструкционных материалов. Сформулированы общие требования, предъявляемые как к режущему инструменту, так и сборочной операции, завершающей процесс изготовления изделия. Предложена марка инструментального материала, обладающего необходимой работоспособностью. Разработана конструкция специального инструмента двойного назначения – способного к обработке глубокого отверстия и созданию посадки с натягом в пакете сборочной единицы.

**Ключевые слова:** пакет деталей, разноконструкционные материалы, способ обработки, глубокое отверстие, инструмент двойного назначения.

**Введение**

В связи с усложнением конструктивной сложности изделий, технологам все чаще приходится решать проблемы, связанные с механической обработкой пакета деталей. В дальнейшем, называем пакетом сборочную единицу, состоящую из двух и более совместно обрабатываемых деталей, как правило изготовленных из разноконструкционных материалов.

Ярким примером пакетных конструкций является сборочная единица Секция, состоящая из Корпуса (поз. 1, рис. 1), с центральным сквозным отверстием для прохода кабеля и фиксацией его в Корпусе двумя Стержнями (поз. 2, рис. 1) и Оболочки (поз. 3, рис. 1), необходимой для предохранения Корпуса от механических повреждений при соударении с рельефом местности и сохранения целостности в составе изделия, предназначенного для заброса на большую дальность.

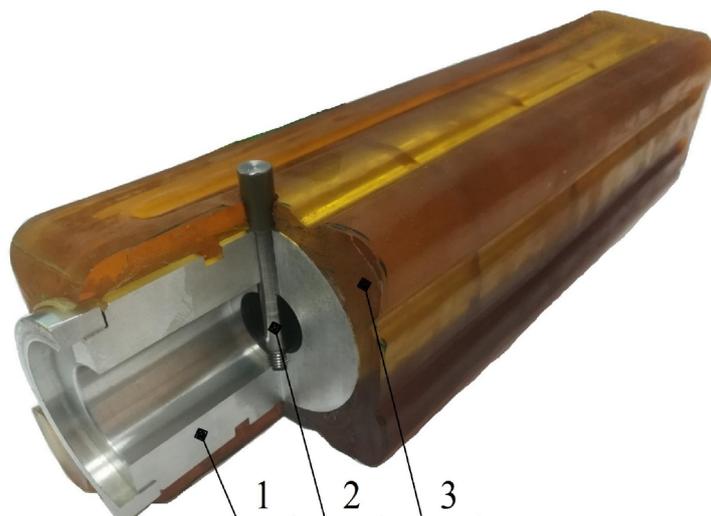


Рис. 1. Конструкция сборочной единицы

Материал Корпуса – алюминий марки Д1.Т. ГОСТ 21488-97, материал Оболочки – полиуретан марки 403. Сочетание материалов в конструкции Секции позволяет обеспечить выполнение заданных характеристик изделия, а именно:

- требования по габаритно-массовым характеристикам;
- возможность многократного использования Секции в условиях ударных нагрузок;
- минимально возможное количество дефектов конструкции от воздействия факторов применения.

Вместе с тем в технологии механической обработки и сборки имеются отдельные операции, требующие от технолога дополнительных решений для обеспечения точности изготовления и надежности изделия в применении.

Базовая деталь сборочной единицы – Корпус (диаметр 57,6 мм, длина 317 мм) изготавливается с центральным сквозным отверстием диаметром 20 мм и имеет два ступенчатых отверстия с перепадом диаметров от 6-ти до 4,2 мм, пересекающих по центру симметрии тело детали на длине 75 мм (т.е. Оболочку поз. 3, рис. 1); тело детали (поз. 1, рис. 1) и тело фиксирующего каната, устанавливаемого при сборке в центральном сквозном отверстии детали). Конструктивно перечисленные отверстия относятся к глубоким, и при их механической обработке и сборке встречается ряд трудностей, а именно:

1) вследствие глубокого сверления (длина отверстий более 10-ти диаметров инструмента) высока вероятность превышения установленного допуска на отклонение от перпендикулярности, по отношению к оси симметрии деталей, оси двух ступенчатых отверстий;

2) при сверлении материалов Оболочки (поз. 3, рис. 1), затем тела детали (поз. 1, рис. 1) инструмент совершает холостой пробег через зазоры между стенками центрального сквозного отверстия и телом каната, продолжает сверление самого каната и заканчивает работу получением оставшейся части отверстия в теле детали для нарезания на этом участке, на следующем технологическом переходе, резьбы М6 для ввинчивания Стержня (поз. 2, рис. 1). На режущих кромках сверла образуется плотный нарост из спаянных частиц труднообрабатываемых материалов (полиуретан, алюминий, высокопрочный полиэтилен и снова алюминий корпуса) создающий при схватывании его со стенками отверстия вероятность поломки хрупкого метчика (см. выносной элемент А, поз. 1 и 2, рис. 2).

Таким образом, исходя из перечисленных технологических особенностей изготовления деталей, целью исследования является производительное формообразование

глубоких отверстий в пакете деталей из разноконструкционных материалов с соединением их в сборочную единицу Секция посредством специального инструмента.

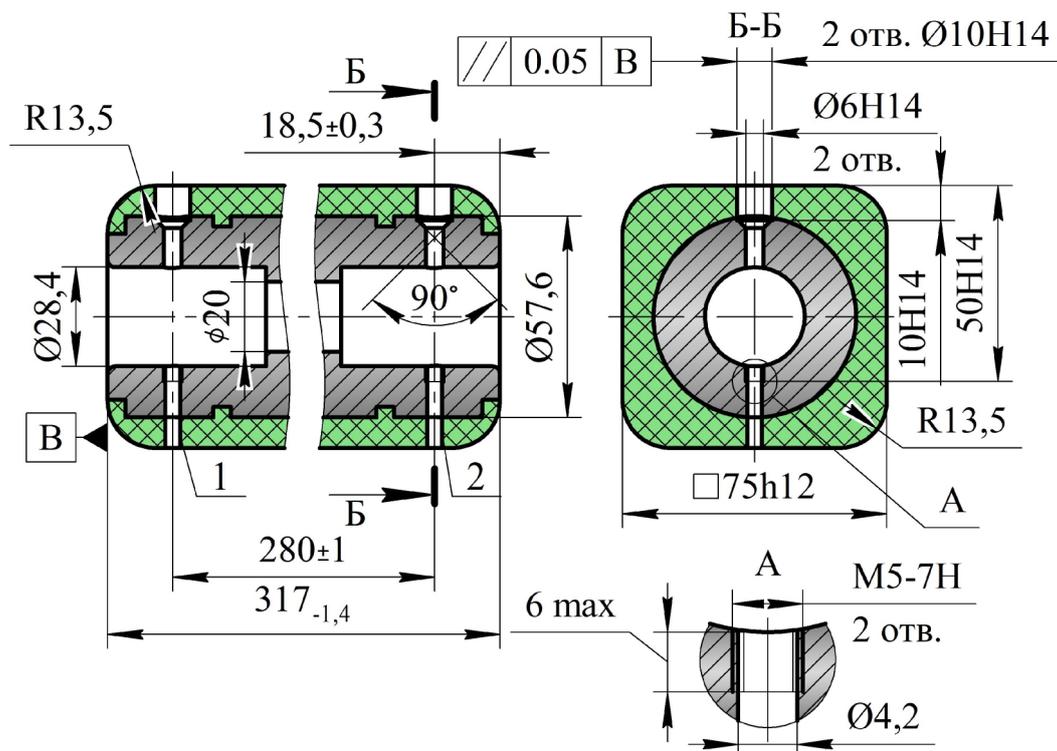


Рис. 2. Наличие глубоких отверстий в сборочной единице

### Материалы и методы исследования

С учетом рекомендаций по изучению технологических особенностей механической обработки деталей из разноконструкционных материалов [1-5], результаты исследований позволили формулировать общие требования, предъявляемые как к режущему инструменту, так и сборочной операции, завершающей процесс изготовления изделия:

1) выбор инструментального материала, обладающего необходимой работоспособностью к обработке глубоких отверстий в деталях из разнородных конструкционных материалов;

2) разработка специального инструмента, способного к обработке глубокого отверстия с последующим, посредством его использования, образованием посадки с натягом для надежного удержания в пакет деталей сборочной единицы Секция.

Многочисленные исследования в области резания труднообрабатываемых материалов отдают предпочтение наиболее эффективным сверхтвердым композитам на основе кубического нитрида бора, способным обеспечить предъявляемые требования, а также достаточную прочность и износостойкость в условиях динамических нагрузок и перепадов температур, причем лучшим инструментальным материалом для достижения поставленной цели служит материал марки композит 10 [6-10].

Для устранения трудностей, связанных с получением глубоких отверстий в пакетных конструкциях, предложена самонарезная шпилька, состоящая из заходной части (поз. 1, рис. 3), оснащенной паяным режущим элементом из композита 10, и самонарезной части (поз. 2, рис. 3).

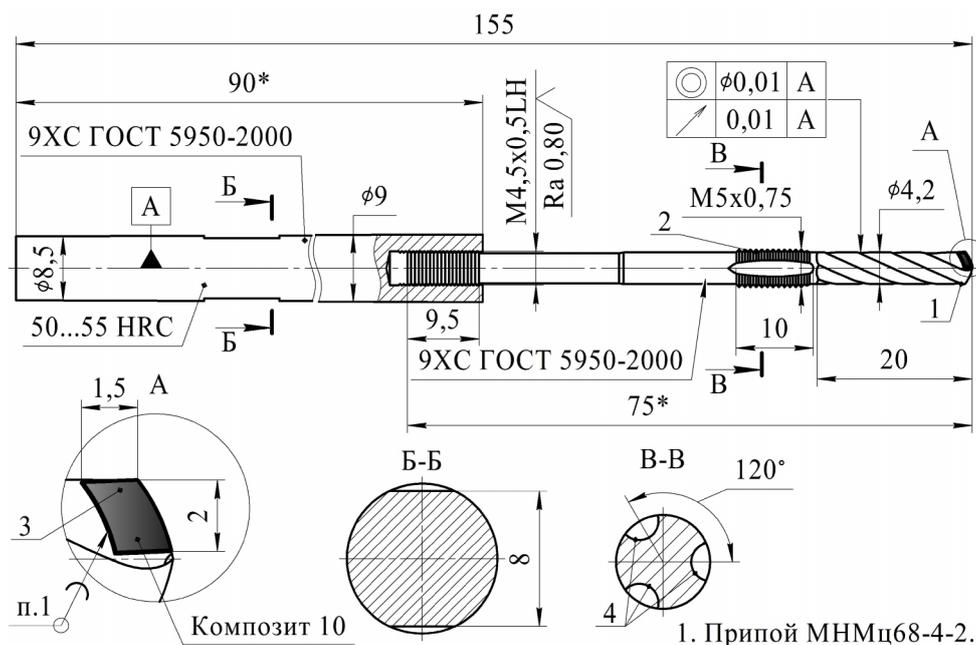


Рис. 3. Конструкция самонарезной шпильки

## Результаты и обсуждение

Режущий элемент из композита 10 (поз. 3, рис. 3), в силу своих физико-механических характеристик, исключает наростообразование, а стружка из элементов труднообрабатываемых материалов удаляется из зоны резания посредством трех каналов на режущей поверхности шпильки (поз. 4, рис. 3) [11-15].

По окончании самозавинчивания инструмент остается в сборочной единице, выполняя функцию фиксирующего канат стержня, обеспечивая надежное соединение, образуя с Корпусом посадку с натягом. Рабочему остается освободить хвостовик инструмента для использования при самозавинчивании следующей шпильки.

## Выводы

По результатам проведенного исследования можно заключить следующее:

1) применение комбинированного инструмента позволяет не только обеспечить обработку глубокого отверстия в пакете деталей из разнородных конструкционных материалов, но и образовать посадку с натягом для их надежного удержания в сборочной единице;

2) инструментальный материал композит 10 обладает необходимой работоспособностью для образования глубоких отверстий в пакете разноконструкционных материалов;

результаты испытания показали, что включенные в конструкцию Секции комбинированные инструменты, выполняющие в изделии двойную функцию – инструмента и фиксирующего канат стержня, позволяют создать надежную конструкцию, способную без дефектов выполнить свое назначение.

## Список литературы

1. Kudryashov E.A., Nikonov A.M., Stetsurin A.V. General approach to the optimization of machining by composite tools // Russian Engineering Research. – 2008. – Vol. 28, N 6. – P. 611–613. – doi: 10.3103/S1068798x08060221.
2. Кудряшов Е.А., Лунин Д.Ю., Павлов Е.В. Преимущества лезвийной технологии обработки деталей инструментом из композита // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 5. – С. 77–80.
3. De Vos P., Stahl J.E. Applied metal cutting physics: best practice. – Fagersta: SECO Tools AB, 2016. – 163 p.
4. Carou D., Rubio E.M., Davim J.P. Discontinuous cutting: failure mechanisms, tool materials and temperature study – a review // Reviews on Advanced Materials Science. – 2014. – Vol. 38, N 2. – P. 110–124.
5. Altintas Y. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. – New York: Cambridge University Press, 2012. – 366 p. – ISBN 978-05-118-4372-3.
6. Алтухов А.Ю., Лунин Д.Ю., Фомичев Е.Н. Технологические преимущества инструментального материала композит при обработке конструктивно сложных поверхностей деталей // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2010. – № 12 (72). – С. 15–20.
7. Analysis of PCBN cutting tool intermittent cutting hardened steel finite element simulation based on deform / S. Hao et al. // Tool Engineering. – 2015. – Vol. 5. – P. 41.
8. Zhou Y.H. The application and performance of diamond and PCBN tools in difficult-to-cut materials // Solid State Phenomena. – 2017. – N 263. – P. 90–96.
9. Кудряшов Е.А., Смирнов И.М. К вопросу выбора предпочтительной марки инструментального материала // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2014. – № 1 (52). – С. 81–85.
10. Using superhard tools in discontinuous cutting / E.A. Kudryashov, A.M. Nikonov, V.S. Rogovskii, A.V. Stetsurin // Russian Engineering Research. – 2009. – Vol. 29, N 2. – P. 210–213. – doi: 10.3103/S1068798X09020221.
11. The application of CBN on the lunar rock drill / D. Zhao et al. // 5th International Conference on Advanced Engineering Materials and Technology (AEMT 2015). – Guangzhou, China, 2015. – P. 789–793.
12. Jin Z.J., Bao Y.J., Gao H. Disfigurement formation and control in drilling carbon fibre reinforced composites // International Journal of Materials and Product Technology. – 2008. – Vol. 31, N 1. – P. 46–53.
13. Abhishek K., Datta S., Mahapatra S.S. Optimization of thrust, torque, entry, and exist delamination factor during drilling of CFRP composites // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 76, N 1–4. – P. 401–416.
14. Stahl J.E. Metal cutting: theories and models. – Lund: Lund University, 2012. – 580 p. – ISBN 978-91-637-1336-1.
15. Kudryashov E.A., Stetsurin A.V. More efficient repair of machine parts by a group method // Russian Engineering Research. – 2008. – Vol. 28, N 9. – P. 924–925. – doi: 10.3103/S1068798X08090232.

## TECHNOLOGICAL FEATURES OF DIFFERENT MATERIALS PACKAGES MACHINING

**Kudryashov E.A.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: kea-swsu@mail.ru

**Smirnov I.M.**, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: i.m.smirn@mail.ru

**Grishin D.V.**, Post-graduate Student, e-mail: d.v.grishin@aoniii.ru

**Khizhnyak N.A.**, Post-graduate Student, e-mail: kraxmalll@yandex.ru

JS «Scientific Research Engineering Institute», 6 Shosse Entuziastov, Balashikha, Moscow Region,  
143912, Russian Federation

### Abstract

The purpose of the study is the productive machining of deep holes in a package of parts made from different materials with their connection to an assembly unit by means of a special tool. As an example, we considered the package design of a product, consisting of parts (aluminum, polyurethane) of a complex structural form, intended for ejection on the ground with significant dynamic loads. The article shows an analysis of the difficulties associated with the manufacturing of a deep hole in a package of different structural materials. We formulated general requirements for both the cutting tool and the assembly operation, which completes the process of manufacturing the product. In addition, we justified the brand of the cutting tool material, which provides the necessary operability and the design of a special dual-use tool – capable of processing a deep hole and creating a fit in the package of the assembly unit.

### Keywords

package of parts, different structural materials, machining method, deep drilling, dual-use tool

УДК 62-50

**МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СТАЛКИВАТЕЛЯ  
УСТАНОВКИ МЕЖКЛЕТЬЕВОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЛПЦ-1  
АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»**

*К.В. ЛИЦИН, канд. техн. наук, доцент  
Т.В. КОВАЛЬЧУК, студент  
(НФ НИТУ «МИСиС», г. Новотроицк)*

**Лицин К.В.** – 462359, г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8  
Новотроицкий филиал национального исследовательского технологического университета  
«МИСиС»,  
e-mail: k.litsin@rambler.ru

Использование частотно-регулируемых электроприводов является веянием времени. Практически все устаревшие системы, регулируемые на основе систем с двигателем постоянного тока, уходят в прошлое. В статье предложена модернизация системы электропривода сталкивателя установки межклетьевого охлаждения листопрокатного цеха АО «Уральская сталь» (г. Новотроицк). Представлено описание сталкивателя установки межклетьевого охлаждения. Приведена кинематическая схема механизма и его номинальные данные. Осуществлен выбор двигателя и преобразователя частоты в соответствии с проведенными расчетами и необходимыми требованиями к электроприводу сталкивателя. Представлена схема подключения выбранного асинхронного двигателя к подходящему преобразователю частоты.

**Ключевые слова:** клеть, преобразователь частоты, сталкиватель, электропривод.

**Введение**

В настоящее время частотно-регулируемые электроприводы переменного тока не уступают электроприводам постоянного тока практически по всем основным техническим и экономическим показателям, а по некоторым показателям статических и динамических характеристик и превосходят его [1-5]. Это стало возможным благодаря созданию мощных запираемых силовых полупроводниковых приборов с высокими динамическими параметрами и быстродействующих микропроцессорных средств управления [6-8]. Актуальным направлением повышения эффективности производства АО «Уральская Сталь» (г. Новотроицк, Оренбургская обл.) является модернизация существующего электропривода сталкивателя установки межклетьевого охлаждения вследствие повышающихся требований к энергосбережению, а также обеспечение автоматизации всего процесса.

Целью данной работы является модернизация системы электропривода толкателя установки межклетьевого охлаждения (УМО) ЛПЦ-№1 АО «Уральская сталь». Для достижения поставленной цели необходимо:

- произвести расчет электродвигателя на основании существующих данных;
- осуществить выбор двигателя и преобразователя частоты.

**Теория**

Установка межклетьевого охлаждения листов (УМО) предназначена для ускоренного охлаждения подкатов во время междеформационной паузы до требуемой температуры начала чистой прокатки в клетки «КВАРТО» стана «2800» АО «Уральская Сталь».

К элементам основного оборудования УМО относятся:

- сталкиватель левый;
- сталкиватель правый;
- стеллаж охлаждения;
- автоматизированная система управления.

Сталкиватели предназначены для перемещения подката с рольганга на стеллаж охлаждения и обратно при достижении требуемой температуры начала чистовой прокатки. Их кинематическая схема представлена на рисунке 1.

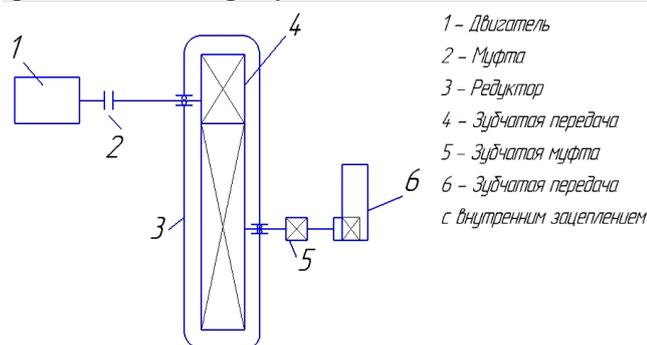


Рис.1. Кинематическая схема

К установке межклетьевого охлаждения листа предъявляются следующие основные требования:

- простота конструкции;
- удобство и безопасность обслуживания и ремонта;
- высокое быстродействие функционирования [9].

С целью увеличения производительности в работе действующего оборудования, а также с целью уменьшения затрат на обслуживание необходима замена существующего привода правого сталкивателя на новый – электродвигатель переменного тока. Это обеспечит увеличение скорости его работы, следовательно, увеличится производительность цеха. Замена привода объясняется рядом преимуществ по сравнению с приводом постоянного тока: асинхронный двигатель сравнительно дешев, затраты при эксплуатации минимальны, а надежность высока [10-14].

Проведем необходимые расчеты для выбора асинхронного двигателя на основании данных, представленных в таблице 1.

Таблица 1

Параметр	Обозначение	Значение
Масса заготовки, т	$m_m$	6,7
Масса штанги, т	$m_{ш}$	1,35
Путь толкания, м	$L_m$	3,5
Путь подхода штанг к заготовке, м	$L_n$	3,02
Рабочая скорость прямого хода, м/с	$V_{np}$	0,8
Радиус ведущей шестерни, м	$r_{ш}$	0,25
Момент инерции ведущей шестерни, кгм <sup>2</sup>	$J_{ш}$	7,5
Продолжительность включения, %	$ПВ$	51
Отношение нормальной скорости к рабочей скорости	$K_{обр}$	2
Отношение пониженной скорости к рабочей скорости	$K_{пон}$	0,5
Коэффициент трения штанги о ролики	$\mu_p$	0,06
Коэффициент трения заготовки о рольганг	$\mu_m$	0,5
КПД механических передач при рабочей нагрузке	$\eta_{nN}$	0,95
КПД механических передач при работе на холостом ходу	$\eta_{nxx}$	0,5

Расчет проводится по методике, изложенной в [15].

Расчетная номинальная мощность двигателя, Вт:

$$P_{рас} = K_3 \frac{F_{экр} V_{обр}}{\eta_{нН}} \cdot \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_н}} = 1,2 \cdot \frac{2731,88 \cdot 1,6}{0,95} \cdot \sqrt{\frac{51}{40}} = 6234,4 \text{ Вт}, \tag{1}$$

где  $K_3$  – коэффициент запаса (примем  $K_3 = 1,2$ );

$F_{экр}$  – эквивалентное статическое усилие за время работы в цикле, 2731, 88 Н;

$V_{обр}$  – скорость обратного хода шланг, 1,6 м/с;

ПВ, ПВн – продолжительность включения и номинальная продолжительность включения.

### Результаты и обсуждение

На основании полученной мощности выберем электродвигатель АИР112М2, технические данные которого представлены в таблице 2.

Таблица 2

Двигатель	Р, кВт	мин <sup>-1</sup>	I при 380В	КПД, %	Коэф. мощн.	Iп/In	m, кг
АИР 112 М2	7,5/7,6	3000	14,7	87	0,88	7,5	48

При выборе преобразователя частоты (ПЧ) будет руководствоваться тем, что его мощность и номинальный ток должны превосходить ток и мощность двигателя на 10-15 % [15]. Кроме того, на участке УМО уже используется ПЧ фирмы Shneider Electric, что объясняет выбор фирмы. Технические данные ПЧ представлены в таблице 3.

Таблица 3

Номер по каталогу	Мощность, кВт	Ток в установленном ном режиме, А	Перегрузка, 60 сек, А	Мощность рассеивания при номинальной нагрузке, Вт	Габариты, В×Ш×Г	Масса, без упаковки, кг.
ATV312HD11N4	11	27,7	41,6	397	329,5x245x192	11,000

Схема подключения двигателя к ПЧ представлена на рисунке 2.

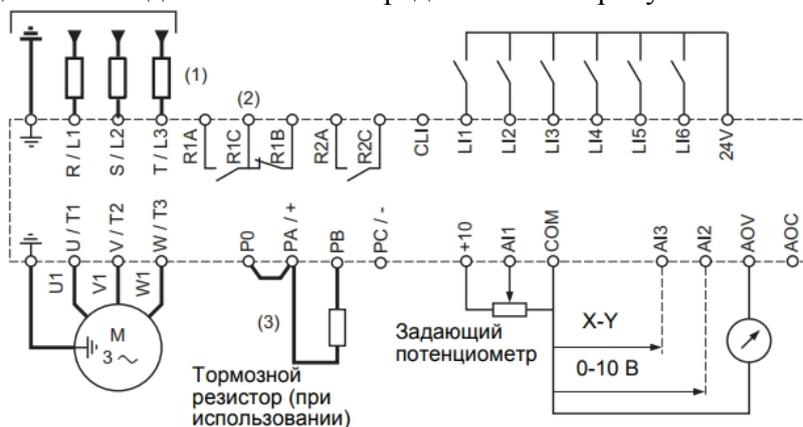


Рис. 2. Схема подключения электропривода

## Выводы

На основании поставленных требований проведен расчет и выбор электродвигателя переменного тока и преобразователя частоты. В итоге, в данной работе решена поставленная задача модернизации стеллажного установочного межклетьевого охлаждения ЛПЦ-1 АО «Уральская Сталь» с заменой старой системы двигателя постоянного тока на систему ПЧ-АД.

## Список литературы

1. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
2. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2008. – 298 с.
3. Вдовин В.В. Адаптивные алгоритмы оценивания координат бездатчиковых электроприводов переменного тока с расширенным диапазоном регулирования: дис. ... канд. техн. наук / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2014. – 244 с.
4. Исаков А.С. Синтез алгоритмов управления частотно-регулируемым электроприводом в условиях информационной неопределенности: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2009. – 140 с.
5. Панкратов В.В. Вентильный электропривод: от стиральной машины до металлорежущего станка и электровоза // Электронные компоненты. – 2007. – № 2.
6. Vas P. Sensorless vector and direct torque control. – Oxford: Oxford University Press, 1998. – 376 p.
7. Калачев Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. – М.: б. и., 2013. – 63 с.
8. Schauder C., Adaptive speed identification for vector control of induction motor without rotational transducers // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1992. – Vol. 28 (5). – P. 1054–1061.
9. Peng F.Z., Fukao T. Robust speed identification for speed-sensorless vector control of induction motors // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1994. – Vol. 30 (5). – P. 1234–1240.
10. ТИ 13657842-СК.П-06. Технология листопрокатного производства. Технологическая инструкция. – Новотроицк: АО «Уральская Сталь», 2006.
11. Marwali M.N., Keyhani A. A comparative study of rotor flux based MRAS and back EMF based MRAS speed estimators for speed sensorless vector control of induction machines // Proceedings of the IEEE-IAS Annual Meeting. – 1997. – Vol. 1. – P. 160–166.
12. Dynamic performance limitations of MRAS based sensorless induction motor drives. Part 1. Stability analysis for the closed loop drive / R. Blasco-Gimenez, G.M. Asher, M. Sumner, K.J. Bradley // IEE Proceedings - Electric Power Applications. – 1996. – Vol. 14 (2). – P. 113–122.
13. Chao K.H., Liaw C.M. Speed sensorless control performance improvement of induction motor drive using uncertainty cancellatio // Proceedings - Electric Power Applications. – 2000. – Vol. 147, iss. 4. – P. 251–262.
14. Целиков А.И., Полухин П.И., Гребеник В.М. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3 т. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1988.

15. Терехов В.М., Осипов В.И. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. – М.: Академия, 2011. – 304 с.

16. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для вузов. – М.: Академия, 2010. – 272 с.

### **MODERNIZATION OF THE ELECTRIC DRIVE SYSTEM DIVERTER OF ICE-CLEAN COOLING INSTALLATION SLS №1 JSC URAL STEEL**

**Litsin K.V.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: k.litsin@rambler.ru

**Kovalchuk T.V.**, Student, e-mail: tyatqq@gmail.com

Novotroitsk Branch of the National University of Science and Technology «MISiS», 8, Frunze st.,  
Novotroitsk, 462359, Russian Federation

#### **Abstract**

The use of frequency-controlled electric drives is a trend of time. Virtually all obsolete systems, regulated on the basis of systems with a DC motor, are a thing of the past. The induction motor has several advantages. The article proposes the modernization of the electric drive system of the diverter ice-clean cooling for the sheet rolling shop of JSC "Ural Steel" (Novotroitsk). Authors presented the description of the interlayer cooling interlocker. The kinematic scheme of the mechanism and its nominal data are given. Authors made choice of the motor and the frequency converter in accordance with the calculations and the necessary requirements for the electric drive of the diverter. Authors presented scheme for connecting the selected asynchronous motor to a suitable frequency converter.

#### **Keywords**

crate, frequency converter, diverter, electric drive.

УДК 621.075: 629.3

**АНАЛИЗ ПЛОСКОЙ ВЕКТОРНОЙ РАЗМЕРНОЙ ЦЕПИ  
МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ШКВОРНЕВОГО УЗЛА АВТОМОБИЛЯ УАЗ**

*А.М. ФИРСОВ, канд. техн. наук, доцент  
А.Г. ОВЧАРЕНКО, доктор техн. наук, профессор  
В.В. СМИРНОВ, канд. техн. наук, доцент  
(БТИ АлтГТУ, г. Бийск)*

**Фирсов А.М.** – 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27

Бийский технологический институт

(филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

e-mail: tmk@bti.secna.ru

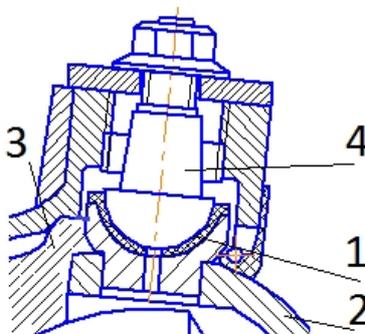
Рассматривается модернизация шкворневого узла автомобиля УАЗ-3163, заключающаяся в том, что вместо полусферических опор в соединении применены подшипники качения. Качественный анализ показывает, что при сборке узла цилиндрические поверхности деталей окажутся расположенными с отклонениями от соосности друг относительно друга. Действительное отклонение от соосности в собранном узле будет соответствовать суммарному эксцентриситету – замыкающему звену векторной размерной цепи. Составляющие звенья-эксцентриситеты этой размерной цепи являются случайными величинами, статистическое распределение которых подчиняется закону Релея. Разработана имитационная математическая модель, позволяющая определить вероятную величину суммарного эксцентриситета, а также вычислить вероятный процент брака при сборке узла.

**Ключевые слова:** автомобиль УАЗ, шкворневой узел, размерный анализ, эксцентриситет, ресурс долговечности.

**Введение**

Модель внедорожника УАЗ Патриот (УАЗ-3163) имеет рамную конструкцию и зависимые мосты. Применение зависимого переднего моста с управляемыми колесами, обуславливает наличие в конструкции подвески поворотного кулака и шкворневого узла.

Заводской шкворневой узел (рис. 1) за счёт применения полусферических опор 1 позволяет обеспечить самоустановку корпуса поворотного кулака 2 относительно шаровой опоры поворотного кулака (ШОПК) 3 и компенсировать возможную несоосность верхнего и нижнего шкворня 4.



*Рис. 1.* Заводская конструкция поворотного кулака автомобиля УАЗ: 1 – опора полусферическая; 2 – корпус поворотного кулака; 3 – ШОПК; 4 – шкворень

Некоторые производители запасных частей, ориентируясь на известные западные и отечественные образцы, предлагают модернизацию шкворневого узла путем замены полусферического подшипника скольжения на радиально-упорный подшипник качения. Преимущества такой замены обосновываются повышением управляемости автомобиля. Однако при сборке узла цилиндрические поверхности деталей окажутся расположенными с отклонениями от соосности друг относительно друга. Большие отклонения от соосности приведут к тому, что нормативные требования к монтажу подшипников качения, обеспечивающие их правильную и долгую работу, перестанут выполняться. В работе [1] проводился предварительный анализ линейной сборочной размерной цепи, соответствующей модернизированному шкворневому узлу. В данной статье предлагается повысить адекватность описанной ранее расчётной модели путём анализа плоской размерной цепи со звеньями-эксцентриситетами.

### Методика анализа сборочной размерной цепи со звеньями-эксцентриситетами

Предлагаемая модернизация шкворневого узла предусматривает установку радиально-упорного конического подшипника качения 7203 или другого с аналогичными размерами. При этом конструкция корпуса поворотного кулака, ШОПК и способ соединения шкворня с корпусом посредством конических поверхностей шкворня и резьбовой втулки остаются неизменными (рис.2). По существу, в шкворне полусферические опорные поверхности заменяются на цилиндрические. В то же время известно, что технические требования ограничивают допустимый угол взаимного перекоса между осями внутреннего и наружного колец при монтаже подшипников качения. В частности, для радиально-упорных конических подшипников основного конструктивного исполнения контактный допустимый угол  $\Theta_{max}$  перекоса осей колец составляет две минуты, а эксплуатационный угол перекоса  $\Theta$  не должен превышать  $0,7 \Theta_{max}$  [2]. Перекос осей колец подшипников возникает из-за погрешностей обработки и сборки деталей, входящих в узел. В данном случае на перекос осей колец подшипников будет влиять эксцентриситет цилиндрической шейки шкворня, которая является опорной поверхностью внутреннего кольца подшипника в верхней опоре относительно такой же шейки в нижней опоре. Это приведет к тому, что корпус поворотного кулака вместе со шкворнями и с установленными на них внутренними кольцами подшипника повернется относительно опор для наружного кольца подшипника на некоторый угол, который и будет углом перекоса  $\Theta$ .

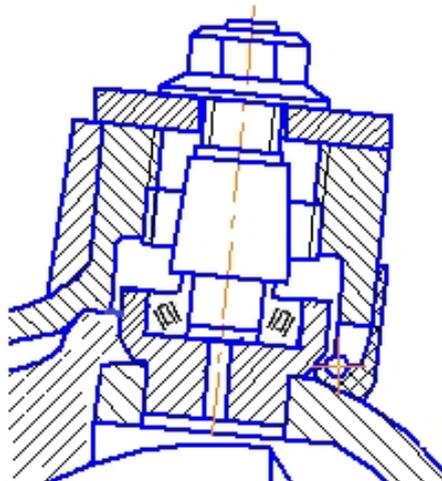


Рис.2. Модернизированный шкворневый узел с подшипником качения

Связь эксплуатационного угла перекоса  $\Theta$  с величиной отклонения от соосности  $\Delta$  поверхностей деталей, входящих в узел показана на рис. 3; она задаётся уравнением:

$$\Delta = \frac{1}{2} L \operatorname{tg} \Theta$$

где  $L$  – расстояние между опорами.

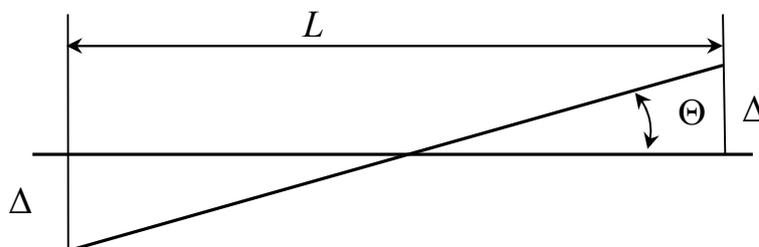


Рис. 3. Расчетная схема для определения отклонения от соосности  $\Delta$  в зависимости от эксплуатационного угла перекоса  $\Theta$

Для подшипника 7203 допустимый эксплуатационный угол перекоса равен  $\Theta = 0,7 \Theta_{max} \approx 1,4'$ , т.е. составляет около 1,4 минуты.

Тогда при расстоянии между опорами шкворня  $L \approx 175$  мм, допустимое суммарное отклонение от соосности шейки шкворня под посадку внутреннего кольца подшипника в верхней опоре относительно шейки шкворня в нижней опоре составит  $\Delta \approx 0,07$  мм.

Действительное отклонение от соосности в собранном узле будет соответствовать суммарному эксцентриситету  $\varepsilon$ , который, очевидно, является замыкающим звеном векторной размерной цепи [3]. Составляющие звенья-эксцентриситеты этой размерной цепи [1] приведены в таблице. Принято, что точность изготовления подшипников существенного влияния на точность сборки узла не оказывает. Кроме того, будем считать, что при сборке обеспечивается плотное сопряжение резьбовой поверхности корпуса поворотного кулака и резьбовой поверхности зажимной втулки, а также создается плотный контакт конических поверхностей зажимной втулки и шкворня. Соответствующие эксцентриситеты равны нулю.

Таблица

Значения составляющих звеньев-эксцентриситетов

Составляющее звено	Обозначение	Абсолютное значение, мм
Отклонение от соосности оси верхнего резьбового отверстия относительно оси нижнего отверстия в корпусе поворотного кулака	$\varepsilon_1$	0,12
Отклонение от соосности осей резьбовой поверхности зажимных втулок относительно конической поверхности этих же втулок	$\varepsilon_2, \varepsilon_3$	0,12
Отклонение от соосности конических поверхностей шкворней относительно осей цилиндрических поверхностей шкворня под установку внутреннего кольца подшипника	$\varepsilon_4, \varepsilon_5$	0,1

Согласно исходным данным, максимально возможное значение замыкающего звена

$$\varepsilon_{\Delta} = \sum_{i=1}^5 \varepsilon_i = 0,56 \text{ мм}$$

которое, однако, маловероятно.

Теоретически, можно подобрать такое сочетание составляющих эксцентриситетов, чтобы их векторная сумма была сколь угодно близко к нулю, но на практике при сборке узла это трудно обеспечить. В большинстве подобных случаев принимают [4], что каждый из векторов характеризуется абсолютной величиной, имеющей нормальное центрированное распределение, и направлением, которое в прямоугольной системе координат характеризует угол с осью абсцисс. Последний с равной вероятностью принимает значения в пределах от 0 до  $2\pi$ . Положение конца каждого из векторов (составляющих звеньев размерной цепи) подчинено так называемому круговому нормальному распределению, для которого характерно следующее:

- равенство нулю среднего значения (математического ожидания) координат случайной точки – конца вектора;
- неравенство нулю математического ожидания величины удалённости этой точки от начала координат.

Последняя величина (удалённость точки от начала координат) определяется соотношением

$$\varepsilon = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение каждой из координат конца случайного вектора.

Из формулы (1) понятно, что среднеквадратическое отклонение одномерной случайной величины  $\varepsilon$  почти в два раза меньше  $\sigma$ , что свидетельствует о более тесном группировании случайной величины  $\varepsilon$  по сравнению с группированием случайных величин  $x$  и  $y$  – координат конца вектора. В рассматриваемом случае статистическое распределение модуля вектора подчиняется закону Релея:

$$f(\varepsilon) = \begin{cases} \frac{\varepsilon}{\sigma^2} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}} & \text{при } \varepsilon \geq 0; \\ 0 & \text{при } \varepsilon < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Функция  $f(\varepsilon)$  достигает максимума при  $\varepsilon = \sigma$ , что говорит о несовпадении среднего значения случайной величины  $\varepsilon$  с её математическим ожиданием.

Поле рассеивания  $\omega$  случайной величины  $\varepsilon$ , имеющей распределение (2), в инженерных расчетах обычно принимают равным

$$\omega = 2\sigma_{\varepsilon} \sqrt{7},$$

где  $\sigma_{\varepsilon}$  – среднеквадратическое отклонение абсолютной величины вектора.

Также определено [2], что с вероятностью 99,76% эта случайная величина попадает в диапазон  $0 \leq \varepsilon \leq 3,47\sigma$ .

Изложенные условия формирования величины эксцентриситета справедливы для большинства конструкторских и технологических задач и позволяют вычислить математическое ожидание результирующего вектора эксцентриситета и прочие параметры статистического распределения.

## Результаты и обсуждение

Вычисления, соответствующие приведённой методике анализа, были выполнены в среде Maple с использованием технологии моделирования по методу Монте-Карло [5]. При построении имитационной модели на первом этапе был получен список значений случайной величины, подчиненной закону кругового нормального распределения для каждого из составляющих звеньев-эксцентриситетов размерной цепи. Исходными данными для получения данного списка являются абсолютные величины середины полей допусков составляющих звеньев-эксцентриситетов (таблица 1) и количество генерируемых случайных величин. Затем для каждого набора из списка вычислялась вероятная величина суммарного случайного вектора – замыкающего звена размерной цепи. Далее вычислялся вероятный процент брака и другие характеристики статистического распределения.

На рис. 4 представлена диаграмма статистического распределения отклонений с отображением средних  $\bar{\varepsilon}_{\Delta}$ , допустимых  $[\varepsilon_{\Delta}]$  и максимальных  $\varepsilon_{\Delta}$  значений суммарного эксцентриситета, возникающего при сборке модернизированного шкворневого узла. В данном расчёте использовано 2000 случайных вариантов сочетаний составляющих звеньев-эксцентриситетов. Суммарное значение векторов (замыкающее звено) на диаграмме отмечено положением некоторой точки на графике. Там же присутствуют три линии окружности: линия допустимых значений суммарного эксцентриситета ( $[\varepsilon_{\Delta}] = \Delta = 0,07 \text{ мм}$ ), линия его максимально возможных значений ( $\varepsilon_{\Delta} = 0,56 \text{ мм}$ ) и линия математического ожидания ( $\bar{\varepsilon}_{\Delta} = 0,117 \text{ мм}$ ). Результат вычислений качественно соответствует теоретическим положениям. Наглядно демонстрируется, что в данном случае математическое ожидание величины суммарного эксцентриситета превышает его допустимое значение.

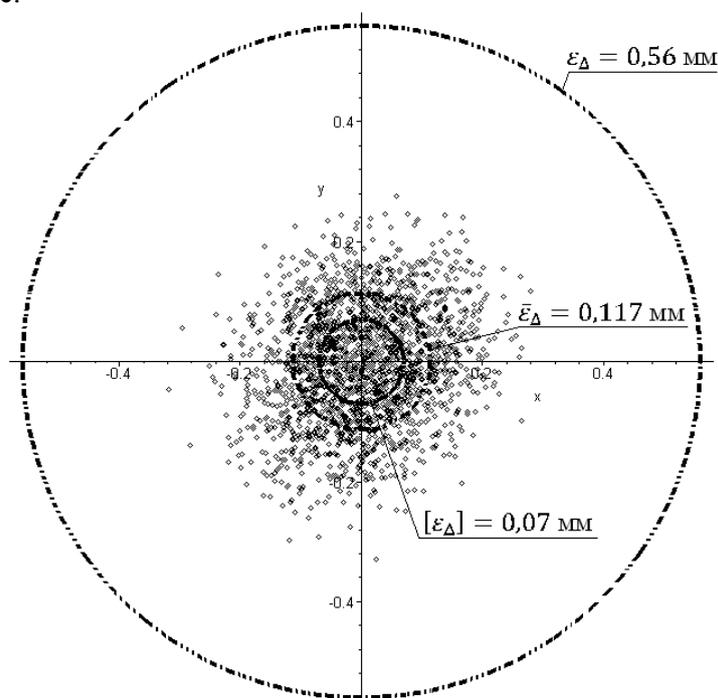


Рис. 4. Диаграмма отклонений суммарного эксцентриситета

Интегральная кривая процентного распределения случайной величины суммарного эксцентриситета показана на рис. 5.

Согласно данным компьютерного эксперимента значение суммарного эксцентриситета фактически не превышает 0,36 мм. Однако вероятный брак при сборке

шкворневого узла при расчёте по программе составил около 78%, что ставит под вопрос целесообразность данной модернизации.

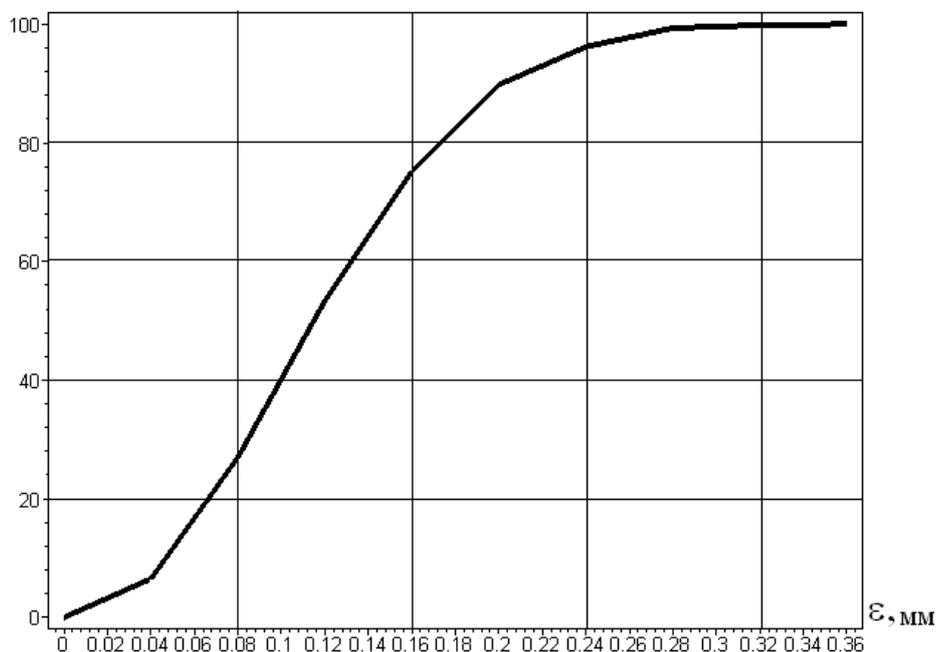


Рис. 5. Интегральная кривая процентного распределения значений суммарного эксцентриситета

## Выводы

Для улучшения управляемости автомобилем УАЗ ряд производителей запчастей предлагают модернизацию шкворневого узла поворотного кулака путем замены полусферической опоры на подшипник качения, долговечность которых в значительной мере зависит от соблюдения технических требований к монтажу.

Перекося осей колец подшипников в модернизированном шкворневом узле приводит к отклонению от соосности шейки шкворня под посадку внутреннего кольца подшипника в верхней опоре относительно шейки шкворня в нижней опоре. Сборочная размерная цепь, позволяющая определить величину этого отклонения является векторной размерной цепью со звеньями-эксцентриситетами.

Для анализа векторной размерной цепи, соответствующей модернизированному шкворневому узлу разработана имитационная модель, адекватность которой подтверждается соответствием результатов расчёта положениям теории вероятности.

Автоматизированные расчёты позволили получить качественную картину распределения возможных отклонений, вычислить математическое ожидание и вероятное максимальное значение суммарного эксцентриситета, а также установить вероятный процент брака при сборке узла.

## Список литературы

1. Размерный анализ шкворневого узла автомобиля УАЗ с подшипником качения / А.М. Фирсов, А.Г. Овчаренко, Х.Г. Карагужин, В.В. Смирнов // Инновации в

машиностроении: сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции, 28–30 сентября 2017 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – С. 167–173.

2. ГОСТ 3325–85 Подшипники качения. Поля допусков и технические требования к посадочным поверхностям валов и корпусов. Посадки. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 40 с.

3. *Henzold G.* Geometrical dimensioning and tolerancing for design, manufacturing and inspection. – London: Gardners Books, 2006. – 416 p.

4. *Тверской М.М.* Расчет размерных цепей со звеньями-эксцентриситетами // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2005. – Вып. 6, № 1 (41). – С. 168–180.

5. *Смирнов В.В., Фирсов А.М., Овчаренко А.Г.* Модель определения положения замыкающего звена плоской векторной размерной цепи со звеньями-эксцентриситетами [Электронный ресурс] // Южно-Сибирский научный вестник. – 2017. – № 4 (20). – С. 259–262. – URL: <http://s-sibsb.ru/issues-of-the-journal.html?sobi2Task=sobi2Details&catid=46&sobi2Id=419>.

## ANALYSIS OF PLANE VECTOR DIMENSIONAL CHAIN FOR MODERNIZED PIVOT UNIT OF CAR UAZ

**Firsov A. M.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: [firsov.am@yandex.ru](mailto:firsov.am@yandex.ru)

**Ovcharenko A. G.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: [tmk@bti.secna.ru](mailto:tmk@bti.secna.ru)

**Smirnov V. V.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: [smirnov@bti.secna.ru](mailto:smirnov@bti.secna.ru)

Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University, 27 Trofimova str.,  
Biysk, 659305, Russian Federation

### Abstract

The authors consider the upgrade of the steering knuckle support for UAZ-3163. This modernization consists in the fact that instead of hemispherical supports in the connection there are rolling bearings. Qualitative analysis says that when assembling a unit, the cylindrical surfaces of the parts will be located with deviations from alignment with each other. The actual deviation from alignment in the assembled node corresponds to the total eccentricity - the closing link of the vector dimension chain. The component links-eccentricities of this dimensional chain are random variables; they have a statistical distribution that obeys Rayleigh's law. The authors developed a simulation mathematical model. This model allows to determine the probable value of the total eccentricity, and also to calculate the probable percentage of rejects during assembly of the unit. The result of the computational experiment shows that the probable rejection at the assembly of the pivot unit will be about 78%. This raises questions about the feasibility of this modernization.

### Keywords

Car UAZ, steering knuckle support, kingpin, tolerance chains, eccentricity, durability.

УДК 621

**ОСОБЕННОСТИ КИНЕМАТИКИ ПРОЦЕССА ВЭН ТВЧ  
ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ\***

*Г.О. ЧА<sup>1,2</sup>, аспирант  
В.Ю. СКИБА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент  
(<sup>1</sup>НГТУ, г. Новосибирск,  
<sup>2</sup>КТИ НП СО РАН, г. Новосибирск)*

**Ча Г.О.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
Новосибирский государственный технический университет,  
630058 г. Новосибирск, ул. Русская, 41  
Конструкторско-технологический институт научного приборостроения  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
e-mail: Grigoriy\_olegovich@mail.ru

В данной статье рассматриваются схемы относительного расположения и перемещения инструмента и детали в условиях комбинированной обработки на гибридном оборудовании на переходе поверхностной закалки деталей вращения.

Был проведен анализ различных схем поверхностной закалки высокоэнергетическим нагревом токами высокой частоты (далее ВЭН ТВЧ) и разработана методика их выбора при конструировании гибридного оборудования для решения технологических задач в зависимости от конструктивных особенностей обрабатываемых заготовок, требований к поверхностному слою, условий работы в узле или механизме и серийности производства.

**Ключевые слова:** гибридное металлорежущее оборудование, высокоэнергетический нагрев, токи высокой частоты, кинематический анализ

**Введение**

Типовой технологический процесс при комбинированной обработке для получения поверхностей с заданной точностью, физико-механическими свойствами и параметрами качества поверхностного слоя на гибридном оборудовании предусматривает 3 основных перехода [1-11]:

- 1) Предварительная обработка резанием.
- 2) Поверхностная закалка.
- 3) Финишная механическая обработка.

В данной работе рассматривается второй переход при обработке на гибридном оборудовании, а именно поверхностная закалка ВЭН ТВЧ при использовании кинематики гибридного металлорежущего оборудования токарной группы.

Для достижения наибольшей концентрации энергии обработка осуществляется индуктором петлевого типа с магнитопроводом с минимальными технологически возможными зазорами ( $\Delta=0,1...0,5$  мм) и минимальной шириной активного провода индуктора  $b=1,2...2$  мм, рисунок 2. За счет этого удельная мощность индукторов и производительность закалки повышается в несколько раз. Так же снижаются остаточные закалочные напряжения, и величина деформация деталей [12-17].

---

\* Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, код проекта: 9.11829.2018/11.12.

**Кинематика процесса ВЭН ТВЧ**

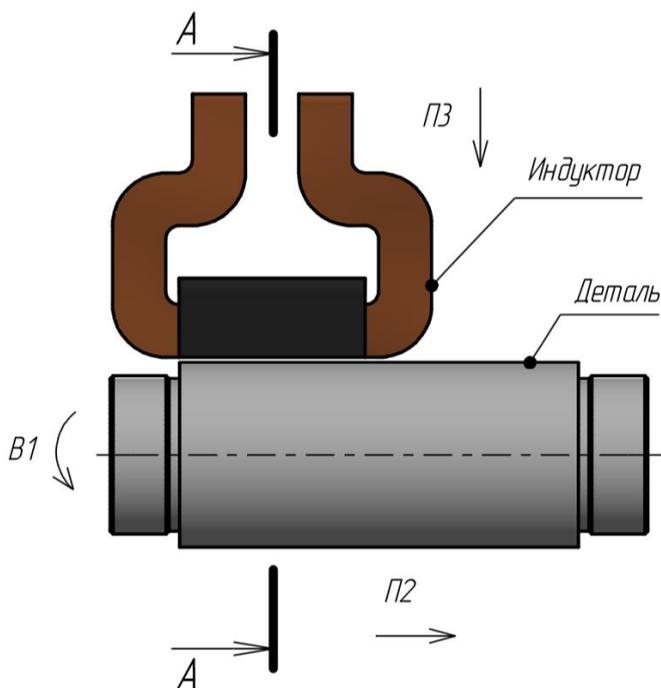


Рис. 1. Процесс ВЭН ТВЧ

В общем случае ВЭН ТВЧ (рисунок 1) осуществляется подводом инструмента к детали с минимальным зазором  $\Delta$  и дальнейшим его относительным движением. При этом возможны несколько вариантов относительного положения и перемещения индуктора и детали, обладающими своими особенностями.

Первая схема предполагает подвод индуктора к детали (движение ПЗ) и медленное вращение детали вокруг своей оси – движение подачи (В1). Главное движение при этом отсутствует. В этом случае ширина закаленной области будет равна длине активной области индуктора (далее просто индуктора).

При данной схеме неизбежно возникновение зоны отпуска в месте перекрывания обработанной и обрабатываемой поверхностей (рисунок 2), а ее наличие предполагает локальную

неравномерность структуры поверхностного слоя, различную твердость и остаточные напряжения, что негативно сказывается на качестве поверхностного слоя и ограничивает область применения подобных деталей в узлах и механизмах машин.

Также при данной схеме существует ограничение на максимальную ширину обработки, зависящее от необходимой удельной мощности и обусловлено ограничением эффективной мощности генератора. Данная схема подходит для деталей с шириной  $b \leq L$ , где  $L$  – длина индуктора.

Вторая схема от первой отличается лишь тем, что для обработки деталей с шириной  $b \geq L$  необходимо еще одно элементарное движение (П2) – перенос индуктора на соседний участок детали. Таким образом, при данной схеме появляется еще одна зона отпуска – не только в осевом, но и в диаметральном сечении, связанная с движением деления.

Третья схема предполагает подвод индуктора к детали (ПЗ), медленное вращение детали вокруг своей оси (В1) и перемещение инструмента в осевом направлении детали (П2). Траектория движения инструмента в этом случае представляет собой винтовую линию и получается за счет двух подач – радиальной и осевой. Главное движение при этом отсутствует. Зона отпуска присутствует в виде винтовой полосы.

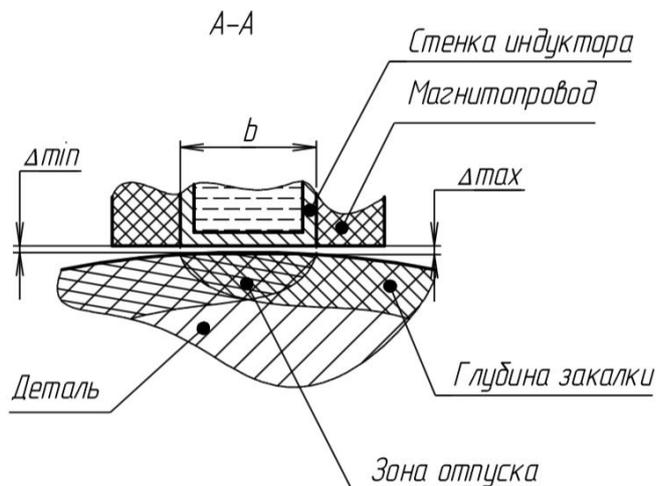


Рис. 2. Сечение А-А рисунка 1

Также существуют схемы обработки, позволяющие исключить появление зон отпуска. Для этого необходимо главное движение. Четвертая схема предполагает расположение индуктора в осевом направлении заготовки, рисунок 1. Главным движением является быстрое вращательное движение заготовки (В1), а движением подачи является движение инструмента вдоль оси обрабатываемой детали (П2). Эта схема предполагает обработку цилиндрической поверхности «на проход» (рисунок 3).

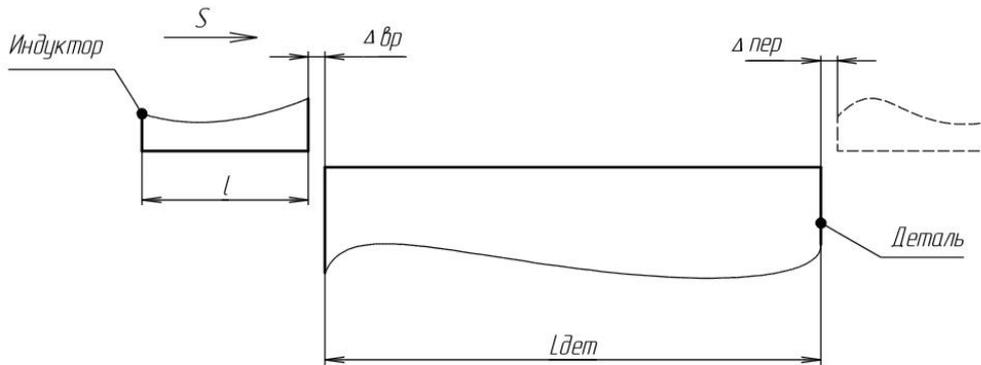


Рис. 3. Поверхностная закалка ВЭН ТВЧ «на проход»

Это необходимо для обеспечения постоянства времени воздействия  $T$  магнитного поля индуктора на локальный объем материала в каждом сечении.

$$T = \frac{L}{S} \quad (1),$$

где

$L$  – Длина рабочей области индуктора, м;  $S$  – Величина подачи, м/мин.

При обработке деталей шириной  $b \leq L$  длины активного провода индуктора движение подачи отсутствует.

Пятая схема с тангенциальным расположением индуктора, рисунок 4:

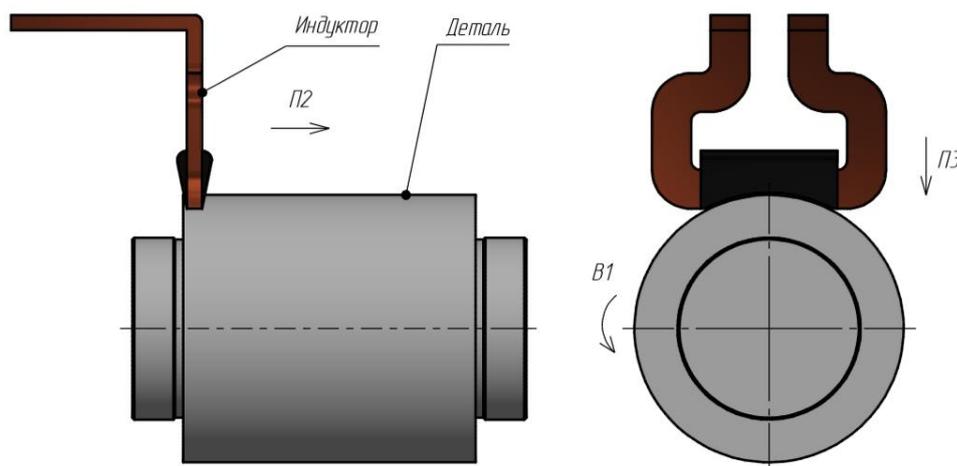


Рис.4. Элементарные движения обработки

При данной схеме индуктор располагается в тангенциальном направлении относительно вращающейся заготовки. Главное движение – вращение заготовки (В1), движение подачи –

перемещение инструмента в осевом направлении (П2). Этот способ позволяет осуществлять закалку без зоны отпуска и без ограничения по ширине цилиндрической части. Однако, главным недостатком данной схемы является то, что для различных диаметров заготовок необходимо изготовление отдельного инструмента.

## Выводы

Каждая из приведенных схем обработки обладает своими преимуществами и недостатками. И осуществлять выбор той или иной схемы относительного расположения и перемещения детали и инструмента необходимо в зависимости от конструктивных особенностей обрабатываемых заготовок, требований к поверхностному слою, заданных чертежом, условий работы в узле или механизме, рациональности использования при условиях различной серийности производства. Зная эти технологические особенности можно выбрать наиболее оптимальную схему. Из результатов можно определить методику выбора схем обработки по таблице 1.

Таблица 1

Выбор схемы обработки

	Первая схема	Вторая схема	Третья схема	Четвертая схема	Пятая схема
Возможность обработки деталей:	$\leq$ ширины индуктора	$\geq$ ширины индуктора	$\geq$ ширины индуктора	$\leq, \geq$ ширины индуктора	Любые детали
Зона отпуска	+	+	+	-	-
Серийность	с/к/с	ед, м/с	ед, м/с, с, к/с	ед, м/с, с, к/с	с, к/с

## Список литературы

1. *Moriwaki T.* Multi-functional machine tool // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 57, iss. 2. – P. 736–749. – doi: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.
2. *Garro O., Martin P., Veron M.* Shiva a multiarms machine tool // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1993. – Vol. 42, iss. 1. – P. 433–436. – doi: 10.1016/S0007-8506(07)62479-2.
3. *Архипов П.В., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С.* Совершенствование оборудования под процессы комбинированной обработки // Вестник Таджикского технического университета. – 2013. – Т. 2, № 2. – С. 32–37.
4. Совершенствование технологических процессов машиностроительных производств / А.С. Янюшкин, С.О. Сафонов, Д.В. Лобанов и др. – Братск: Изд-во БрГУ, 2006. – 302 с.
5. *Макаров В.М.* Комплексированные технологические системы: перспективы и проблемы внедрения // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2011. – № 6 (64). – С. 20–23.
6. *Абрамсон С.И.* Повышение производительности металлорежущих станков при применении групповых методов обработки. – М.: НИИмаш, 1981. – 56 с.

7. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality / V.Yu. Skeebe, V.V. Ivancivsky, A.V. Kutyshkin, K.A. Parts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 126. – P. 012016. – doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012016.

8. Выбор наиболее рациональных методов обработки на гибридном металлорежущем оборудовании на примере цилиндрической поверхности / Г.О. Ча, П.Ю. Скиба, Ю.В. Вшивкова, А.Н. Лобко // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4, № 2. – С. 66–71.

9. Дружинский И.А. Концепция конкурентоспособных станков. – Л.: Машиностроение, 1990. – 247 с.

10. Nagae A. Development trend of multi-tasking machines // Proceedings of the 11th International Conference on Machine Tool Engineers, Tokyo, Japan, 3–5 November 2004. – Tokyo, 2004. – P. 312–323.

11. A review of hybrid manufacturing processes – state of the art and future perspectives / Z. Zhu, V.G. Dhokia, A. Nassehi, S.T. Newman // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. – 2013. – Vol. 26, iss. 7. – P. 596–615. – doi: 10.1080/0951192X.2012.749530.

12. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Степанова Н.П. Методика назначения рациональных режимов поверхностной закалки сталей с использованием концентрированных источников нагрева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). -2006. -№ 4 (33). -С. 17-19.

13. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Зуб Н.П. Методика назначения режимов обработки, обеспечивающих рациональное распределение остаточных напряжений при поверхностной закалке ВЭН ТВЧ // Научный вестник НГТУ. -2008. -№ 3 (32). -С. 83-94.

14. Иванцовский В.В., Скиба В.Ю., Степанова Н.П. Назначение режимов поверхностной закалки с использованием концентрированных источников нагрева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2005. – № 3 (28). – С. 22–24.

15. Ivancivsky V., Parts K., Popov V. Depth distribution of temperature in steel parts during surface hardening by high frequency currents // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 788. – P. 129–135. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.129.

16. The features of steel surface hardening with high energy heating by high frequency currents and shower cooling / V.V. Ivancivsky, V.Y. Skeebe, I.A. Bataev, D.V. Lobanov, N.V. Martyushev, O.V. Sakha, I.V. Khlebova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 156. – P. 012025. – doi: 10.1088/1757-899X/156/1/012025.

17. Formation of high-carbon abrasion-resistant surface layers when high-energy heating by high-frequency currents / N.V. Plotnikova, V.Y. Skeebe, N.V. Martyushev, R.A. Miller, N.S. Rubtsova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 156. – P. 012022.

## INDUCTION HARDENING KINEMATIC FEATURES OF INTEGRATED PROCESSING

**Cha G.O.**<sup>1,2</sup>, Ph.D. student, e-mail: Grigoriy\_olegovich@mail.ru

**Skeeba V. Yu.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: skeeba\_vadim@mail.ru

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>2</sup> Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering Siberian Branch RAS, 41 Russkaya str., Novosibirsk, 630058, Russian Federation

### Abstract

This article investigates different schemes for the tool-part positioning and movement of integrated processing on hybrid equipment at the operation of surface hardening of rotating steel parts.

Different schemes of surface hardening by high-energy heating with high-frequency currents were analyzed. A selection method of the scheme depending on the workpieces design features, the requirements to surface layer, the operating conditions and production seriality was developed.

### Keywords

hybrid equipment, high-energy heating, high-frequency currents, kinematic analysis

### Funding

The results were obtained under the state task of the Ministry of Education and Science of Russia, project code: 9.11829.2018/11.12.

УДК 539.3:666.9-16;621.9

**МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ТВЕРДОГО СПЛАВА  
ПРИ ЗАТАЧИВАНИИ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ  
КОМПОЗИТОВ**

*Д.В. ЛОБАНОВ, доктор техн. наук, доцент,  
Н.В. МУЛЮХИН, ассистент,  
(ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары)*

**Лобанов Д.В.** – 428015 г. Чебоксары, пр-т Московский, д. 15,  
Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова  
e-mail: lobanov@front.ru

В работе рассмотрены вопросы, касающиеся перспектив применения неметаллических композиционных материалов в конструкциях для различных отраслей промышленности. Отмечена специфика и трудности лезвийной обработки композитов, связанные с их особыми свойствами, которые качественно отличают от резания традиционных конструкционных материалов. Эти проблемы значительно снижают эффективность лезвийной обработки и качество обрабатываемой поверхности. Приведены, принципиальные схемы описывающие процесс взаимодействия шлифовального круга с режущим элементом при затачивании. Предложены пути решения проблемы за счет прогнозирования разрушения режущего элемента твердосплавного инструмента для обработки неметаллических композитов. Приведено описание методики, основанной на теории хрупкого разрушения материала, позволяющей повысить качество режущей кромки твердосплавного инструмента за счет выбора рациональных инструментальных материалов и условий их затачивания. Сформулированы выводы и перспективы дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** шлифование, прогнозирование, поврежденность, твердый сплав, режущий инструмент, качество, неметаллические композиты.

**Введение**

Применения неметаллических композиционных материалов, по отношению к металлическим конструкционным: в авиастроении, нефтяной и горнодобывающей отрасли, автомобилестроении, вагоностроении, судостроении эта доля варьируется от 1,5% до 20% [1].

Такое широкое применение в различных отраслях промышленности композиты получили из-за уникального сочетания их физико-механических свойств: малый удельный вес, диэлектрические и теплоизоляционные свойства, высокая коррозионная стойкость, прочность, упругость и т.д.

В производстве готовые детали из неметаллических композитов зачастую получают на заготовительной стадии, пытаясь уйти от их механической обработки. Но, получаемое качество необработанных поверхностей заготовки и погрешности их формы взаимного расположения, не дают возможности обеспечения точности сопрягаемых деталей сборки, а также снижает ресурс работы подвижных компонентов. Чтобы устранить перечисленные недостатки, необходимо полученные на заготовительной стадии изделия дополнительно подвергнуть лезвийной обработке [2 - 4].

При механической обработке деталей из композитов возникает много трудностей, связанных со спецификой процесса резания неметаллических композитов: низкий ресурс инструмента, появление на обработанной поверхности различных дефектов т.д. [5, 6] Обозначим наиболее значимые из них:

а) низкая стойкость инструмента из-за интенсивного абразивного воздействия наполнителя на лезвие инструмента и высокой упругости обрабатываемого материала, вследствие чего увеличивается трение по задней поверхности инструмента [7, 8];

б) вытекающее из предыдущего пункта появление на обработанной поверхности дефектов в виде прижогов и выгорания матрицы композитов, которое происходит из-за повышенного трения по задней поверхности инструмента, усугубляемое недопустимостью применения СОЖ, в связи с гигроскопичностью многих неметаллических композитов [9];

в) как следствие – неудовлетворительное качество обработанных поверхностей деталей из неметаллических композитов, возникающее из-за недостаточного качества режущей кромки инструмента [10].

Требуется проведение дополнительных исследований, направленных на повышение эффективности лезвийной обработки неметаллических композитов.

## Теория

Решение вышеперечисленных проблем возможно при использовании в конструкциях инструмента высокопрочных материалов, рациональных геометрических параметров режущего элемента и режимов резания, позволяющих повысить работоспособность инструмента [11,12]. Существенное внимание необходимо уделить и качеству подготовки режущего лезвия, выбору метода формообразования инструмента [13, 14].

Предварительные исследования позволили выявить марки твердых сплавов, обеспечивающие высокую работоспособность лезвийного инструмента для обработки неметаллических композитов [15-18].

Однако формообразование качественного режущего лезвия инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов, оснащенного твердыми сплавами, традиционными методами шлифования не эффективна [19, 20]. Требуется методика для выявления и прогнозирования поврежденности твердого сплава, позволяющая оценить напряженно-деформированное состояние в при формообразовании режущего лезвия со специфической для обработки композитов геометрией.

Обозначим следующие условные геометрические параметры, характеризующие затачиваемый элемент: ширина  $a$  (мм), длина  $b$  (мм), высота  $c$  (мм), угол заострения  $\beta$ . Режимы затачивания: продольная подача  $S_{пр}$  (м/мин), поперечная подача  $S_{поп}$  (мм/дв.ход), глубина резания  $t$  (мм). Условия закрепления и основные движения резания показаны на принципиальной схеме, представленной на рис. 1.

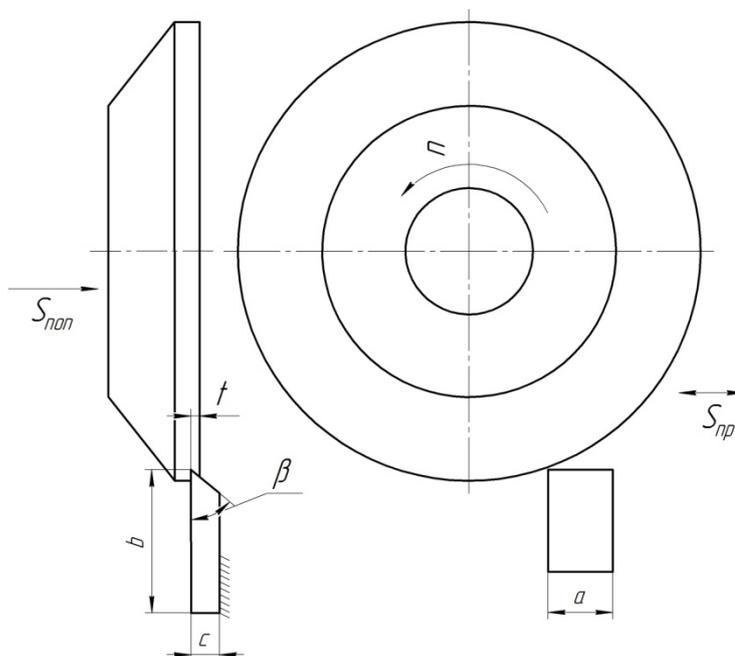


Рис.1. Принципиальная схема затачивания пластины

Для описания процесса объемного разрушения и напряженно-деформированного состояния твердосплавного режущего клина при затачивании сделаем ряд допущений:

1. Воздействие шлифовального круга заменим его действием скорости сдвига (рис. 2).

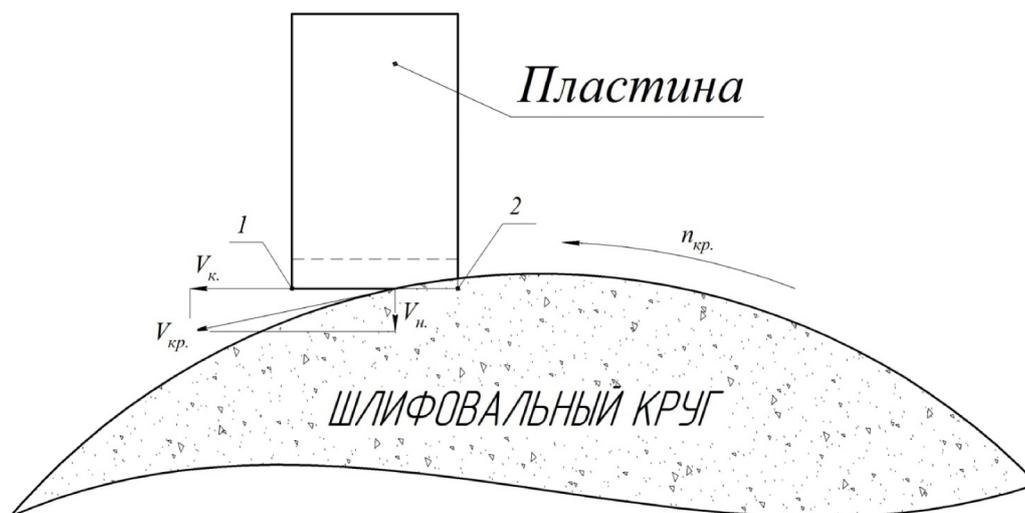


Рис.2. Принципиальная схема задания скорости сдвига.

На режущую кромку затачиваемой пластины наложена касательная скорость смещения снимаемого слоя  $V_k$ , которая имитирует воздействие шлифовального круга бесконечно большого радиуса. Как видно из рис. 2, нормальная составляющая результирующей скорости  $V_n$  достигает максимального значения вдоль затачиваемой кромки пластины и создает растягивающие напряжения, способствующие появлению дефектов на режущей кромке твердосплавного элемента.

2. Материал пластины будем считать однородным, сплошным, изотропным и квазихрупким, т.к. степень деформации до разрушения при сжатии составляет  $\varepsilon_f \sim 4 \dots 5\%$ .

3. Радиус скругления режущей кромки равен нулю, пластина абсолютно острая.

4. Шлифовальный круг работает с постоянной скоростью вращения.

Для описания процесса объемного разрушения режущего клина воспользуемся модифицированной моделью Джонсона-Холмквиста (JH2), которая применяется для описания разрушения хрупких материалов подвергшихся высоким давлениям, деформациям и скорости сдвига, такие материалы имеют высокий предел прочности на сжатие, но имеют низкий предел прочности на растяжение и проявляют прогрессирующее повреждение под нагрузкой из-за роста микротрещин.

Определяющее уравнение эквивалентных напряжений повреждаемого материала определяется из уравнения [21]:

$$\sigma_D^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*),$$

где  $D$  – накопленное повреждение материала,  $\sigma_i^*$  – напряжения неповрежденного пластически деформированного материала,  $\sigma_f^*$  – прочность поврежденного материала;

$$\sigma_i^* = a(P^* + T^*)^n(1 + c \ln \dot{\epsilon})$$

$$\sigma_f^* = b(P^*)^m(1 + c \ln \dot{\epsilon})$$

где  $a, n, c, b, m$  – постоянные материала,  $P^* = P_{HELL}/P$  – безразмерное нормальное давление при различных значениях предела упругости Гюгонио,  $T^*$  – предел прочности на растяжения,  $P_{HELL}$  – предел упругости Гюгонио.

Параметр  $D$  определяется из выражения:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon^P}{\epsilon_f^P}$$

где  $\Delta \epsilon^P$  – инкрементная деформация в данном вычислительном цикле;  $\epsilon_f^P$  – предельная деформация разрушения.

Так как коэффициент дилатансии твердого тела больше нуля [22], то для описания состояния конденсированной фазы материала необходимо использовать уравнение Ми-Грюнайзена в полиномиальной форме:

$$P = A_1 + A_2 + A_3 + (B_0 + B_1) \text{ при } \xi = [(\rho / \rho_0) - 1] > 0 \text{ (сжатие),}$$

$$P = T_1 + T_2 + B_0 \rho_0 E_T, \text{ при } \xi < 0 \text{ (растяжение),}$$

где  $P$  – давление;  $A_1, A_2, A_3, B_0, B_1, T_1, T_2$  – постоянные материала;  $\rho, \rho_0$  – текущая и начальная массовая плотность соответственно;  $E_T$  – тепловая составляющая удельной внутренней энергии.

## Результаты и обсуждение

Беря во внимание то, что качество кромки инструмента определяет качество обработанной поверхности композиционного материала и эффективность процесса резания, введем количественный критерий оценки степени разрушения режущей кромки после затачивания ( $Q$ ). Критерий поврежденности определяется максимальным значением разрушения вдоль режущей кромки твердосплавного инструмента в плоскости нормальной к плоскости затачивания и характеризуется его максимальным значением.

Допустимое значение критерия поврежденности ( $Q_{\text{доп}}$ ) определяется из условия обеспечения необходимого качества обработанной поверхности композитного неметаллического материала и должно быть меньше критического значения ( $Q_{\text{кр}}$ ), то есть соответствовать условию  $Q_{\text{доп}} < Q_{\text{кр}}$ .

Граничное значение критерия поврежденности должно основываться на дополнительных эмпирических исследованиях процесса лезвийной обработки композиционных неметаллических материалов инструментом, оснащенным высокопрочными инструментальными материалами. Это значительно повысит

эффективность и точность прогнозирования напряженно-деформированного состояния при формообразовании режущего лезвия со специфической для обработки композитов геометрией.

### Выводы

Реализация представленной методики при прогнозировании поврежденности твердого сплава позволяет:

I. Снизить объем эмпирических исследований процесса затачивания твердосплавного инструмента за счет сужения диапазона варьирования факторов (силы, напряжения и т.д.) до момента образования критического разрушения.

II. Найти рациональные условия затачивания, приводящие к минимизации повреждений режущего элемента.

III. Провести фундаментальные исследования влияния контактных процессов на качество затачивания.

Данная методика послужит основой для дальнейшего моделирования напряженно-деформированного состояния в твердосплавном режущем элементе инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов.

### Список литературы

1. Батаев А.А., Батаев В.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с.

2. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В. Качество поверхности композиционного материала стеклотекстолит после фрезерования // Инновационные технологии и экономика в машиностроении / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск, 2014. – С. 343–347.

3. Рычков Д.А., Янюшкин А.С. Способ повышения эффективности производства изделий из полимерных композитов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 3 (72). – С. 23–30.

4. Совершенствование технологии формообразования высокопрочных стекловолоконистых композиционных материалов на полимерной основе / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, В.В. Базаркина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 3. – С. 150–153.

5. Рычков Д.А. Специфика резания полимерных композитов: критерий износа режущего инструмента // Прогрессивные технологии и процессы: сборник научных статей 4-й Международной молодежной научно-практической конференции / отв. ред. А.А. Горохов. – Курск, 2017. – С. 160–164.

6. Рычков Д.А., Янюшкин А.С. Технология механической обработки композиционных материалов: монография. – Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2017. – 224 с.

7. Рычков Д.А. Интенсивность износа режущего инструмента при обработке стеклонаполненных полимеров // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2014. – Т. 2. – С. 81–85.

8. Рычков Д.А. Характер износа фрезерного режущего инструмента при обработке плоскостей листового стеклотекстолита // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2016. – Т. 2. – С. 23–27.
9. Контактные процессы при алмазной обработке инструментальных материалов / В.Ю. Попов, А.С. Янюшкин, О.И. Медведева, В.Ю. Скиба // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 3 (23). – С. 68–74.
10. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В. Исследование качества поверхности при формировании режущей кромки фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 582–588.
11. Рычков Д.А. Рационализация параметров фрезерования полимерных композиционных материалов // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 100–105.
12. Шлифовальный инструмент на основе силикокарбида титана / В.Н. Филимоненко, Г.И. Смагин, Н.Д. Яковлев, М.А. Корчагин, В.Ю. Скиба // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 1. – С. 27–30.
13. Yanyushkin A.S., Rychkov D.A. The process of composite materials machining cutting tools profiling // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 944–949.
14. Янюшкин А.С., Сурьев А.А., Ереско С.П. Электроалмазное затачивание твердосплавных инструментов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2003. – Т. 2. – С. 100–111.
15. Янюшкин А.С., Кузнецов А.М. Износостойкость твердосплавного инструмента при обработке древесностружечных плит // Технология машиностроения. – 2008. – № 11. – С. 29–31.
16. Рычков Д.А., Попов В.Ю. Износостойкость твердосплавного фрезерного инструмента при варьировании скорости резания стеклотекстолитов // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4, № 1. – С. 47–52.
17. Расчет гибкого вала, используемого для непрерывной правки шлифовальных кругов / Д.П. Салова, Е.Н. Петряшин, В.С. Григорьев, Н.В. Мулюхин, В.В. Плотников, С.С. Сорокин // Проектирование и перспективные технологии в машиностроении и металлургии: материалы II-ой Республиканской научно-практической конференции / Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. – Чебоксары, 2016. – С. 118–121.
18. Методика расчета величины разрушения режущей кромки твердосплавного инструмента / А.С. Янюшкин, А.М. Кузнецов, С.А. Якимов, Н.П. Петров // Системы. Методы. Технологии. – 2010. – № 8. – С. 139–144.
19. Деформации в технологической системе при шлифовании / П.М. Салов, В.Н. Цай, С.С. Сайкин, Д.А. Юрпалов, Т.Г. Виноградова, Н.В. Мулюхин, Е.А. Андреева, Е.В. Антонова, Д.П. Салова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 3. – С. 44–46.
20. Определение относительной абразивной способности кругов при безалмазной непрерывной правке / П.М. Салов, В.Н. Цай, С.С. Сайкин, Ю.И. Воронцов, Н.В. Мулюхин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 4. – С. 57–59.
21. Johnson G.R., Holmquist T.J. An improved computational constitutive model for brittle materials // AIP Conference Proceedings. – 1994. – Vol. 309 (1). – P. 981–984.
22. Жабко А.В. Предельное напряженное состояние горных пород // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2015. – № 5. – С. 50–55.

**METHODOLOGY FOR PREDICTING THE DAMAGE OF A SOLID ALLOY  
AT THE TOOLING OF A TOOL FOR PROCESSING NONMETALLIC COMPOSITES**

**Lobanov D.V.**, D.Sc. (Engineering), Associate Professor Associate Professor,  
e-mail: lobanov@front.ru

**Muliukhin N.V.**, Assistant, e-mail: muliukhin@mail.ru

I.N. Ulianov Chuvash State University, 15 Prospekt Moskovsky, Cheboksary, Chuvash Republic,  
428015, Russian Federation

**Abstract**

In the work the questions concerning prospects of application of nonmetallic composite materials in designs for various industries are considered. The specifics and difficulties of blade processing of composites, related to their special properties, which are qualitatively different from cutting traditional construction materials, are noted. These problems significantly reduce the efficiency of blade processing and the quality of the surface to be treated. The basic schemes describing the process of interaction of the grinding wheel with the cutting element during grinding are given. The ways of solving the problem are proposed by predicting the destruction of the cutting element of a hard alloy tool for processing nonmetallic composites. A description is given of a technique based on the theory of brittle fracture of a material that makes it possible to improve the quality of the cutting edge of a carbide tool by selecting rational tool materials and the conditions for grinding them. Conclusions and perspectives of further research are formulated

**Keywords**

grinding, prediction, damage, hard alloy, cutting tools, quality, non-metallic composites

УДК 621.9 (0.45)

**МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРИ МОНИТОРИНГЕ И ДИАГНОСТИРОВАНИИ  
РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

*А.Г. ОБЧАРЕНКО, доктор техн. наук, профессор  
А.Н. РОМАШЕВ, канд. техн. наук, доцент,  
В.В. СМИРНОВ, канд. техн. наук, доцент,  
А.М. ФИРСОВ, канд. техн. наук, доцент,  
(БТИ АлтГТУ, г. Бийск)*

**Ромашев А.Н.** – 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27  
Бийский технологический институт (филиал)  
Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова,  
e-mail: mrsi@bti.secna.ru

Развитие и совершенствование систем мониторинга состояния и диагностики режущего инструмента приобретает все большую актуальность. В работе описан ряд возможных диагностических признаков, характеризующих состояние инструмента. Проведенный краткий обзор применяемых методов обработки данных позволил сделать вывод о наиболее распространенных методах обработки получаемых данных.

**Ключевые слова:** мониторинг состояния и диагностика режущего инструмента, критерии состояния и критерии отказа инструмента, методы обработки сигнала.

**Введение**

Системы мониторинга состояния и диагностики технологической системы, которые способны определять дефекты обработки и их расположение, имеют большое значение для условий «безлюдной» обработки. Одним из важных элементов в технологической системе механической обработки является режущий инструмент. «Безлюдное» производство практически возможно только в том случае, когда реализована система мониторинга состояния и диагностики режущего инструмента (МСД РИ).

Износ инструмента оказывает влияние на качество обработанной поверхности и получаемые размеры, в то время как отказ инструмента является основной причиной нештатных ситуаций и незапланированных перерывов во время обработки [1].

Надежная система МСД РИ должна обеспечить реализацию оптимального использования ресурса режущего инструмента. Вполне закономерно, что прогнозирование технического состояния режущего инструмента (требуемое предсказание, в какой степени в будущем сохранится его работоспособность), основанное только на статистическом подходе, не предполагает безошибочных решений. Вследствие этого развитие и совершенствование систем мониторинга состояния и диагностики режущего инструмента приобретает все большую актуальность. Нужно подчеркнуть еще тот факт, что только небольшому числу из всех доступных методов свойственна стадия промышленной реализации.

Для прогнозирования развития неисправности требуется знание возможных видов отказов режущего инструмента, которые могут с ним произойти, и понимание связей между рабочим состоянием режущего инструмента и видами его отказов. Поэтому прежде чем выполнять процедуры прогнозирования, необходимо собрать сведения об имевших место режимах работы режущего инструмента, изменениях рабочих характеристик и параметров технического состояния.



Рис. 1. Виды неисправностей режущего инструмента

Состояние инструмента сильно зависит от неисправностей, которые могут возникнуть во время его использования. Как показано на рисунке 1, переход из работоспособного состояния в неработоспособное, инструмент может выполнить двумя путями [2].

Изнас и деформации режущего инструмента изменяются во времени, создавая условия постепенной потери работоспособности инструмента. С другой стороны, поломки и выкрашивания происходят практически мгновенно, вызывая резкое прекращение обработки. Другими словами, изнас и деформации режущего инструмента приводят к весьма предсказуемой ситуации, что позволяет выполнить мониторинг его состояния, в то время как поломки и выкрашивания, как правило, непредсказуемы и непригодны для мониторинга. Следовательно, имевший место тип неисправности может быть применен для прогнозирования, иначе говоря, для диагностики. Оба типа неисправностей проявляются специфическими параметрами, которые возможно использовать для мониторинга состояния режущего инструмента (рисунок 2)

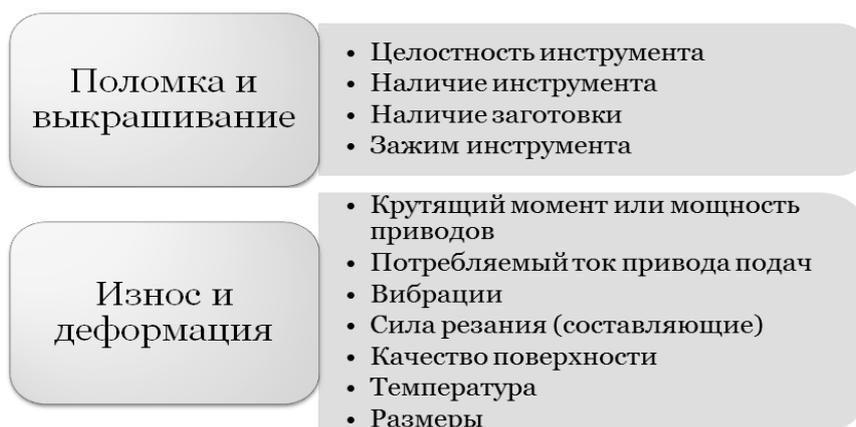


Рис. 2. Контролируемые параметры

### Диагностические признаки состояния инструмента

Систему мониторинга и диагностики режущего инструмента следует рассматривать как совокупность объекта – режущего инструмента – и средств его диагностирования. Характер возможных изменений в состоянии инструмента предопределяет алгоритм диагностирования и структуру такой системы.

На автоматизированном технологическом оборудовании применяют разнообразные виды и типы инструмента. Однако при эксплуатации конкретных инструментов вместе с общими закономерностями изнашивания возникают в зависимости от условий резания свои особенности в изменении состояния инструмента, часто и приводящие к его отказу. Что же касается справочных значений допускаемых износов, критериев отказа, то они могут существенно отличаться от тех, при которых инструмент при полном использовании его ресурса следует заменять.

В связи с этим для обеспечения надёжного диагностирования необходимо, прежде всего, изучить изменения в состоянии инструмента в конкретных условиях его использования, выявить такой изменяющийся параметр, который может служить критерием состояния и критерием отказа инструмента. Ряд параметров характеризует начальное состояние инструмента. В процессе резания изменение каждого из них, в конечном счете, отображается в росте интенсивности изнашивания или выкрашивания. Поэтому, в качестве критерия состояния принимают какой-либо размер очага износа или выкрашивания. Предельное значение этих размеров, при которых начинается разрушение режущей части или нарушаются установленные технической документацией требования обработки, принимают в качестве критерия отказа.

При оптимальных условиях эксплуатации режущего инструмента, имеющего оптимальные параметры начального состояния, доминирующим является отказ из-за изнашивания его рабочих поверхностей. В этом случае в качестве критерия состояния должна быть выбрана такая мера места износа, которая будет удовлетворять следующим требованиям [2]:

- ✓ однозначно во всех стадиях изнашивания вплоть до отказа отображать изменения в состоянии инструмента, как по геометрии режущей части, так и по свойствам инструментального материала;
- ✓ монотонно возрастать в зоне нормального изнашивания;
- ✓ быть удобной для точных измерений;
- ✓ информативно отображаться параметрами процесса резания, принятыми в качестве диагностических признаков.

Измерение повреждений в инструменте для его диагностирования может производиться непрерывно или периодически. Периодические измерения часто связаны с прямыми методами определения конструктивных и геометрических параметров инструмента, с помощью которых можно определить поломку, скалывание, износ режущего участка. Измерения могут осуществляться в рабочей зоне технологического оборудования с прерыванием цикла обработки или в специальной позиции инструментального магазина.

Для использования возможных диагностических признаков, характеризующих состояние инструмента, сначала следует выбрать измеряемые параметры для определения технического состояния инструмента, т.е. для его технического контроля или мониторинга, что является составной частью диагностирования.

При резании взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом вызывает два одновременно протекающих процесса: разрушение режущего инструмента и разрушение обрабатываемого материала. Результатом разрушения обрабатываемого материала является образование стружки и поверхностного слоя детали, которые характеризуются указанными на рисунке 3 параметрами состояния. Значение параметров определяются условиями резания.



Рис. 3. Взаимосвязь параметров в процессе резания

Разрушение инструмента проявляется в виде выкрашивания (скалывания) рабочей части или чаще в виде изнашивания его рабочих поверхностей, что изменяет параметры начального состояния инструмента. Изменяется геометрия инструмента, а вместе с ней основные параметры состояния поверхностного слоя детали и стружки. В свою очередь, параметры состояния детали и стружки влияют на особенности разрушения режущего инструмента и параметры его состояния.

Среди параметров первого и второго блока есть такие, которые непрерывно измеряют, осуществляя мониторинг – наблюдение за развитием во времени. Это износ, скалывание, поломка инструмента, форма стружки, нарост, шероховатость, размер детали и др. [2].

Помимо взаимосвязанных между собой параметров состояния инструмента стружки, и детали, процесс резания характеризуется функциональными параметрами. Из параметров этого третьего блока особое место занимает сила резания. Она появляется в обрабатываемой заготовке при заданном кинематикой резания относительном движении инструмента. Поэтому ровно такая же сила, которая нужна для преодоления сопротивления этому движению – сопротивления разрушению срезаемого слоя и трения, возникающего в движении.

Любые изменения условий резания, вызванные изменением параметров состояния инструмента и стружки, приводят к изменению силы. При этом в связи с нестационарностью процесса резания могут изменяться не только среднее значение силы и направление её действия  $\vec{R}$ , но и амплитуда  $A_R$  и частота её колебания –  $f_R$ .

Сила едина для процессов разрушения обрабатываемого материала и инструмента. Эта сила определяет необходимую работу и мощность для резания. Едино и источники теплоты  $Q$ , возникающие вследствие превращения механической энергии в тепловую энергию и создающие различные, определяемые температурой  $\theta$  и температурными полями тепловые условия процессов разрушения. Так же, как и сила, источники теплоты, а вслед за ними и температурные поля чувствительны к изменениям условий резания и параметров состояния инструмента, детали и стружки. Взаимосвязь параметров трех блоков используется при решении конкретных задач диагностики. Так, при диагностировании инструмента, когда в качестве параметра его состояния принята какая-либо мера места износа, диагностическими признаками её величины, обладающими большей или меньшей информативностью, могут быть один или несколько из параметров состояния стружки, детали, а также функциональных параметров процесса резания. Предельно допустимые значения этих параметров могут служить критериями отказа инструмента. Кроме параметров трех рассмотренных блоков в качестве диагностических признаков находят широкое использование сигналы различных физических явлений, сопровождающих процесс резания. Прежде всего, это параметры колебаний в широком диапазоне частот вплоть до акустико-эмиссионных колебаний (АЭ); электрические параметры (ЭДС резания); параметры магнитных полей у зоны резания и др. Все они отображают контактные процессы при резании, разрушении обрабатываемого материала и инструмента.

### **Методы обработки сигнала**

Важность обработки сигнала состоит в том, что она имеет большое значение для получения достоверной информации из большой ее массы, которую можно извлечь из полученного сигнала. Во многих случаях бывает так, что более сложные методы требуют значительных временных затрат и, следовательно, не подходят, например, для обнаружения поломки инструмента [1]. При этом результаты со сложной функцией анализа чувствительны и к условиям резания, что делает более достоверным диагноз. С другой стороны, упрощенные методы быстры и часто в результате не зависят от изменения условий резания. К сожалению, в то же время они еще и не достаточно чувствительны, чтобы отслеживать постепенный износ инструмента. Перечень методов обработки сигналов, выделенных из литературных источников, представлены на рисунке 4. Среди исследователей наиболее распространенными методами обработки сигналов являются методы определения статистических показателей, временных характеристик, а так же вейвлет-анализ и преобразования Фурье.



Рис. 4. Методы обработки сигнала

### Временные характеристики и статистические показатели

Данные временного интервала не очень информативны как таковые и их регистрация это весьма трудоемкая процедура. В частности, сигналы датчика силы во временном интервале не показывают корреляции с изнашиванием режущего инструмента [1]. В тоже время использование статистических показателей наряду с сигналом временной области может быть многообещающим:

- Градиент осевой силы был идентифицирован в качестве подходящего параметра для предсказания отказа инструмента.

- С ростом износа инструмента увеличивается потребная величина крутящего момента, и соответственно потребляемого тока двигателя главного привода. Эффективная величина этого параметра становится ценной функцией для прогнозирования износа.

### Вейвлет-анализ

Отличительной особенностью вейвлет-анализа является то, что в нем можно использовать семейства функций, реализующих различные варианты соотношения неопределенности. То есть, исследователь имеет возможность выбора между ними, применяя такие вейвлетные функции, которые обеспечивают эффективное решение поставленных задач.

Предполагается, что вейвлетный спектр, в отличие, например, от преобразования Фурье, являясь двумерным и определяя двумерную поверхность, может быть идеальным инструментом для многих приложений, требующих автоматизированный мониторинг производственных операций [1]. К. Чен и Б. Ли в [6] представили технику для мониторинга состояния инструмента на основе вейвлет-анализа сигнала акустической эмиссии. Они пришли к выводу, что их метод может быть использован для МСД РИ, предлагая несколько подходов для организации испытания, в том числе для выбора функции порогового значения и для применения новых широкополосных датчиков. А. Франко-Гаска с соавторами в [3],

проанализировали сигнал датчика потребленного тока привода для оценки состояния инструмента с помощью дискретного вейвлет-преобразования (DWT). DWT позволило предоставить точную оценку износа осевого инструмента при различных условиях обработки.

### **Преобразования Фурье**

Данный метод обработки сигнала, в том числе быстрые преобразования (БПФ), кратковременные преобразования Фурье (STFT) и дискретные преобразования Фурье (ДПФ), предоставляют собой средства для выяснения состава и содержания частотного спектра измеряемого сигнала. В частности, мощность спектра частот сигналов о силовых параметрах при изнашивании инструмента изменяется от узкой зоны до расширенной полосы с набором зон. По мере приближения поломки инструмента мощность высокочастотных составляющих силы резания возрастает, обеспечивая при этом рост полезного признака для обнаружения аварийной ситуации [1].

### **Другие методы обработки сигналов**

В литературе представлены и некоторые другие способы обработки сигналов. Большинство из них применялись при использовании прямых методов оценки для обработки изображений. В работе [4] Брэдли и Вонг делают вывод о том, что все три применяемых метода анализа изображений (анализ гистограммы яркости и контраста, спектральный анализ, текстурный анализ) обеспечивают выявление изменений в структуре поверхности с прогрессирующим износом инструмента. В частности, спектральный метод может также определить начало износа инструмента, что является важным фактором в любой автоматизированной системе мониторинга инструмента. В своей работе [5] Д. Керр подтвердил результаты С. Курады и К. Брэдли [7], которые выявили перепад предельного параметра, в качестве хорошего индикатора износа. Хотя, проведенные тесты, в общем, показывали неутешительные результаты, и только показатели инерции и энтропии продемонстрировали ожидаемый характер монотонного изменения с износом, и только в определенном распределении уровня яркости (КРНБ анализ). В статье [8], М. Сортино представлен инновационный алгоритм для идентификации зоны износа инструмента и системы его обнаружения на основе применения статистической фильтрации изображений режущей кромки. При этом оказалось, что статистический фильтр более эффективен по сравнению со стандартными фильтрами для регистрации границ.

### **Выводы**

Для современного металлорежущего оборудования около 1/5 доли времени общих простоев связано с отказами режущего инструмента, приводящими к снижению производительности и экономическим потерям. Следует отметить, что надежная реализация «безлюдной», а вернее сказать, малолюдной технологии возможна, только если должным образом организована работа системы МСД РИ, отслеживающей и реагирующей не только на постепенные, но и на внезапные отказы инструмента.

Важность обработки данных для получения достоверной информации из большой ее массы, которую можно извлечь из получаемых сигналов проявляется при выборе методов обработки. Проведенный краткий обзор применяемых методов обработки данных позволяет сделать вывод, что среди исследователей наиболее распространенными методами обработки сигналов, на наш взгляд, являются методы определения временных характеристик, статистических показателей, а так же вейвлет-анализ и преобразования Фурье.

## Список литературы

1. *Jantunen E.* A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2002. – Vol. 42. – P. 997–1010.
2. *Ромашев А.Н., Марков А.М.* Анализ состояния вопросов мониторинга и диагностирования режущего инструмента в процессе обработки // Инновации в машиностроении (ИнМаш-2015): сборник трудов VII международной научно-практической конференции, Кемерово, 23–25 сентября 2015 г. – Кемерово, 2015. – С. 153–158.
3. Sensorless tool failure monitoring system for drilling machines / L.A. Franco-Gasca, G. Herrera-Ruiz, R. Peniche-Vera, R.d.J. Romero-Troncoso, W. Leal-Tafolla // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2006. – Vol. 46. – P. 381–386.
4. *Bradley C., Wong Y.S.* Surface texture indicators of tool wear – a machine vision approach // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2001. – Vol. 17. – P. 435–443.
5. *Kerr D., Pengilley J., Garwood R.* Assessment and visualisation of machine tool wear using computer vision // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2006. – Vol. 28. – P. 781–791.
6. *Chen X., Li B.* Acoustic emission method for tool condition monitoring based on wavelet analysis // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2006. – Vol. 33.
7. *Kurada S., Bradley C.* A review of machine vision sensors for tool condition monitoring // Computers in Industry. – 1997. – Vol. 34. – P. 55–72.
8. *Sortino M.* Application of statistical filtering for optical detection of tool wear // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2003. – Vol. 43. – P. 493–497.

DATA PROCESSING METHODS IN MONITORING AND DIAGNOSIS OF CUTTING  
TOOL

**Ovcharenko A.G** D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: shura@bti.secna.ru  
**Romashev A.N.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: alniro@yandex.ru  
**Smirnov V.V.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: v2s0@yandex.ru  
**Firsov A.M.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: fam5417@yandex.ru

Biysk Technological Institute, Branch of Polzunov Altai State Technical University, 27 Trofimova str., Biysk, 659305, Russian Federation

## Abstract

Development and improvement of systems for monitoring the condition and diagnosis of cutting tool is of increasing importance. The work describes a number of possible diagnostic symptoms characterizing the State of the cutting tools. Conducted a brief overview of data processing methods allowed to conclude the most common methods of processing the data received.

## Keywords

condition monitoring and diagnostics of the cutting tool, criteria for status and failure criteria, methods of signal processing tool

УДК 621.785

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ  
И СВОЙСТВА ЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ, ПОДВЕРГНУТОЙ  
ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

*В.А. БУТУХАНОВ<sup>1</sup>, инженер  
Б.Д. ЛЫГДЕНОВ<sup>1</sup>, доктор техн. наук, доцент  
А.М. ГУРЬЕВ<sup>2</sup>, доктор техн. наук, профессор  
Б.С. ЦЫДЫПОВ<sup>1</sup>, аспирант  
(<sup>1</sup> ВСГУТУ, г. Улан-Удэ,  
<sup>2</sup> АлтГТУ, г. Барнаул)*

**Бутуханов В.А.** – 670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В  
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,  
e-mail: butuhanov\_vyacheslav@mail.ru

В работе проведено исследование влияния термоциклирования и других видов термической обработки на измельчение зерна для повышения ударной вязкости эвтектоидной стали, подвергнутой химико-термической обработке. Нагрев при термоциклировании обеспечивался путем закладки образцов в печь, разогретую до 900 °С. Скорость нагрева образцов составила 3 °С / сек. Термоциклическая обработка заключалась в нагреве образцов исследуемой стали до температуры 900 °С для обеспечения условий формирования аустенита, последующем охлаждении на воздухе до температуры 600–650 °С, далее – охлаждение в воде. Было проведено 3 циклов «нагрев – охлаждение». Режим термоциклирования предусматривал на заключительной стадии закалку. Показано, что термоциклирование с 3-мя циклами и последующей закалкой приводит к измельчению действительного аустенитного зерна с 18–26 мкм (непосредственно после химико-термической обработки) до 6–8 мкм. Установлено, что измельчение зерна термоциклированием приводит к существенному повышению ударной вязкости стальных образцов, подвергнутых химико-термической обработке. Применение химико-термической обработки и последующего термоциклирования обуславливает одновременное повышение поверхностной твердости и ударной вязкости эвтектоидной стали и может быть применимо для штампов холодного деформирования.

**Ключевые слова:** термоциклирование, химико-термическая обработка, размер зерна, ударная вязкость

**Введение**

Обеспечение удовлетворительной стойкости холодноштампового инструмента обусловлено комплексом свойств материала, среди них: высокая твердость, удовлетворительная ударная вязкость [1]. Очень часто преждевременный износ инструмента вызван выкрашиванием его рабочих кромок по причине недостаточной твердости. Износостойкость материала определяется главным образом его твердостью. Однако при работе штампа с динамическими нагрузками не менее важное значение имеет ударная вязкость. При низком значении ударной вязкости вероятность хрупкого разрушения выше. Известно, что ударная вязкость тем меньше, чем больше твердость. Таким образом, актуальной задачей является получение одновременно высоких значений твердости и ударной вязкости штампов для холодного деформирования. В настоящее время указанный комплекс свойств обеспечивается путем подбора специальных легированных сталей. Химико-термическая обработка (ХТО) является одним из эффективных методов повышения

износостойкости инструмента и технологической оснастки. ХТО обуславливает возможность замены легированных дорогостоящих сплавов менее дефицитными углеродистыми, упрочненными данным методом. Описано много способов ХТО, обеспечивающих значительное повышение твердости и износостойкости поверхностных слоев сплавов [2–4]. Одним из недостатков традиционной ХТО является крупнозернистая структура, формирующаяся в результате воздействия высокой температуры и длительной выдержки, что приводит к снижению ударной вязкости упрочняемого материала. Достижение высокой ударной вязкости возможно путем получения мелкого зерна [5–7]. Цель данной работы заключалась в исследовании влияния печного термоциклирования на измельчение структуры для повышения ударной вязкости эвтектоидной стали, подвергнутой ХТО.

### Материалы и методы

В качестве материала исследования выбрана инструментальная углеродистая стали У8А. Стальные образцы подвергались ХТО в герметичных контейнерах при  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 6 ч в порошке феррованадия. Затем образцы извлекались, очищались от остатков насыщающей смеси и подвергались термической обработке. Для сравнительной оценки эффективности термоциклирования, проводимого после ХТО, исследовали отжиг на зернистый перлит. Отжиг проводился по режиму: нагрев до  $740\text{--}760\text{ }^{\circ}\text{C}$ , выдержка, непрерывное охлаждение с печью до  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  со скоростью  $30\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{ч}$  с дальнейшим охлаждением на воздухе. Схема приведена на рис. 1.

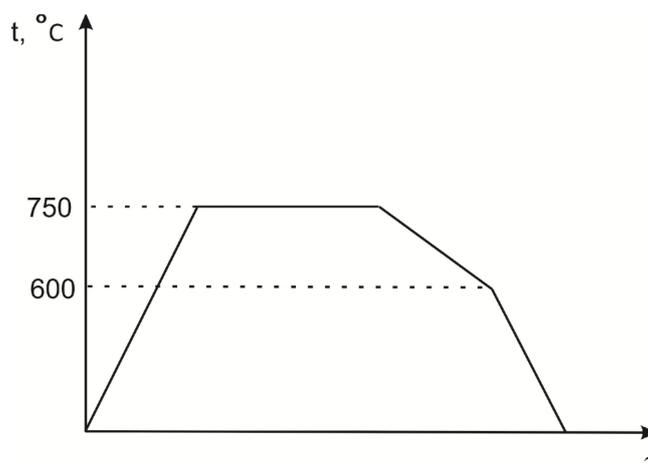


Рис. 1. График изотермического отжига эвтектоидной стали на зернистый перлит

Нагрев при печном термоциклировании обеспечивался путем закладки образцов в печь, разогретую до  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для прохождения полного  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения, охлаждение при термоциклировании необходимо проводить ниже критической точки  $A_{r1}$  на  $30\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это соответствует температурному интервалу  $640\text{--}660\text{ }^{\circ}\text{C}$  или  $650 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, верхний температурный предел термоциклирования определялся температурой разогретой печи, а нижний предел был обусловлен температурой фазового превращения. К помещенному в печь образцу подводилась термопара (ХА), подключенная к мультиметру. Считывая показания термопары, определили скорость нагрева и время, необходимое для прогрева образцов (рис. 2).

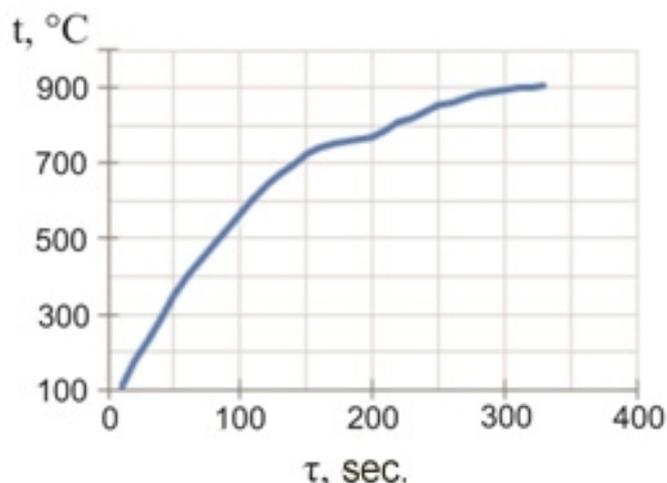


Рис. 2. График нагрева образца из эвтектоидной стали в печи, нагретой до 900 °C

Как видно из графика, стабилизация температуры образца в районе 720–730 °C обусловлена протеканием  $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения, после чего происходит нагрев  $\gamma$ -фазы. Скорость нагрева образцов с исследуемыми размерами составила 3 °C / сек. Таким образом, было установлено, что при ТЦО достаточно 4-х минутной выдержки с момента помещения образца в пространство печи для формирования структуры аустенита. Охлаждение после окончания времени выдержки вели на воздухе до 600–650 °C, далее – в воде, на последнем цикле следовала закалка. Было проведено 3 цикла «нагрев–охлаждение» (рис. 3).

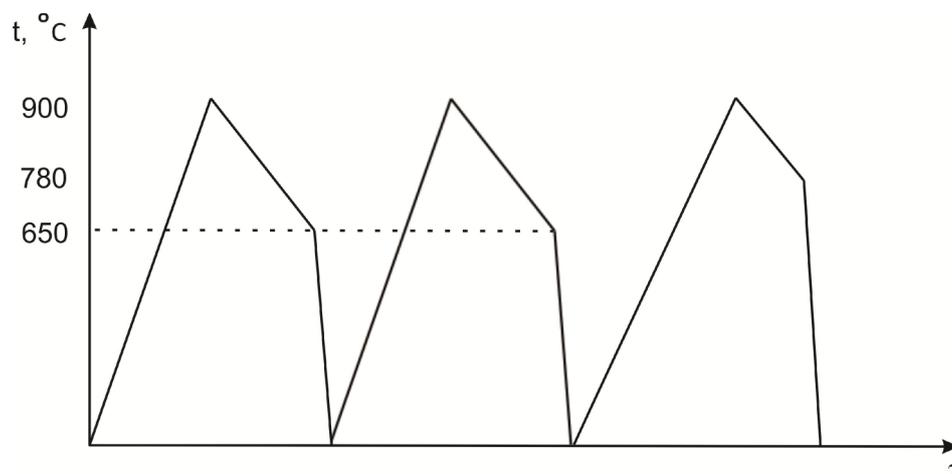


Рис. 3. График термоциклирования с закалкой эвтектоидной стали

Испытания образцов на ударный изгиб проводились при комнатной температуре на маятниковом копре в соответствии с ГОСТ 9454-78.

### Результаты и обсуждение

Выявление размеров зерна в эвтектоидной стали проблематично из-за отсутствия четких границ зерен, высокой степени разнотерности, блочности, дисперсности структуры. Размеры зерен определяли по методу сетки троостита в соответствии с ГОСТ 5639-82. Метод сетки троостита применим для сталей, закаливающихся на мартенсит и предпочтителен для сталей, близких к эвтектоидным. Производился нагрев образцов после

ХТО до температуры закалки с необходимой выдержкой. При выемке из печи образец брали подогретыми клещами за конец, охлаждали в воде до  $\frac{1}{2}$  образца. Затем изготавливается продольный шлиф, травление в 4 %  $HNO_3$ . Границы зерен выявляются в переходной зоне со структурой мартенсит + троостит по сетке троостита, выделяющейся по границам бывших аустенитных зерен (рис. 4).

Образцы (*KCU*) нагревали, выдерживали и охлаждали водой для получения структуры мартенсита. Известно, что первая пластина мартенсита имеет протяженность, соответствующую поперечному размеру зерна аустенита. Таким образом, размеры аустенитных зерен наследуются при закалке. Размеры действительного аустенитного зерна определяли по изображениям изломов, полученных с помощью растрового электронного микроскопа (рисунок 5). Размер зерен определяли с помощью программы микроскопа из выбранных 10 наиболее характерных для фрактограммы зерен. Измерения проводили на пяти фотографиях изломов.

Как видно из представленных рисунков, наибольшее измельчение зерна после ХТО достигается при термоциклировании с 3-мя циклами. После ХТО, проведенной при  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 6 ч, сталь У8А имеет крупные зерна с размерами 18–26 мкм и 26–37 мкм, также присутствуют зерна с размерами 37–54 мкм. Величина действительного аустенитного зерна после ХТО соответствует *G7–G8* по ГОСТ 5639-82, при ТЦО с 3-мя циклами величина зерна составляет *G11–G10*.

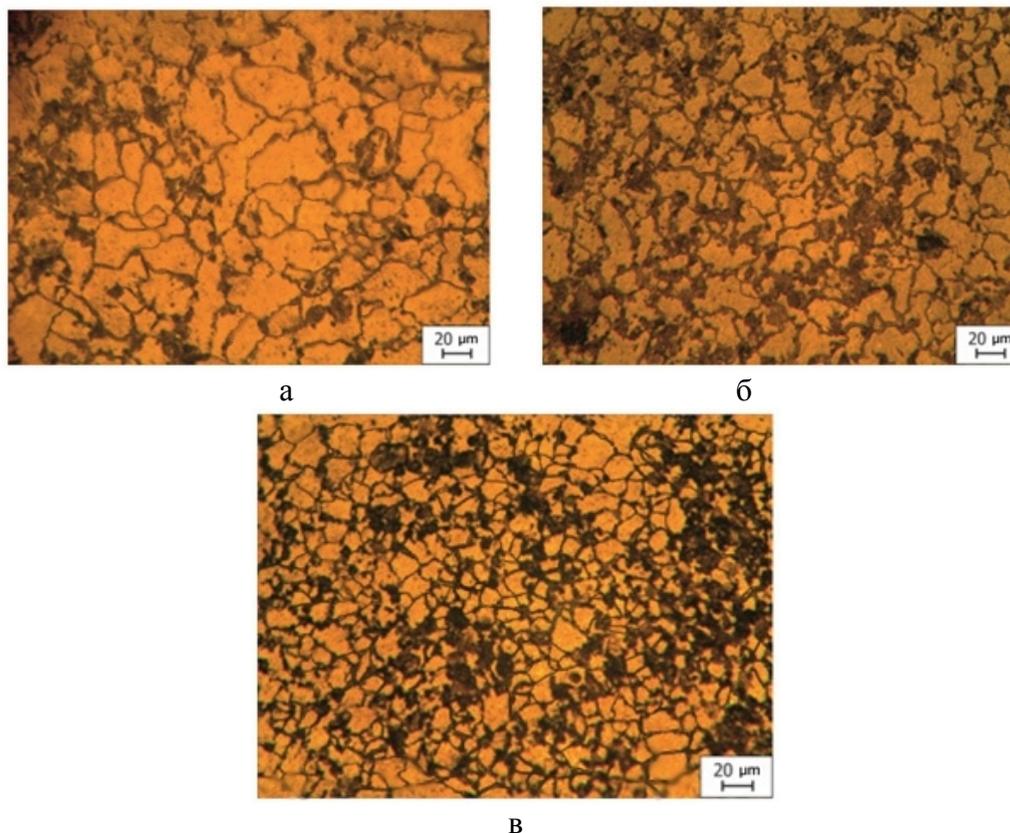


Рис. 4. Микроструктура эвтектоидной стали с трооститной сеткой (ГОСТ 5639-82): после ХТО ( $1000\text{ }^\circ\text{C}$ , 6 ч.) (а); после ХТО и отжига по режиму: выдержка при  $740\text{--}760\text{ }^\circ\text{C}$ , охлаждение с печью до  $600\text{ }^\circ\text{C}$  (б); после ХТО, 3 циклов ТЦО (в).

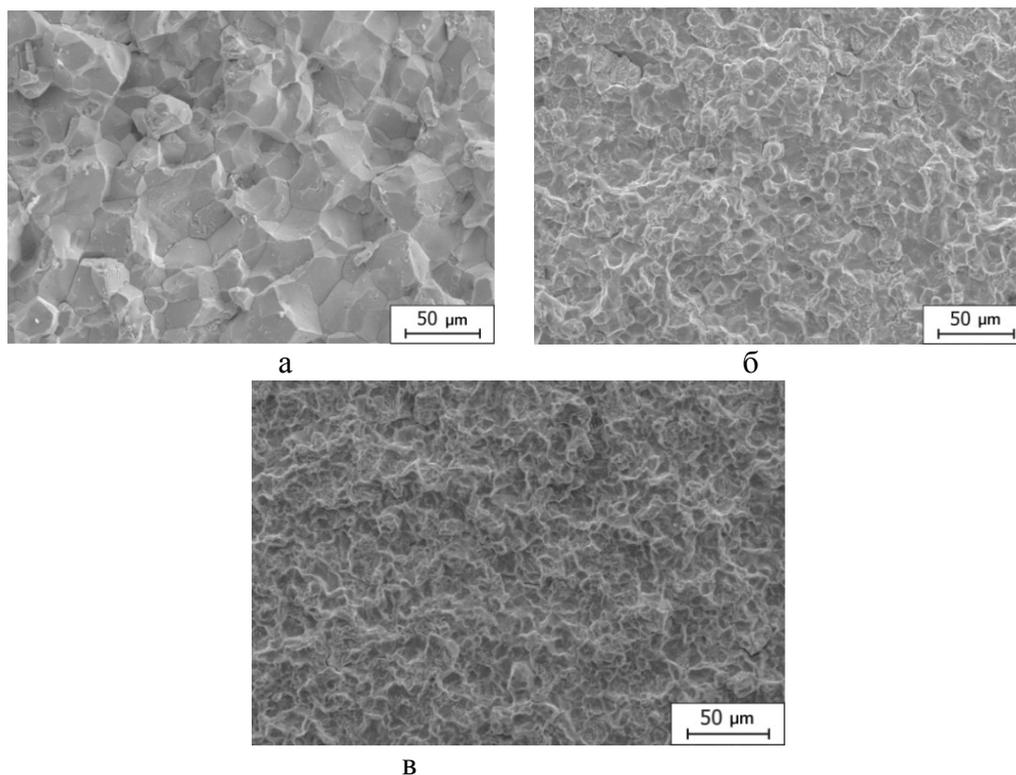


Рис. 5. Изломы эвтектоидной стали с мартенситной структурой: после ХТО (1000 °С, 6 ч.) (а); после ХТО и отжига по режиму: выдержка при 740–760 °С, охлаждение с печью до 600 °С (б); после ХТО, 3 циклов ТЦО (в)

Инструменты, подвергаемые ХТО, в процессе эксплуатации часто подвергаются динамическому воздействию. Для проверки способности материала сопротивляться ударным нагрузкам и выявления склонности к хрупкому разрушению проводили испытания на удар. Сталь У8А, подвергнутая ХТО при высоких температуре и длительности, имеет низкий показатель ударной вязкости (0,5 Дж/см<sup>2</sup>). При сравнении результатов испытаний, приведенных на рисунке, можно сделать вывод о том, что ТЦО с 3 циклами существенно повышает ударную вязкость стали У8А по сравнению со стандартными видами отжига. Так, показатели ударной вязкости после отжигов на зернистый перлит с выдержками при 740–760 °С и 650 °С составляет 6,5–6 Дж/см<sup>2</sup>. Показатель ударной вязкости эвтектоидной стали после ХТО и последующей ТЦО (3 цикла) с изотермическим отжигом на 650 °С составляет 30 Дж/см<sup>2</sup>.

## Выводы

Эвтектоидная сталь, подвергнутая диффузионному насыщению в порошке феррованадия при 1000 °С в течение 6 ч, имеет крупнозернистую структуру с действительным аустенитным зерном размерами, соответствующими номерам G7–G8.

Исследовано влияние отжига на зернистый перлит и ТЦО с 3 циклами на структуру и свойства эвтектоидной стали, подвергнутой ХТО. Показано положительное влияние отжига на зернистый перлит и циклического теплового воздействия на измельчение зерна и уровень ударной вязкости эвтектоидной стали, подвергнутой диффузионному насыщению при высокой температуре и длительной выдержке.

Установлено, что максимальное измельчение действительного аустенитного зерна с 26–37 мкм до 6–8 мкм ( $G11-G10$ ) происходит при ТЦО с 3-мя циклами и закалкой на последнем цикле.

Установлено, что термоциклирование эвтектоидной стали, подвергнутой ХТО при 1000°C в течение 6 часов, приводит к существенному повышению уровня ударной вязкости (0,5 Дж/см<sup>2</sup> до 30 Дж/см<sup>2</sup>) по сравнению с отжигом на зернистый перлит (в 4,6 раз).

### Список литературы

1. Тимощенко В.А. Повышение износостойкости разделительных штампов // Кузнечно-штамповочное производство. – 2000. – № 12. – С. 22.
2. Carbuicchio M., Palombarini G. Effects of alloying elements on the growth of iron boride coatings // Journal of Materials Science Letters. – 1987. – Vol. 6. – P. 1147–1149.
3. Dearnley P.A., Bell T. Engineering the surface with boron based materials // Surface Engineering. – 1985. – Vol. 1, N 3. – P. 203–216.
4. Progressive diffusion coatings / B.D. Lygdenov, A.M. Guriev, V.I. Mosorov, V.A. Butukhanov. – Raleigh, North Carolina, USA: Lulu Press, 2015. – 131 p.
5. Термоциклирование. Структура и свойства / Б.Д. Лыгденов, Ю.П. Хараев, А.Д. Грешилов, А.М. Гурьев. – Барнаул: Системы управления, 2014. – 252 с.
6. Sizov I.G.A., Mishigdorzhyn U.L., Maharov D.M. Study of thermocycling boroaluminizing of carbon steel // Metal Science and Heat Treatment. – 2012. – Vol. 53, iss. 11. – P. 592–597.
7. Мордасов Д.П., Зотов С.В. Термоциклическая обработка штампов для работы в условиях горячего деформирования из стали X12MФ // Вестник ТГТУ. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 481–490.

**A STUDY OF THERMOCYCLING EFFECT ON STRUCTURE AND PROPERTIES  
OF EUTECTOID STEEL AFTER THERMOCHEMICAL TREATMENT****Butukhanov V.A.**<sup>1</sup>, Engineer, e-mail: butuhanov\_vyacheslav@mail.ru**Lygdenov B.D.**<sup>1</sup>, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: lygdenov59@mail.ru**Guryev A.M.**<sup>2</sup>, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: gurievam@mail.ru**Tsydyпов B.S.**<sup>1</sup>, Ph.D. student, e-mail: bulvin@rambler.ru

<sup>1</sup> East Siberia State University of Technology and Management, 40V Klyuchevskaya st., Ulan-Ude, 670013, Russian Federation

<sup>2</sup> I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

**Abstract**

The coarse-grained structure is formed on steel by traditional thermochemical treatment with long duration at high temperatures. This disadvantage leads to decreasing of steel plasticity. Achieving of high plasticity is possible by formation of small grains by using thermocycling after thermochemical treatment. The work investigated the effect of thermocycling and other types of heat treatment on grain size for improving impact of eutectoid steel. The heating during thermocycling was provided by putting steel samples in a furnace preheated to 900 °C. Heating rate was 3 °C / sec. Thermocycling treatment consists of steel heating to a temperature of 900°C, cooling in air to a temperature of 600–650°C, then - cooling in water. It was carried 3 cycles of "heating - cooling". Thermocycling mode in the final stage includes quenching. It is shown that thermocycling with 3 cycles and isothermal annealing at 650°C leads to a refinement of austenite grain from 18–26 microns (after the thermochemical treatment) to 6–8 microns. It is found that grain refinement by thermocycling leads to a significant increase in impact toughness of steel. The use of thermochemical treatment and thermocycling causes simultaneous increase in the surface hardness and the impact toughness of the eutectoid steel and can be applied on dies for cold deformation.

**Keywords**

thermocycling, thermochemical treatment, grain size, impact toughness

УДК 621.789

**ПОВЕРХНОСТНОЕ И ОБЪЕМНОЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ  
ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ\*****В.В. СТОЛЯРОВ, доктор техн. наук, профессор  
(ИМАШ РАН, Москва)****Столяров В.В.** – 101990, Москва, Малый Харитоньевский переулок, 4  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,  
e-mail: vlstol@mail.ru

В работе представлены результаты исследования влияния поверхностной ультразвуковой обработки на структуру и механические свойства ультрамелкозернистых титановых сплавов – технически чистого титана VT1-0 и застехиометрического сплава с памятью формы  $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ . Методами оптической и просвечивающей электронной микроскопии показано, что в поверхностном слое толщиной до 20 мкм ультразвуковая обработка в крупнозернистом титане формирует наноструктуру с размером зерен менее 100 нм, а в наноструктурном никелиде титана дополнительно уменьшает размер кристаллов со 100 до 30 нм. Ультразвуковая обработка сплавов многократно повышает прочность, микро- и нанотвердость поверхностного слоя, уменьшает шероховатость, формирует градиентную наноструктуру, обеспечивая повышение долговечности и расширение функциональных возможностей изделий.

**Ключевые слова:** наноструктура, прокатка с током, ультразвуковое поверхностное упрочнение

**Введение**

Проблема получения наноструктуры в конструкционных материалах относится к числу приоритетных направлений, поскольку это путь создания нового класса материалов с повышенными физико-механическими и функциональными свойствами. Методы, позволяющие формировать наноструктуру либо в объеме [1-3], либо на поверхности [4-6] материала хорошо известны. Особое внимание уделяется методам интенсивной пластической деформации (ИПД), поскольку они позволяют получать беспористые объемные материалы с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой. Сочетание ИПД и холодной прокатки (волочения) позволяет дополнительно измельчить структуру до нанокристаллической [7, 8]. Объемную наноструктуру (50 нм) в полосах из никелида титана с эффектом памяти формы получают методом холодной прокатки с наложением электрических импульсов [9, 10].

К методам получения поверхностных наноструктур можно отнести выглаживание – поверхностную упрочняющую ультразвуковую обработку (УЗО) [11, 12]. Интенсивность деформационного воздействия велика – ультразвуковой инструмент производит порядка 6-10 тысяч ударов на квадратный миллиметр. Особенностью материалов после такого воздействия является формирование наноструктуры в тонком поверхностном слое при сохранении крупнозернистой структуры в объеме.

\* **Финансирование:** Работа поддержана РФФИ, грант №16-58-48001.

**Благодарности:** Автор выражает благодарность д.т.н. *Лесюк Е.А.* и *Петржику М.И.*, соответственно за помощь в проведении УЗО и измерений нанотвердости.

Представляется важным разработать и исследовать такой подход к структурообразованию в конструкционных материалах, при котором возможно сформировать градиентную наноструктуру (НС). Это возможно осуществить при последовательном использовании комбинированных методов объёмного и поверхностного наноструктурирования, в частности, комбинированной деформации методом прокатки с импульсным током и УЗО. Новый подход, заключающийся в создании градиентной наноструктуры, может позволить регулировать размер зерен в объеме и на поверхности в зависимости от конфигурации и функционального назначения изделия. В качестве исследуемых материалов выбраны технически чистый титан и сплав TiNi с памятью формы, являющийся одним из перспективных конструкционных материалов машиностроения будущего. Цель настоящей работы – демонстрация возможности использования метода УЗО для получения или дополнительного измельчения наноструктуры в титановых сплавах.

### Материал и методы исследования

Исследуемые материалы представляют собой полосы размером 2.1 x 8 x 150 мм<sup>3</sup> из технически чистого титана ВТ1-0 и титанового сплава с памятью формы Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub>. В чистом титане отжигом сформирована крупнозернистая структура, а в никелиде титана прокаткой с применением импульсного тока получена наноструктура [9]. Прокатку выполняли на двухвалковом прокатном стане с диаметром валков 120 мм, оборудованном генератором импульсного тока [10]. Для подведения и съема тока использовали скользящий контакт (отрицательный полюс) до зоны деформации образца и один из валков (положительный полюс), соответственно. Прокатку вели при плотности однополярного импульсного тока около 100 А/мм<sup>2</sup>, длительности импульса около 10<sup>-4</sup>с и скважности 12.5, при комнатной температуре со скоростью 4 м/мин в пошаговом режиме при регулируемом разовом обжатии по толщине (~ 25 мкм). После каждого шага прокатки образцы охлаждали в воде, чтобы избежать влияния деформационного разогрева. Накопленная величина истинной деформации составляла  $\epsilon=1.9$ . Последеформационный отжиг осуществляли при температуре 450°C и длительности выдержки 1 час. Толщина образцов после прокатки составляла 0.3 мм.

Далее образцы подвергали УЗО, использующей энергию механических колебаний инструмента – индентора [11]. УЗО проводилась со следующими параметрами: при фиксированной частоте 20 кГц, амплитуде колебаний инструмента 20 мкм и диаметре шарика индентора 10 мм, скорости обработки 0.3 м/мин, статическое усилие прижима инструмента к обрабатываемой поверхности ( $P_{ст}$ ) 50 Н, 100 Н и 150 Н, подача инструмента 0.1 мм.

Исследование микроструктуры проводилось на оптическом и просвечивающем электронном микроскопе JEM-2000. Образцы подвергали последовательно шлифовке, механической и ионной полировке аргоном. Для определения микро- и нанотвердости использовали микротвердомер ПМТ-3 и нанотвердомер CSEM ATSM E 2546-07 с нагрузкой 20 мН. Растяжение выполнено на испытательной машине «Instron». Для измерения шероховатости применяли профилограф БВ-7669.

### Экспериментальные результаты и обсуждение

#### *Титан ВТ1-0*

УЗО крупнозернистого титана привела к созданию градиентного поверхностного слоя толщиной более 100 мкм, в котором размер зерен увеличивается от поверхности к центру (рис.1а). Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) показала, что размер зерен в поверхностном слое составляет 100 нм и менее (рис.1б).

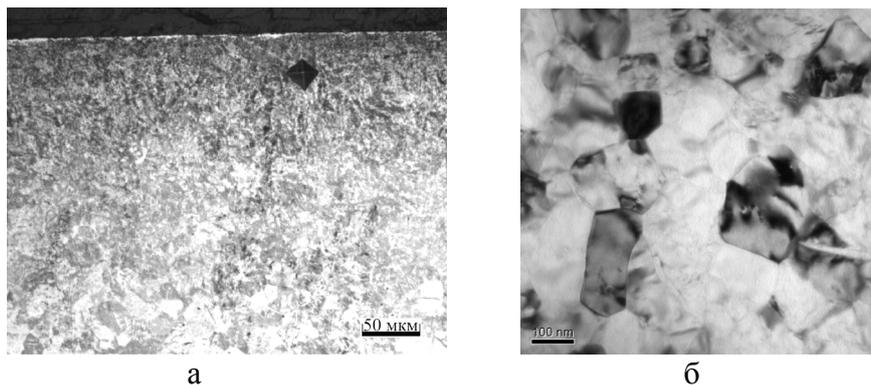


Рис 1. Вид микроструктуры Ti в поперечном сечении после УЗО: а – оптика; б – ПЭМ

УЗО эффективно упрочняет и улучшает качество поверхности с одновременным повышением модуля упругости  $E$  и снижением глубины восстановленного отпечатка  $h_f$  (табл.1). Измерение твердости на поверхности и в объеме свидетельствует о многократном упрочнении и уменьшении шероховатости после УЗО. Различие в микро- и нанотвердости связано с методическими особенностями наноиндентирования – локальностью отпечатка и скоростью деформации [3].

Таблица 1

Твердость, модуль упругости, шероховатость титана до и после УЗО

обработка	место отпечатка	Нано твердость, МПа	Hv, МПа	E, ГПа	h <sub>f</sub> , нм	Шероховатость, МКМ	
						Rz	Ra
Без обработки	поверхность	3000	1920	114.5	468	2.45	4.4
	в объеме	2900	1470	114.2	470		
УЗО	поверхность	7400	4100	127.5	260	0.4	0.95
	в объеме	3100	1500	114.6	470		

$h_f$  – глубина восстановленного отпечатка, нм

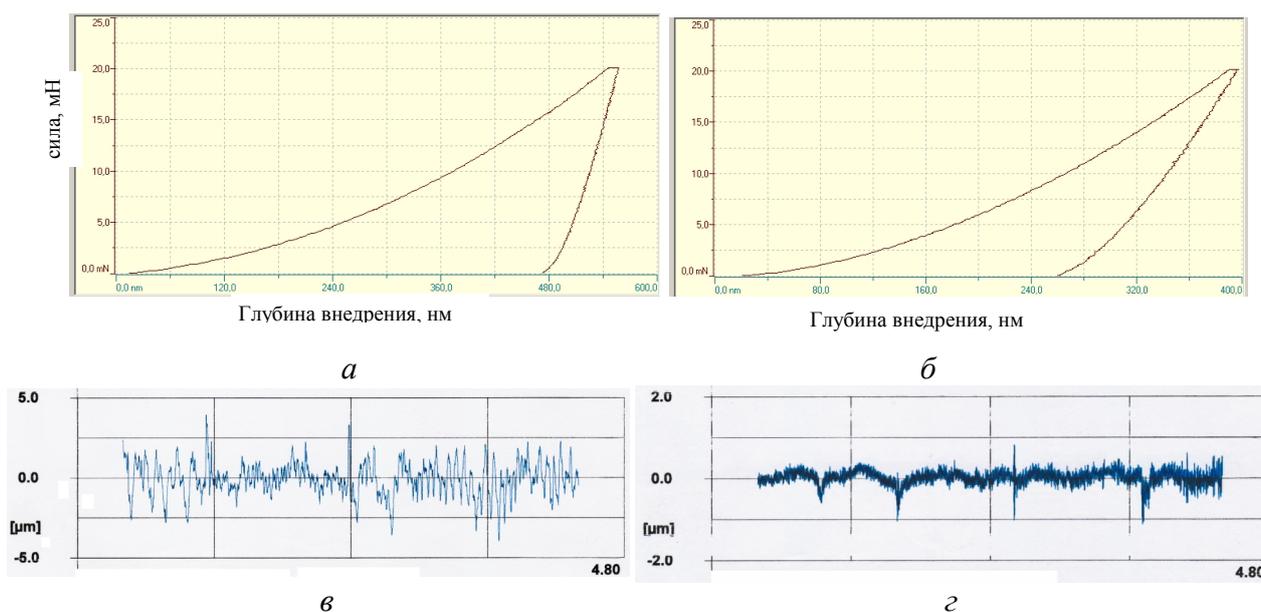
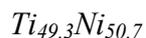


Рис. 2 Кривые наноиндентирования (а, б) и профилограммы (в, г) на поверхности титана: а – до УЗО; б – после УЗО.



Образцы никелида титана после прокатки с током и последующего отжига имели однородную наноструктуру с размером зерен 40-50 нм. Последующая УЗО этих образцов дополнительно уменьшает размер зерен на поверхности до 10-15 нм (рис. 3а), а на глубине 14 мкм от обработанной поверхности до 20-30 нм (рис. 3б). Нанокристаллическая структура представлена точечными дифракционными кольцами (или их частями) на электроннограммах (рис. 3). Таким образом формируется градиентная по сечению наноструктура с размером зерен в интервале от 5 нм (на поверхности) до 50 нм (в объеме).

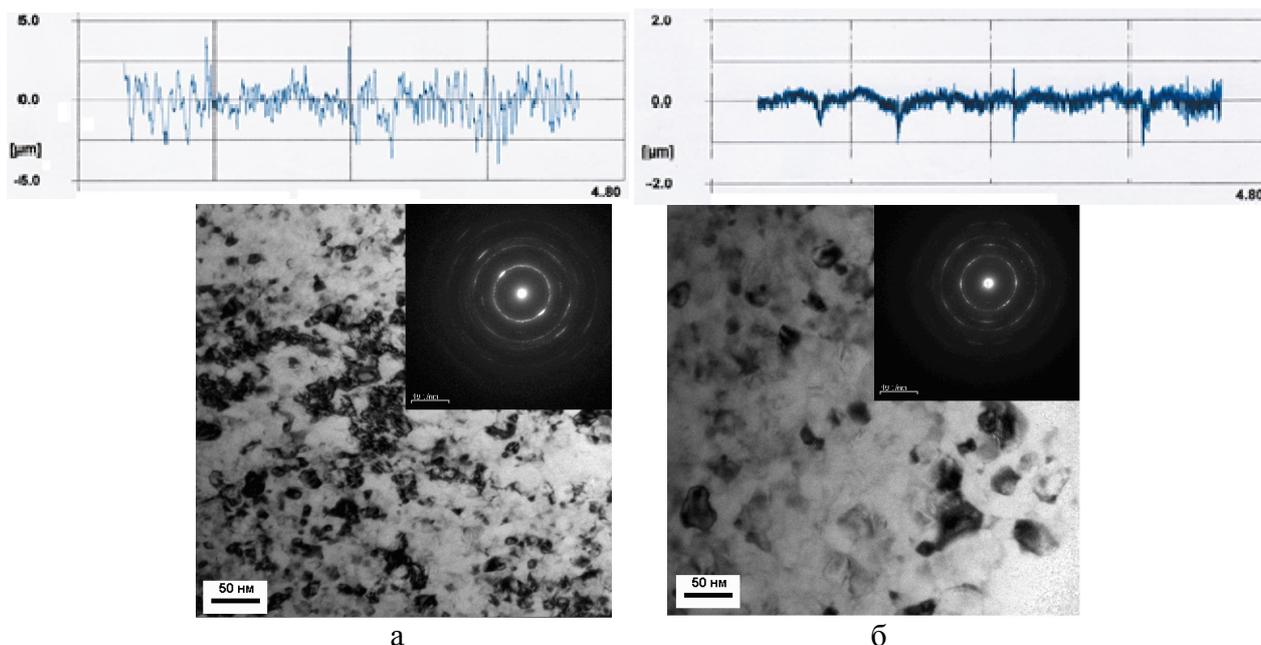


Рис. 3. Микроструктура наноструктурного никелида титана после УЗО ( $P_{ст}=100$  Н) на поверхности (а) и на глубине ~14 мкм от поверхности (б).

Исследование влияния режима УЗО на микротвёрдость поверхности, в частности, статического усилия прижима инструмента к обрабатываемой поверхности  $P_{ст}$  (50, 100 и 150Н) показало его влияние на шероховатость поверхности, степень и глубину наклепа, величину напряжений, возникающих в поверхностном слое материала, и на физико-механические свойства поверхности [11]. Это влияние обусловлено самим характером образования поверхностного слоя при пластическом деформировании ультразвуковым инструментом [12]. Выбор величины статического усилия определяет производительность обработки, подачу и окружную скорость детали, число проходов (табл.2). Результаты исследований показали, что оптимальным усилием прижима для обработки наноструктурного никелида титана является величина 100 Н., поскольку рост микротвердости в результате прокатки с током по сравнению с исходным крупнозернистым состоянием составляет около 70%, а после комбинированной обработки – более 115%.

Таблица 2

Микротвердость  $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$  для разных режимов обработки

Нагрузка на индентор, г	Исходное	Прокатка с током	УЗО ( $P_{ст}=100$ Н)	УЗО ( $P_{ст}=150$ Н)
20	1800	3100	3800	3700
50	1800	3300	4250	3800

Проведены испытания механических свойств наноструктурного никелида титана на растяжение. Исследованы исходные образцы в крупнозернистом состоянии и наноструктурные образцы после комбинированной обработки - прокатки с током и последующей УЗО. Результаты исследований показали, что прокатка с током позволяет повысить предел прочности крупнозернистого никелида титана с 660 МПа до 1600 МПа, а применение дополнительной УЗО повышает предел прочности до 1690 МПа. При этом относительное удлинение до разрушения сохраняется достаточно высоким для инженерных применений (до 7%). Установлено, что после комбинированной обработки в наноструктурных образцах происходит также рост критического напряжения мартенситного сдвига с 210 МПа до величины порядка 400 МПа.

Вид кривых «напряжение - деформация» образцов в крупнозернистом и наноструктурном состояниях показал, что они качественно подобны и включают три стадии [14, 15]. Первая стадия – упругая деформация аустенита. На второй стадии (псевдотекучести) происходит фазовый переход аустенита в мартенсит. На третьей стадии развиваются процессы пластической деформации сформированной системы деформационных доменов мартенситной фазы, завершающиеся разрушением образцов.

### Выводы

1. Показана возможность формирования градиентной наноструктуры в объемных полуфабрикатах титановых сплавов при использовании комбинации методов прокатки с импульсным током и УЗО.
2. УЗО повышает качество поверхности и ее твердость в титановых сплавах, что позволит снизить вес и габариты конструкций, а также уменьшить затраты на потребление сырья

### Список литературы

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: Академкнига, 2007. – 398 с.
2. Edalati K., Horita Z. A review on high-pressure torsion (HPT) from 1935 to 1988 // *Materials Science & Engineering A*. – 2016. – Vol. 652. – P. 325–352.
3. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику. – М.: Машиностроение, 2007. – 496 с.
4. Extraordinary strain hardening by gradient structure / X. Wua, P. Jiang, L. Chena, F. Yuan, Y.T. Zhu // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2014. – Vol. 111, N 20. – P. 7197–7201.
5. Beygelzimer Y., Estri Y., Kulagin R. Synthesis of hybrid materials by severe plastic deformation: a new paradigm of SPD processing // *Advanced Engineering Materials*. – 2015. – Vol. 17 (12). – P. 1853–1861. – doi: 10.1002/adem.201500083.
6. Gradient structure produced by three roll planetary milling: numerical simulation and microstructural observations / Y. Wang, A. Molotnikov, M. Diez, R. Lapovok, H. Kim, J. Wang, Y. Estrin // *Materials Science & Engineering A*. – 2015. – Vol. 639. – P. 165–172.
7. Механические свойства и структура высокопрочных наноструктурированных сплавов никелида титана, подвергнутых РКУП и прокатке / Л.И. Юрченко, А.П. Дюпин, Д.В. Гундеров, Р.З. Валиев и др. // *Фазовые переходы, упорядоченные состояния и новые материалы*. – 2006. – № 10.

8. Shock-wave-induced grain refinement and phase state modification in coarse-grained and nanocrystalline titanium / Y.R. Kolobov, S.S. Manokhina, A.Yu. Kolobova et al. // *Technical Physics Letters*. – 2016. – Vol. 42, N 9. – P. 959–962.
9. Столяров В.В., Узурчиев У.Х., Трубицына И.Б. и др., Интенсивная электропластическая деформация сплава TiNi // *Физика и техника высоких давлений*. – 2006. – Т. 16, № 4. – С. 48–51.
10. Stolyarov V.V. Deformability and nanostructuring of shape memory TiNi alloys during the electroplastic rolling // *Materials Science & Engineering A*. – 2009. – Vol. 503. – P. 18–20.
11. Лесюк Е.А., Алехин В.П. Формирование нано- и субмикроструктур в инструментальных и конструкционных материалах и обеспечение их термической стабильности: монография. – М.: МГИУ, 2009. – 247 с.
12. Mordyuk B., Prokopenko G. Ultrasonic impact peening for the surface properties' management // *Journal of Sound and Vibration*. – 2007. – Vol. 308. – P. 855–866.
13. Дефекты структуры и мезорельеф поверхности никелида титана после интенсивной пластической деформации ультразвуковым методом / А.И. Лотков, А.А. Батулин, В.Н. Гришков и др. // *Физическая мезомеханика*. – 2005ю – № 8. – С. 109–112.
14. Shape memory alloys: fundamentals, modeling and applications / ed. by V. Brailovski, S. Prokoshkin, P. Terriault and F. Trochu. – Montreal, Quebec, Canada: Ecole de Technologie Superieure, Université du Québec, 2003. – 844 p.
15. Cismasiu C. Shape memory alloys. – Rijeka, Croatia: Sciyo, 2010. – 218 p.

## SURFACE AND BULK NANOSTRUCTURING OF TI-BASED ALLOYS

Stolyarov V. V., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: vlstol@mail.ru

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 4 Maly Kharitonyevsky Pereulok, Moscow, 101990, Russian Federation

### Abstract

The paper presents the results of the investigation of the ultrasonic surface hardening treatment effect on the structure and mechanical properties of ultrafine-grained titanium alloys –commercially pure (CP) titanium VT1-0 and a stoichiometric shape memory  $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$  alloy. Optical and transmission electron microscopy has shown that in a surface layer of thickness up to 20  $\mu m$  an ultrasonic surface hardening treatment in coarse-grained titanium forms a nanostructure with a grain size of less than 100 nm, and in nanostructured  $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$  further reduces the grain size from 100 to 30 nm. The ultrasonic surface hardening treatment of alloys multiply increases the strength, micro- and nanohardness of the surface layer, reduces the roughness and forms a gradient nanostructure, ensuring an increase in durability and expansion of the functionality of products.

### Keywords

nanostructure, electropulse rolling, nanohardness, ultrasonic surface hardening

УДК 538.9

## ПАЧКООБРАЗОВАНИЕ В ГЦК МОНОКРИСТАЛЛАХ\*

*Е.А. АЛФЁРОВА*<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, доцент  
*Д.В. ЛЫЧАГИН*<sup>1,2</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор  
(<sup>1</sup>ТПУ, г. Томск, <sup>2</sup>ТГУ, г. Томск)

Алфёрова Е.А. – 634050, г. Томск, проспект Ленина, 30  
Томский политехнический университет,  
e-mail: katerina525@mail.ru

В работе рассмотрены такие структурные элементы деформационного рельефа как следы сдвига и пачки следов. Анализ проведен на различных ГЦК-материалах (монокристаллы чистых металлов никеля, алюминия и сплава  $Ni_3Fe$  с ближним (БП) и дальним (ДП) порядком). Установлено, что следы сдвига и пачки следов сдвига имеют различные графики плотности распределения ординат. Это характерно для всех рассмотренных материалов. Используя методы фрактального анализа оценена способность следов сдвига и пачек следов к самоорганизации. На микроуровне самоорганизация осуществляется за счет подстройки в дислокационной подсистеме, а на мезоуровне за счет коррелированного сдвига в параллельных октаэдрических плоскостях.

**Ключевые слова:** следы сдвига, пачки следов сдвига, самоорганизация, монокристалл, дислокационная структура

**Введение**

Деформационный рельеф – всегда есть отражение процессов, происходящих внутри кристалла при нагружении различного рода.

Структурные элементы деформационного рельефа (СЭДР) на поверхности весьма разнообразны [1–8].

Если говорить о наиболее очевидном элементе деформационного рельефа, сформированным трансляционным механизмом деформации, то им является след скольжения или след сдвига. Этот СЭДР всегда наблюдается при начале пластической деформации. След сдвига представляет собой пачку следов скольжения. Однако, в экспериментах мы наблюдаем на поверхностях и более сложные структурные элементы рельефа [9–11]. Это пачки следов, мезополосы, макрополосы, гофры (складчатые структуры) и др. Таким образом, на поверхности отражается результат самоорганизации внутренних процессов при пластической деформации. В настоящей работе внимание уделено формированию такого типа СЭДР как следы сдвига и пачки следов и рассмотрению эффективности процессов самоорганизации деформации в них.

\* **Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60007 мол\_а\_дк.

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность к.т.н., м.н.с. ИФПМ СО РАН А.В. Филиппову за помощь в получении экспериментальных результатов.

## Материал и методика

В настоящей работе использовались монокристаллы чистых металлов никеля, алюминия и сплава  $Ni_3Fe$  с ближним (БП) и дальним (ДП) порядком. Размер образцов до деформации  $3 \times 3 \times 6$  мм. Деформация указанных материалов сопровождается формированием деформационного рельефа благодаря скольжению по октаэдрическим плоскостям скольжения, при комнатной температуре. Отличительной чертой в данном случае обладают упорядочивающиеся сплавы, в которых протекание пластической деформации связывается с движением сверхдислокаций. Ориентировку проведена на рентгеновском аппарате ИРИС 3 по эпиграммам с точностью  $\pm 1^\circ$ , уточнение ориентации – на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3, с точностью  $\pm 0.02^\circ$ . Поверхность образцов готовили механическим шлифованием и полированием и заключительной электролитической полировкой.

Деформирование сжатием проводили на испытательной машине *Instron ElektroPuls E10000* со скоростью  $1.4 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  при комнатной температуре. Картину деформационного рельефа исследовали на оптическом микроскопе *Leica DM 2500P* и конфокальном лазерном сканирующем микроскопе *Olympus LEXT OLS4100*.

## Результаты и обсуждение

Пачки следов являются, вероятно, самым простым способом организации деформационного рельефа из следов. Самоорганизация следов сдвига в пачки характерная черта деформационного рельефа ГЦК монокристаллов различных материалов (никель, алюминий и сплав  $Ni_3Fe$  с ближним (БП) и дальним (ДП) порядком), в каждом случае рельеф имеет свои отличительные особенности, определяемые характеристиками материала. Безусловно отличие в морфологии можно наблюдать на оптических снимках (рис. 1, а -2, а), однако, встает вопрос о более объективном методе. Одним из таких методов может быть применение графического (непараметрического) критерия оценки [12]. Конечно использование количественных методов оценки поверхности (параметры шероховатости) также возможно, однако, оно имеет ряд недостатков [13].

Оценка морфологии поверхности и выявление особенностей, характерных для различных ГЦК монокристаллов проводилась с использованием программного комплекса *Gwyddion*. В настоящей работе была применена одномерная статистическая функция распределения высот. Эта функция представляет собой нормированную гистограмму значений высоты, находящихся на сканированном участке поверхности. Анализ функции распределения высот позволяет получить количественные параметры поверхности и объективно оценить размеры и вероятность появления выступов и впадин на поверхности. Кроме того, использование графического (непараметрического) критерия позволяет с высокой степенью достоверности идентифицировать определенный оригинальный тип деформационного рельефа, т.к. непараметрический критерий содержит значительно большее количество информации о поверхности (порядка 95%), чем численные параметры шероховатости [12]. В зависимости от характера расположения выступов и впадин относительно средней плоскости можно выделить на графиках 3 зоны: I – зона, соответствующая следам сдвига, II – зона, описывающая распределение впадин на поверхности по глубине, и III – зона, описывающая распределение выступов на поверхности по высоте (рис. 1).

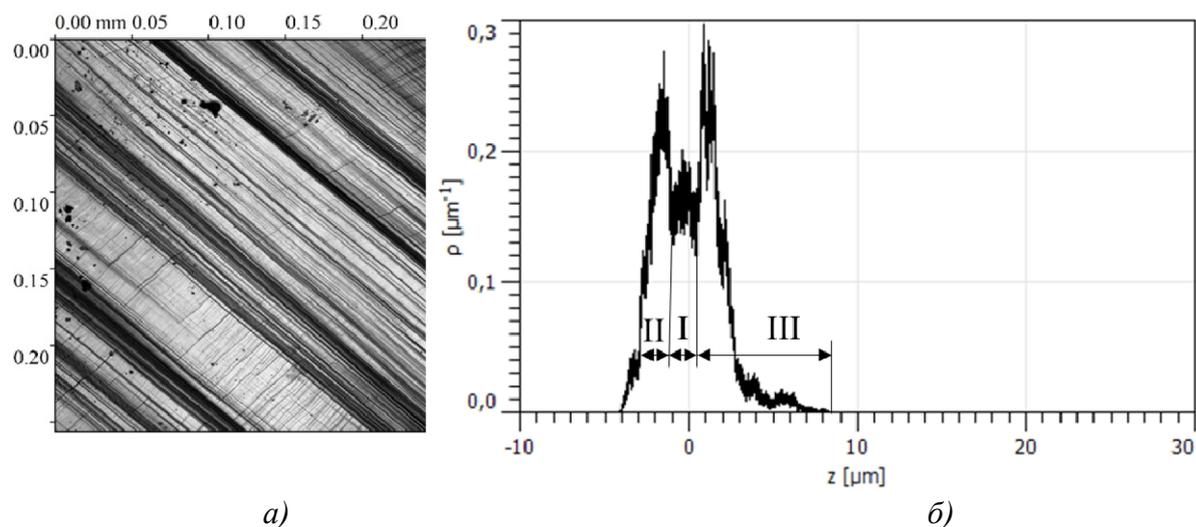


Рис. 1. Деформационный рельеф (а), график функции плотности распределения ординат  $Ni_3Fe$  БП (б),  $e=20\%$ , пачки следов

Отметим, что для участка деформированной поверхности, занятой только следами сдвига график функции плотности распределения ординат представляет собой фактически только зону I (рис. 2). Небольшие «хвосты» указывают на различие в степени развития следов.

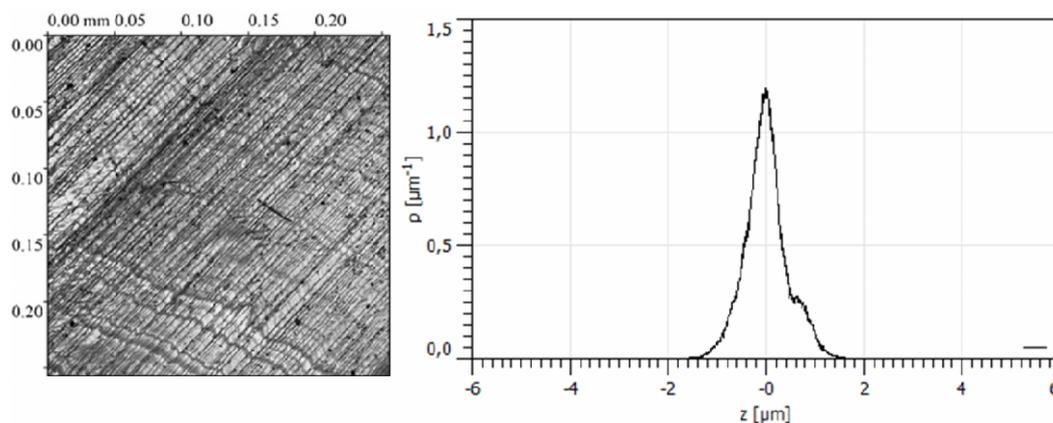


Рис. 2. Деформационный рельеф (а), график функции плотности распределения ординат (б),  $Ni$ ,  $e=20\%$ , следы сдвига

В работе было проведено сравнение графиков функции плотности распределения ординат для следов сдвига и пачек, формирующихся в различных ГЦК материалах (никель, алюминий и сплав  $Ni_3Fe$  с ближним (БП) и дальним (ДП) порядком). Определено, что графики носят схожий характер. В случае формирования следов скольжения графики представляют собой кривую близкую к гауссовому распределению с пиком около нуля (рис. 2). В случае формирования пачек кривая имеет несколько пиков, которые располагаются как слева, так и справа от нулевой точки профиля (зоны II и III на рис. 1). В этом случае у нулевого значения можно отметить наличие локального минимума функции. Это свидетельствует о том, что часть следов сдвига перестроилась в пачки и была сформирован новый СЭДР. Наличие нескольких экстремумов функции свидетельствует об иерархии рельефных образований на поверхности деформированных кристаллов.

Далее используя методы фрактального анализа оценим способность следов сдвига и пачек следов к самоорганизации.

На основе анализа корреляционных функций «высота-высота»  $H(r)$  (1) был определен показатель Хёрста ( $H$ ) и верхние границы длины корреляции ( $L$ ) для нескольких участков [14,15]. Показатель Хёрста  $H$  может быть применен для оценки способности системы к самоорганизации [16].

$$H(r) = \langle [Z(r') - Z(r' - r)]^2 \rangle, \tag{1}$$

где  $Z(r)$  – функция высоты поверхности по всем парам точек, отстоящим друг от друга на фиксированное расстояние  $r$ , скобки указывают на усреднение по всем парам точек.

Из полученного графика корреляционной функции «высота-высота»  $H(r)$  в логарифмических осях, по наклону начального участка кривой определяется показатель Хёрста ( $H$ ) и по проекции линейного участка на ось абсцисс определяется длина корреляции  $L$ .

Значения показателя Хёрста меньше 0,5 свидетельствует о том, что рассматриваемая система стремится возвратиться к среднему значению, при этом чем ближе к нулю значение  $H$ , тем выше степень устойчивости системы. Значение  $H = 0,5$  указывает на отсутствие корреляции, значения  $H > 0,5$  говорят о присутствии длинномасштабных корреляций [17].

В табл. приведены параметры, характеризующие СЭДР в разных ГЦК-материалах.

Таблица

Параметры, характеризующие СЭДР в разных ГЦК-материалах

Тип СЭДР	Параметр	Ni <sub>3</sub> Fe БП, 20%	Ni <sub>3</sub> Fe ДП, 16%	Al, 27%	Ni, 20%
Следы сдвига	H <sub>1</sub>	0,03	*	0,02	0,007
	H <sub>2</sub>	0,05	*	0,03	0,008
	H <sub>3</sub>	0,03	*	**	0,005
	L <sub>1</sub> , мкм	1	*	1,6	2
	L <sub>2</sub> , мкм	4	*	18	14
	L <sub>3</sub> , мкм	13	*	**	63
Пачки следов сдвига	H <sub>1</sub>	0,05	0,004	*	0,009
	H <sub>2</sub>	0,15	0,009	*	0,017
	H <sub>3</sub>	**	**	*	0,049
	L <sub>1</sub> , мкм	1	6	*	1,6
	L <sub>2</sub> , мкм	8	19	*	18
	L <sub>3</sub> , мкм	**	**	*	38

\* нет данных

\*\* участок не выделяется

Анализ полученных результатов показывает, что на микромасштабном уровне процесс деформации носит ярко выраженный антиперсистентный характер, т.е. система стремится сохранить среднее значение высоты рельефа. На данном масштабном уровне процессы деформации в основном обусловлены зарождением и аннигиляцией дислокации и развиваются благодаря сдвигу в объеме монокристалла и нестесненными материальными поворотами [18].

При переходе к следующему масштабному уровню (мезоуровень) можно наблюдать увеличение показателя Хёрста, но оно по-прежнему много меньше значения 0,5, при котором можно говорить об отсутствии корреляции. Следовательно, самоорганизация осуществляется за счет согласованного сдвига в параллельных октаэдрических плоскостях, а на поверхности это выражается в формировании квазипериодического профиля.

## Выводы

На примере различных ГЦК-материалов было установлено, что следы сдвига имеют график плотности распределения ординат близкий к гауссовому распределению, в то время как пачки следов сдвига формируют график с несколькими локальными максимумами и минимумом вблизи нуля. Графики плотности распределения ординат позволяют идентифицировать иерархическую соподчиненность в пачках следов сдвига.

Благодаря методам фрактального анализа была оценена способность следов сдвига и пачек следов к самоорганизации. И те, и другие СЭДР имеют высокую способность к самоорганизации, при этом на уровне дислокационной подсистемы способность к диссипации энергии максимальная.

## Список литературы

1. Лычагин Д.В., Старенченко В.А., Соловьева Ю.В. Классификация и масштабная иерархия структурных элементов деформации ГЦК-монокристаллов // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8, № 6. – С. 67–77.
2. Неоднородность деформации в монокристаллах никеля с разной иерархией структурных элементов / Д.В. Лычагин, Е.А. Алферова, Р.В. Шаехов, А.Д. Лычагин, В.А. Старенченко // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2007. – Т. 4, № 2. – С. 26–35.
3. Florando J.N., LeBlanc M.M., Lassila D.H. Multiple slip in copper single crystals deformed in compression under uniaxial stress // Scripta Materialia. – 2007. – Vol. 57, N 6. – P. 537–540.
4. Axial compression and post-deformation annealing of <011> aluminum single crystal / T. Okada, A. Ikeda, D. Noguchi, T. Yamahata, M. Tagami, F. Inoko // Materials Transactions. – 2009. – Vol. 50, N 10. – P. 2391–2395.
5. Cai M., Langford S.C., Thomas Dickinson J. Orientation dependence of slip band formation in single-crystal aluminum studied by photoelectron emission // Acta Materialia. – 2008. – Vol. 56, N 20. – P. 5938–5945.
6. Plastic deformation of MoSi<sub>2</sub> single crystals / K. Ito, H. Inui, Y. Shirai, M. Yamaguchi // Philosophical Magazine A. – 1995. – Vol. 72, N 4. – P. 1075–1097.
7. Ambrosi P., Schwink ChPias C. Slip line length of copper single crystals oriented along [100] and [111] // Scripta Metallurgica. – 1978. – Vol. 12. – P. 303–308.
8. Atypical “boomerang” slip traces in [001] niobium single crystals deformed at room temperature / D.S.P. Charrier, J. Bonneville, C. Coupeau, Y. Nahas // Scripta Materialia. – 2012. – Vol. 66, N 7. – P. 475–478.
9. Strain-induced folding on [111] copper single crystals under uniaxial compression / D.V. Lychagin, S.Yu. Tarasov, A.V. Chumaevskii, E.A. Alfeyorova // Applied Surface Science. – 2016. – Vol. 371. – P. 547–561.
10. Surface wrinkling of the twinning induced plasticity steel during the tensile and torsion tests / S. Khoddam, H. Beladi, P.D. Hodgson, A. Zarei-Hanzaki // Materials and Design. – 2014. – Vol. 60. – P. 146–152.
11. Polak J., Man J. Mechanisms of extrusion and intrusion formation in fatigued crystalline materials // Materials Science & Engineering A. – 2014. – Vol. 596. – P. 15–24.
12. Валетов В.А., Иванов А.Ю. Непараметрический подход к оценки качества изделий // Металлообработка. – 2010. – Т. 6, № 60. – С. 55–59.
13. Алферова Е.А. Количественная оценка деформационных структур на примере монокристаллов никеля // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4, № 2. – С. 127–131.

14. Sampling-induced hidden cycles in correlated random rough surfaces / H.-N. Yang, Y.-P. Zhao, A. Chan, T.-M. Lu, G.-C. Wang // *Physical Review B*. – 1997. – Vol. 56, N 7. – P. 4224–4232.
15. *Pelliccione M., Lu T.-M.* Evolution of thin film morphology. Modeling and simulations. – New York: Springer, 2008. – 206 p.
16. *Антуков В.Н., Митин В.Ю., Скачков А.П.* Исследование микрорельефа поверхности селльвина с помощью метода Хёрста // *Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика*. – 2010. – Т. 4, № 4. – С. 30–33.
17. Исследование закономерностей локализации пластической деформации и формирования многомасштабных дефектных структур в процессе динамического нагружения алюминиевого сплава 6061 / Е.А. Ляпунова, А.Н. Петрова, И.Г. Бродова, О.Б. Наймарк, М.А. Соковиков, В.В. Чудинов, С.В. Уваров // *Физическая мезомеханика*. – 2012. – Т. 2, № 15. – С. 61–67.
18. *Панин В.Е., Панин Л.Е.* Масштабные уровни гомеостаза в деформируемом твердом теле // *Физическая мезомеханика*. – 2004. – Т. 4, № 7. – С. 5–23.

### PACK SLIP BANDS FORMATION IN FCC SINGLE CRYSTALS\*

**Alfyorova E.A.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, e-mail: katerina525@mail.ru  
**Lychagin D.V.**<sup>1,2</sup>, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, e-mail: dvl-tomsk@mail.ru

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

<sup>2</sup>National Research Tomsk State University, 36 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

### Abstract

In this paper, we consider such structural elements of the deformation relief as slip traces and pack slip bands. The analysis was carried out on various FCC materials (single crystals of pure metals of nickel, aluminum and Ni<sub>3</sub>Fe alloy with short-range order and long-range order). We have established that slip traces and pack slip bands have different graphs of ordinate density function. This is typical for all materials that we reviewed. Using the methods of fractal analysis, we estimate the ability of slip traces and pack slip bands to self-organization. At the microlevel, self-organization is carried out through tuning in the dislocation subsystem, and at the mesolevel due to a correlated shift in parallel octahedral planes.

### Keywords

slip traces, pack slip bands, self-organization, single crystal, dislocation subsystem

\* The reported study was funded by RFBR, according to the research project No. 16-32-60007 mol\_a\_dk

УДК 621.793:621.785.532

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ИОНАМИ  
АЗОТА ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ВЫСОКОХРОМИСТЫХ СТАЛЕЙ,  
НАПЫЛЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОГО ГОРЮЧЕГО ГАЗА***М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ<sup>1</sup>, доктор техн. наук, доцент  
А.Н. ГРИГОРЧИК<sup>1</sup>, канд. техн. наук**В.А. КУКАРЕКО<sup>1</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор  
В.М. КОНСТАНТИНОВ<sup>2</sup>, доктор техн. наук, профессор  
(<sup>1</sup> Объединенный институт машиностроения  
НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь**<sup>2</sup> Белорусский национальный технический университет  
г. Минск, Беларусь)*

**Кукареко В.А.** – 220072, г. Минск, ул. Академическая, 12  
Государственное научное учреждение "Объединенный институт машиностроения  
Национальной академии наук Беларуси",  
e-mail: v\_kukareko@mail.ru

Проведено сравнительное исследование структурно-фазового состояния и микротвердости модифицированных ионами азота высокохромистых проволочных сталей 40X13, Lastifil 812, 02X17H11M2 и напыленных из этих сталей с использованием горючего газа МАФ газотермических покрытий. Показано, что повышенная глубина азотированных слоев в газотермических покрытиях из высокохромистых сталей связана с ускорением диффузии азота в покрытиях из этих сталей вследствие пониженного содержания в них хрома, а также с высокой дефектностью кристаллических решеток матричных фаз покрытий.

**Ключевые слова:** газотермические покрытия, ионно-плазменное азотирование, глубина азотированного слоя, структурно-фазовое состояние, микротвердость

**Введение**

Метод высокоскоростной металлизации (ВМ) с целью получения покрытий из проволочных материалов относится к экономичным аддитивным технологиям, которые основаны на распылении расплавленных капель металла продуктами сгорания горючих газов [1-2]. ВМ позволяет формировать поверхностные слои деталей машин и механизмов машиностроительного профиля с требуемыми физико-механическими характеристиками из различных токопроводящих материалов, и, в частности, проволочных сталей.

В работах [2-3] показано, что в целях формирования плотных газотермических покрытий с повышенной адгезией к основе при ВМ вместо традиционно используемого пропана целесообразно использовать высокоэнтальпийные горючие газы типа метилацетилен-алленовой фракции (МАФ), представляющей собой смесь метилацетилена и аллена с добавлением  $\approx 25$  об.% пропана. В частности, использование горючего газа МАФ позволяет повысить скорость полета расплавленных частиц до  $\approx 500$  м/с, что в свою очередь приводит к напылению покрытия с низкой остаточной пористостью не превышающей 2-4 об.%. Вместе с тем, несмотря на преимущества метода ВМ, триботехнические и дюрометрические свойства получаемых покрытий значительно ниже, чем у соответствующих монолитных материалов. В связи с этим, газотермические покрытия

подвергают различным видам упрочняющей обработки. В частности, в работах [4-6] рассмотрено влияние ионного азотирования на структурно-фазовое состояние и трибомеханические свойства газотермических покрытий напыленных с использованием пропана. В работах [4-6] отсутствуют данные о структуре и фазовом составе модифицированных ионами азота исходных проволочных сталей, из которых напылялись газотермические покрытия. В связи с этим, интерес представляет сопоставление данных по структурно-фазовому состоянию ионно-модифицированных проволочных материалов и соответствующих покрытий, полученных с использованием газа МАФ. Целью данной работы являлось исследование структурно-фазового состояния газотермических покрытий и исходных проволочных материалов из высокохромистых сталей, подвергнутых ионно-плазменному азотированию.

### Образцы и методики исследований

Для исследований были выбраны проволочные материалы 40X13, *Lastifil* 812 и 02X17H11M2 ( $d=1,2-2,0$  мм) и напыленные из них методом ВМ с помощью газа МАФ газотермические покрытия (таблица 1). Для нанесения газотермических покрытий методом ВМ использовалась установка АДМ-10, разработанная в ОИМ НАН Беларуси [2]. Скорость полета напыляемых частиц составляла  $> 500$  м/с, размер частиц 5 – 40 мкм. С целью повышения прочности сцепления покрытий с основой наносился промежуточный слой напылением проволоки из сплава Х20Н80. Покрытия подвергались механической шлифовке с финишной обработкой на абразивной бумаге (Р320). Толщина напыленных покрытий составляла  $\approx 1,0 \div 1,5$  мм.

Таблица 1

Химический состав распрыляемых проволочных материалов

Марка проволочной стали	Содержание элементов, масс, %						
	<i>C</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Fe</i>
40X13	0,42	13,20	-	0,60	0,35	0,40	основа
<i>Lastifil</i> 812	0,40	17,50	1,10	0,50	0,40	0,40	основа
02X17H11M2	0,025	16,20	1,65	11,30	0,40	0,45	основа

Ионно-плазменное азотирование (ИПА) образцов исходных проволок и напыленных из них покрытий проводилось в среде 15% N<sub>2</sub> + 80% Ar + 5% CH<sub>4</sub>. Параметры ИПА: V=395 В, I=7,4 А, температура 740 К, время обработки – 8 часов.

Исследование фазового состава проволочных материалов и газотермических покрытий из высокохромистых сталей в исходном состоянии и после ИПА осуществлялось на дифрактометре ДРОН-2.0 в монохроматизированном кобальтовом (CoK<sub>α</sub>) излучении при напряжении 30 кВ и анодном токе 15 мА. Расшифровка рентгенограмм осуществлялось при помощи программного обеспечения *Crystallographica Search-Match* с картотекой PDF-2.

Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ и сканирующем электронном микроскопе *TESCAN VEGA 3 LMH*. Для проведения микроанализа использовался энергодисперсионный спектрометр *X-Max 150* производства *Oxford Instruments* с программным обеспечением *AZtec Automated*. Точность определения химического состава составляла  $\pm 0,05 \div 0,1$  % масс. Травление образцов проволок и покрытий после ионно-плазменного азотирования осуществлялось в 4%-ом спиртовом растворе пикриновой кислоты.

### Результаты исследований и их обсуждение

Напыление проволочных материалов методом высокоскоростной металлизации приводит к формированию плотного покрытия с пористостью не превышающей  $\approx 2-4$  об.%. Содержание оксидов в покрытии составляет  $\approx 25$  об.%. Характерные микроструктуры покрытий, напыленных из проволочных сталей 40X13, *Lastifil* 812, 02X17H11M2, представлены на рисунке 1.

В фазовый состав покрытия, напыленного из мартенситной стали 40X13, после завершающей механической шлифовки входит 58 об.%  $\alpha$ -Fe, 18 об.%  $\gamma$ -Fe и 24 об.%  $FeO+Fe_3O_4$  (рисунок 2, а). Твердость покрытия составляет 400 HV 10. Газотермическое покрытие из проволоки *Lastifil* 812 включает в себя 58 об.%  $\alpha$ -Fe, 19 об.%  $\gamma$ -Fe и 23 об.%  $FeO+Fe_3O_4$  (рисунок 2, б) и имеет твердость 375 HV 10. В покрытии из стали 02X17H11M2 содержится 7 об.%  $\alpha$ -Fe, 66 об.%  $\gamma$ -Fe и 27 об.%  $FeO+Fe_3O_4$  (рисунок 2, в). Твердость покрытия из стали 02X17H11M2 составляет 270 HV 10. Из данных рентгеноструктурного анализа можно видеть, что покрытия из мартенситных сталей 40X13 и *Lastifil* 812 содержат аномально высокое количество аустенитной фазы (рисунок 2). Повышенное содержание  $\gamma$ -фазы в покрытиях обусловлено особыми условиями их формирования, заключающимися в реализации в процессе напыления изотермической выдержки покрытия в области температур бейнитного превращения, что приводит к стабилизации  $\gamma$ -фазы [7].

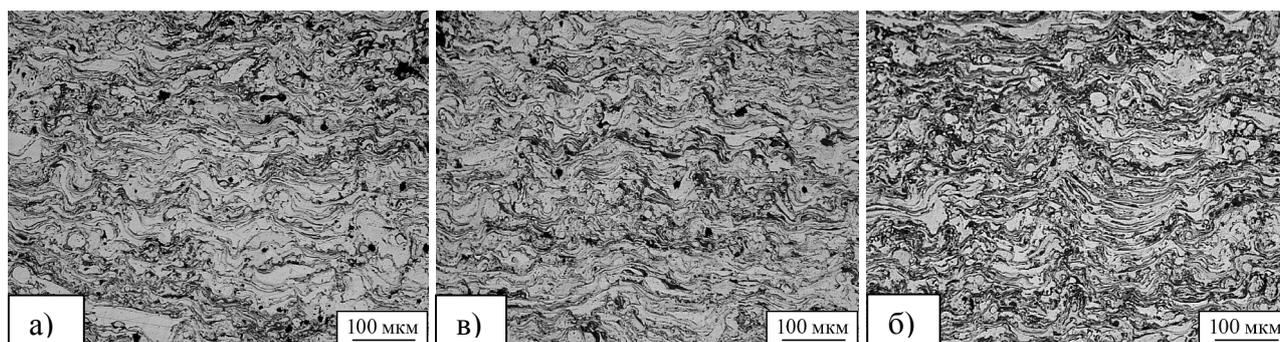


Рис. 1. Характерные микроструктуры газотермических покрытий из различных сталей, полученных методом ВМ с использованием горючего газа МАФ:

а – покрытие из стали 40X13; б – покрытие из стали *Lastifil* 812; в – покрытие из стали 02X17H11M2

Характерные микроструктуры газотермических покрытий после ионно-плазменного азотирования представлены на рисунке 3.

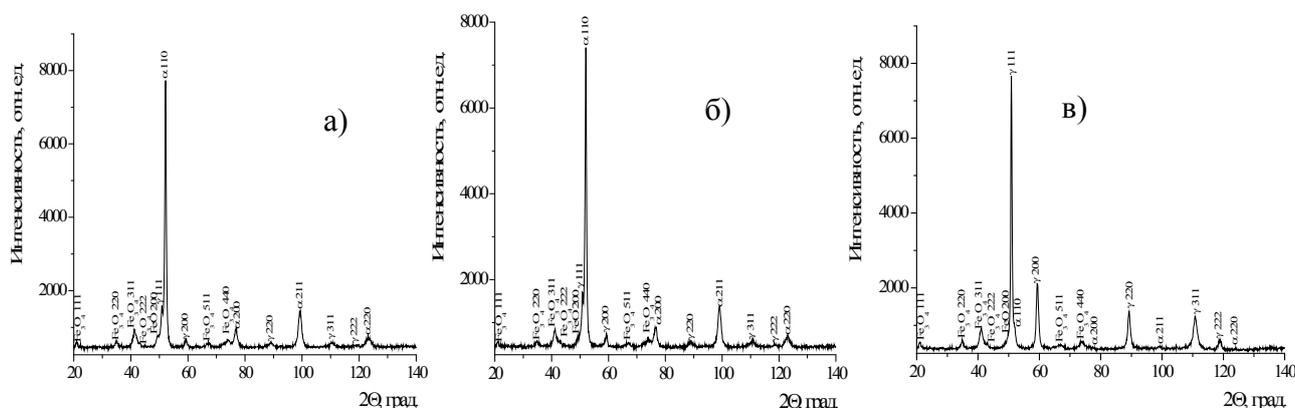


Рис. 2. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм ( $CoK_{\alpha}$ ) от поверхностных слоев газотермических покрытий (после механической шлифовки) из различных высокохромистых сталей, полученных высокоскоростной металлизацией с использованием газа МАФ:

а – покрытие из стали 40X13; б – покрытие из стали *Lastifil* 812; в – покрытие из стали 02X17H11M2

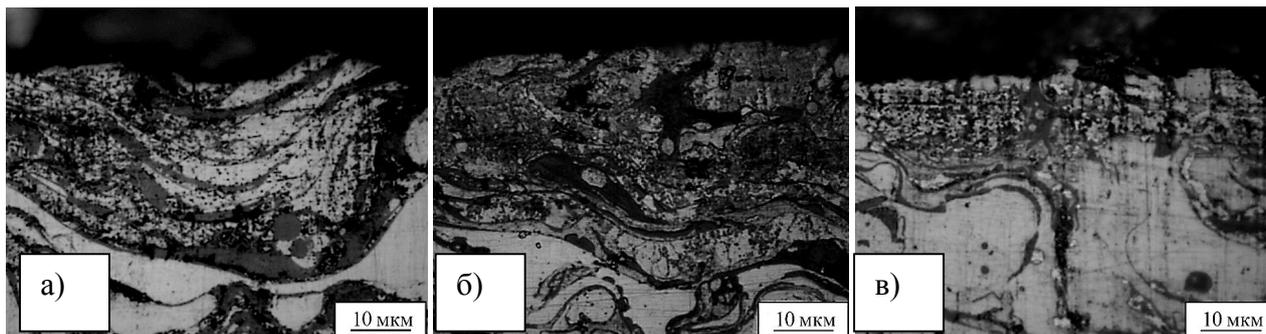


Рис. 3. Характерные микроструктуры газотермических покрытий из различных сталей, полученных методом ВМ с использованием горючего газа МАФ, прошедших ионно-плазменное азотирование при 740 К (8 часов): а – покрытие из стали 40X13;

б – покрытие из стали Lastifil 812; в – покрытие из стали 02X17H11M2

Глубина азотированных слоев в исходных проволоках и в напыленных из них газотермических покрытиях, а также микротвердость слоев приведены в таблице 2.

Таблица 2

Глубина азотированных слоев в проволоке и в покрытиях, напыленных из высокохромистых проволочных сталей (в скобках указана микротвердость азотированного слоя)

Материал	Глубина азотированного слоя в покрытии, мкм	Глубина азотированного слоя в проволоке, мкм
40X13	30-40 (1050 HV 0,01)	15-20 (1100 HV 0,01)
Lastifil 812	25-35 (1000 HV 0,01)	10-20 (1050 HV 0,01)
02X17H11M2	15-20 (1100 HV 0,01)	5-10 (1150 HV 0,01)

Из данных, представленных в таблице 2, можно видеть, что глубина азотированных слоев в проволочных сталях в  $\approx 2$  раза меньше, чем глубина слоя в газотермических покрытиях, сформированных из этих проволок (рисунок 3, 4). При этом значения микротвердости азотированных проволок несколько превышают значения микротвердости соответствующих газотермических покрытий (таблица 2). Для объяснения указанных различий в глубине азотированных слоев и в значениях их микротвердости необходимо рассмотреть данные по фазовому составу ионно-модифицированных покрытий. Рентгеновские дифрактограммы от поверхностных слоев проволок и покрытий, подвергнутых ионно-плазменному азотированию, представлены на рисунке 5. Фазовый состав проволок и покрытий после ионно-плазменного азотирования приведен в таблице 3. Из данных рентгеноструктурного анализа можно видеть, что в процессе ионного азотирования во всех проволочных материалах наряду с нитридами железа  $\epsilon-(Fe, Cr)_{2-3}N$  и  $\gamma'-(Fe, Cr)_4N$  выделяется большое количество нитрида  $CrN$ , а в молибденсодержащих сталях образуется нитрид  $Mo_2N$  (таблица 3). В то же время в газотермических покрытиях из этих же сталей после азотирования образуется относительно повышенное количество легированного хромом нитрида железа  $\epsilon-(Fe, Cr)_{2-3}N$ , а также присутствуют нитриды  $CrN$ ,  $Mo_2N$  и  $\gamma'-(Fe, Cr)_4N$  (таблица 3). По-видимому, с указанным различием в фазовом составе азотированных слоев связаны относительно пониженные значения микротвердости ионно-модифицированных газотермических покрытий по сравнению с проволоками. Кроме этого, необходимо отметить, что в фазовом составе азотированной проволоки из стали 02X17H11M2 и покрытия из этой стали регистрируется твердый раствор азота в матричной  $\gamma$ -фазе с гексагонально искаженной ГЦК решеткой ( $\gamma'_N-(Fe, Cr)$ ) [8]. По данным [9] указанные искажения кристаллической решетки матричной  $\gamma$ -фазы вызваны высокой концентрацией двойников и дефектов упаковки, генерируемых в процессе ионной обработки [10].



Таблица 3

Фазовый состав газотермических покрытий и исходных проволочных материалов после ионно-плазменного азотирования при 740 К (8 часов)

Материал	Фазовый состав	
	Проволока	Покрытие
40X13	$\alpha$ -(Fe, Cr), CrN, $\varepsilon$ -(Fe, Cr) <sub>2-3</sub> N, $\gamma'$ -(Fe, Cr) <sub>4</sub> N, $\gamma$ -(Fe, Cr)	$\alpha$ -(Fe, Cr), $\varepsilon$ -(Fe, Cr) <sub>2-3</sub> N, $\gamma'$ -(Fe, Cr) <sub>4</sub> N, CrN, $\gamma$ -(Fe, Cr), Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Lastifil 812	$\alpha$ -(Fe, Cr), CrN, $\varepsilon$ -(Fe, Cr) <sub>2-3</sub> N, $\gamma$ -(Fe, Cr), $\gamma'$ -(Fe, Cr) <sub>4</sub> N, Mo <sub>2</sub> N	$\alpha$ -(Fe, Cr), $\varepsilon$ -(Fe, Cr) <sub>2-3</sub> N, CrN, $\gamma'$ -(Fe, Cr) <sub>4</sub> N, Mo <sub>2</sub> N, $\gamma$ -(Fe, Cr), Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
02X17H11M2	CrN, $\gamma'_N$ -(Fe, Cr), $\varepsilon$ -(Fe, Cr) <sub>2-3</sub> N, $\gamma'$ -(Fe, Cr) <sub>4</sub> N, $\gamma$ -(Fe, Cr), $\alpha$ -(Fe, Cr), Mo <sub>2</sub> N	$\varepsilon$ -(Fe, Cr) <sub>2-3</sub> N, $\gamma'_N$ -(Fe, Cr), CrN, $\gamma'$ -(Fe, Cr) <sub>4</sub> N, $\gamma$ -(Fe, Cr), $\alpha$ -(Fe, Cr), Mo <sub>2</sub> N, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>

Пониженная глубина азотированных слоев в проволочных высокохромистых сталях по сравнению с глубиной слоев в газотермических покрытиях из этих сталей связана с относительно более низкой диффузионной подвижностью атомов азота в монолитных материалах. При этом повышенная скорость диффузии атомов азота в напыленных газотермических покрытиях обусловлена высокой концентрацией дефектов кристаллической решетки в матричных фазах покрытий (вакансий, дислокаций), а также пониженным содержанием в них атомов хрома, который существенно снижает диффузионную подвижность атомов азота [11]. Уменьшение концентрации хрома в матричных фазах покрытий связано с окислением хрома в процессе газотермического распыления проволок [11]. В [11] показано, что напыленные металлические частицы покрытия содержат пониженную концентрацию этого легирующего элемента, а оксидные прослойки характеризуются его повышенным содержанием. В частности, на рисунке 6 представлено распределение хрома по глубине поверхностного слоя газотермического покрытия из стали 40X13, напыленного методом ВМ с использованием пропана. Можно видеть, что в тонких ( $\approx 1,5-3,0$  мкм) металлических прослойках, регистрируется пониженная концентрация хрома, составляющая  $\approx 10,0-12,5$  масс.% (рисунок 6). При этом, оксидные прослойки, вследствие высокого сродства хрома к кислороду, содержат относительно повышенную концентрацию хрома (до  $\approx 23$  масс.%), которая существенно (в  $\approx 2$  раза) превышает его номинальное содержание в исходном проволочном материале (таблица 1, рисунок 6). Принимая во внимание, что в процессе напыления происходит интенсивное окисление частиц распыляемой стали можно полагать, что на металлических частицах малого диаметра (до  $\approx 20$  мкм), которые характеризуются высокой удельной площадью поверхности (рисунок 7, а), образуется оксидный слой, составляющий до 30-80 % объема всей частицы (рисунок 7, б). Таким образом, значительная часть атомов хрома, в газотермическом покрытии, сформированном преимущественно из мелких частиц, будет находиться в оксидных прослойках, а металлические слои будут содержать относительно пониженную концентрацию хрома, что способствует ускорению диффузионного переноса азота в процессе ИПА.

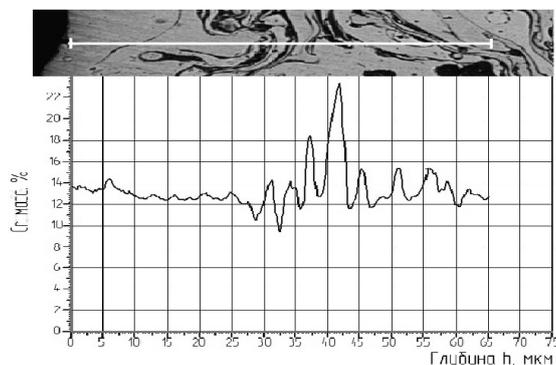


Рис. 6. Распределение хрома по глубине ( $h$ ) поверхностного слоя газотермического покрытия из стали 40X13, полученного методом ВМ с использованием пропана

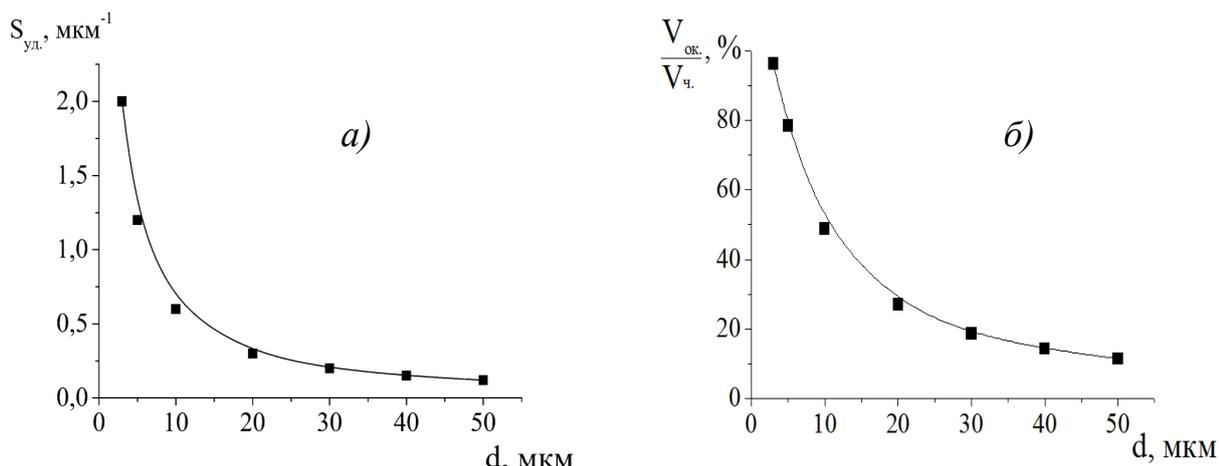


Рис. 7. Зависимость удельной площади поверхности ( $S_{уд}=S_{ч}/V_{ч}$ , где  $S_{ч}$  – площадь поверхности частицы;  $V_{ч}$  – объем частицы) (а) и удельного окисленного объема  $V_{ок}/V_{ч}$  (б) от размера  $d$  напыляемых частиц

Кроме того, вклад в уменьшение диффузионной подвижности атомов азота в проволочных высокохромистых сталях может быть связан с явлением восходящей диффузии атомов хрома в азотированный слой в процессе ИПА [11]. При этом, общая концентрация хрома в азотированных слоях существенно повышается относительно его номинального содержания. В то же время в газотермических покрытиях процессы диффузионного переноса атомов хрома из более глубоких слоев к азотированному слою затруднены, так как между отдельными напыленными частицами покрытия находятся непроницаемые/полупроницаемые для диффузии оксидные прослойки  $Fe_3O_4$  [12].

Таким образом, можно сделать вывод, что ионное азотирование газотермических покрытий из высокохромистых сталей будет приводить к формированию в них относительно более глубоких азотированных слоев по сравнению с монолитными проволочными сталями. Формирование более глубоких азотированных слоев в газотермических покрытиях из высокохромистых сталей связано с пониженным содержанием в них хрома относительно их концентрации в исходных проволочных сталях, наличием большого количества пор и дефектов кристаллического строения матричных фаз, а также с замедлением процессов восходящей диффузии хрома оксидными прослойками, расположенными на границах напыленных частиц.

## Заключение

Исследовано структурно-фазовое состояние и дюрметрические свойства проволочных сталей 40X13, Lastifil 812, 02X17H11M2, а также газотермических покрытий, полученных методом высокоскоростной металлизации этих проволок с использованием высокоэнтальпийного горючего газа МАФ, в исходном состоянии и после ионно-плазменного азотирования при 740 К. Установлено, что напыление газотермических покрытий из мартенситных сталей 40X13 и Lastifil 812 приводит к формированию покрытий с аномально высоким содержанием  $\gamma$ -фазы, составляющим 18 и 19 об.%, соответственно.

Проведено ионно-плазменное азотирование газотермических покрытий из высокохромистых сталей 40X13, Lastifil 812 и 02X17H11M2, напыленных методом высокоскоростной металлизации с использованием горючего газа МАФ. Показано, что в результате ионного азотирования покрытий в их поверхностных слоях образуются модифицированные азотом слои толщиной до 40 мкм, содержащие легированные хромом нитриды железа  $\varepsilon-(Fe, Cr)_{2-3}N$ ,  $\gamma'-(Fe, Cr)_4N$ , а также нитриды  $CrN$ ,  $Mo_2N$ . Кроме того в

фазовом составе покрытия из аустенитной стали 02X17H11M2 регистрируется твердый раствор азота в матричной  $\gamma$ -фазе с гексагонально искаженной ГЦК решеткой ( $\gamma'_N$ -(Fe, Cr)). Установлено, что глубина азотированных слоев, в газотермических покрытиях из высокохромистых сталей в  $\approx 2$  раза больше глубины слоев, формирующихся в аналогичных проволочных сталях. Сделано заключение, что повышенная глубина азотированных слоев в газотермических покрытиях из высокохромистых сталей связана с пониженным содержанием в них хрома, повышенной концентрацией дефектов кристаллического строения матричных фаз покрытий, а также с замедлением процессов восходящей диффузии атомов хрома оксидными прослойками, располагающимися на границах металлических напыленных частиц.

### Список литературы

1. Белоцерковский М.А., Прядко А.С. Активированное газопламенное и электродуговое напыление покрытий проволочными материалами // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 12 – С. 17–23.
2. Белоцерковский М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий. – Минск: Технопринт, 2004. – 200 с.
3. Белоцерковский М.А., Прядко А.С., Черепко А.Е. Методы и оборудование для формирования высокоэнергетических двухфазных потоков // Физика плазмы и плазменные технологии. – Минск, 1997. – Т. 4. – С. 670–673.
4. Влияние ионно-лучевого азотирования на структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства экономичных газотермических покрытий из проволочных сталей различных классов / В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский, А.В. Белый, А.Н. Григорчик // Трение и износ. – 2013. – Т. 34, № 6. – С. 621–627.
5. Григорчик А.Н., Кукареко В.А., Белоцерковский М.А. Износостойкость гиперзвуковых газотермических покрытий из сталей различных классов, подвергнутых ионно-плазменному азотированию // Вестник Белорусского государственного университета транспорта. – 2016. – № 1. – С. 308–311.
6. Структурно-фазовое состояние и износостойкость в условиях граничного трения обработанных ионами азота газотермических покрытий из сталей различных классов / В.А. Кукареко, А.В. Белый, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик // Трение и износ. – 2015. – Т. 36, № 6. – С. 661–670.
7. О природе формирования метастабильной аустенитной структуры при газотермическом напылении высокохромистой стали мартенситного класса 95X18 / В.А. Кукареко, А.Н. Григорчик, М.А. Белоцерковский, А.В. Сосновский // Упрочняющие технологии и покрытия. – М., 2017. – Т. 13, № 7 (151). – С. 318–322.
8. Белый А.В., Кукарек В.А., Патюк А. Инженерия поверхностей конструкционных материалов концентрированными потоками ионов азота. – Минск: Белорусская наука, 2007. – 244 с.
9. Формирование и свойства наноструктурных поверхностных слоев в аустенитных сталях подвергнутых ионно-лучевому азотированию / А.В. Белый, В.А. Кукареко, И.И. Таран, С.К. Ших, С.Г. Сандомирский // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2006. – № 7. – С. 100–106.
10. Riviere J.P., Meheust P., Villain J.P. Wear resistance after low-energy high-flux nitrogen implantation of AISI 304L stainless steel // Surface and Coatings Technology. – 2002. – Vol. 158–159. – P. 647–652.
11. Закономерности диффузии азота в процессе ионно-лучевого азотирования газотермического покрытия из аустенитной стали 06X19H9T / А.Н. Григорчик, В.А.

Кукареко, А.В. Белый, М.А. Белоцерковский, Б.Б. Хина // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – № 2. – С. 75–80.

12. Особенности формирования модифицированного азотом слоя при ионно-лучевой обработке гиперзвукового газотермического покрытия из аустенитной стали / А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко, А.В. Белый, М.А. Белоцерковский // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2016. – № 7. – С. 41–46.

## STRUCTURAL-PHASE STATE OF THERMAL SPRAYED COATINGS FROM HIGH-CHROMIUM STEELS DEPOSITED USING HIGH-ENTHALPY COMBUSTIBLE GAS

**Belotserkovskii M.A.**<sup>1</sup>, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: mbelotser@gmail.com

**Grigorchik A.N.**<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), e-mail: Grigorchik\_a\_n@mail.ru

**Kukareko V.A.**<sup>1</sup>, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, e-mail: v\_kukareko@mail.ru

**Konstantinov V.M.**<sup>2</sup> D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: v\_m\_konst@mail.ru

<sup>1</sup> The State Scientific Institution “Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus”, 12 Akademicheskaya str., Minsk, 220072, Republic of Belarus

<sup>2</sup> Belorussian national technical university, 65 Nezavisimosty Avenue, Minsk, 220137, Republic of Belarus

### Abstract

Comparative study of the structural-phase state and microhardness of modified nitrogen ions wire steel and thermal sprayed coatings deposited using combustible gas MAF from high-chromium steel 40Cr13, Lastifil 812, 02Cr17Ni11Mo2 was conducted. It is shown that the increased depth of nitride layers in thermal sprayed coatings from high-chromium steel is associated with the acceleration of nitrogen diffusion in coatings of these steel due to a lower content of chromium in them and high defectiveness of crystal of matrix coating phases.

### Keywords

thermal spray coating, ion-plasma nitriding, depth of nitrated layer, structural-phase state, microhardness

УДК 548.4

**МИГРАЦИЯ В МОДЕЛИ НЕСОРАЗМЕРНОЙ  
МЕЖЗЕРЕННОЙ ГРАНИЦЫ***В.Г. КУЛЬКОВ, доктор физ.-мат. наук, профессор  
(НИУ «МЭИ», г. Волжский)***Кульков В.Г.** – 404101, г. Волжский, просп. Ленина, 69  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
e-mail: vikulkov@yandex.ru

В работе обсуждается применимость модели межзеренной границы несоответствующего типа к релаксационным процессам межзеренного проскальзывания и миграции границы. Приводятся выражения для скорости миграции при различных величинах эффективного напряжения. Зависимость скорости миграции границы от величины напряжения имеет вид степенной функции. Показатель степени изменяется от 2 до 1. Показывается, что многие процессы зернограницной деформации являются прерывистыми.

**Ключевые слова:** несоответствующая граница, кинетическое уравнение, миграция межзеренной границы.

**Введение**

Среди большого разнообразия межзеренных границ лишь небольшая часть относится к границам специального типа. В результате взаимного разворота кристаллических решеток соседних зерен на вполне определенные углы в области таких границ образуются упорядоченные атомные структуры. Теория специальных границ хорошо разработана, однако их доля сравнительно невелика и составляет не более 10% [1]. Остальные границы называют обычными, произвольными или несоответствующими [2]. Модель несоответствующих межзеренных границ позволила рассмотреть не только статическую их атомную структуру, но и различного рода ее перестройки в релаксационных процессах.

Геометрическое положение каждого приграничного атома одного зерна по отношению к соседям другого определяется так называемым параметром несоответствия или дистанцией [3]. В общем случае это векторная величина. Если в специальных границах распределение параметра несоответствия по приведенной ячейке имело  $\delta$ -образный вид, то для несоответствующих границ характерно его равномерное распределение [4]. Такая модель атомного строения границы позволила разработать теорию межзеренного проскальзывания без использования понятия о зернограницных дислокациях [4–6], описать процессы рассеяния энергии и разработать механизмы зернограницного внутреннего трения [7], описать диффузионные и энергетические их свойства. Хорошие результаты показала эта модель строения границы при описании ее миграции [8–10]. Известно большое количество работ, где такого типа границы наблюдались в эксперименте методами высокоразрешающей микроскопии [11, 12].

**Модель миграции границы наклона**

Рассмотрим границу наклона общего типа с углом поворота зерен, отличным от специального. Приграничные атомы каждого из зерен имеют повышенную энергию в сравнении с атомами, расположенными в зерне. Для характеристики положения атома можно ввести дистанцию  $\zeta$ , равную расстоянию от данного атома до плоскости границы, вводимой одинаково для каждого зерна по усредненному ее положению в каждой локальной

конфигурации. Точную функциональную зависимость энергии атома от дистанции описать не удастся, но общая тенденция такова, что она монотонно возрастает по мере уменьшения дистанции. Для описания атомных перестроек достаточно иметь общее представление об этой зависимости. Наличие эффективной силы миграции границы означает, что атомы по одну сторону от границы обладают повышенной энергией. Релаксация ее происходит путем перехода атомов с достраиванием решетки зерна с меньшей энергией. Вблизи границы для атомов со стороны зерна с повышенной энергией реализуются условия появления области дистанций, для которых имеют место двухъямные энергетические конфигурации [5] с более глубокой ямой в соседнем зерне.

Можно ввести функцию распределения атомов по ямам  $f(\zeta)$ , имеющую смысл вероятности того, что перескок атома еще не произошел. В области возможных перескоков запишем для нее кинетическое уравнение

$$\frac{df(\zeta)}{d\zeta} = -\frac{f(\zeta)}{v\tau(\zeta)}, \quad (1)$$

где  $\tau(\zeta)$  – время релаксации,  $v$  – скорость миграции границы. Считается, что граница всегда остается плоской.

Время релаксации определяется либо временем перескока атомов в ближайшие позиции в соседней решетке, либо временем их диффузионного перемещения вдоль границы до положения с минимальной энергией. Во всех случаях выражение для него [10] имеет вид

$$\tau_1(\zeta) = A(\zeta) \exp\left(\frac{U_i}{kT}\right), \quad (2)$$

где  $U_i$  – энергия активации перескока через границу или зернограничной диффузии,  $A(\zeta)$  – множитель, выражаемый через частоту колебаний атомов, их энергетические характеристики, геометрические параметры границы, напряжение и температуру.

Решением уравнения (1) является функция

$$f(\zeta) = \exp\left(-\int_0^{\zeta} \frac{d\zeta'}{v\tau(\zeta')}\right), \quad (3)$$

Используя соответствующее выражение для времени релаксации, после интегрирования получаем [8] выражения для скоростей миграции границы:

$$v_1 = \frac{2\alpha a^2}{\pi\tau_0 kT} \exp\left(-\frac{U_0}{kT}\right) \left(\frac{a^2\sigma}{\alpha}\right)^2, \quad (4)$$

$$v_2 = \frac{C_0\alpha a\delta}{2\tau_0 kT} \exp\left(-\frac{U_b}{kT}\right) \frac{a^2\sigma}{\alpha}, \quad (5)$$

Здесь  $\tau_0^{-1}$  – частота колебаний атома;  $U_0$  – энергия активации скачка;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – термодинамическая температура,  $U_b$  – энергия активации граничной диффузии,  $\delta$  – диффузионная толщина границы,  $a$  – период решетки,  $\alpha$  – параметр зависимости энергии атомов в приграничной области от дистанции, если ее аппроксимировать линейной функцией. Реализация выражений (4), (5) определяется уровнем действующих напряжений миграции  $\sigma$ , равных избыточной энергии в объеме, приходящемся на один перемещающийся атом.

На рисунке приведены последовательно изменяющиеся зависимости скорости миграции от величины напряжения (линии 1, 2), описываемые выражениями (4), (5). Контролирующим процессом является всегда наиболее медленный. Поэтому реально

осуществляемой является зависимость, график которой расположен в нижнем положении на рисунке.

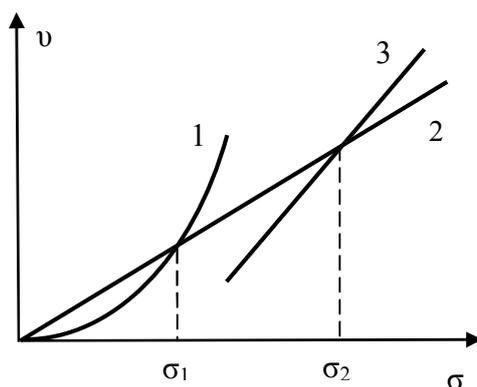


Рис. Функциональные зависимости скорости миграции от напряжения.

Значения напряжения  $\sigma_i$  соответствуют критическим напряжениям, при которых происходит смена функциональной зависимости скорости миграции от напряжения.

В случае больших термодинамических движущих сил наблюдается эффект «насыщения», когда область дистанций атомов, перескакивающих в растущее зерно, достигает максимального размера и более не увеличивается. Расчет в этом случае [10] приводит к выражению

$$v_3 = \frac{\alpha a^2}{\tau_0 kT} \exp\left(-\frac{U_0}{kT}\right) \left(\frac{\sigma}{\alpha a} - 1\right) \quad (6)$$

На рисунке эта зависимость изображена линией 3. Реализация каждого из механизмов перехода атомов-источников одного кристаллита в вакантные места другого кристаллита определяется как величиной движущих сил, так и структурой границы. Следует отметить, что атомная структура заметаемого границей объема не является совершенной. Позади фронта движущейся границы имеется повышенная концентрация вакансий [13].

### Обсуждение результатов

В работе [5] обсуждается вопрос о том, что зависимость смещения вдоль границы при зернограницном проскальзывании не является аналитической функцией. В атомном масштабе она представляется ступенчатой функцией с разными близко расположенными ступеньками непредсказуемой величины. Вид такой функции был назван «дьявольской лестницей» [14], поскольку производная ее везде равна нулю, но тем не менее, она возрастает. Величина скачков связана с взаимодействием возникающих в границе локальных атомных конфигураций и их релаксацией. Такое же поведение имеет граница, содержащая примесные атомы [15]. Подобное явление наблюдается и при миграции границы. Здесь нет одновременного параллельного движения всей плоскости границы, а перемещение ее состоит из малых локальных продвижений. Всякий раз происходит смещение малого участка на расстояние, сравнимое с атомным, что оказывает влияние через дальнедействующее поле напряжений на другие локальные конфигурации в границе. Локальная перестройка и смещение происходят скачком, так что нельзя предугадать, где произойдет следующая подобная локальная релаксация. Поэтому движение границы при миграции также представляет собой «дьявольскую лестницу». По-видимому, эффект прерывистой деформации не является в кристаллических системах экзотическим. Достаточно вспомнить такие явления, как эффект Портевена – Ле-Шателье [16] с пилообразной кривой деформации. Известен также эффект Савара – Массона ступенчатой деформации при растяжении или

сжатии образца [17–19]. Выражения, подобные (4) и (5) аппроксимируют такой реальный процесс аналитическими функциями.

Полученные выражения для скорости миграции границы показывают, что с изменением величины напряжения изменяется вид соответствующей функциональной зависимости. Этот эффект объясняется тем, что на величину скорости влияет не только частота перескоков атомов через границу, но также и размеры области, в которой такие перескоки реализуются. Значения показателя степени изменяются от  $n = 2$  при самых малых величинах движущей силы до значений  $n = 1$  при ее большей величине. В реальности переход происходит в интервале напряжений с плавной сменой показателя степени. Такой эффект неоднократно наблюдался в эксперименте [7–9]. Подобная зависимость скорости процесса имеет место и при зернограницном проскальзывании [20–22].

### Выводы

Модель несоразмерного строения границы с успехом может быть использована для описания различных релаксационных процессов, происходящих в поликристаллических металлах. В рамках одной модели границы можно объяснить функциональную зависимость скорости миграции границы от величины эффективных движущих сил степенного вида с различными показателями степени. Реализация каждого из них определяется как структурой границы, так и величиной этих сил.

### Список литературы

1. *Страумал Б.Б.* Фазовые переходы на границах зерен. – М.: Наука, 2003. – 327 с.
2. *Даринский Б.М., Федоров Ю.А.* Классификация межкристаллитных границ // Физика твердого тела. – 1992. – Т. 34, № 7. – С. 2053–2058.
3. *Даринский Б.М., Муштенко С.В., Сайко Д.С.* Несоразмерные межкристаллитные границы. Точечные дефекты // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2000. – Т. 2, № 4. – С. 333–338.
4. *Кульков В.Г.* Межзеренное проскальзывание по границе, сопрягающей плотноупакованную и некристаллографическую плоскости // Вестник МЭИ. – 2005. – № 5. – С. 96–100.
5. *Даринский Б.М., Сайко Д.С., Федоров Ю.А.* Скольжение по границе, образующей несоизмеримую структуру // Известия вузов. Физика. – 1987. – № 9. – С. 53–57.
6. *Даринский Б.М., Кульков В.Г.* Межкристаллитное скольжение вдоль границ, образованных плотноупакованными плоскостями // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1993. – № 5. – С. 153–156.
7. Structure of grain boundaries of a general type and mechanisms of the grain boundary internal peak / В.М. Darinskii, Yu.E. Kalinin, S.V. Mushtenko, D.S. Sajko // Solid State Phenomena. – 2003. – Vol. 89. – P. 203–232.
8. *Кульков В.Г., Поляков А.С.* Атомный механизм миграции несоразмерной границы наклона // Деформация и разрушение материалов. – 2008. – № 11. – С. 42–47.
9. *Кульков В.Г., Поляков А.С.* Двумерная атомная модель миграции несоразмерной межзеренной границы наклона // Ползуновский альманах. – 2007. – № 1–2. – С. 97–100.
10. *Кульков В.Г., Поляков А.С.* Миграция несоразмерной межзеренной границы общего типа // Деформация и разрушение материалов. – 2011. – № 1. – С. 11–17.

11. Atomic structure characterization of an incommensurate grain boundary / A. Gautam, C. Ophus, F. Lancon, V. Radmilovic, U. Dahmen // *Acta Materialia*. – 2013. – Vol. 61. – P. 5078–5086.
12. *Deymier P.A., Shamsuzzoha M., Weinberg J.D.* Experimental evidence for a structural unit model of quasiperiodic grain boundaries in aluminum // *Journal of Materials Research*. – 1991. – Vol. 6, N 7. – P. 1461–1468.
13. *Кульков В.Г., Поляков А.С.* Изменение концентрации вакансий в мигрирующей границе зерна // *Металлы*. – 2009. – № 6. – С. 105–109.
14. *Шредер М.* Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. – Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2005. – 528 с.
15. *Даринский Б.М., Кульков В.Г.* Межкристаллитное скольжение вдоль границ, содержащих примеси // *Письма в ЖТФ*. – 1992. – Т. 18, № 2. – С. 65–68.
16. *Бернштейн М.Л., Займовский В.А.* Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 496 с.
17. Динамика деформационных полос и разрушение алюминий-магниевого сплава АМг6 / А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов, А.В. Шуклинов, А.А. Денисов // *Физика твердого тела*. – 2011. – Т. 53, № 10. – С. 1873–1878.
18. *Трусов П.В., Чечулина Е.А.* Прерывистая текучесть: физические механизмы, экспериментальные данные, макрофеноменологические модели // *Вестник ПНИПУ*. – 2014. – № 3. – С. 186–232.
19. Механизм распространения полос деформации Савара–Массона в сплавах системы Al–Mg / А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов, А.А. Денисов // *Вестник ТГУ*. – 2010. – Т. 15, вып. 3. – С. 1278–1282.
20. *Кульков В.Г.* Релаксационные процессы на границах зерен в металлах. – Волжский: Филиал МЭИ, 2015. – 162 с.
21. *Gupta V.K., Madhuri M.K., Gupta S.P.* Diffusion induced grain boundary migration in the Cu–Cd system // *Acta Materialia*. – 2003. – Vol. 51, N 17. – P. 4991–5000.
22. *Viswanathan R., Bauer C.L.* Kinetics of grain boundary migration in copper bicrystals with [001] rotation axes // *Acta Metallurgica*. – 1973. – Vol. 21, N 8. – P. 1099–1109.

## MIGRATION IN THE MODEL OF INCOMMENSURATE GRAIN BOUNDARY

**Kul'kov V.G.**, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, e-mail: vikulkov@yandex.ru

Volzhsky Branch of National Research University «MPEI», 69 Lenin avenue, Volzhsky, 404101,  
Russian Federation

### Abstract

The applicability of the model of an intergrain boundary of an incommensurate type to the relaxation processes of intergranular slip and boundary migration is discussed. Expressions are given for the migration rate for different values of the effective voltage. The dependence of the migration rate of the boundary on the value of the voltage has the form of a degree function. The exponent varies from 1 to 3. It is shown that many processes of grain boundary deformation are discontinuous.

### Keywords

incommensurate boundary, kinetic equation, grain boundary migration

УДК 621.768.011

**ПОЛУЧЕНИЕ ПРЕССОВАННЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА И ИХ СВОЙСТВА**

*А.Н. ПРУДНИКОВ, доктор техн. наук, профессор  
В.А. ПРУДНИКОВ, аспирант  
(СибГИУ, г. Новокузнецк)*

**Прудников А.Н.** – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42  
Сибирский государственный индустриальный университет,  
e-mail: a.prudnikov@mail.ru

Приведены результаты влияния предварительной термоциклической осадки на микроструктуру и механические свойства слитков полунепрерывного литья из поршневого заэвтектического силумина на основе Al-20 % Si. Показана возможность прессования осаженных заготовок из легированного заэвтектического силумина за счет использования рационального термокинетических параметров деформации. Приведены структура и механические свойства слитков, заготовок после осадки и прессованных прутков из поршневого силумина. Полученные результаты показывают улучшение механических характеристик заготовок с увеличением степени деформации при обработке заэвтектического силумина.

**Ключевые слова:** силумин, осадка, прессование, деформационная термоциклическая обработка, структура, механические свойства

**Введение**

Производство деталей из деформируемых сплавов включает обязательную технологическую операцию по получению деформируемой заготовки или полуфабриката. Особенно важна эта операция для сплавов, обладающих малой пластичностью, таких как заэвтектические силумины, высоколегированные стали и чугуны. Довольно часто для получения качественной деформированной заготовки или детали применяют комплексные виды обработок: термоциклическую (ТЦО) и деформационную термоциклическую обработку (ДТЦО) [1-5]. Кроме того, разработанные в настоящее время режимы ТЦО и ДТЦО с успехом используются для улучшения механических [6-11], физических [1,12,13] и других свойств различных материалов [3,14-16]. Поэтому работа посвящена выбору вида и схемы деформации и оптимизации технологических параметров процесса осадки и прессования слитков полунепрерывного литья из легированного заэвтектического силумина с 20 % Si для группы оборудования ОАО «СМК» (г. Ступино), используемой для производства и обработки промышленных поршней.

**Материал и методика экспериментального исследования**

Для исследования использовали поршневой заэвтектический силумин следующего состава, % (вес.): кремний – 18-20; медь – 0,6-1,0; магний – 0,5-1,0; марганец – 0,8-1,0; титан – 0,1-0,3; азот – 0,2-0,4; кальций – 0,07-0,09; алюминий – ост. Сплав готовили в печи сопротивления в графито-шамотном тигле емкостью 60 кг и накопительном миксере емкостью 150 кг. Для модифицирования структуры силуминовых слитков использовали обработку расплава смесью, содержащей фосфористую медь (Cu<sub>3</sub>P), борную кислоту (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) и оксиды железа (III) и никеля (III) [16,17]. Слитки отливали полунепрерывным способом на машине ПН-2 с дюралюминиевым кристаллизатором в ЦЗЛ ОАО «СМК».

Диаметр слитка составлял 165 мм, а его длина – 700÷950 мм. После обрезки головной (150 мм) и донной (100 мм) частей длина литой заготовки равнялась 500÷700 мм.

Металлографические исследования структуры слитков, заготовок и деформируемых полуфабрикатов после термоциклической осадки и прессованных прутков проводили на оптическом микроскопе ЛабoМет—И1. Механические свойства определяли по ГОСТ 1497-84 на цилиндрических образцах с диаметром рабочей части 6 мм. Измерение твердости образцов из силумина проводили на приборе ТШ-2Б.

Для получения заготовок были использованы температурные интервалы максимальной пластичности, определенные для литого и деформированного состояний поршневого заэвтектического силумина, из которых температуры максимальной пластичности составили 500°C и 450°C соответственно [16]. Поэтому осадку и прессование проводили при этих температурах.

### Результаты и обсуждение

Опробование изготовления поршневой заготовки методом молотовой штамповки на кривошипно-шатунном молоте непосредственно из литой заготовки в горячем состоянии привели к появлению большего числа визуально наблюдаемых трещин на юбочной поверхности формируемой детали. Дефекты штампованных деталей являются результатом неравномерности деформации и различной скорости деформирования металла под бойками молота (от 5-9 м/с до практически нуля). Наиболее чувствительны к этим параметрам сплавы с низкой пластичностью, в том числе легированные заэвтектические силумины. Поэтому была выбрана технология получения поршневой заготовки с использованием метода объемной штамповки на гидравлическом прессе вертикального типа с одновременной подпрессовкой. Данная технология предусматривает штамповку поршневых заготовок из прессованного прутка диаметром 100 мм. Однако непосредственная прессовка слитка после гомогенизационного нагрева и выдержки в печи при температуре 480-500 °С в течение 3-х часов не позволила получить качественные прутки, пригодные для дальнейшей обработки. В связи с этим применили предварительную термоциклическую осадку слитков, чтобы повысить перед прессованием пластичность силумина и увеличить диаметр заготовки для получения больших степеней вытяжки при прессовании на пруток диаметром 100 мм. Был рассчитан наиболее рациональный диаметр контейнера под прессование – 300 мм, что позволяет получить коэффициент вытяжки – 9 (степень деформации более 90 %).

Предельную степень деформации при осадке поршневого заэвтектического силумина из слитка определяли на цилиндрических образцах с соотношением длины образца к диаметру 2,5÷3 (диаметр 25÷30 мм и длина 75 мм). Образцы выдерживали 3 часа при температуре 370-500 °С и осаживали при этой температуре на вертикальном гидравлическом прессе усилием 1,25 МН до появления первой трещины по бочке. Определено, что предельная степень осадки для литого и гомогенизированного образца из легированного заэвтектического силумина составляет 10÷15 % в зависимости от температуры осадки. Для предварительно деформированного сплава она может достигать 35 %.

С учетом полученных результатов были разработаны термокинетические параметры термоциклической осадки опытных слитков. Перед осадкой заготовки нагревали и выдерживали в печи сопротивления в течение 4-х часов при 480-500 °С. Целью этой выдержки являлась гомогенизация структуры литого силумина, повышение пластичности слитков и их полный прогрев. Осадку проводили на вертикальном гидравлическом прессе усилием 90 МН. Для уменьшения тепловых потерь и снижения температуры заготовки в процессе проведения цикла осадки бойки пресса были нагреты до 300÷350 °С. После деформации в каждом цикле проводили подогрев заготовки до температуры осадки и выдержку в течение 1 часа для снятия наклепа. Для данного химического состава и диаметра слитков количество циклов осадки составляло 4-5 в зависимости от длины слитка. Степень

относительного сжатия и размеры заготовки по циклам при осадке слитков из поршневого заэвтектического силумина приведены в таблице 1.

Температура нагрева в цикле составляла 480-500 °С, степень обжатия в первом цикле – не более 15 %, для каждого типоразмера слитка она показана в таблице 1, и равна 10÷13 %. Суммарная степень относительного сжатия для каждого типоразмера слитков составляла 53÷60 %, а диаметр конечной заготовки после всего процесса термоциклической осадки – 275 ÷ 285 мм (см. таблица 1).

Таблица 1

Степень относительного сжатия и размеры заготовок по циклам при осадке слитков диаметром 165 мм из поршневого заэвтектического силумина

Исходная заготовка, мм		Циклы осадки						
		1			2			
h	d	ε, %	h, мм	d, мм	ε, %	h, мм	d, мм	
450	165	11	400	176	15	340	192	
500	165	12	440	173	16	370	185	
600	165	13	522	185	17	434	204	
650	165	10	585	180	15	498	196	
700	165	10	630	179	15	536	197	
Циклы осадки								
3			4			5		
ε, %	h, мм	d, мм	ε, %	h, мм	d, мм	ε, %	h, мм	d, мм
18	280	315	29	200	275	-	-	-
18	300	207	33	200	279	-	-	-
20	347	230	22	278	252	25	223	285
17	414	218	21	327	246	25	245	280
17	445	220	20	356	250	22	278	278

После проведения термоциклической осадки заготовки из поршневого силумина были успешно пропрессованы на пруток диаметром 100 мм на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 70 МН. Диаметр контейнера равнялся 300 мм. Процесс прессования проводили прямым способом без смазки контейнера по режиму: температура прессования – 440÷450 °С; скорость прессования – 0,05÷0,1 м/мин; время выдержки перед прессованием – 4 часа; Расчетный коэффициент вытяжки ( $K_B$ ) составлял – 9 (суммарная степень деформации – 94 %, величина пресс-остатка 40 мм). Реальный коэффициент вытяжки и размеры прутка приведены в таблице 2.

Таблица 2

Реальный коэффициент вытяжки и размеры прессованного прутка из поршневого заэвтектического силумина

Заготовка после осадки			Прессованный пруток			
h, мм	d, мм	$S \cdot 10^{-2}, \text{мм}^2$	h, мм	d, мм	$S \cdot 10^{-2}, \text{мм}^2$	$K_B$
200	275	594	1210	100	78,5	7,6
200	279	611	1256	100	78,5	7,8
223	285	638	1510	100	78,5	8,1
245	280	615	1610	100	78,5	7,8
279	278	607	1840	100	78,5	7,7

Исследование микроструктуры слитков полунепрерывного литья, осажённых заготовок и прессованных прутков из поршневого заэвтектического силумина показало, что с увеличением суммарной степени деформации при горячей обработке давлением происходит измельчение кристаллов первичного кремния, эвтектика приобретает глобулярное строение и равномерно распределяется по сечению прутка (рис. 1).

Механические свойства образцов из опытного сплава в литом состоянии, после осадки и прессования приведены в таблице 3 и находятся в соответствии с изменениями микроструктуры заготовок. Видно, что обработка давлением заэвтектических силуминов повышает их характеристики тем в большей мере, чем выше суммарная степень деформации заготовки. Так, прессованный полуфабрикат из поршневого заэвтектического силумина имеет значение временного сопротивления разрыву на 40 % выше, чем у слитка полунепрерывного литья.

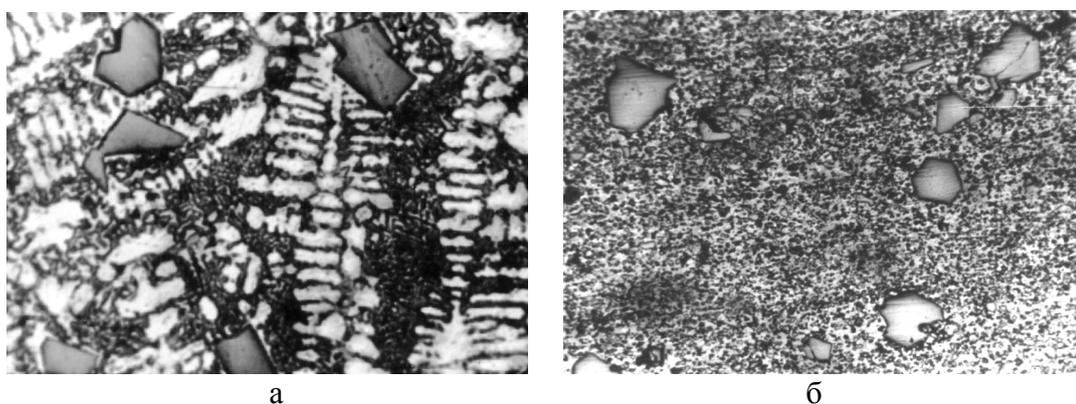


Рис. 1. Микроструктура слитка (а) и прессованного прутка (б) из легированного заэвтектического силумина

Таблица 3

Влияние горячей деформации на механические свойства поршневого заэвтектического силумина

Состояние	Механические характеристики		
	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	НВ, МПа
Слиток, диаметр 165 мм	150	1,2	1050
Заготовка после осадки	181	1,5	970
Прессованный пруток, диаметр 100 мм	213	2,6	868

### Выводы

1. Приведены термокинетические параметры термоциклической осадки слитков полунепрерывного литья диаметром более 150 мм и прессования для получения качественных прутков из поршневого заэвтектического силумина.

2. Увеличение суммарной степени пластической деформации независимо от ее вида (осадка, прессование) приводит к повышению прочностных и пластических характеристик поршневых заэвтектических силуминов ( $\sigma_B$ ,  $\delta$ ).

## Список литературы

1. Федюкин В.К Смагоринский М.Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин – Л.: Машиностроение, 1989. – 255 с.
2. Чуракова А.А. Гундеров Д.А. Механические свойства сплава TiNi, полученного интенсивной пластической деформацией и последующей термоциклической обработкой // Вектор науки ТГУ. – 2013. – № 3 (25). – С. 288–291.
3. Prudnikov A.N. Deformable heatproof transeutectic silumin for pistons // Steel in Translation. – 2009. – Vol. 39, N 6. – P. 456–459.
4. Термоциклическая обработка литейных сплавов на основе алюминия / А.Д. Грешилов, Д.С. Фильчаков, Б.Д. Лыгденов, Мей Шунчи // Ползуновский альманах. – 2014. – № 2. – С. 134–136.
5. Прудников А.Н. Поршневые деформируемые заэвтектические силумины // Технология металлов. – 2014. – № 2. – С. 8–11.
6. Monzen R., Watanabe C. Microstructure and mechanical properties of Cu-Ni-Si alloys // Materials Science and Engineering. – 2008. – Vol. 483–484. – P. 117–119.
7. Agbadua S.A., Mgbemena C.O., Mgbemena C.E. Thermal cycling effects on the fatigue behaviour of low carbon steel // Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering. – 2011. – Vol. 10, N 14. – P. 1345–1357.
8. Прудников А.Н. Комплексное воздействие отжига и термоциклическойковки на структуру и свойства заэвтектических силуминов // Деформация и разрушение материалов. – 2014. – № 2. – С. 14–20.
9. Yu T., Wang L., Zhao Y.Q. Effects of thermal exposure on cyclic deformation and fracture behavior of Ti600 titanium alloy // International Journal of Fatigue. – 2012. – Vol. 35, N 1. – P. 31–36.
10. Прудников А.Н. Структура и свойства жаропрочного силуминового поршня // Известия вузов. Черная металлургия. – 2009. – № 8. – С. 28–30.
11. Song D., Kang G., Kan Q. The effect of martensite plasticity on the cyclic deformation of super-elastic NiTi shape memory alloy // Smart Materials and Structures. – 2014. – Vol. 23 (1). – P. 1–7.
12. Прудников А.Н. Прудников В.А. Влияние термоциклическойковки и последующего отжига на коэрцитивную силу и линейное расширение стали 10 // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 451–456.
13. Microstructure and properties of Cu-Cr alloys prepared by a shortened process and a conventional process / C.D. Xia, M.P. Wang, G.Y. Xu, W. Zhang, Y.L. Jia, H.C. Yu // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 199–200. – P. 1890–1895.
14. Andronov I.N., Demina M.Yu, Polugrudova L.S. Calculation-experimental analysis of the thermocyclic deformation of titanium nickelide coil springs // Russian Metallurgy (Metally). – 2016. – Vol. 2016, N 4. – P. 300–306.
15. Taskin M., Orhan M., Ozan S. Diffusion bonding of fine grained high carbon steels in the super-plasticity temperature range // Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. – 2006. – Vol. 12. – P. 362–367.
16. Прудников А.Н. Структурно-технологические основы разработки прецизионных силуминов с регламентированным содержанием водорода: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.09. – Новосибирск, 2013. – 40 с.
17. Furuya Y., Park Y.C. Thermal cyclic deformation and degradation of shape memory effect in Ti-Ni alloy // Nondestructive Testing and Evaluation. – 1992. – Vol. 8 (1). – P. 541–554.
18. Прудников А.Н. Исследование комплексного модифицирования заэвтектических силуминов с содержанием кремния 20...30 % фосфидами и оксидами некоторых металлов // Известия вузов. Цветная металлургия. – 1995. – № 2. – С. 38–41.

**PRODUCTION OF PRESSED BILLETS FROM HYPEREUTECTIC SILUMIN  
AND THEIR PROPERTIES****Prudnikov A.N.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: a.prudnikov@mail.ru**Prudnikov V.A.**, Ph.D. student, e-mail: vladpr88@gmail.com

Siberian State Industrial University, 42 Kirov st., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

**Abstract**

Results of preliminary thermocycling effect draft on the microstructure and mechanical properties of semi-continuous casting of ingots piston hypereutectic silumin based Al-20 % Si. Ingots used for draft vertical type hydraulic press force of 90 MN. Technological parameters of thermocyclic draft: the heating temperature in the cycle was 480-500 ° C, the reduction rate in the first cycle is no more than 15 %, the number of cycles is 4-5. The possibility of pressing of billets after draft from the doped hypereutectic silumin is shown by using the rational thermokinetic parameters of deformation. The parameters of the pressing process are calculated: pressing temperature – 440÷450 °C; holding time before deformation – 4 h; pressing speed – 0.05÷1 m / mm; the design drawing ratio is 9; the size of the press-residue is 40 mm. The structure and mechanical properties of ingots, billets after draft and pressed rods from piston silumin are studied. It has been established that plastic deformation of doped hypereutectic silumins leads to the crushing of primary silicon crystals in the structure of the billets. The eutectic component (Al + Si) in the deformed silumin becomes a globular form. Changes in the structure of the hypereutectic silumin after deformation provide an increase in the strength and plastic characteristics ( $\sigma_{ts}$ ,  $\delta$ ) of the billets. The strength ( $\sigma_{ts}$ ) of the pressed billets from the hypereutectic silumin is 40 % higher than that of the ingot, and the elongation ( $\delta$ ) is more than 2 times higher.

**Keywords**

silumin, draft, pressing, deformation thermo-cyclic treatment, structure, mechanical properties.

УДК 669.715.017.16

**ВОЗДЕЙСТВИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ Al-(20÷40)% Si**

*М.В. ПОПОВА, доктор техн. наук, профессор  
М.А. МАЛЮХ, соискатель  
(СибГИУ, г. Новокузнецк)*

**Попова М.В.** – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42  
Сибирский государственный индустриальный университет,  
e-mail: m.popova@rdtc.ru

Представлены результаты исследований влияния модифицирования сульфатом меди на микроструктуру, тепловое расширение и плотность сплавов алюминия с 20÷40% кремния. Проводили продувку расплава парами 3-7%-ного водного раствора  $\text{CuSO}_4$  в течение 5–15 минут при температуре 800–1100°C. Кристаллизацию осуществляли в алюминиевый кокиль и с имитацией жидкой штамповки. Модифицирование сплавов предложенным способом способствует формированию мелкодисперсной структуры сплавов Al-(20÷40)%Si, особенно после высокоскоростной кристаллизации.

Установлено, что обработка расплава парами водного раствора сульфата меди влияет на величину температурного коэффициента линейного расширения, микротвердость и плотность сплавов Al-(20÷40) % Si. ТКЛР в интервале испытаний 50–250°C снижается на 3–16%, тогда как в интервале 300–450 °C наблюдается его увеличение. После модифицирования повышается микротвердость и снижается плотность сплавов на 3-6%. Указанные изменения свойств более заметно проявляются с увеличением содержания кремния.

**Ключевые слова:** алюминий, кремний, модифицирование, кристаллизация, структура, температурный коэффициент линейного расширения, плотность.

**Введение**

Тепловое расширение и плотность являются важными свойствами для изделий таких отраслей промышленности, как специальное приборостроение и двигателестроение. Основой легких сплавов с низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР,  $\alpha$ ) традиционно является система алюминий – кремний, причем кремния необходимо вводить не менее 20 % [1–4].

Обязательной технологической операцией при выплавке силуминов является модифицирование, основной целью которого является повышение механических свойств сплавов за счет изменения параметров структуры: диспергирования и изменения морфологии структурных составляющих, а также более равномерного распределения их по объему слитка [5–8]. Однако результаты ранее проведенных нами исследований показывают, что модифицирование можно использовать для улучшения не только механических, но и физических свойств силуминов [9–11]. С целью измельчения кристаллов первичного кремния (КПК) и эвтектики, а также обеспечения необходимого комплекса физико-механических свойств разработаны многочисленные способы модифицирования высококремнистых алюминиевых сплавов. Известны способы получения сплавов системы Al-Si, в которых с целью улучшения механических и технологических свойств их расплавы подвергают обработке газообразными веществами, солями, легкоразлагающимися твердыми

веществами и нанопорошками [12-19]. В настоящее время продолжается поиск модифицирующих составов, позволяющих улучшить структуру и повысить уровень физико-механических свойств высококремнистых силуминов [20].

Эффективность обработки расплава во многом зависит от условий кристаллизации. Высокие скорости охлаждения алюминиевых сплавов в процессе кристаллизации способствуют улучшению параметров микроструктуры и благоприятно влияют на физико-механические свойства [21 – 23].

В связи с этим, *целью настоящей работы* являлось изучение модифицирующего действия продувки расплава парами водного раствора сульфата меди на микроструктуру и физические свойства сплавов алюминия с 20, 30 и 40% Si. Учитывалось также влияние скорости охлаждения сплавов в процессе кристаллизации.

### Методика экспериментального исследования

Сплавы выплавляли в печи шахтного типа с нагревателями из карбида кремния в алуновом тигле. В качестве шихты использовали алюминий марки А7, кремний Кр0 и технически чистый сульфат меди  $\text{CuSO}_4$  (медный купорос). Шихтовый алюминий расплавляли, вводили в него кремний, после его полного расплавления проводили продувку расплава парами водного раствора  $\text{CuSO}_4$  в течение 5 – 15 минут при температуре 800 – 1100 °С. По окончании обработки проводили заливку металла с разными скоростями кристаллизации: в алюминиевый кокиль (~ 20 °С/с) и между двумя массивными медными плитами – имитация жидкой штамповки (~ 100 °С/с), при этом температура заливки равнялась температуре обработки.

Из полученных слитков изготавливали образцы для металлографического и дилатометрического исследования. Изучение микроструктуры сплавов осуществляли с помощью оптического микроскопа *OLYMPUS GX-51* при увеличениях  $\times 100$  и  $200$ . Микротвердость и плотность образцов определяли по стандартным методикам [24]. ТКЛР определяли с помощью дифференциального оптического фоторегистрирующего дилатометра системы Шевенара в интервале температур испытания 50–450 °С, погрешность определения составляла  $\pm 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

### Результаты и обсуждение

Исследовано тепловое расширение сплавов Al–(20÷40) % Si до и после обработки расплава парами водного раствора сульфата меди. Результаты определения ТКЛР сплавов представлены на рис. 1. Видно, что в низкотемпературном интервале испытания происходит снижение ТКЛР для всех изученных сплавов в среднем на 3–16 %. Наиболее существенное снижение ТКЛР наблюдается для сплава Al–40% Si: ТКЛР сплава обычного приготовления имеет среднее значение  $\bar{\alpha}_{50-250} = 13,4 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ , тогда как после обработки расплава  $\bar{\alpha}_{50-250} = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ .

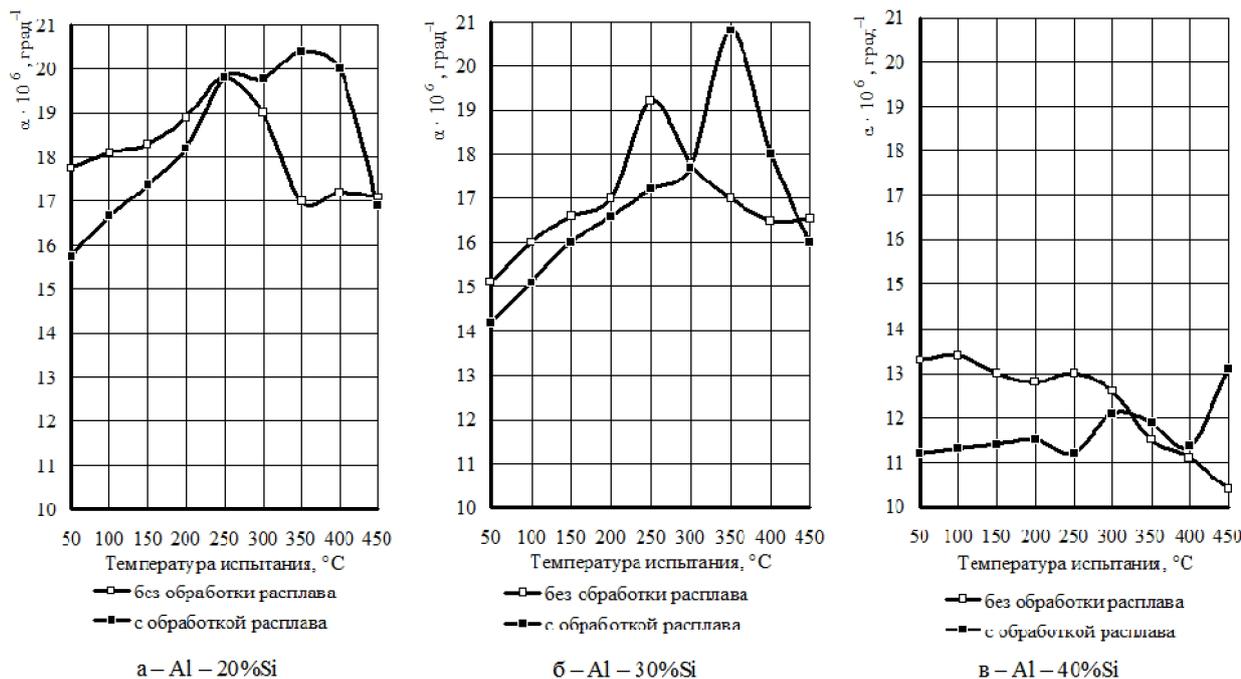


Рис. 1. Влияние обработки расплава парами водного раствора  $\text{CuSO}_4$  на линейное расширение сплавов Al-Si

Снижение ТКЛР в этом случае может быть обусловлено увеличением содержания меди в составе сплавов и развитием процессов старения в интервале 200-300 °С при охлаждении с температур кристаллизации. Повышение значений ТКЛР в высокотемпературной области испытаний за счет обработки расплава не является определяющим, поскольку приборы при таких температурах не эксплуатируют.

Для достижения такого эффекта оптимальной является обработка 3÷7 %-ным водным раствором сульфата меди. Применение водного раствора с большей концентрацией приводит к большому количеству вредных паров.

Проведение обработки расплава меньше 5 минут и при температурах ниже 800 °С не обеспечивает нужного понижения ТКЛР по причине слабого усвоения  $\text{CuSO}_4$  расплавом. Проведение обработки расплава больше 15 минут и при температурах выше 1100 °С приводит к развитию усиленного шлакообразования и, следовательно, к уменьшению выхода годного металла.

Обработка расплава 3%-ным водным раствором  $\text{CuSO}_4$  способствует существенному измельчению структурных составляющих, особенно после высокоскоростной кристаллизации. На рис. 2 приведена микроструктура сплавов Al – 20% Si обычного приготовления (а) и после обработки парами водного раствора  $\text{CuSO}_4$  (в), залитых в кокиль. Для сравнения представлена микроструктура тех же сплавов (б, г), залитых с высокой скоростью кристаллизации. Видно, что высокоскоростная кристаллизация способствует дополнительному измельчению кристаллов первичного кремния и формированию более равномерной структуры.

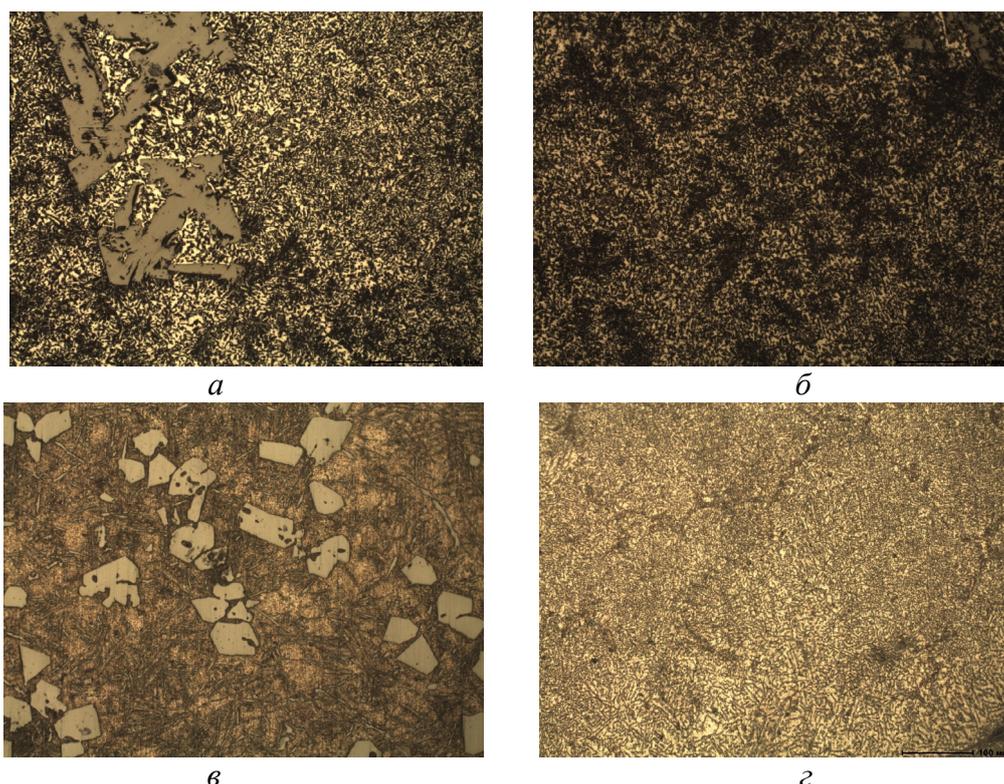


Рис. 2. Микроструктура сплава Al – 20% Si:

без обработки, заливка в кокиль (а), без обработки, имитация жидкой штамповки (б), обработка парами водного раствора CuSO<sub>4</sub>, заливка в кокиль (в), обработка парами водного раствора CuSO<sub>4</sub>, имитация жидкой штамповки (г)

Исследованы микротвердость и плотность сплавов Al–(20÷40) % Si до и после обработки расплава. Результаты определения этих свойств приведены на рис. 3. Как следует из приведенных данных, обработка расплава 3%-ным водным раствором CuSO<sub>4</sub> незначительно повышает микротвердость, но заметно снижает плотность по сравнению со сплавами обычного приготовления. Наиболее существенное уменьшение плотности наблюдается для сплава Al–40% Si: у сплава обычного приготовления  $\rho = 2,51 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , тогда как после обработки расплава  $\rho = 2,44 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

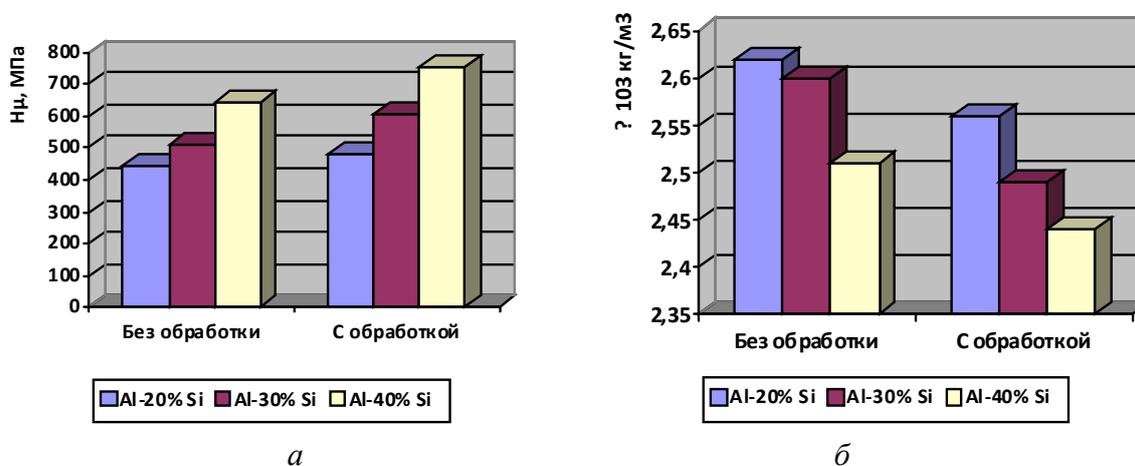


Рис. 3. Влияние обработки расплава парами водного раствора сульфата меди на микротвердость (а) и плотность (б) сплавов Al-Si

Уменьшение плотности сплавов на 3–6% связано с тем, что в процессе продувки парами водного раствора сульфата меди водяной пар разлагается по реакции  $H_2O \rightarrow 2H + O$ , что приводит к насыщению расплава водородом и кислородом. В итоге после кристаллизации сплавов Al–Si образуется пересыщенный твердый раствор с повышенным содержанием элементов внедрения [25]. Вторая составляющая модификатора – медь также входит в состав  $\alpha$ -твердого раствора. Повышение микротвердости после обработки расплава водным раствором  $CuSO_4$  можно объяснить увеличением легированности сплавов медью.

### Выводы

Установлено, что модифицирование сплавов Al–(20÷40) % Si путем обработки расплава парами водного раствора сульфата меди обеспечивает диспергирование всех структурных составляющих. Высокоскоростная кристаллизация модифицированных сплавов способствует дополнительному измельчению кристаллов первичного кремния и формированию более равномерной структуры.

Показано, что обработка расплава парами водного раствора сульфата меди влияет на величину ТКЛР, микротвердость и плотность сплавов Al–(20÷40) % Si. ТКЛР в интервале испытаний 50–250°C снижается на 3–16%, тогда как в интервале 300–450 °C наблюдается его увеличение. Установлено, что модифицирование водным раствором сульфата меди незначительно повышает микротвердость, но снижает плотность по сравнению со сплавами обычного приготовления. С увеличением содержания кремния указанные изменения свойств проявляются наиболее заметно.

### Список литературы

1. *Добаткин В.И., Елагин В.И.* Гранулируемые алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1981. – 176 с.
2. Спеченные материалы из алюминиевых порошков / В.Г. Гопиенко, М.Е. Смагоринский, А.А. Григорьев, А.Д. Беллавин; под ред. М.Е. Смагоринского. – М.: Металлургия, 1993. – 320 с.
3. *Polmear I.J.* Light alloys: from traditional alloys to nanocrystals. – Amsterdam: Elsevier Ltd, 2005. – 421 p.
4. О влиянии кремния на тепловое расширение алюминия А7 / В.К. Афанасьев, А.В. Горшенин, М.В. Попова, А.Н. Прудников, М.А. Старостина (М.А. Малюх) // Металлургия машиностроения. – 2010. – № 6. – С. 23–26.
5. *Строганов Г.Б., Ротенберг В.А., Гершман Г.Б.* Сплавы алюминия с кремнием. – М.: Металлургия, 1977. – 272 с.
6. *Напалков В.И., Махов С.В.* Легирование и модифицирование алюминия и магния. – М.: МИСИС, 2002. – 376 с.
7. *Афанасьев В.К., Попова М.В.* Новые способы обработки жидких сплавов алюминия с 30-50% кремния // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2001. – № 2. – С. 29–31.
8. Модифицирование силуминов – разные подходы для одной системы легирования / А.О. Кузнецов, Д.А. Шадаев, В.Ю. Конкевич, С.Т. Бочвар, Т.М. Кунявская // Технология легких сплавов. – 2014. – № 4. – С. 75–81.
9. *Ушакова В.В., Попова М.В., Лузянина З.А.* О влиянии обработки расплава на линейное расширение сплавов Al–20÷40% Si // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1995. – № 4. – С. 69.

10. Попова М.В., Ружило А.А. Наследственное влияние обработки шихты и расплава на терморасширение заэвтектических силуминов // Литейное производство. – 2000. – № 10. – С. 4–6.
11. Влияние обработки расплава водородосодержащими веществами на тепловое расширение алюминия / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, М.А. Старостина (М.А. Малюх), Н.В. Кривичева // Металлургия машиностроения. – 2011. – № 3. – С. 30–33.
12. Modification of eutectic Si in Al-Si based alloys / J.H. Li, M. Albu, T.H. Ludwig, Y. Matsubara, F. Hofer, L. Arnberg, Y. Tsunekawa, P. Schumacher // Materials Science Forum. – 2014. – Vol. 794–796. – P. 130–136. – doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.794-796.130.
13. Effect of Ca level on the formation of silicon phases during solidification of hypereutectic Al-Si alloys / Kawther Al-Helal, Yun Wang, Ian Stone and Zhongyun Fan // Materials Science Forum. – 2013. – Vol. 765. – P. 117–122. – doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.765.117.
14. Study on dual modification of Al–17%Si alloys by structural heredity / J. Zhang, H. Chen, H. Yu, Y. Jin // Metals. – 2015. – N 5. – P. 1112–1126. – doi: 10.3390/met5021112.
15. Haitham Razouqi Saleh. Mechanical properties of the modified Al-12%Si alloy reinforced by ceramic particles // Engineering and Technology Journal. – 2010. – Vol. 28. – N 2. – P. 289–300.
16. Microstructural characteristics of Sr and Na modified Al-Mg-Si alloy / B.N. Sarada, P.L. Srinivasamurthy, Swetha // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 2, iss. 8. – P. 3975–3983.
17. Водородная обработка расплава для увеличения деформируемости высококремнистых Al-сплавов / В.К. Афанасьев, В.В. Герцен, Г.Т. Коровин, С.В. Долгова, М.В. Попова // Металлургия машиностроения. – 2015. – № 4. – С. 14–18.
18. Influence of soaking time of modifier in melt on microstructure of Al-12%Si alloys / N.V. Martyushev, V.S. Bashev and A.P. Zyкова // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. Vol. 177. – P. 012118. – doi: 10.1088/1757-899X/177/1/012118.
19. Афанасьев В.К., Попова М.В., Самонь В.А. О создании новых легких деформированных сплавов для космической техники // Металлургия машиностроения. – 2014. – № 5. – С. 21–28.
20. Zu Fangqiu, Li Xiaoyun. Functions and mechanism of modification elements in eutectic solidification of Al-Si alloys: A brief review // China Foundry. – 2014. – Vol. 11, N 4. – P. 287–295.
21. Cais J., Weiss V., Svobodova J. Relation between porosity and mechanical properties of Al-Si alloys produced by low-pressure casting // Archives of Foundry Engineering. – 2014. – Vol. 14, Special issue 1. – P. 97–102.
22. Structural and mechanical properties of Al–Si alloys obtained by fast cooling of a levitated melt / S.P. Nikanorov, M.P. Volkov, V.N. Gurin, Yu.A. Burenkov, L.I. Derkachenko, B.K. Kardashev, L.L. Regel, W.R. Wilcox // Materials Science and Engineering: A. – 2005. – Vol. 390, iss. 1-2. – P. 63–69.
23. Srivastava V.C., Mandal R.K., Ojha S.N. Microstructure and mechanical properties of Al–Si alloys produced by spray forming process // Materials Science and Engineering: A. – 2001. Vol. 304–306. – P. 555–558.
24. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
25. О влиянии водяного пара на формирование свойств высококремнистых Al-сплавов / В.К. Афанасьев, В.В. Герцен, С.В. Долгова, Ю.М. Мусохранов, М.В. Попова // Металлургия машиностроения. – 2015. – № 5. – С. 17–21.

## MODIFICATION EFFECTS ON MICROSTRUCTURE AND PHYSICAL PROPERTIES OF Al-(20÷40)% Si ALLOYS

**Popova M.V.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: m.popova@rdtc.ru  
**Malyuh M.A.**, Post-graduate Student, e-mail: starostina\_ma1976@mail.ru

Siberian State Industrial University, 42 Kirov str., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

### Abstract

This paper presents the results of the research of the effect of alloy modification with Cu sulfate on microstructure, thermal expansion and density of aluminium alloys with 20÷40% Si. Modification was carried out in the following way. Alloy melts were purged for 5-15 minutes with vapors of 3-7% water solution of CuSO<sub>4</sub> at a temperature 800–1100°C. Crystallization was carried out in the aluminum chill mold whereby liquid stamping was imitated.

The metallographic analysis has shown that the alloy modification proposed in the current paper induces the formation of finely dispersed structure of Al-(20÷40) % Si alloys, especially after high-speed crystallization. At the same time the size of both the primary crystals of Si as well as of the eutectic Si decreases.

The conducted research has shown that the treatment of alloys with vapors of water solution of Cu sulfate affects the temperature coefficient of linear expansion, microhardness and density of alloys Al-(20÷40) % Si. The TCLE goes down by 3-16% in the temperature range 50–250°C whereas it increases in the temperature range 300–450 °C. As a result of modification the microhardness of alloys increases whereas their density goes down by 3-6%. The aforementioned changes of alloy properties become more pronounced when the content of Si is increased.

### Keywords

aluminum, silicon, modification, microstructure, temperature coefficient of linear expansion, crystallization, density.

УДК 531.44:620.179.16

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИЗНОСА  
СТАЛИ ГАДФИЛЬДА\**Д.В. ЛЫЧАГИН<sup>1,2</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор  
О.С. НОВИЦКАЯ<sup>1,3</sup>, аспирант**А.В. ФИЛИПОВ<sup>2,3</sup>, кандидат техн. наук**(<sup>1</sup>ТГУ, г. Томск,**<sup>2</sup>ТПУ, г. Томск,**<sup>3</sup>ИФПМ СО РАН, г. Томск)***Лычагин Д.В.** – 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Томский государственный университет,

e-mail: dvl-tomsk@mail.ru

Для системы мониторинга трибосопряжения с использованием сигнала акустической эмиссии (АЭ) необходимо тестирование сигнала в зависимости от особенностей износа. В стали Гадфильда кристаллографическая ориентация влияет на механизм деформации. В работе были установлены различия в поведении трения и износа для сухого трения и параметров сигнала АЭ для случаев скольжения и скольжения с двойникованием. АЭ точно определяет момент перехода трибосопряжения от области приработки к области установившегося трения. Для монокристаллов с ориентацией благоприятной для двойникования наблюдается чередование деформационного упрочнения и активного износа отражающееся на изменении параметров сигнала АЭ.

**Ключевые слова:** трение скольжения, износ, акустическая эмиссия, сталь Гадфильда, монокристалл.

**Введение**

Сталь Гадфильда является материалом, обладающим комплексом уникальных свойств: высокая пластичность и износостойкость, интенсивное деформационное упрочнение.

В настоящее время существует несколько точек зрения о возможной причине высокой износостойкости стали Гадфильда [1-5]. Вклад в упрочнение стали Гадфильда оказывают атомы внедрения углерода, которые искажают кристаллическую решетку и препятствуют скольжению дислокаций [6]. Кроме этого, они могут образовывать комплексы с атомами марганца [7]. Деформация поверхностного слоя в большой степени зависит от наличия или отсутствия упругих колебаний в трибосопряжении [8] и образования деформационных мезоструктур по механизму ротационной пластичности [9]. В процессе трения в поверхностном слое наблюдается нанокристаллическая структура и микродвойники. Результаты наноиндентирования свидетельствуют, что поверхностный слой является неравновесным после трения и переходит к равновесному спустя 8-12 дней [10].

В поликристаллах изучение деформации осложнено присутствием границ зерен, исходной текстурой поликристаллов и её изменением в ходе деформации. Поэтому представляет интерес исследование деформационных процессов при трении скольжения с использованием монокристаллов [11]. Как показано в работах [12-14], выбором ориентации

\* **Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-08-00377\_а.

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность своим коллегам д.т.н. ИФПМ СО РАН *Е.А. Колубаеву* и *О.В. Сизовой* за помощь в выполнении работы и обсуждении результатов.

монокристалла стали Гадфильда можно управлять механизмом деформации (скольжением и двойникованием) и задавать активность действующих систем сдвига.

Большой интерес в трибологических исследованиях представляет регистрация колебаний ультразвуковой частоты (сигналы акустической эмиссии), которые возбуждаются при пластической деформации и появлении трещин в поверхностном слое при трении, адгезионном схватывании, отделении частиц износа, появлении и отслоении оксидных пленок [15-21]. Соответствие акустической эмиссии характеру трения позволяет применять ее в качестве метода диагностики контактных узлов и получать информацию о состоянии поверхностей трения по интенсивности и частотному спектру ультразвукового сигнала.

Таким образом, использование сигналов акустической эмиссии дает возможность контролировать механизм износа в трибосопряжениях. Установление связи параметров сигнала акустической эмиссии и процессов деформации и износа стали Гадфильда при трении скольжения является актуальной задачей. Использование монокристаллов позволяет проследить влияние кристаллографической ориентации осей нормального давления и трения на процессы износа.

### Материал и методика

Образцы монокристаллов стали Гадфильда, выращенные по методу Бриджмена, имели размер 10.0x3.6x3.6 мм и аустенитную структуру после закалки. Трение скольжения со скоростью 0,1 м/с осуществляли на трибометре TRIBOtechnik по схеме «палец-диск» при комнатной температуре. Испытывали монокристаллы с ориентацией осей сжатия  $[10\bar{7}1]$  и трения  $[\bar{3}42]$  при давлении 2,5 МПа и 1,25 МПа – для  $[11\bar{8}]$  и  $[441]$ , соответственно. Деформационный рельефа изучали на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе Olympus LEXT OLS4100. Акустическую эмиссию регистрировали при помощи модуля ЭЯ-2 разработки Тольяттинского госуниверситета.

### Результаты и обсуждение

Для монокристаллов с ориентацией оси сжатия  $[10\bar{7}1]$  и оси трения  $[\bar{3}42]$  характерным является развитие деформационных процессов как от действия силы нормального давления (сжатия), так и от действия силы трения. Развитие деформации осуществляется путем скольжения по плоскостям  $\{111\}$ .

На зависимости коэффициента трения от расстояния можно выделить область приработки, которая характеризуется большими колебаниями величин коэффициента трения и сигнала акустической эмиссии. Прирост величины огибающей сигнала АЭ обусловлен большим числом актов деформации на этой стадии, происходящих при интенсивном формировании и разрушении контактных площадок, отделении и отрыве частиц износа. В области установившегося трения наблюдаются небольшие колебания коэффициента трения и сигнала АЭ. Явление периодических колебаний коэффициента трения связано с окислительным механизмом изнашивания образца. В процессе трения поверхностный слой образца деформируется, а затем разрушается с отделением мелких оксидных и металлических частиц.

Анализ фреймов, регистрируемого сигнала АЭ, показал существенные различия в виде амплитудно-частотных характеристиках сигналов, относящихся к областям приработки и установившегося трения. Анализировали характерный сигнал АЭ (а), интенсивность мощности спектра (б) и изменение центральной частоты сигнала (в) (рис. 1).

Для этапа приработки характерными являются сигналы с невысокой амплитудой и ярко выраженным единичным всплеском – burst type signals. На этапе установившегося трения происходит увеличение амплитуды сигнала и количества всплесков. Фрейм сигнала

АЭ состоит из череды пиков АЭ с различной амплитудой. Наибольшая интенсивность мощности спектра данного фрейма вдвое меньше, чем у фрейма из области приработки трибосопряжения. Центральная частота фрейма сигнала АЭ находится в диапазоне 125..305 кГц.

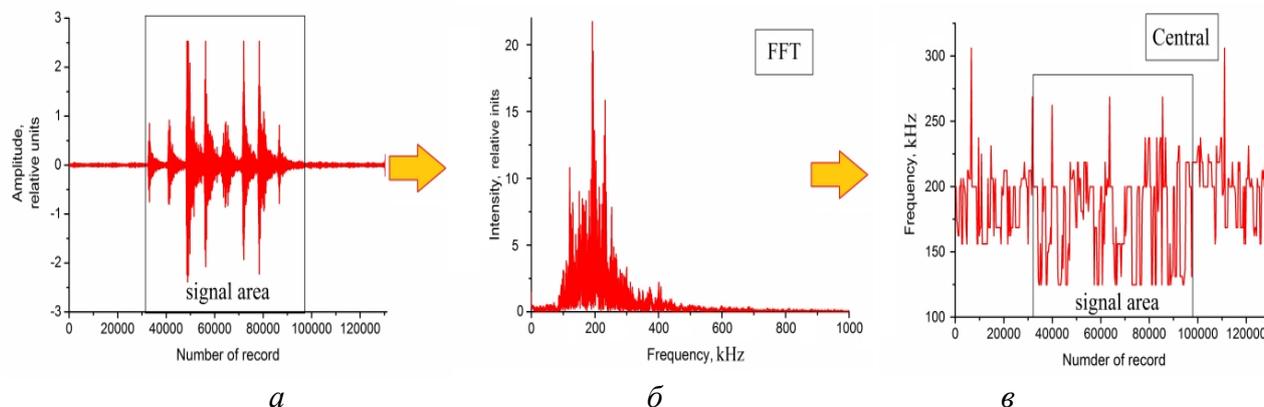


Рис. 1. Характерный сигнал АЭ в области установившегося трения [10 7 1] – монокристаллов

Монокристаллы рассматриваемой ориентации благоприятны для скольжения. Деформационные процессы определяются эволюцией и последовательностью включения плоскостей сдвига в деформационный процесс в зависимости от величины напряжения сдвига для систем скольжения.

Трение монокристаллов стали Гадфильда с ориентацией оси нормального давления [1 1 3] и оси трения [4 4 1] характеризуется четырьмя отдельными периодами (продолжительность каждого 8 часов): приработка (state 1), деформационное упрочнение (state 2), интенсивный износ (state 3), повторное деформационное упрочнение (state 4). После завершения четвертой стадии начинается чередование стадий 3 и 4. Для каждого из четырех периодов трения были выделены характерные виды коротких сигналов – фреймов АЭ.

Каждый период имеет отличительные фреймы сигнала АЭ. На периоде приработки можно выделить за период регистрации сигнала два отрезка: с большим всплеском амплитуды сигнала и без всплеска. Следующий временной период характеризуется интенсивным деформационным упрочнением и низкой интенсивностью износа монокристаллов стали Гадфильда. За время регистрации фрейма наблюдаются два участка с чередой всплесков амплитуды сигнала (state 2). На этом этапе число всплесков амплитуды фрейма АЭ увеличивается, а максимальная амплитуда сигнала достигает  $\sim 0.95V$ . Медианная частота фрейма АЭ изменяется от 54 до 90 kHz. Мощность спектра достигает максимального значения  $2.8 \times 10^{14}$  rel.u. на частоте  $\sim 50$  kHz. Типичными характеристиками сигнала АЭ на этапах установившегося трения и интенсификации износа (state 3 и state 4, соответственно) являются значения максимальной амплитуды сигнала  $\sim 1.02V$ , изменения медианной частоты от 42 до 110 kHz, максимального значения мощности спектра  $5.5 \times 10^{15}$  rel.u. на определенных частотах (например,  $\sim 42$  kHz) (рис. 2).

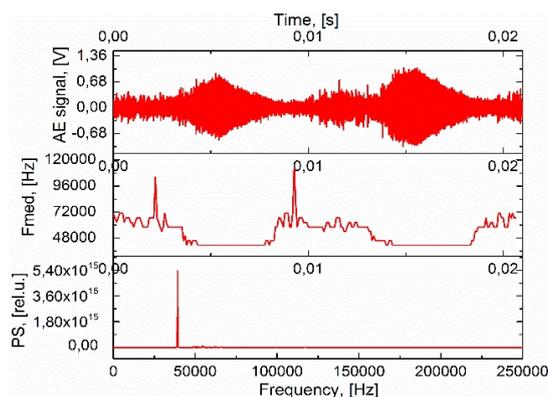


Рис. 2. Фрейм сигнала АЭ, его медианная частота и мощность спектра после 48 часов трения  
Медианная частота сигналов изменяется в широком диапазоне, но при наличии низкой мощности спектра. Период нарастания и затухания амплитуды сигнала АЭ на этапе чередования интенсивного износа и повторного деформационного упрочнения характеризуется снижением медианной частоты.

### Выводы

Выполненные экспериментальные исследования трения скольжения монокристаллов стали Гадфильда с регистрацией сигналов акустической эмиссии позволили сделать следующие выводы:

Используя регистрацию сигналов акустической эмиссии при трении можно достаточно точно определить момент перехода трибосопряжения от области приработки к области установившегося трения. Установлено, что для этапа приработки характерными являются сигналы акустической эмиссии с невысокой амплитудой и ярко выраженным единичным всплеском – burst type signals. На этапе деформационного упрочнения происходит увеличение амплитуды сигнала и количества всплесков. Установившееся трение монокристаллов стали Гадфильда второй ориентации для которой наряду со скольжением развивается двойникование, характеризуется чередованием периодов деформационного упрочнения и активного износа.

Полученные результаты можно применить при разработке системы мониторинга состояния трибосопряжения.

### Список литературы

1. Богачев И.Н., Еголаев В.Ф. Структура и свойства железомарганцевых сплавов. – М.: Металлургия, 1973. – 296 с.
2. Исследование упрочнения и структурных превращений в стали 110Г13 при трении / И.Н. Богачев, Л.Г. Коршунов, М.С. Хадыев и др. // Физика металлов и металловедение. – 1977. – Т. 43, № 2. – С. 380–387.
3. Влияние мартенситного  $\gamma$ - $\alpha$  превращения на кинетику упрочнения и сопротивление разрушению поверхности трения аустенитных сталей при полидеформационном характере изнашивания / Л.Г. Коршунов, И.Н. Богачев, Ю.И. Аверин и др. // Физика металлов и металловедение. – 1980. – Т. 49, № 1. – С. 113–120.
4. Штремель М.А., Коваленко И.А. О механизме упрочнения стали Гадфильда // Физика металлов и металловедение. – 1987. – Т. 63, № 1. – С. 172–181.
5. Коршунов Л.Г. Структурные превращения при трении и износостойкость аустенитных сталей // Физика металлов и металловедение. – 1992. – № 8. – С. 3–21.

6. Каракишев С.Д., Попцов М.Е., Рябухина О.М. Распределение атомов углерода в решетке стали Гадфильда // Термическая обработка и свойства металлов. – Свердловск: УПИ, 1983. – С. 35–40.
7. Шабашов В.А., Коршунов Л.Г., Балбохин Ю.В. Мессбауэровское исследование структуры стали 110Г13, деформированной в условиях трения // Физика металлов и материаловедение. – 1989. – Т. 67, № 6. – С. 1197–1203.
8. Генерация звука при трении скольжения / А.В. Колубаев, А.Е. Колубаев, И.Н. Вагин, О.В. Сизова // Письма в ЖТФ. – 2005. – № 19 (31). – С. 6–13.
9. Закономерности формирования структуры поверхностного слоя стали Гадфильда при трении / Ю.Ф. Иванов, Е.А. Алешина, Е.А. Колубаев, А.В. Колубаев, О.В. Сизова, В.Е. Громов // Физическая мезомеханика. – 2006. – № 6 (9). – С. 83–90.
10. Колубаев А.В., Колубаев А.Е., Сизова О.В. Об особенностях наноиндентирования поверхностного слоя стали Гадфильда после испытаний на трение // Письма в ЖТФ. – 2007. – Т. 33, № 24. – С. 16–23.
11. Macrosegmentation and strain hardening stages in copper single crystals under compression / D.V. Lychagin, S.Yu. Tarasov, A.V. Chumaevskii, E.A. Alfeyorova // International Journal of Plasticity. – 2015. – Vol. 69. – P. 36–53.
12. Modeling the deformation behavior of Hadfield steel single and polycrystals due to twinning and slip / I. Karaman, H. Sehitoglu, A.J. Beaudoin, Yu.I. Chumlyakov, H.J. Maier, C.N. Tome // Acta Materialia. – 2000. – Vol. 48. – P. 2013–2047.
13. The effect of twinning and slip on the baushinger effect of Hadfield steel single crystals / I. Karaman, H. Sehitoglu, Yu.I. Chumlyakov, H.J. Maier, I.V. Kireeva // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2001. – Vol. 32. – P. 695–706.
14. Extrinsic stacking faults and twinning in Hadfield manganese steel single crystals / I. Karaman, H. Sehitoglu, Yu.I. Chumlyakov, H.J. Maier, I.V. Kireeva // Scripta Materialia. – 2001. – Vol. 44. – P. 337–343.
15. Hase A., Wada M., Mishina H. The relationship between acoustic emissions and wear particles for repeated dry rubbing // Wear. – 2008. – Vol. 265. – P. 831–839.
16. Benabdallah H.S., Aguilar D.A. Acoustic emission and its relationship with friction and wear for sliding contact // Tribology Transactions. – 2008. – Vol. 51. – P. 738–747.
17. Asamene K., Sundaresan M. Analysis of experimentally generated friction related acoustic emission signals // Wear. – 2012. – Vol. 296. – P. 607–618.
18. Study on stick–slip friction of reciprocating O-Ring seals using acoustic emission techniques / Chuanjun Liao, Shuangfu Suo, Yuming Wang, Weifeng Huang, Ying Liu // Tribology Transactions. – 2012. – Vol. 55. – P. 43–51.
19. Hase A., Mishina H., Wada M. Correlation between features of acoustic emission signals and mechanical wear mechanisms // Wear. – 2012. – Vol. 292–293. – P. 144–150.
20. Hase A., Mishina H., Wada M. Microscopic study on the relationship between AE signal and wear amount // Wear. – 2013. – Vol. 308. – P. 142–147.
21. Hase A., Wada M., Mishina H. Scanning electron microscope observation study for identification of wear mechanism using acoustic emission technique // Tribology International. – 2014. – Vol. 72. – P. 51–57.

## USE OF ACOUSTIC EMISSION FOR WEAR CONTROL OF GADFIELD STEEL

**Lychagin D.V.**<sup>1,2</sup>, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, e-mail: dvl-tomsk@mail.ru

**Novitskaya O.S.**<sup>1,3</sup>, Post-graduate Student, e-mail: novoolbka@mail.ru

**Filippov A.V.**<sup>2,3</sup>, Ph.D. (Engineering), e-mail: avf@ispms.tsc.ru

<sup>1</sup>National Research Tomsk University, 36 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

<sup>3</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2/4 pr. Akademicheskii, Tomsk, 634021, Russian Federation

### Abstract

Testing of an acoustic emission signal is need for monitoring of tribological system. It gives information on features of wear. Crystallographic orientation of Hadfield steel influences the deformation mechanism. It can be sliding and twinning. We set differences in a dry friction and wear for cases of sliding and sliding with twinning. We determined parameters of an acoustic emission signal for these cases. We connected them to curves of friction and features of wear. Acoustic emission defines the moment of transition of a tribological system from area of burn-in to area of the set friction precisely. Signals of acoustic emission are the small amplitude and burst type signals within a burn-in stage. Signal amplitudes and the number of surges increase within stages of the set friction. Alternation of deformation hardening and the active wear is watched for single crystals with orientation for sliding and twinning. Parameters of a signal of acoustic emission reflect these changes.

### Keywords

sliding friction, wear, acoustic emission, Hadfield's steel, single crystal



2.

6.2.

6.3.

7.

« ».

*PowerPoint.*

8.

9.

«  
[building/rules](https://journals.nstu.ru/machine-building/rules) .

»

<https://journals.nstu.ru/machine->

( 50 %, 15 30

–

);

(References) –

(

).

«

»







1. ( ; ).
2. : 7.9-95 – ( 10 , 850 ), ; ; 100 - 250 ,
3. ( ( )).
4. ( ;
5. ( ) ( )
6. ( , , )
7. ( ; )
8. : 15 – 25 ( 7.05-2008 « »).
9. [1], [2, 3], [4–7], [4, . 23–28]. 30 % ( 50 % )
10. ( )

**(Title),**

**(Affiliation).**

**(e-mail),**

: [http://journals.nstu.ru/files/2\\_4/affiliation.doc](http://journals.nstu.ru/files/2_4/affiliation.doc);

**(Abstract) -**

**100 - 250**

**(Keywords);**

**(Funding) (**

« ( • • )»

A , « ( • •

**Web of**

**Science**

**(Abstract)**

**(References),**

**References**

Scopus Web of Science.

**Abstract**

(Title),

(Affiliation).

(e-mail),

(Abstract) -

250

(Keywords);

(References).

<http://translit.ru>

- BSI;

(Funding) (

References

References

References,

Scopus;

References

(in

Russian);

References,

( ), Scopus.

References

(in Russian).

5)

\*

: 1.

, 2012, 68 ; 2.

Scopus. , 2013. . 1. 90 .

- 6) (unpublished), “Unpublished Report” ( ), “Unpublished Source” ;
- 7) ;
- 8) doi, References,
- 9) ;
- 10) ( : , , ; ) ;
- 11) )) ;
- 12) ( , ) “pp.” ;
- ( ) - “p.” ;
- 13) ;
- 14) ;
- 15) ( - References) ;
- 16) “ - ” ;

: <http://translit.net/>

Translit.net,

BSI (British Standard Institute),

« »

« ».

Atapin V.G., Skeebea V.Yu. Chislennoe modelirovanie beskarkasnykh arochnykh pokrytii [Numerical simulation of frameless arched covers]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2012, no. 4(57), pp. 23–27.

Kiselev E.S., Unyanin A.N., Kurzanova Z.S., Kuznetsova M.A. Sovremennye smazочно-okhlazhdayushchie zhidkosti [Modern coolants]. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*, 1996, no. 7, pp. 30-34.

Swaminathan V., Lepkoswka-White E., Rao B.P. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *Journal of Computer- Mediated Communication*, 1999, vol. 5, no. 2. Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (Accessed 28 April 2011).

DOI –

!

c DOI:

Abul’khanov S.R., Goryainov D.S., Skuratov D.L., Shvetsov A.N. Formation of the surface layer in diamond smoothing. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, iss. 2, pp. 147-149. doi: 10.3103/S1068798X15020033

Ding H.T., Shin Y.C. Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50, iss. 1, pp. 106-114. doi:10.1016/j.ijmactools.2009.09.001

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. [Experimental study of the strength of joints "steelcomposite"]. *Trudy MGTU «Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh sistem»* [Proceedings of the Bauman MSTU “Mathematical Modeling of Complex Technical Systems”], 2006, no. 593, pp. 125–130. (In Russian)

Usmanov T.S., Gusmanov A.A., Mullagalina I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Sveshnikov A.V. [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma “Novye resursoberegayushchie tekhnologii nedropol’zovaniya i povysheniya neftegazootdachi”* [Proceedings 6th International

Symposium "New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact". Moscow, 2007, pp. 267–272. (In Russian).

Sen'kin A.V. [Issues of vibration diagnostics of elastic spacecraft]. *Problemy teorii i praktiki v inzhenernykh issledovaniyakh. Trudy 33 nauchnoi konferentsii RUDN* [Problems of the Theory and Practice of Engineering Research. Proc. Russ. Univ. People's Friendship 33<sup>rd</sup> Sci. Conf.]. Moscow, 1997, pp. 223-225. (In Russian)

( );  
Nenashev M.F. *Poslednee pravitel'stvo SSSR* [Last government of the USSR]. Moscow, Krom Publ., 1993. 221 p.

*Ot katastrofy k vozrozhdeniyu: prichiny i posledstviya razrusheniya SSSR* [From disaster to rebirth: the causes and consequences of the destruction of the Soviet Union]. Moscow, HSE Publ., 1999. 381 p.

Lindorf L.S., Mamikonians L.G., eds. *Ekspluatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 352 p.

Kanevskaya R.D. *Matematicheskoe modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov razrabotki mestorozhdenii uglevodorodov* [Mathematical modeling of hydrodynamic processes of hydrocarbon deposit development]. Izhevsk, 2002. 140 p.

Izvekov V.I., Serikhin N.A., Abramov A.I. *Proektirovanie turbogeneratorov* [Design of turbo-generators]. Moscow, MEI Publ., 2005, 440 p.

Latyshev V.N. *Tribologiya rezaniya. Kn. 1: Friksionnye protsessy pri rezanii metallov* [Tribology of Cutting, Vol. 1: Frictional Processes in Metal Cutting], Ivanovo, Ivanovskii Gos. Univ. Publ., 2009. 245 p.

Belousov, A.I., Bobrik, P.I., Rakhman\_Zade, A.Z. *Teplovye yavleniya i obrabatyvaemost' rezaniem aviatsionnykh materialov. Trudy MATI* [Thermal Phenomena and the Ease of Cutting of Aviation Materials: Proceedings of the Moscow Aviation Engineering Institute]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966, no. 64.

( ),  
(235 p.),  
(pp. 220-222).

Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W. *Vibration problems in engineering*. 4<sup>th</sup> ed. New York, Wiley, 1974. 521 p. (Russ. ed.: Timoshenko S.P., Iang D.Kh., Uiver U. *Kolebaniya v inzhenernom dele*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 472 p.).

Brooking A., Jones P., Cox F. *Expert systems. Principles and case studies*. Chapman and Hall, 1984. 231 p. (Russ. ed.: Bruking A., Dzhons P., Koks F. *Ekspertnye sistemy. Printsipy raboty i primery*. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1987. 224 p.).

Latypov A.R., Khasanov M.M., Baikov V.A. Geology and Production (NGT GiD). The Certificate on official registration of the computer program. No. 2004611198, 2004. (In Russian, unpublished).

Pressure generator GD-2M. Technical description and user manual. Zagorsk, Res. Inst. of Appl. Chem. Publ., 1975. 15 p. (In Russian, unpublished).

Kondrat'ev V.B. *Global'naya farmatsevticheskaya promyshlennost'* [The global pharmaceutical industry]. Available at: [http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja\\_farmacevticheskaja\\_promyshlennost\\_2011-07-18.html](http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja_farmacevticheskaja_promyshlennost_2011-07-18.html). (accessed 23.06.2013)

APA Style (2011). Available at: <http://www.apastyle.org/apa-style-help.aspx> (accessed 05.02.2011).

Semenov V.I. *Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyi tor*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Moscow, 2003. 272 p.

Grigor'ev Iu.A. *Razrabotka nauchnykh osnov proektirovaniia arkhitektury raspredelennykh sistem obrabotki dannykh*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Development of scientific bases of architectural design of distributed data processing systems. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1996. 243 p.

GOST 8.586.5-2005. *Metodika vypolneniia izmerenii. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkosti i gazov spomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroistv* [State Standard 8.586.5 - 2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p.

State Standard 8.586.5-2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p. (In Russian)

Palkin M.V., e.a. *Sposob orientirovaniia po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoi golovkoi samonavedeniia* [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF, no. 2280590, 2006.

References

(Inventor's Certificate) –

Russian Pharmaceutical Market. Results of 2010. The Analytical Review. DSM Group, 2011. 74 p. (In Russian)

Current status of the Russian pharmaceutical industry and international experience. Materials for the working group of the Commission for Modernization and Technological Development of Russia's Economy. Available at: <http://www.strategy.ru>. (In Russian)

Code of Business Conduct of OJSC "LUKOIL". Available at: [http://www.lukoil.ru/materials/doc/documents/lukoil\\_corp\\_code.pdf](http://www.lukoil.ru/materials/doc/documents/lukoil_corp_code.pdf). (In Russian)

RF Federal Law "On Protection of Consumers' Rights" of February 07, 1992 N 2300-1 (as amended by Federal Law of January 09, 1996 N 2 FZ, December 17, 1999 N 212 FZ). (In Russian)

---

15.03.2018. 60 × 84 1/8.  
10 . . - . . 36,27. . . 19,5. . . 82. 469.  
630073, . . . . , 20. . : (383)-346-31-87.  
630073, . . . . , 20



## Кафедры:

Инженерной графики (ИГ)  
Материаловедения в машиностроении (ММ)  
Проектирования технологических машин (ПТМ)  
Технологии машиностроения (ТМС)  
Химии и химической технологии (ХХТ)

## Научная деятельность:

*выполнение фундаментальных и прикладных исследований в области:*

- создания новых материалов с уникальными свойствами;
- исследования структурных превращений в металлических материалах;
- технологий производства керамики и керамических композитов;
- исследования процесса образования водорода и нановолокнистого углерода каталитическим разложением углеводородов при давлениях выше атмосферного;
- исследования способов модификации углеродных нанотрубок и нановолокон;
- управления качеством поверхностного слоя деталей машин при интеграции поверхностной термической и механической обработки на одном технологическом оборудовании;
- технологий плазменного нанесения покрытий на детали машин;
- разработки технологических процессов лазерной и плазменной резки, поверхностной термообработки, сварки, маркировки, а также электрохимической и ультразвуковой обработки;
- разработки опытных образцов установок и модернизации существующего оборудования электрофизических методов обработки.

## Производственная деятельность:

- содействие в конструкторско-технологической подготовке производства;
- проектирование технологических процессов;
- услуги по плазменной и лазерной резке материалов;
- услуги гибки листового и трубного проката;
- определение механических свойств, химического состава и структуры материалов;
- услуги механической, термической обработки материалов;
- проектирование и изготовление технологического оборудования с подготовкой требуемой конструкторской документации в NX, SolidWorks, AutoCAD, Компас;
- проведение инженерного анализа конструкторских задач и технологических процессов в программных комплексах ANSYS, SYSWELD, APM WinMachine для оптимизации проектных разработок на ранних стадиях;
- услуги плазменного нанесения покрытий на детали машин;
- технологический аудит предприятий;
- установление причин разрушения деталей машин.

## Образовательные услуги:

- курсы повышения квалификации и обучающие семинары для сотрудников предприятий;
- обучение работе на станках с ЧПУ, лазерных и плазменных комплексах.

## Центры, лаборатории:

Учебный центр современных металлообрабатывающих технологий «DMG-НГТУ».  
Научно-образовательный центр «Сварочные технологии» - «НГТУ- «Kjellberg Finsterwalde».  
Научно-образовательный центр «Нанотехнологии».  
Научно-образовательный центр «Лазерные и плазменные технологии».  
Научно-образовательный центр в области машиностроения «НГТУ-ИТПМ СО РАН».  
Учебно-научная лаборатория «Термическая обработка материалов».  
Учебно-научная лаборатория «Плазменные покрытия».  
Центр прототипирования.

## Адрес:

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корп. 5, НГТУ, МТФ, V-278.

Тел./факс: +7 (383) 346-51-92

Сайт факультета: <http://www.mtf.nstu.ru/>

e-mail: [mtf@corp.nstu.ru](mailto:mtf@corp.nstu.ru)

Декан МТФ: к.т.н., доцент **Янпольский Василий Васильевич**



# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ  
ОБОРУДОВАНИЕ  
ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

[http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)  
[metal\\_working@mail.ru](mailto:metal_working@mail.ru)



Организатор международных  
выставок и конференций



ITE Сибирь  
В составе группы компаний ITE

<http://www.ite-siberia.ru/>    [welcome@sibfair.ru](mailto:welcome@sibfair.ru)

**mash**  
SIBERIA



Выставка оборудования  
для металлообработки и сварки

Россия, Новосибирск

[www.mashex-siberia.ru](http://www.mashex-siberia.ru)