

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ISSN 1994-6309

ТЕХНОЛОГИЯ • ОБОРУДОВАНИЕ • ИНСТРУМЕНТЫ

№ 2 (59)

АПРЕЛЬ—ИЮНЬ 2013 г.

научно-технический и производственный журнал

## Технология Оборудование Инструменты Материаловедение



11-я Всероссийская научно-практическая конференция  
«Проблемы повышения эффективности металлообработки  
в промышленности на современном этапе» 27 марта 2013 г.

НОВОСИБИРСК

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ • ОБОРУДОВАНИЕ • ИНСТРУМЕНТЫ

№ 2 (59) АПРЕЛЬ–ИЮНЬ 2013 г.

научно-технический и производственный журнал

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

### Председатель совета

**Пустовой Николай Васильевич** – доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, член Национального комитета по теоретической и прикладной механике, ректор НГТУ, г. Новосибирск (Российская Федерация)

### Члены совета

Республика Беларусь: **Пантелеенко Ф.И.**, доктор техн. наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, Заслуженный деятель науки Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Российская Федерация: **Анисименко Г.Е.**, директор производственно-технической фирмы «Сигма-инструмент», г. Новосибирск, **Афанасьев В.К.**, доктор техн. наук, профессор, академик РАЕН, СибГИУ, г. Новокузнецк, **Балков В.П.**, зам. ген.директора АО «ВНИИинструмент», канд. техн. наук, г. Москва, **Батаев А.А.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Батаев В.А.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Герасенко А.Н.**, директор ООО НПКФ «Машсервисприбор», г. Новосибирск, **Кирсанов С.В.**, доктор техн. наук, профессор, ТПУ, г. Томск, **Коротков А.Н.**, доктор техн. наук, профессор, академик РАЕ, КузГТУ, г. Кемерово, **Кудряшов Е.А.**, доктор техн. наук, профессор, Засл. деятель науки РФ, ЮЗГУ, г. Курск, **Овчаренко А.Г.**, доктор техн. наук, профессор, БТИ АлтГТУ, г. Бийск, **Рахимянов Х.М.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Сараев Ю.Н.**, доктор техн. наук, профессор, ИФПМ ССО РАН, г. Томск, **Смольников Н.Я.**, доктор техн. наук, профессор, ВолгГТУ, г. Волгоград, **Суслов А.Г.**, доктор техн. наук, профессор, Засл. деятель науки и техники РФ, МГИУ, г. Москва, **Татаркин Е.Ю.**, доктор техн. наук, профессор, АлтГТУ, г. Барнаул.

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 (решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 19 февраля 2010 года № 6/6)

### СОУЧРЕДИТЕЛИ

ОАО НПТ и ЭИ «Оргстанкинпром»  
ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный  
технический университет»  
ООО НПКФ «Машсервисприбор»

### ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный  
технический университет»

### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Батаев Анатолий Андреевич** – профессор,  
доктор технических наук

### ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

**Атапин Владимир Григорьевич** – профессор,  
доктор технических наук

**Буров Владимир Григорьевич** – профессор,  
кандидат технических наук  
(технология, материаловедение)

**Скиба Вадим Юрьевич** – доцент, кандидат технических наук  
(оборудование, инструменты)

### ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

### Периодичность – 4 номера в год

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory»

Журнал награжден в 2005 г. Большой Золотой Медалью Сибирской Ярмарки за освещение новых технологий, инструмента, оборудования для обработки металлов

Журнал зарегистрирован 05.04.2006 г. Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-23961

Индекс: **70590** («РОСПЕЧАТЬ»)

### Адрес редакции:

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, к. 274, Атапин В.Г.

Тел. (383) 346-17-77

E-mail: metal\_working@mail.ru

www.nstu.ru (раздел «Научная и инновационная деятельность»; научные издания)

Цена свободная

Перепечатка материалов из журнала «Обработка металлов» возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.  
За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

## СОДЕРЖАНИЕ

**ТЕХНОЛОГИЯ**

**Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С., Сауткина М.А., Скрынник В.А., Лихачев А.П.** Обеспечение качества поверхности деталей машин ультразвуковым пластическим деформированием перед нанесением покрытия ..... 4

**ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ**

**Петрушин С.И., Филиппов А.В.** Анализ геометрии косоугольного обтачивания безвершинными резцами ..... 8

**Медведев А.М., Литовка Г.В.** Расчет коэффициента эффективности вибрационной защиты составного зубчатого колеса с учетом жесткостных характеристик обода ..... 14

**Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Трунова И.С.** Инструмент магнитно-импульсной технологии ремонта на основе совмещенного согласующего устройства цилиндрического типа ..... 19

**Кудряшов Е.А., Смирнов И.М.** Эффективная работа инструмента из композита при скоростном фрезеровании резьбы ..... 25

**Птицын С.В., Скиба В.Ю., Чёсов Ю.С., Мережко Е.В.** Надежность прогноза качества технологического оборудования ..... 33

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

**Борыняк Л.А., Чернышев А.П.** Метод расчета эквивалентной температуры спекания нанопорошков ..... 39

**Токарев А.О., Потапов В.М.** Наплавка поверхности серого чугуна с присадкой из чугунной стружки ..... 44

**Игнатов М.Н., Игнатова А.М., Артемов А.О., Чумаченко А.Ю., Шевцова Л.И.** Коэффициент термического расширения синтетических минеральных сплавов с фазовым разделением ..... 49

**Путилова Е.А., Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Вичужанин Д.И., Черномас В.В., Сапченко И.Г., Комаров О.Н.** Структура и свойства листовой стали 30ГСЮ6, изготовленной по совмещенной технологии непрерывного литья деформации металла в твердожидком состоянии ..... 54

**TECHNOLOGY**

**Rakhimyanov Kh. M., Semyonova Yu.S., Sautkina M. A., Skrinnik V. A., Likhatchev A.P.** Providing of substrate surface quality prior to coating by ultrasonic plastic deformation treatment ..... 4

**EQUIPMENT. INSTRUMENTS**

**Petrushin S.I., Filippov A.V.** The analysis of the geometry of oblique turning peakless cutters ..... 8

**Medvedev A.M., Litovka G.V.** Research of vibroisolation properties compound cogwheel .... 14

**Batygin Yu.V., Hnatov A.V., Trunova I.S.** The tool of magnetic-pulse repair technology based on combined matching device of cylindrical type ..... 19

**Kudryashov E.A., Smirnov I.M.** Efficient tool of composite at high-speed thread milling ..... 25

**Ptitsyn S.V., Skeebe V.Yu., Chesov Yu.S., Merezhko E.V.** Reliability prediction of quality process equipment ..... 33

**MATERIAL SCIENCE**

**Borynyak L.A., Chernyshev A.P.** The method of the equivalent sintering temperature calculation ..... 39

**Tokarev A.O., Potapov V.M.** Hard surface of grey cast iron with addition of iron shavings ..... 44

**Ignatov M. N., Ignatova A.M., Artemov A.O., Chumachenko A.Yu., Shevtsova L.I.** Coefficient of thermal expansion of synthetic mineral alloys with phase separation ..... 49

**Putilova E.A., Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Vichuzhanin D.I., Chernomas V.V., Sapchenko I.G., Komarov O.N.** Structure and properties of steel 30GSYU6 has been obtained by continuous casting technology combined deformation of the metal in the solid-liquid ..... 54

<b>Попелюх П.А., Попелюх А.И., Юркевич М.Р.</b> Комбинированная термомеханическая обработка стали с мартенсито-бейнитным превращением аустенита .....	62	<b>Popelyukh P.A., Popelyukh A.I., Yurkevich M.R.</b> Combined thermomechanical treatment of steel with martensite-bainite transformation of austenite .....	62
<b>ПРЕСС-РЕЛИЗ MASHEX SIBERIA 2013 .....</b>	69	<b>PRESS RELEASE MASHEX SIBERIA 2013 ...</b>	69
Правила для авторов .....	71	Rules for authors .....	71

---

Корректор *Л.Н. ВЕТЧАКОВА*  
Художник-дизайнер *А.В. ЛАДЫЖСКАЯ*  
Компьютерная верстка *В.Н. ЗЕНИНА*

Подписано в печать 10.06.13. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
Усл. печ.л. 9.0. Уч.-изд. л. 16,74. Изд. № 116. Заказ 840. Тираж 1000 экз.

Отпечатано в типографии Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ ПЕРЕД НАНЕСЕНИЕМ ПОКРЫТИЯ\*

*Х.М. РАХИМЯНОВ, доктор техн. наук, профессор*  
*Ю.С. СЕМЕНОВА, канд. техн. наук, доцент*  
*М.А. САУТКИНА, магистрант*  
*В.А. СКРЫННИК, магистрант*  
*А.П. ЛИХАЧЕВ, студент*  
*(НГТУ, г. Новосибирск)*

Статья поступила 7 мая 2013 года

Семенова Ю.С. – 630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: nahat@yandex.ru

Приводятся исследования по подготовке поверхности деталей перед нанесением покрытия. Проведен анализ качества поверхности, подготовленной перед нанесением покрытия абразивно-струйным методом. Приводятся результаты исследования зоны на границе между покрытием и поверхностью основного материала, подготовленной абразивно-струйной обработкой. Покрытие наносилось детонационно-газовым методом. Выявлены негативные последствия абразивно-струйной обработки, отрицательно влияющие на качество покрытия. Предложен метод ультразвукового пластического деформирования (УЗПД) в качестве альтернативы абразивно-струйной обработке. Показаны его преимущества с точки зрения формирования более равномерно распределенного и управляемого микрорельефа, отсутствия микротрещин, шаржирования поверхности абразивным материалом, а также возможности управления напряженно-деформированным состоянием поверхностного слоя детали.

**Ключевые слова:** подготовка поверхности детали, абразивно-струйная обработка, ультразвуковое пластическое деформирование.

## Введение

Важной задачей в технологии нанесения покрытий является обеспечение качества поверхности детали при ее предварительной подготовке. Микрорельеф поверхности, наличие окисных пленок и загрязнений, механическое состояние поверхностного слоя детали значительно влияют на адгезионную прочность покрытий. В зависимости от метода нанесения покрытия и его характеристик в качестве предварительной подготовки поверхности подлож-

ки используются различные методы обработки. К ним относятся: химические (обезжиривание, травление), механические (шлифование, точение, нарезание рваной резьбы, кольцевых канавок, фрезерование насечек), обработка свободными абразивами (вибрационная обработка, абразивно-струйная обработка), методы поверхностного пластического деформирования (обкатка шариками, роликами, выглаживание) и др. [1].

В данной работе проводится анализ методов подготовки поверхности деталей машин перед

\* Исследования проведены при финансовой поддержке проекта, выполняемого в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ в 2012 г. и в плановом периоде в 2013–2014 гг. (Шифр заявки 7.759.2011 «Повышение конструктивной прочности материалов конструкционного и инструментального назначения методами, основанными на высокоэнергетическом воздействии»).

нанесением детонационных покрытий. Традиционным методом, обеспечивающим требуемую шероховатость, является абразивно-струйная обработка. В качестве альтернативы предлагается использовать ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование (УЗПД). Рассматриваются вопросы обеспечения требуемого геометрического состояния обработанных поверхностей деталей и свойства их поверхностного слоя.

### Методики экспериментальных исследований

Исследование геометрических свойств поверхности после абразивно-струйной обработки проводилось на образцах из сплава ВТ-3 (ГОСТ 19807–91) и стали Ст. 3 (ГОСТ 380–94). Образцы обрабатывались на следующих режимах: давление 5 атм, размер частиц абразива 0,4...1 мм, материал частиц – электрокорунд, продолжительность обработки 1 мин.

Геометрия поверхности после абразивно-струйной обработки исследовалась по поперечным шлифам образцов с использованием оптического микроскопа отраженного света Zeiss Axiovert 40 MAT (рис. 1), а также по профилограммам, полученным с помощью профилографа-профилометра модели 525 (рис. 2).

Для исследования границы между покрытием и материалом основы на стальную пластину, предварительно обработанную абразивно-струйным методом, наносилось покрытие NiCr детонационно-газовым методом. После нанесения покрытия поперечные шлифы образцов исследовались также на оптическом микроскопе отраженного света Zeiss Axiovert 40 MAT (рис. 3).

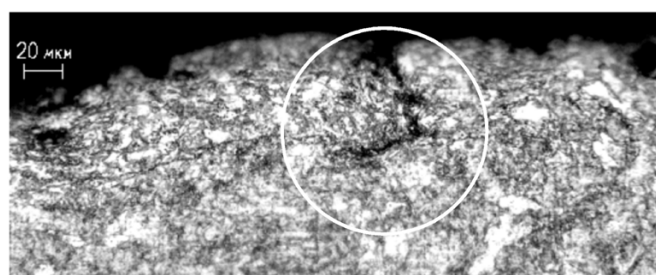
Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование производилось на режимах: статическое усилие прижима инструмента – 150 Н, амплитуда колебаний инструмента – 27 мкм, частота колебаний – 22,4 кГц, частота вращения шпинделя – 930 об/мин, подача инструмента – 0,065 мм/об, диаметр детали – 50 мм, материал – сталь 45 (ГОСТ 1050–88).

Изучение микрорельефа поверхности, обработанной ультразвуковым пластическим деформированием, осуществлялось с помощью комплекса изучения топографии поверхности ZIGO New View 7300. Структура поверхност-

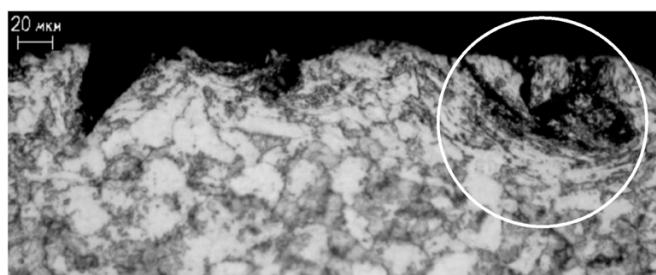
ного слоя обработанной поверхности изучалась по микрошлифам (рис. 4, а, б).

### Результаты и обсуждения

На рис. 1 показано увеличенное изображение поверхности, обработанной абразивно-струйным методом. Как видно из рисунка, при такой обработке не исключено возникновение микротрещин (рис. 1, а), шаржирование поверхности частичками абразива (рис. 1, б) и другие дефекты на поверхности (выбоины, задиры, завихрения). При этом их распределение по поверхности происходит случайным образом.



а



б

Рис. 1. Поверхность детали после абразивно-струйной обработки

Шероховатость поверхности после абразивно-струйной обработки на указанных режимах составила  $Ra = 4 \dots 6$  мкм вне зависимости от обрабатываемого материала. На рис. 2 представлена профилограмма поверхности после абразивно-струйной обработки, которая подтверждает хаотичность распределения микронеровностей.

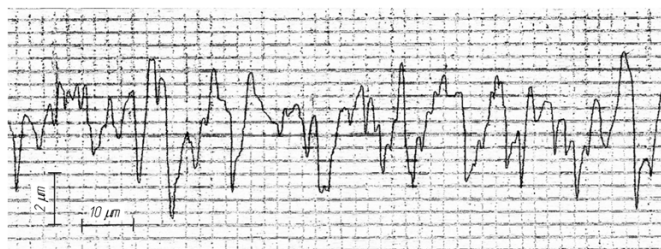


Рис. 2. Шероховатость поверхности после абразивно-струйной обработки

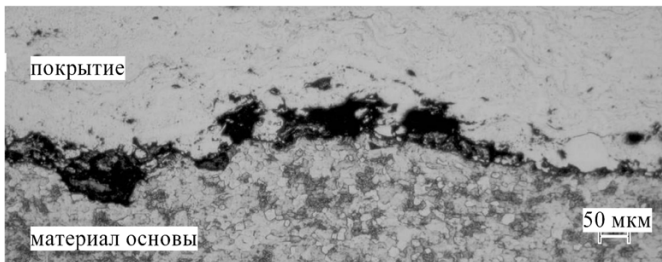


Рис. 3. Граница между покрытием и материалом поверхности детали, обработанной абразивно-струйным методом

Формирование такого рельефа объясняется тем, что, ударяясь о поверхность, частицы абразива удаляют материал поверхности детали в случайном порядке. В результате на поверхности образуется характерный рисунок, состоящий из расположенных случайным образом царапин и сколов. Прогнозировать состояние поверхности после абразивно-струйной обработки можно лишь с использованием статистических методов. При этом полученная таким образом поверхность имеет высокую активность и быстро вступает в химическое взаимодействие с окружающей средой, в результате чего окисляется. Поэтому обработку производят непосредственно перед нанесением покрытия.

На рис. 3 показана граница между покрытием и материалом основы. Нерегулярность микрорельефа поверхности детали не позволила образоваться сплошной границе с покрытием, видны отслоения, несплошности. При этом шаржированные частицы абразива остались в слое, разделяющем материал основы и покрытие, что препятствует формированию прочного соединения.

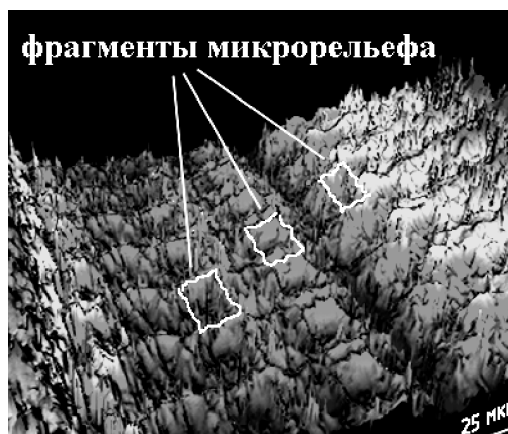
Перечисленные недостатки вызвали необходимость поиска альтернативы абразивно-струйному

методу обработки. В работе предлагается использовать метод ультразвукового пластического деформирования. Этот метод позволяет получать регулярный микрорельеф с управляемой геометрией (формой, высотой, размерами его фрагментов). Кроме того, доказано, что данная обработка способствует заживлению мелких микротрещин на поверхности, полученных на предшествующих этапах обработки. При этом происходит формирование и равномерное распределение остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое [2].

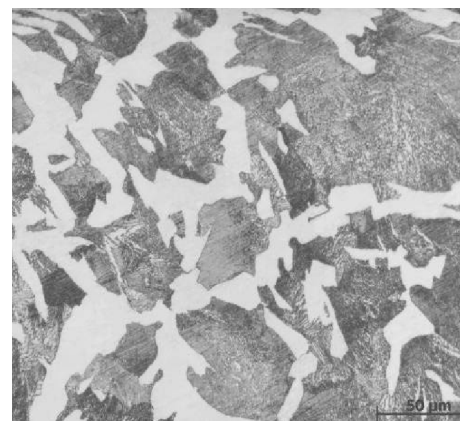
На рис. 4, а показано трехмерное изображение поверхности стального образца после УЗПД. Из рисунка видно, что на поверхности действительно формируется регулярный микрорельеф с четко различимыми фрагментами. При этом формой и размерами этих фрагментов можно управлять за счет изменения режимов обработки [3].

Изучение шлифа поверхности (рис. 4, б), обработанной методом УЗПД, показало, что в отличие от абразивно-струйной обработки в поверхности не возникают микротрещины, нет дефектов в виде шаржированных частиц абразива и других дефектов. Искаженные у поверхности зерна свидетельствуют о наличии пластической деформации материала поверхностного слоя. В данных условиях обработки глубина деформационного воздействия составила около 30 мкм.

В настоящий момент нет однозначных сведений о влиянии наличия упрочненного слоя в поверхности детали на ее взаимосвязь с покрытием. Однако в исследованиях взаимосвязи свойств материала основы и покрытия необходимо учитывать не только геометрические, но и физико-механические свойства поверхности.



а



б

Рис. 4. Поверхность после ультразвукового пластического деформирования

## Выводы

На основании экспериментальных исследований можно сделать вывод, что рельеф поверхности после УЗПД более управляем и равномерен по сравнению с абразивно-струйной обработкой.

Проведенные исследования показали, что применение ультразвукового пластического деформирования в качестве предварительной обработки деталей перед нанесением покрытия имеет перспективы. Однако окончательные выводы можно сделать лишь после нанесения покрытия на обработанную методом УЗПД поверхность. Необходимо изучить влияние исходного состояния поверхности детали (твердости, микрорельефа, напряженно-деформированного состояния) на свойства покрытия. Анализ свойств покрытий, наносимых на обработанные различными методами поверхности, позволит сделать

вывод о целесообразности применения УЗПД в качестве предварительной обработки деталей перед нанесением покрытия.

## Список литературы

1. *Техника и технологии нанесения покрытий* / В.Я. Фролов, В.С. Клубникин, Г.К. Петров, Б.А. Юшин: учеб. пособие. – СПб: Изд-во Политехнического университета, 2008. – 387 с.
2. *Высокоэнергетические процессы обработки материалов* / О.П. Солоненко, А.П. Алхимов, Х.М. Рахимьянов и др. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 2000. – 425 с. – (Низкотемпературная плазма. Т. 18).
3. *Рахимьянов Х.М.* Моделирование процесса формирования регулярного микрорельефа при ультразвуковом пластическом деформировании / Х.М. Рахимьянов, Ю.С. Семенова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 2. – С. 3–9.

## Providing of substrate surface quality prior to coating by ultrasonic plastic deformation treatment

Kh. M. Rakhimyanov, Yu.S. Semyonova, M. A. Sautkina, V. A. Skrinnik, A.P. Likhatchev.

Novosibirsk State Technical University, Karl Marx avenue, 20,  
Novosibirsk, 630073, Russian Federation

### Abstract

Studies on the preparation of the substrate surface prior to coating are presented. The quality analysis of the surface, prepared by grit blasting to coating, is carried out. Results of studies on the boundary zone between the coating and the substrate prepared by grit blasting are performed. Negative effects of abrasive blasting, adversely affecting the quality of the coating, are revealed. A method of ultrasonic plastic deformation (UZPD) as an alternative to abrasive blasting is proposed. Advantages of this method in terms of a more evenly distributed and managed microrelief, the lack of microcracks, caricaturing the surface of an abrasive material, and ability to manage the stress-strain state of the surface layer of the substrate were showed.

**Keywords:** substrate surface quality prior to coating, abrasive flow machining, ultrasonic plastic deformation.

### References

1. Frolov V.Ja., Klubnikin V.S., Petrov G.K., Jushin B.A. *Tehnika i tehnologii nanesenija pokrytij* (Technique and plating technologies). Saint Petersburg, St.Petersburg State Polytechnic University, 2008. 387 p.
2. Solonenko O.P., Alhimov A.P., Marusin V.V., Orishich A.M., Rahimjanov H.M., Salimov R.A., Shhukin V.G., Kosarev V.F. *Nizkotemperaturnaja plazma. T. 18: Vysokojenergeticheskie processy obrabotki materialov* (Low-temperature plasma. Vol. 18: High-energy materials processing). Novosibirsk, Nauka, 2000. 425 p.
3. Rahimjanov H.M., Semenova Ju.S. *Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija*, 2010, no. 2, pp. 3-9.



# АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИИ КОСОУГОЛЬНОГО ОБТАЧИВАНИЯ БЕЗВЕРШИННЫМИ РЕЗЦАМИ

*С.И. ПЕТРУШИН, доктор техн. наук, профессор  
А.В. ФИЛИППОВ, аспирант  
(ЮТИ (филиал) Национального исследовательского  
Томского политехнического университета, г. Юрга)*

Статья поступила 16 ноября 2012 года

**Петрушин С.И.** – 652055, г. Юрга, ул. Ленинградская, 26,  
Юргинский технологический институт (филиал) Национального  
исследовательского Томского политехнического университета,  
e-mail: avf@tpu.ru

Рассматривается геометрия процесса косоугольного продольного точения резцом с прямолинейной режущей кромкой. Представлена схема процесса косоугольного точения в статической системе координат, которая учитывает переменность положения координатных плоскостей вдоль режущей кромки инструмента. Выведены формулы, определяющие значения геометрии инструмента, которые связывают инструментальную и статическую системы координат. Рассчитаны значения углов для различных значений угла наклона лезвия. Показаны зависимости изменения углов вдоль рабочей части режущей кромки от значения угла наклона лезвия и основной плоскости. На графиках зависимости изменения геометрии показан рабочий диапазон углов инструмента, ограничивающий область допустимых значений угла наклона основной плоскости. Представлено описание способа построения модели эквивалентного лезвия, на примере которого наглядно показан характер изменения геометрии вдоль рабочей части инструмента.

**Ключевые слова:** косоугольное точение, безвершинный резец, геометрические параметры, угол наклона лезвия, эквивалентное лезвие.

## Введение

Косоугольное наружное продольное точение осуществляется резцом с прямолинейным лезвием, повернутым по отношению к оси заготовки на угол наклона лезвия  $\omega$  (рис. 1) [1]. «Безвершинным» называется резец, у которого в работе участвует небольшой участок главной режущей кромки, а вспомогательные кромки и вершина отсутствуют [4, 7].

Основными направлениями исследования процесса косоугольного безвершинного точения является определение влияния угла наклона лезвия на качество обработанной поверхности и силу резания в процессе обработки. Авторы работ [2–6] отмечают, что в широком диапазоне изменения скорости резания и подачи шероховатость поверхности, обработанной безвершинными резцами различной конструкции, меньше, чем при обработке обычными резцами при аналогичных режимах обработки.

К достоинствам такого метода обработки относят: отсутствие вершины как слабого места, плавность врезания, не требуется выверка инструмента при установке на станок, отсутствие нароста и возможность получения низкой шероховатости поверхности при обработке цветных металлов [6]. Основными недостатками являются ограниченная область изменения глубины резания и обработка наружных поверхностей с обеспечением места для выхода резца.

Особенностью процесса косоугольного точения является переменность рабочих углов лезвия вдоль режущей кромки. Это отмечается в работах [1, 7, 8], однако нет общего мнения о том, в каком направлении измерять значения переднего и заднего углов инструмента. Нет также общих формул, определяющих зависимости изменения геометрии инструмента. В связи с этим в настоящей работе рассмотрены закономерности геометрии косоугольного наружного продольного точения безвершинными резцами.



### 1. Результаты исследования

С использованием метода векторной алгебры, изложенного в работе [9], и положений ГОСТа [10] разработана схема данного процесса (рис. 1). По сравнению с ГОСТ 25762–83 изменены обозначения статической плоскости резания ( $P_{tc}$ ) и секущей плоскости ( $P_{nc}$ ), поскольку традиционно касательной плоскости соответствует индекс «т», а нормальной – «н».

Положение статической основной плоскости ( $P_{vc}$ ) зависит от направления вектора скорости резания ( $\vec{a}_{4C}^A$ ), которое будет переменным, поскольку он направлен по касательной к окружности в каждой точке вдоль рабочей части режущей кромки.

Оси инструментальной системы координат (ИСК) имеют обозначения с индексом «и», статической (ССК) – «с». Направим инструментальные оси координат лезвия [9] в точке  $O(x_{и}, y_{и}, z_{и})$  таким образом, чтобы ось  $y_{и}$  совпадала с режущей кромкой, а оси  $x_{и}$  и  $z_{и}$ , как показано на рис. 1. На разрезе Е-Е показаны углы режущего клина в ИСК:  $\gamma_{и}$  – инструментальный передний угол и  $\alpha_{и}$  – инструментальный задний угол.

Статический угол наклона режущей кромки  $\lambda_c$  лежит между основной плоскостью и проекцией режущей кромки в плоскости резания  $P_{tc}$ . Статический угол в плане  $\varphi_c$  лежит в секущей плоскости  $P_{nc}$  между статической плоскостью резания  $P_{tc}$  и рабочей плоскостью. Статические передний  $\gamma_c$  и задний  $\alpha_c$  углы лежат в секущей плоскости  $P_{nc}$  между передней поверхностью и основной плоскостью  $P_{vc}$ , и задней поверхностью и плоскостью резания  $P_{tc}$  соответственно. Поскольку положение координатных плоскостей в каждой точке режущей кромки будет переменным, то и значения этих углов также будет изменяться.

Безвершинный резец снимает срезаемый слой сегментообразной формы с максимальной глубиной резания для точки  $O$  величиной  $t_{max}$  (см. рис. 1). Угловая координата в начальной точке  $A$  срезаемого слоя определится выражением

$$\cos \psi_A = \pm \left( \frac{D - 2t_{max}}{D} \right), \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр обрабатываемой поверхности;  $\psi_A$  – угол наклона основной плоскости в точке  $A$ .

В ИСК имеем следующие выражения для единичных направляющих векторов:

– режущей кромки:  $\vec{a}_1^и = \vec{j}_и$ ; (2)

– перпендикулярного к передней поверхности:  $\vec{a}_2^и = \cos \gamma_{и} \cdot \vec{i}_и + \sin \gamma_{и} \cdot \vec{k}_и$ ; (3)

– перпендикулярного к задней поверхности:  $\vec{a}_3^и = -\sin \alpha_{и} \cdot \vec{i}_и - \cos \alpha_{и} \cdot \vec{k}_и$ , (4)

где  $\vec{i}_и, \vec{j}_и, \vec{k}_и$  – орты ИСК.

Если повернуть ИСК на угол  $\omega$  (см. рис. 1), то получим статическую систему координат (ССК) с ортами  $\vec{i}_c, \vec{j}_c, \vec{k}_c$ .

Координаты объекта в ССК связаны с координатами в ИСК следующими соотношениями [9]:

$$\begin{cases} x_c = x_{и} \cdot \cos \omega + y_{и} \cdot \sin \omega; \\ y_c = -x_{и} \cdot \sin \omega + y_{и} \cdot \cos \omega; \\ z_c = z_{и}. \end{cases} \quad (5)$$

С учетом выражения (5) векторы (2), (3) и (4) в ССК примут следующий вид:

$$\begin{aligned} \vec{a}_1^и &= \sin \omega \cdot \vec{i}_c + \cos \omega \cdot \vec{j}_c; \\ \vec{a}_2^и &= \cos \gamma_{и} \cdot \cos \omega \cdot \vec{i}_c - \cos \gamma_{и} \cdot \sin \omega \cdot \vec{j}_c + \sin \gamma_{и} \cdot \vec{k}_c; \\ \vec{a}_3^и &= -\sin \alpha_{и} \cdot \cos \omega \cdot \vec{i}_c + \sin \alpha_{и} \cdot \sin \omega \cdot \vec{j}_c - \cos \alpha_{и} \cdot \vec{k}_c. \end{aligned}$$

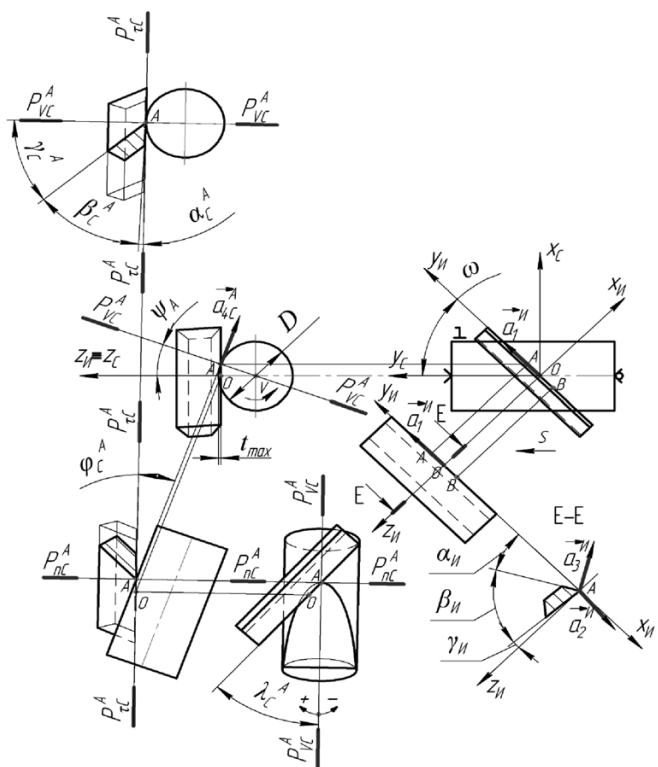


Рис. 1. Геометрические параметры процесса косоугольного обтачивания

В текущей точке  $A$  в ССК статическая основная плоскость  $P_{vc}^A$  проходит перпендикулярно к скорости резания через центр обрабатываемого валика и точку  $A$ . Вектор, нормальный к  $P_{vc}^A$ , равен (см. рис. 1):

$$\vec{a}_{4C}^A = \cos \psi_A \cdot \vec{i}_C - \sin \psi_A \cdot \vec{k}_C, \quad (7)$$

где значение  $\psi_A$  определяется из формулы (1).

Угол между векторами  $\vec{a}_1^C$  и  $\vec{a}_4^C$  равен

$$\frac{\pi}{2} - \lambda_C^A,$$

где  $\lambda_C^A$  – угол наклона режущей кромки в точке  $A$ .

Отсюда

$$\sin \lambda_C^A = \sin \omega \cdot \cos \psi_A. \quad (8)$$

На рис. 2, *a* приведены графики изменения угла  $\lambda_C^A$  на режущей части резца. При  $\omega < 0$  эти кривые имеют вогнутый характер.

Для определения статического угла в плане в текущей точке  $A$   $\varphi_C^A$  определим вектор, перпендикулярный к статической плоскости резания  $P_{\tau C}^A$ :

$$\vec{a}_{5C}^A = \vec{a}_{4C}^A \times \vec{a}_1^C,$$

и направляющий вектор проекции режущей кромки на основную плоскость:

$$\vec{a}_{6C}^A = \vec{a}_{5C}^A \times \vec{a}_{4C1}^A.$$

Тогда угол  $\varphi_C^A$  определится как угол между вектором  $\vec{a}_{6C}^A$  и осью  $\vec{y}_C$ . Решив векторное про-

изведение в координатах с учетом выражений (6) и (7), получим

$$\cos \varphi_C^A = \frac{\cos \omega}{\sqrt{\cos^2 \omega + \sin^2 \omega \cdot \cos^2 \psi_A}}. \quad (9)$$

На рис. 2, *б* даны зависимости угла  $\varphi_C^A$  в широком диапазоне изменения углов  $\omega$  и  $\psi_A$ . Для случая  $\omega < 0$  перед формулой (9) нужно ставить знак «минус». Следует отметить, что представленные зависимости на рис. 2 были проверены путем непосредственного измерения величины углов на 3D модели безвершинного резца.

С целью определения статического переднего угла  $\gamma_C^A$  в точке  $A$  рассмотрим направляющий вектор линии пересечения статической главной секущей плоскости  $P_{nC}$  (см. рис. 1) и передней поверхности лезвия инструмента:

$$\vec{a}_{7C}^A = \vec{a}_2^C \times \vec{a}_{6C}^A.$$

Тогда дополнительный угол между векторами  $\vec{a}_{4C}^A$  и  $\vec{a}_{7C}^A$  будет равен углу  $\gamma_C^A$ :

$$\sin \gamma_C^A = \frac{\cos \gamma_n \cdot \sin \psi_A + \sin \gamma_n \cdot \cos \psi_A \cdot \cos \omega}{\sqrt{(\cos \gamma_n \cdot \sin^2 \omega \cdot \sin \psi_A \cdot \cos \psi_A + \sin \gamma_n \cdot \cos \omega)^2 + \dots}} \dots \dots \dots \frac{\dots}{\dots + \sin^2 \omega \cdot \sin^2 \psi_A (\cos \gamma_n \cdot \cos \omega \cdot \cos \gamma_A - \sin \gamma_n \cdot \sin \psi_A)^2 + \dots} \dots \dots \dots \frac{\dots}{\dots + \cos^2 \gamma_n (\cos^2 \omega + \sin^2 \omega \cdot \sin^2 \psi_A)^2}. \quad (10)$$

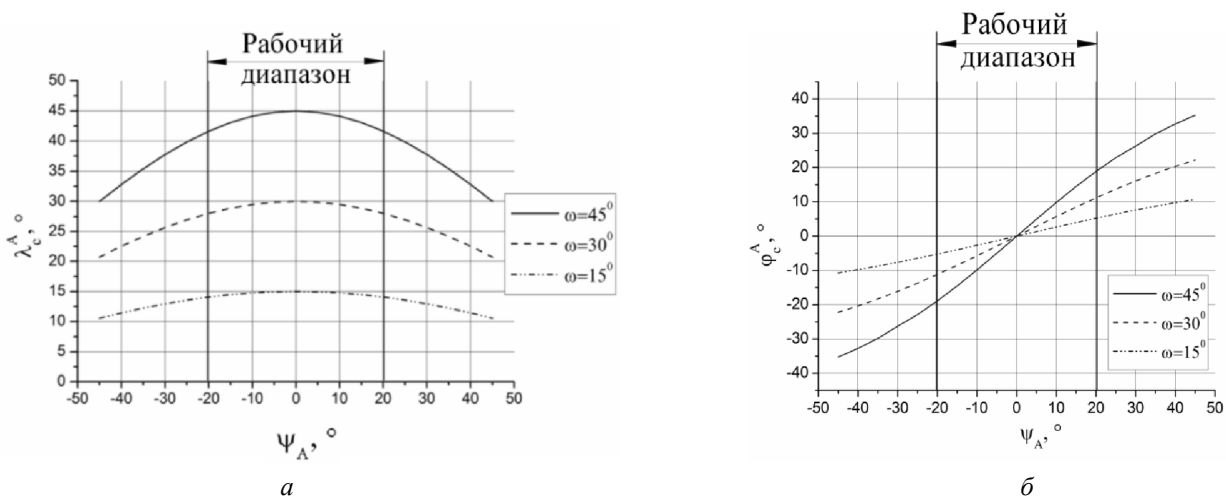


Рис. 2. Зависимости угла наклона режущей кромки  $\lambda_C^A$  (а) и угла в плане  $\varphi_C^A$  (б) в точке  $A$  от угла наклона основной плоскости  $\psi_A$  в ССК:  $\gamma_n = 5^\circ$ ;  $\alpha_n = 30^\circ$ ;  $D = 20$  мм

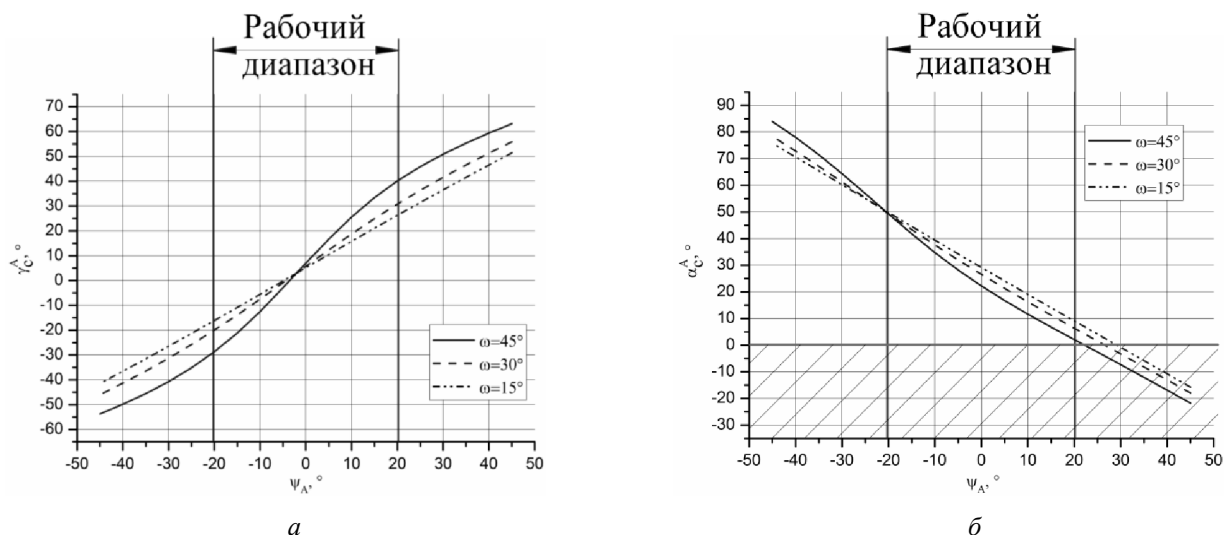


Рис. 3. Зависимости переднего угла  $\gamma_C^A$  (а) и заднего угла  $\alpha_C^A$  (б) в точке А от угла наклона основной плоскости  $\psi_A$  в ССК:  $\gamma_{и} = 5^\circ$ ;  $\alpha_{и} = 30^\circ$ ;  $D = 20$  мм

На рис. 3, а представлены рассчитанные по формуле (10) зависимости изменения угла  $\gamma_C^A$  от угла наклона основной плоскости ( $\psi_A$ ) в ССК.

Аналогично направляющий вектор линии пересечения плоскости  $P_{иC}$  и главной задней поверхности лезвия определится как

$$\vec{a}_{8C}^A = \vec{a}_3^C \times \vec{a}_{6C}^A,$$

и статический задний угол  $\alpha_C^A$  будет равен углу между векторами  $\vec{a}_{8C}^A$  и  $\vec{a}_{4C}^A$ .

Отсюда получено следующее выражение для расчета статического заднего угла  $\alpha_C^A$ :

$$\cos \alpha_C^A = \frac{\cos \alpha_{и} \cdot \cos \omega \cdot \cos \psi_A + \sin \alpha_{и} \cdot \sin \psi_A}{\sqrt{(\sin \alpha_{и} \cdot \sin^2 \omega \cdot \sin \psi_A \cdot \cos \psi_A)^2 + \dots}} \dots$$

$$\dots \frac{\dots}{+\sin^2 \omega \cdot \sin^2 \psi_A (\sin \alpha_{и} \cdot \cos \omega \cdot \cos \psi_A - \cos \alpha_{и} \cdot \sin \psi_A)^2 + \dots}$$

$$\dots \frac{\dots}{+\sin \alpha_{и} (\cos^2 \omega + \sin^2 \omega \cdot \sin^2 \psi_A)^2} \dots$$

(11)

На рис. 3, б представлены зависимости, рассчитанные по формуле (11), изменения заднего угла в точке А ( $\alpha_C^A$ ) от угла наклона основной плоскости ( $\psi_A$ ) в ССК. Зависимости рис. 3 были также проверены измерением углов на 3D модели.

## 2. Анализ результатов

Как видно из графиков, изменения заднего и переднего углов значительны, имеет место переход от положительных значений к отрицательным, и, следовательно, необходимо ограничить область допустимых (рабочих) значений геометрии инструмента. При проектировании металлорежущих инструментов для обработки конструкционных материалов принимают значение заднего угла от  $+2^\circ$  и более с учетом упругого восстановления материала и особенностей данного (конкретного) процесса обработки. Подобное ограничение геометрии применительно к процессу косоугольного обтачивания цилиндрических тел возможно за счет регулирования глубины резания и, следовательно, изменения значений угла  $\psi$ . Для рассматриваемого случая допустимый диапазон  $\psi = \pm 20^\circ$ , при этом значения заднего угла  $\alpha$  будут больше  $2^\circ$  для всех значений  $\omega$ , что отражено на графиках (см. рис. 2 и 3).

Представленные выше данные указывают на сложную геометрию процесса косоугольного точения резцом с прямолинейной режущей кромкой, однако без точной графической модели представить форму лезвия с параметрами, рассчитанными по формулам (8) – (11), затруднительно. Поэтому была разработана 3D-модель «эквивалентного» лезвия, под которым понимается лезвие с параметрами геометрии, рассчитанные по формулам (8) – (11).

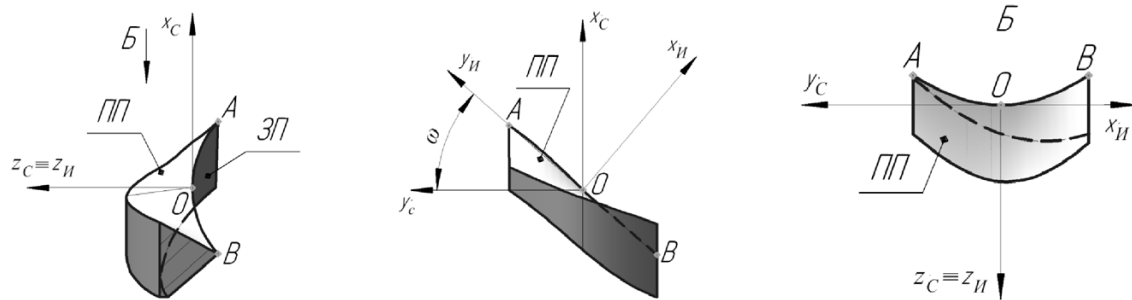


Рис. 4. Трехмерная модель рабочей части эквивалентного лезвия: ЗП – задняя поверхность; ПП – передняя поверхность:  $\psi = 20^\circ$ ;  $\omega = 45^\circ$ ;  $\gamma_{и} = 5^\circ$ ;  $\alpha_{и} = 30^\circ$ ;  $D = 20$  мм

танними и построенными в ИСК, и сориентированное в ССК.

Уравнение пространственной кривой режущей кромки эквивалентного лезвия определяется системой из трех уравнений:

$$\begin{cases} x_i = \operatorname{tg}(\psi_i) [r - t_{\max}], \\ y_i = \operatorname{tg}(\lambda_i) x_i, \\ z_i = \operatorname{tg}(\varphi_i) x_i. \end{cases} \quad (12)$$

Построение модели эквивалентного лезвия выполнялось в системе трехмерного проектирования Компас 3D. Первоначально с учетом уравнения (12) строилась пространственная кривая эквивалентного лезвия.

Знак угла  $\psi$  определяет знак и положение координат точек рабочей части лезвия вдоль оси  $OX$ . С учетом первого уравнения системы определялись координаты вдоль осей  $OZ$  и  $OY$  относительно точки  $O$ , которая является началом систем координат и общей точкой для всех проекций эквивалентного лезвия.

Кривая разбивалась параллельными плоскостями на сечения, проходящими через ось  $z_{и} \equiv z_c$  с шагом координаты  $x_{i'}$ , причем чем больше количество значений  $i$ , тем точнее получится модель. После чего в этих сечениях строились сечения с параметрами переднего и заднего угла для соответствующего значения угла  $\psi$ . Полученные сечения объединялись поверхностью. В итоге формировалась объемная модель рабочей части эквивалентного лезвия. В представленном варианте использовалось 41 сечение, т. е. шаг по углу  $\psi$  составил  $1^\circ$ . Построенная таким образом трехмерная модель рабочей части эквивалентного лезвия представлена на рис. 4.

## Выводы

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы.

1. Разработанная схема (рис. 1) дает наглядное представление о геометрии процесса косоугольного точения безвершинным резцом в ССК.

2. Представленные формулы (8) – (11) геометрии процесса косоугольного точения связывают значения инструментальных и статических углов инструмента, что является важным с точки зрения проектирования безвершинных резцов с криволинейным лезвием.

3. На примере эквивалентного лезвия наглядно показан характер изменения геометрических параметров инструмента вдоль рабочей части инструмента.

4. Как видно из графиков (см. рис. 2 и 3), при больших значениях угла наклона лезвия изменение геометрических параметров в ССК будет более интенсивным, что, в свою очередь, приводит к большей неоднородности процесса обработки и влияет на силовые параметры, контактные нагрузки, износ и температуру, точность и качество обработки.

## Список литературы

1. Галоян Г.П. Теоретические основы нового процесса диагонального точения с обоснованием путей его реализации: дис. канд. техн. наук: Спец.05.03.01. / Г.П. Галоян. Ереванский политехнический институт им. К. Маркса, Ленинаканский филиал. – Ленинакан, 1986. – 157 с.
2. Рывкин Г.М., Самойлов Б.И. Чистовое точение резцами с перемещаемой режущей пластинкой // СТИН. – № 4. – 1952. – С. 20–22.



3. Клименко С.А., Манохин А.С. Твердое «бреющее» точение // Сверхтвердые материалы. – № 1. – 2009. – С. 58–74.

4. Минасян Г.С. О некоторых преимуществах безвершинного резца БРМ-1 // Известия академии наук Армянской ССР. – Т. XIX. № 3. – 1966. – С. 39–45.

5. Grzesik W., Żak K. Investigations of surface textures produced by oblique machining of different workpiece materials // Archives of Materials Science and Engineering, 52, 2011. – P. 46–53.

6. Подгорков В.В. Чистовое точение однокромочными резцами // СТИН. – № 1. – 1974. – С. 30–31.

7. Тер-Маркарян М.С. Некоторые особенности кинематики и процесса резания безвершинными резцами // Известия академии наук Армянской ССР. – Т. XXX. – № 6. – 1977. – С. 3–12.

8. Бобров В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов. – М.: Машгиз, 1962. – 152 с.

9. Петрушин С.И., Баканов А.А., Махов А.В. Геометрический анализ конструкций сборных режущих инструментов со сменными многогранными пластинами. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 100 с.

10. ГОСТ 25762-83 Обработка резанием. Термины, определения и обозначения общих понятий.

### The analysis of the geometry of oblique turning peakless cutters

S.I. Petrushin, A.V. Filippov

Yurga Institute of Technology, TPU Affiliate, Leningradskaja st., 26  
Yurga, 652055, Russian Federation

#### Abstract

The geometry of the process oblique longitudinal turning tool with straight cutting edge is considered. The diagram of the process of oblique turning in a static system of coordinates, which takes into account the variability of the position of the coordinate planes along the cutting edge of the tool, is presented. The formulas that determine the geometry tool, which binds tool-in-hand and setting system of coordinates, are received. Values of angles for different values of the angle wedge are calculated. The variation of angles along the working part of the cutting edge of the value of the angle of inclination of the wedge and the reference plane is shown. On the diagrams of dependence of change of the geometry shows the operating range of the angle of the tool, limiting the area of the possible values of the slope angle of the main plane. Description of the method of modeling an equivalent wedge, for example, which visually shows the character of changes of geometry along the working part of the tool, is presented.

**Keywords:** oblique turning, peakless cutter, geometrical parameters, the inclination angle of the edge, the edge equivalent.

#### References

1. Galojan G.P. *Teoreticheskie osnovy novogo processa diagonal'nogo tochenija s obosnovaniem putej ego realizacii* (The theoretical basis for a new process of diagonal turning with a justification for ways to implement): Thesis of the Cand. of Tech. Scien., Specialty 05.03.01, K. Marx Erevan Polytechnic Institute, Leninakanskij Affiliate, Lenakan, 1986. 157 p.

2. Rvkin G.M., Samojlov B.I. *STIN*, 1952, no. 4, pp. 20-22.

3. Klimenko S.A., Manohin A.S. *Sverhtverdye materialy*, 2009, no. 1, pp. 58-74.

4. Minasjan G.S. *Izvestija akademii nauk Armjanskoj SSR*, 1966, Vol. XIX, no. 3, pp. 39-45.

5. Grzesik W., Żak K. Investigations of surface textures produced by oblique machining of different workpiece materials. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2011, no. 52, pp. 46–53.

6. Podgorkov V.V. *STIN*, 1974, no. 1, pp. 30–31.

7. Ter-Markarjan M.S. *Izvestija akademii nauk Armjanskoj SSR*, 1977, Vol. XXX, no. 6, pp. 3-12.

8. Bobrov V.F. *Vlijanie ugla naklona glavnoj rezhushhej kromki instrumenta na process rezanija metallov* (Effect of angle of the cutting edge of the tool to the cutting process metal). Moscow, Mashgiz, 1962. 152 p.

9. Petrushin S.I., Bakanov A.A., Mahov A.V. *Geometricheskij analiz konstrukcij sbornyh rezhushhih instrumentov so smennymi mnogogrannymi plastinami* (Geometric analysis of precast cutting tools with indexable inserts). Tomsk, TPU, 2008. 100 p.

10. ГОСТ 25762-83 *Obrabotka rezaniem. Terminy, opredelenija i oboznachenija obshhih ponjatij* (Machining. Terms, definitions and designations of general concepts), 45 p.

# РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ СОСТАВНОГО ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА С УЧЕТОМ ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОДА

*А.М. МЕДВЕДЕВ, канд. техн. наук, доцент  
Г.В. ЛИТОВКА, доктор техн. наук, профессор  
(Амурский государственный университет,  
г. Благовещенск)*

Статья поступила 20 февраля 2013 года

Медведев А.М. – 675027, г. Благовещенск, ул. Игнатъевское шоссе, 21,  
Амурский государственный университет, e-mail: design@amursu.ru

Рассмотрен комплексный подход при проектировании средств борьбы с возникновением и распространением структурного шума в приводных устройствах технологического оборудования. Выполнены теоретические исследования, позволяющие на ранних стадиях проектирования механических передач снизить шум путем увеличения виброизолирующей способности зубчатых колес. Снижение шума реализовано за счет снижения амплитуды звуковой волны в конструкциях составных зубчатых колес механических приводов станков. В результате упругих деформаций прокладок и втулок обеспечивается не только самоустановка зубчатого венца от действия возникающих в зацеплении динамических нагрузок, но и их активное гашение. Для оценки изменения уровня вибраций на ступице составного зубчатого колеса, вызванного переходом к неабсолютно жесткому ободу от абсолютно жесткого, необходимо учесть изменение характеристик самого обода составного колеса как источника возмущений.

**Ключевые слова:** технологическое оборудование, механический привод, структурный шум, составные зубчатые колеса, коэффициент эффективности вибрационной защиты.

## Введение

Для современной экономики развитых стран характерен высокий удельный вес машиностроительного производства, которое служит основным исходным звеном в создании различных машин и механизмов. В то же время оно является одним из травмоопасных среди основных отраслей промышленности. Основные причины этого – наличие ряда неблагоприятных факторов среды, особенно шумов и вибраций оборудования. Механический привод является одним из источников повышенной виброакустической активности и оказывает существенное влияние на обеспечение динамического качества станка.

Проблема проектирования малошумных машин и оборудования является достаточно сложной и многоплановой. Множество различных факторов, характеризующих условия работы

зубчатых передач, сложные закономерности теории колебаний и упругости пространственных систем до настоящего времени не позволили на основе обобщения всех отдельных наблюдений и исследований создать единые методики расчетной количественной оценки влияния каждого из этих факторов, а особенно их сочетаний на вибрационные процессы и нагруженность элементов зубчатых сопряжений и далее на виброакустическую активность и долговечность зубчатых передач. Следует отметить, что средства снижения вибрации и воздушного шума, применяемые после окончания общего проектирования, во многих случаях лишь частично решают поставленную задачу и требуют больших затрат. Значительный эффект снижения уровней вибрации и шума с меньшими затратами можно получить, если уже на ранних стадиях проектирования судов учесть акустические требования и



предусмотреть выполнение акустического проектирования станка.

Одним из средств борьбы с возникновением и распространением вредной вибрации, в том числе структурного шума, представляющего собой вибрации звуковых частот, является использование эффективной виброизоляции в приводных устройствах технологического оборудования [1].

Дальнейшие теоретические исследования проводились с целью создания критериальных показателей, позволяющих на ранних этапах проектирования разработать методики расчетной количественной оценки шума зубчатой передачи.

### Теоретические исследования коэффициента эффективности вибрационной защиты составного зубчатого колеса

Представляет интерес такой момент, когда в конструкцию составного зубчатого колеса (рис. 1) входит сосредоточенная масса (фиксирующий ролик б), помещенная между двумя упруговязкими звеньями (зубчатым венцом 4 и ступицей колеса 3) (рис. 2) [2].

Рассмотрим обод составного зубчатого колеса, когда он представлен не массой  $M$ , а в виде четырехполюсника с упруговязким звеном  $C_1, R$ , между массами  $M_1$  и  $M_2$ , причем  $M = M_1 + M_2$ .

Коэффициент эффективности вибрационной защиты составного зубчатого колеса запишется в развернутом виде [3]:

$$U = 10 \lg \left\{ 1 + \frac{\omega^2 \frac{M_{\text{мф}}}{C} \left[ \left( 1 + \frac{\omega^2 R_1^2}{C_1^2} \right) \left( \omega^2 \frac{M_{\text{мф}}}{C} - 2 \right) + \omega^2 \frac{M_{1,2+\text{ф}}}{C_1} \left( \omega^2 \frac{M_{1,2}}{C_1} - 2 \right) \left( \omega^2 \frac{M_{2,\text{ф}}}{C} - 2 \right) \right] - 2 \frac{\omega^4 M_{1-\text{ф}}^2}{C C_1} \left( 1 - \frac{\omega R}{C} \frac{\omega R_1}{C_1} \right)}{\left( 1 + \frac{\omega^2 R_1^2}{C^2} \right) \left[ \left( 1 - \omega^2 \frac{M_{1,2+\text{ф}}}{C_1} \right)^2 + \frac{\omega^2 R_1^2}{C_1^2} \right]} \right\}, \quad (1)$$

где

$$M_{1,2} = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2};$$

$$M_{\text{м,ф}} = \frac{M M_{\text{ф}}}{M + M_{\text{ф}}} = M_{\text{ф}} \frac{M_1 + M_2}{M_1 + M_2 + M_{\text{ф}}};$$

$$M_{2,\text{ф}} = \frac{M_2 M_{\text{ф}}}{M_2 + M_{\text{ф}}}; \quad M_{1,2+\text{ф}} = M_1 \frac{M_2 + M_{\text{ф}}}{M_1 + M_2 + M_{\text{ф}}};$$

$$M_{1-\text{ф}} = \frac{M_1 M_{\text{ф}}}{M_1 + M_2 + M_{\text{ф}}}.$$

При отсутствии трения ( $R_1 = R = 0$ ) формула (1) примет следующий вид:

$$U = 20 \lg \left| 1 - \omega^2 \frac{M_{\text{мф}}}{C} \frac{1 - \omega^2 \frac{M_{12}}{C_1}}{1 - \omega^2 \frac{M_{1,2+\text{ф}}}{C_1}} \right| = 20 \lg \left| 1 - \frac{2 \left( 1 - \omega^2 \frac{M_{1,2+\text{ф}}}{C_1} \right) - \omega^2 \frac{M_{\text{мф}}}{C} \left( 1 - \omega^2 \frac{M_{12}}{C_1} \right)}{1 - \omega^2 \frac{M_{1,2+\text{ф}}}{C_1}} \right|, \quad (2)$$

причем  $U \rightarrow \infty$ , когда  $\omega^2 = \omega_*^2 = \frac{C_1}{M_{1,2+\text{ф}}}$ , а также

при  $\omega \rightarrow \infty$ .



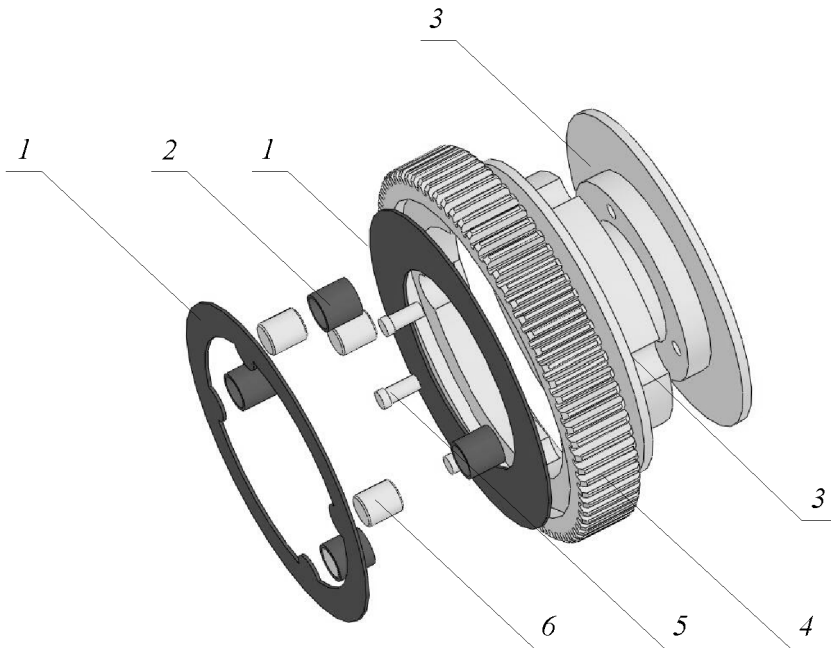


Рис. 1. Конструкция составного зубчатого колеса с полной виброизоляцией венца:

1 – виброизолирующие прокладки; 2 – виброизолирующие втулки; 3 – ступица; 4 – зубчатый венец; 5 – крепежные элементы; 6 – ролик

Можно также видеть, что квадраты корней уравнения  $U(\omega) = 0$  будут:

$$\begin{aligned} \omega_1^2 &= 0; \\ \omega_{11}^2 &= \frac{C_1}{2M_{12}} + \frac{C}{M_{2\Phi}} - \sqrt{\left(\frac{C_1}{2M_{12}} - \frac{C}{M_{2\Phi}}\right)^2 + 2\frac{CC_1}{M_2^2}}; \\ \omega_{111}^2 &= \frac{C_1}{M_{12}}; \\ \omega_{1V}^2 &= \frac{C_1}{2M_{12}} + \frac{C}{M_{2\Phi}} + \sqrt{\left(\frac{C_1}{2M_{12}} - \frac{C}{M_{2\Phi}}\right)^2 + 2\frac{CC_1}{M_2^2}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Приравняв нулю величину, стоящую в выражении (2) под знаком логарифма, получим частотное уравнение рассматриваемой системы без трения. Его корнями

$$\lambda_{1,2}^2 = \frac{1}{2} \left[ \frac{C_1}{M_{12}} + \frac{C}{M_{2\Phi}} \pm \sqrt{\left(\frac{C_1}{M_{12}} - \frac{C}{M_{2\Phi}}\right)^2 + 2\frac{CC_1}{M_2^2}} \right] \quad (4)$$

определяются частоты возмущения, при которых  $U \rightarrow -\infty$ .

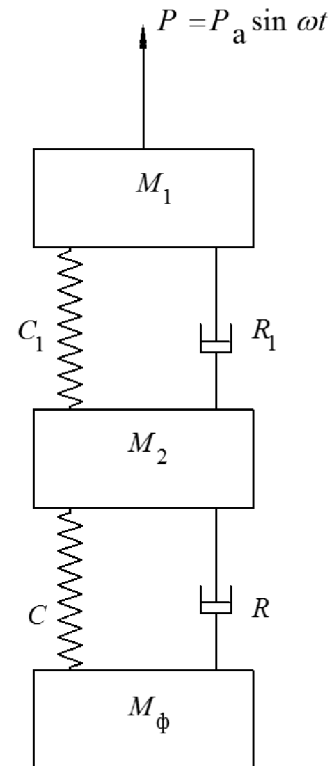


Рис. 2. Принципиальная схема колебательной системы

При этом

$$\begin{aligned} \omega_1^2 &= 0 < \lambda_1^2 < \omega_1^2; \\ \omega_{11}^2 &< \omega_*^2 < \omega_{11}^2; \quad \omega_{111}^2 < \lambda_2^2 < \omega_{1V}^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Приближенное построение графика зависимости  $U(\omega)$  или  $U(\omega^2)$  для системы без трения теперь не представит затруднений. Такой график полезен в качестве первого приближения и для оценки коэффициента эффективности вибрационной защиты составного колеса в системе с трением. Последнее устранил разрывы непрерывности кривой  $U(\omega)$ , но в остальном, за исключением области самых высоких частот, его влияние будет слабым.

Возвращаясь к выражению (2), учитывая трение, заметим, что при весьма больших  $\omega$  оно дает

$$U \approx 20 \lg \frac{\omega}{R} M_{2\Phi}. \quad (6)$$

Если бы принадлежащие конструкции составного зубчатого колеса массы  $M_1$  и  $M_2$  составляли одно жесткое целое (т. е.  $C_1 \rightarrow \infty$ ), то при весьма высоких частотах было бы, что

$$U_{C_1 \rightarrow \infty} \approx 20 \frac{\omega}{R} M_{\Phi}. \quad (7)$$



Таким образом, в области высоких частот для рассматриваемого случая имеет место уменьшение коэффициента эффективности вибрационной защиты конструкции составного зубчатого колеса:

$$U_{C_1 \rightarrow \infty} - U \approx 20 \lg \left( 1 + \frac{M_1}{M_{21}} \frac{M_\Phi}{M_1 + M_2 + M_\Phi} \right), \quad (8)$$

обусловленное неабсолютной жесткостью обода колеса. Коэффициент возрастает с увеличением массы ступицы составного зубчатого колеса и при  $M_\Phi \rightarrow \infty$  составляет

$$20 \lg \left( 1 + \frac{M_1}{M_2} \right).$$

Выражение для разности  $U_{C_1 \rightarrow \infty} - U$  остается справедливым при достаточно высоких частотах  $\omega$  и в случае системы без трения, хотя ход кривых  $U_{C_1 \rightarrow \infty}$  и  $U$  различен. При отсутствии

трения их координаты возрастают на 12 дБ с увеличением частоты на октаву, а при наличии трения – только на 6 дБ.

На рис. 3 изображены две кривые коэффициента эффективности вибрационной защиты составного зубчатого колеса, построенные для системы без трения; показаны также высокочастотные ветви аналогичных кривых, соответствующих наличию трения. При вычерчивании

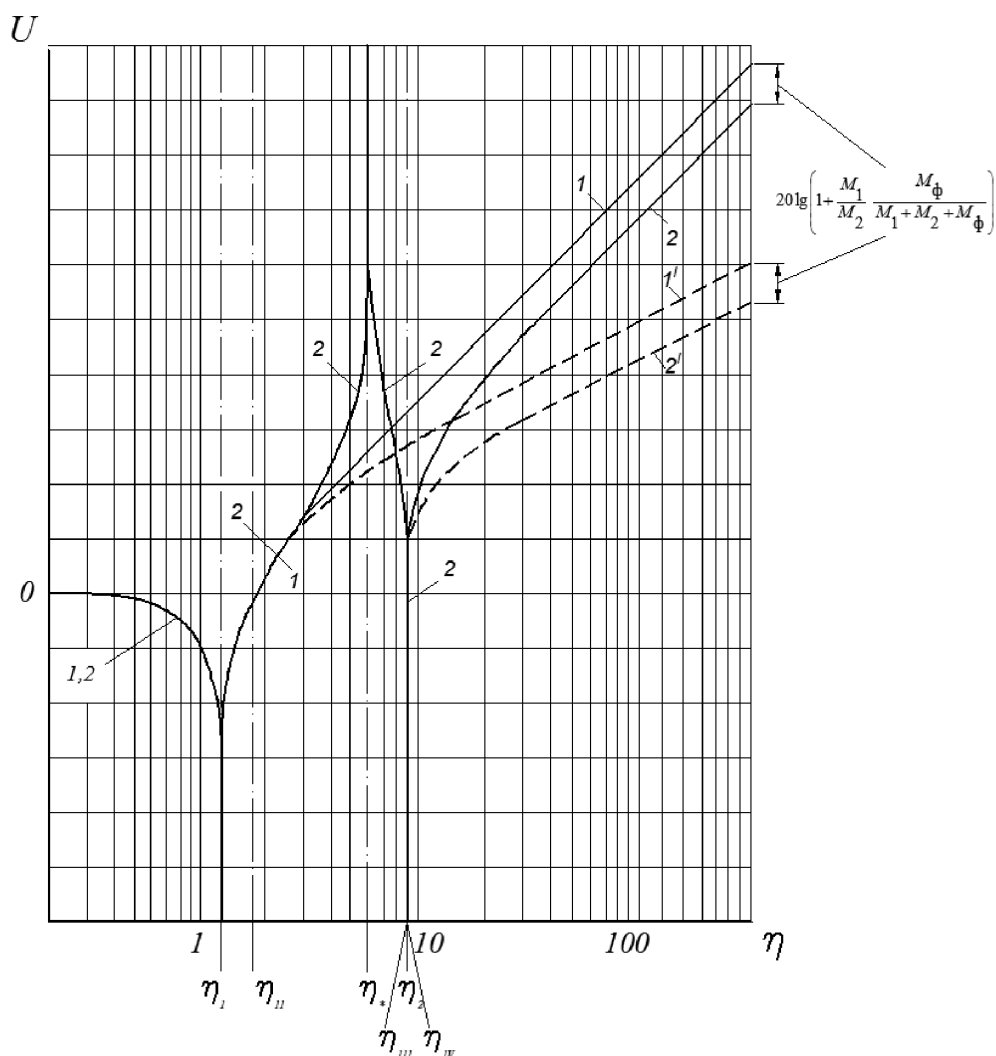


Рис. 3. Кривые коэффициента эффективности вибрационной защиты составного зубчатого колеса при отсутствии трения ( $R = R_1 = 0$ ) для случаев:

1 – абсолютно жесткого обода колеса  $C_1 \rightarrow \infty$ ; 2 – неабсолютно жесткого обода колеса, для которого  $C_1$  значительно больше  $C$ , в силу чего низшая частота свободных колебаний системы почти не изменяется в случае увеличения  $C_1$ ; 1' и 2' – высокочастотные ветви кривых коэффициента эффективности вибрационной защиты (при  $R \neq 0$ )

кривых в качестве аргумента взята безразмерная

$$\text{величина } \eta = \omega \sqrt{\frac{M}{C}}.$$

### Вывод

Таким образом, для оценки изменения уровня вибраций на ступице составного зубчатого колеса, вызванного переходом к неабсолютно жесткому ободу от абсолютно жесткого, недостаточно знать, как изменился при этом коэффициент эффективности вибрационной защиты, обеспечиваемый виброизолирующим креплением. Необходимо учесть изменение характеристик самого обода составного колеса как источника возмущений.

### Research of vibroisolation properties compound cogwheel

A.M. Medvedev, G.V. Litovka

Amur State University, 21 Ignatyevskoe Shosse, Blagoveschensk, 675027, Russian Federation

#### Abstract

An integrated approach in design of means of emergence and distribution of structural noise stoppers in actuating units of processing equipment is considered. The theoretical research that allow to reduce noise on the early stages of the mechanical gears design by the means of anti-vibration ability of cogwheels increase are executed. Noise reduction is realized at the expense of decrease of a sound wave amplitude in compound cogwheels construction of mechanical drives of machines. As a result of elastic deformations of laying and plugs not only self-installation of a gear wreath from action of dynamic loadings arising in gearing, but their active clearing is provided. To evaluate changes in the level of vibration on the composite gear hub, caused by the transition to a non-absolutely rigid rim from absolutely rigid it is necessary to take into account the changes of the composite wheel rim characteristics as a source of disturbance.

**Keywords:** processing equipment; mechanical drive; structural noise; compound cogwheels; effectiveness ratio of vibration protection.

#### References

1. Artobolevskij I.I., Bobrovnickij Ju.I., Genkin M.D. *Vvedenie v akusticheskuyu dinamiku mashin* (Introduction to the acoustic dynamics of machines). Moscow, Nauka, 1979. 295 p.
2. Medvedev A.M., Suhanov N.L., Bushmanov A.V., Churilin A.S. Avtorskoe svidetel'stvo № 1551913 SSSR, MKI5 F 16 H 55/17, 55/14. *Sostavnoe zubchatoe koleso* (Composite gear). № 4424362/25-28; zajavl.12.05.88, opubl. 23.03.1990, Bjul. № 11. 140 p.
3. Kljukin I.I. *Bor'ba s shumom i vibraciej na sudah* (Control of noise and vibration on ships). Leningrad, Sudostroenie, 1982. 256 p.

### Список литературы

1. Артоболевский И.И., Бобровницкий Ю.И., Генкин М.Д. Введение в акустическую динамику машин. – М.: Наука, 1979. – 295 с.
2. А.с. № 1551913 СССР, МКИ5 F 16 H 55/17, 55/14. Составное зубчатое колесо / А.М. Медведев, Н.Л. Суханов, А.В. Бушманов А.С. Чурилин. – № 4424362/25-28; заявл. 12.05.88, опубл. 23.03.1990, Бюл. № 11. – С. 140.
3. Клюкин И.И. Борьба с шумом и вибрацией на судах. – Л.: Судостроение, 1982. – 256 с.

# ИНСТРУМЕНТ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА НА ОСНОВЕ СОВМЕЩЕННОГО СОГЛАСУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТИПА

*Ю.В. БАТЫГИН, доктор техн. наук, профессор  
А.В. ГНАТОВ, канд. техн. наук, доцент  
И.С. ТРУНОВА, аспирант  
(ХНАДУ, г. Харьков)*

Статья получена 01 марта 2013 года

**Трунова И.С.** – Украина, 61002, г. Харьков, ул. Петровского 25,  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,  
e-mail: trynova\_irinka@mail.ru

Проведен анализ электромагнитных процессов в совмещенном согласующем устройстве, представляющем собой базовую составляющую инструмента бесконтактной магнитно-импульсной технологии устранения вмятин в листовых металлах. Предложенная конструкция представляет собой совмещение собственно согласующего устройства с исполнительным органом, что существенно повышает уровень энергии, передаваемой от источника мощности в зону силового воздействия на обрабатываемый объект. Интегрированием уравнений Максвелла получены аналитические выражения для компонент вектора электромагнитного поля, возбуждаемого в системе, и токов, индуцированных в металле вторичного витка рассмотренного конструктивного исполнения устройства. Показано, что для цилиндрической геометрии устройства, выполненного, например, из меди, и реальных в магнитно-импульсной обработке металлов временных параметров тока в первичной обмотке, коэффициент трансформации может достигать своего максимального значения, равного числу витков в первичной обмотке рассмотренного согласующего устройства. Результаты проведенных исследований полностью согласуются с данными, полученными из ранее опубликованных аналогичных зависимостей для подобных конструкций импульсных преобразователей тока, что подтверждает достоверность выводов настоящей работы. Проведенные экспериментальные исследования показали высокую эффективность совмещенного согласующего устройства цилиндрического типа для технологии бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки.

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная обработка металлов, внешняя магнитно-импульсная рихтовка, согласующее устройство, коэффициент трансформации.

## Введение

Разрабатываемые различные технические системы и комплексы, основанные на использовании энергии электромагнитных полей в современной промышленности, например в практике ремонта и восстановления поврежденных кузовных покрытий автомобилей, в наше время являются весьма актуальными и перспективными. В связи с этим возрастает необходимость в осуществлении различных технических разработок и усовершенствований всевозможных технических систем и устройств, которые по-

зволяют производить внешнюю бесконтактную магнитно-импульсную рихтовку [1–3]. К таким устройствам относятся согласующие устройства (СУ) – импульсные трансформаторы тока. Данные устройства применяют в практике магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) для повышения уровня энергии, передаваемой от мощных импульсных установок (источников мощности) в малоиндуктивные нагрузки – инструмент магнитно-импульсного воздействия [2, 4, 5].

Основной функцией СУ в технике МИОМ является преобразование амплитудно-временных

параметров тока при разряде емкостных накопителей, что позволяет существенно повысить величину силового воздействия на обрабатываемый объект [4, 5]. СУ условно можно разделить на две большие группы – дискового и цилиндрического типа.

Коллективом лаборатории электромагнитных технологий ХНАДУ предложена совмещенная конструкция СУ с индуктором [6]. Такая конструкция обеспечивает:

- повышение прочностных показателей;
- повышение уровня передачи энергии в рабочую зону инструмента;
- исключение так называемых переходных сопротивлений, которые возникают в местах подсоединения индуктора к СУ.

Подобные узкоспециализированные решения применялись в традиционной МИОМ (концентраторы) для обжима полых цилиндрических труб [4, 7–9].

**Цель работы** – анализ протекающих процессов в инструменте бесконтактной магнитно-импульсной технологии ремонта – совмещенном согласующем устройстве цилиндрического типа с определением его основных параметров и характеристик; экспериментальная апробация рассматри-

ваемого согласующего устройства как инструмента внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки кузовных панелей автомобилей.

## 1. Исследование электромагнитных процессов

Принятая расчетная модель и ее физическая реализация представлены на рис. 1.

Постановка задачи:

- принимается полярная система координат;
- первичную обмотку – катушку с достаточно плотным размещением витков (их число  $w$ ) можно считать цельнометаллическим полым цилиндром с внутренним и внешним радиусами  $R_3, R_4$  соответственно;
- вторичная обмотка – полый металлический цилиндр с внутренним и внешним радиусами  $R_1, R_2$  соответственно;
- цилиндры первичного и вторичного витков выполнены из одинаковых немагнитных металлов с удельной электропроводностью  $\gamma$ ;
- продольный  $\ell$  и радиальные размеры  $R_{1,2,3,4}$  рассматриваемой системы достаточно велики, так что  $\ell/R_{1,4} \gg 1$  и  $R_{1,2,3,4}/h \gg 1$ , где  $h = (R_3 - R_2)$  – расстояние между обмотками;

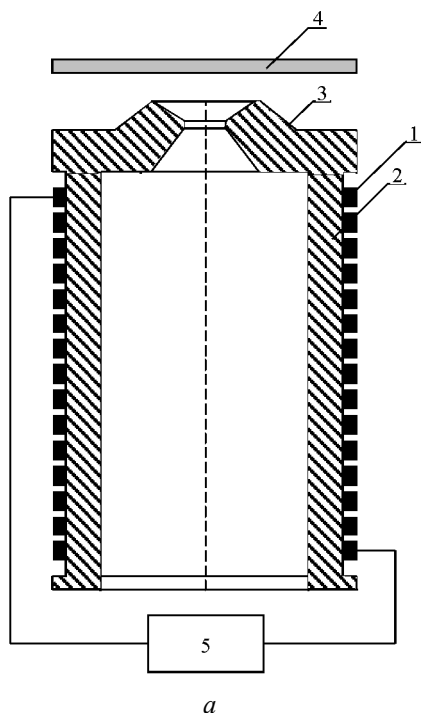


Рис. 1. Совмещенное согласующее устройство цилиндрического типа:

*a* – расчетная модель; *б* – физическая реализация;

1 – первичная обмотка; 2 – разомкнутый виток вторичной обмотки; 3 – индуктор-инструмент;

4 – тонкостенная металлическая заготовка; 5 – магнитно-импульсная установка



– наличием продольного разреза во внутреннем цилиндре пренебрегаем и полагаем, что система обладает аксиальной симметрией, так что  $\partial/\partial\varphi \approx 0$  ( $\varphi$  – азимутальный угол);

– в первичной обмотке согласующего устройства имеет место только азимутальная составляющая плотности тока  $J(t) = J_m j(t)$ , где  $J_m$  – амплитуда;  $j(t)$  – временная зависимость;

– электромагнитные процессы удовлетворяют условию квазистационарности,  $\omega/c\ell \ll 1$ , где  $\omega$  – радиальная частота;  $c$  – скорость света в вакууме;  $\ell$  – наибольший характерный геометрический размер в системе.

Обозначим области с одинаковыми электрофизическими параметрами:

- 1 – внутренняя полость,  $r \in [0, R_1]$ ;
- 2 – металл внутреннего цилиндра,  $r \in [R_1, R_2]$ ;
- 3 – диэлектрическая полость между цилиндрами,  $r \in [R_2, R_3]$ ;
- 4 – металл внешнего цилиндра,  $r \in [R_3, R_4]$ ;
- 5 – свободное пространство вне системы,  $r \in [R_4, \infty)$ .

В принятой системе координат (в соответствии с постановкой задачи) составим уравнения Максвелла для ненулевых компонент вектора напряженности электрического и магнитного полей  $E_\varphi(r, t) \neq 0, H_z(r, t) \neq 0$ :

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_\varphi(p, r)) = -\mu_0 p H_z(p, r), \\ -\frac{\partial H_z(p, r)}{\partial r} = p\epsilon_0 E_\varphi(p, r) \text{ (вакуум)}, \\ -\frac{\partial H_z(p, r)}{\partial r} = \gamma E_\varphi(p, r) \text{ (металл)}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $p$  – параметр преобразования Лапласа;  $\mu_0, \epsilon_0$  – магнитная и диэлектрическая проницаемости свободного пространства;  $E_\varphi(p, r) = L\{E_\varphi(t, r)\}, H_z(p, r) = L\{H_z(t, r)\}$ .

Система уравнений (1) приводится к соответствующим дифференциальным уравнениям для напряженности электрического поля:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_\varphi(p, r)) \right) - k_{1,2}^2(p) E_\varphi(p, r) = 0, \quad (2)$$

где  $k_1(p)$  – волновое число в металле,  $k_1(p) = \sqrt{p\mu_0\gamma}$ ;  $k_2(p)$  – волновое число в вакууме,  $k_2(p) = p/c$ .

Решая полученные уравнения известными методами математического анализа с применением интегрального преобразования Бесселя, как это выполнено в работах [1, 3, 5], опуская промежуточные выкладки, запишем систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных произвольных постоянных  $C_1, D_1, A_1$  в выражениях и тока, индуцированного во вторичной обмотке рассматриваемого согласующего устройства:

$$\begin{cases} \frac{1}{\sqrt{R_1}} (C_1(p)e^{k_1(p)R_1} + D_1(p)e^{-k_1(p)R_1}) = \frac{A_1(p)R_1}{2}, \\ \frac{\gamma}{k_1(p)\sqrt{R_1}} (C_1(p)e^{k_1(p)R_1} - D_1(p)e^{-k_1(p)R_1}) = \frac{A_1(p)}{p\mu_0}, \\ \frac{\gamma}{k_1(p)\sqrt{R_1}} (C_1(p)e^{k_1(p)R_1} - D_1(p)e^{-k_1(p)R_1}) \approx \\ \approx \left( \frac{J_1(p) + J(p)w}{\ell} \right), \end{cases} \quad (3)$$

где  $J_1(p)$  –  $L$ -изображение тока, индуцированного в металле внутреннего цилиндра.

Исключив  $A_1(p)$ , находим связь следующего вида:

$$C_1(p)e^{k_1(p)R_1} = \left( \frac{k_1(p)R_1 + 2}{k_1(p)R_1 - 2} \right) D_1(p)e^{-k_1(p)R_1}. \quad (4)$$

Следует отметить, что рабочие частоты в технике МИОМ не превышают  $\sim 50 \dots 70$  кГц [4, 9]. Например, для  $f \sim 2$  кГц и реально возможных радиальных размеров рассматриваемой системы  $R_1 \approx 0,025 \dots 0,25$  м при  $\gamma = 6 \cdot 10^7$  1/Ом·м (медь) справедлива оценка:

$$\sqrt{\omega\mu_0\gamma} \cdot R_1 \gg 1 \quad \text{и} \quad |k_1(p) \cdot R_{1,2,3,4}| \gg 1. \quad (5)$$

Тогда при выполнении условия (5) выражение (4) принимает вид

$$C_1(p)e^{k_1(p)R_1} \approx D_1(p)e^{-k_1(p)R_1}. \quad (6)$$

Связь (6) подставим в третье уравнение системы (3). После перехода в пространство оригиналов находим, что

$$J_1(t) \approx -wJ(t). \quad (7)$$

Проводя сравнение результата (7) с аналогичной зависимостью для индуцированных токов в

СУ с двумя вторичными витками в виде коаксиальных полых цилиндров, между которыми размещена первичная многovitковая обмотка, можно судить о достоверности полученного результата [3]. В пределе, когда толщина внешнего цилиндра-витка стремится к нулю, индуцированный ток, так же как и в (7), пропорционален току индуктора с коэффициентом пропорциональности, равным числу витков в первичной обмотке.

Зависимости, полученные при проведении настоящих вычислений, приводят к следующему выводу: при достаточной длине системы ( $\ell \gg R_{\max}$ ,  $R_{\max}$  – максимальный радиус) и выполнении двойного неравенства (5) ( $\sqrt{\omega\mu_0\gamma \cdot R_{\min}} \gg 1$ ,  $R_{\min}$  – минимальный радиус) величина коэффициента трансформации по току достигает своего максимального значения, равного числу витков в первичной обмотке рассмотренного согласующего устройства.

Для подтверждения достоверности результатов теоретических исследований были проведены эксперименты с рассмотренным СУ.

## 2. Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились на магнитно-импульсной установке МИУС-2, разработанной в лаборатории электромагнитных технологий ХНАДУ, рис. 2 [10–12].



Рис. 2. Магнитно-импульсная установка МИУС-2 с кабельным подключением совмещенного СУ цилиндрического типа

МИУС-2 обладает следующими техническими характеристиками:

- запасаемая энергия  $W \sim 2$  кДж;
- напряжение питающей сети  $\sim 380/220$  В.
- емкость конденсаторов  $C = 1200$  мкФ;
- собственная частота  $f_0 \sim 7$  кГц;
- собственная индуктивность  $L \sim 440 \dots 500$  нГн;
- напряжение заряда емкостных накопителей  $U \sim 100 \dots 2100$  В;
- частота следования разрядных импульсов  $f_{\text{имп}} \sim 1 \dots 10$  Гц;
- тип коммутаторов – тиристорные ключи;
- режим работы:

а) аperiodический (разрядный импульс униполярной формы);

б) колебательный (разрядный импульс – затухающая синусоида).

В качестве образцов металла для проведения экспериментальных исследований используются обшивки кузовной панели автомобиля фирмы «Subaru» толщиной 0,8 мм.

Экспериментальные исследования предполагали создание и удаление вмятины магнитно-импульсным притяжением участка (область внутреннего отверстия индуктора) на поверхности листового образца стали кузовной панели автомобиля. Эксперименты проводились в режиме многократного повторения импульсов силового воздействия. Их количество позволяло дозировать интегральную энергию в зоне деформирования и, в конечном итоге, управлять процессом образования или устранения вмятины. Для создания вмятины было подано 20 силовых разрядных импульсов. Результат опыта: силовым

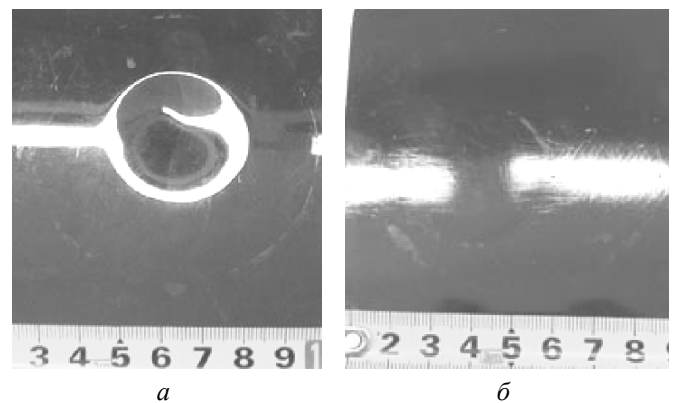


Рис. 3. Фрагмент обшивки кузова автомобиля «Subaru»:

а – образование вмятины; б – удаление вмятины

магнитно-импульсным притяжением на ровной поверхности образца была получена вмятина глубиной ~ 1,7 мм и диаметром ~ 40 мм [12] (рис. 3, а).

Устранение вмятины осуществлялось силовым магнитно-импульсным притяжением, было произведено 20 силовых разрядных импульсов, для втягивания металла вмятины до уровня поверхности листового образца (рис. 3, б). В результате эксперимента получено удовлетворительное выравнивание образца, лакокрасочное покрытие осталось **неповрежденным**.

### Выводы

1. Проведен анализ протекающих процессов в инструменте бесконтактной магнитно-импульсной технологии – совмещенном согласующем устройстве цилиндрического типа.

2. Получены аналитические зависимости для определения основных параметров и характеристик в исследуемом согласующем устройстве.

3. Определено, что коэффициент трансформации по току может достигать своего максимального значения, равного числу витков в первичной обмотке совмещенного согласующего устройства цилиндрического типа.

4. Проведена экспериментальная апробация исследуемого согласующего устройства как инструмента внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки кузовных панелей автомобилей.

5. Экспериментальные исследования показали высокую эффективность совмещенного согласующего устройства цилиндрического типа для технологии бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки.

### Список литературы

1. Батыгин Ю.В. Притяжение тонкостенных металлических листов магнитным полем одновиткового индуктора / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, С.А Щиголева // *Электричество*. – 2011. – № 4. – С. 55–62.

2. Батыгин Ю.В. Цилиндрический виток индуктора с разрезом как инструмент для магнитно-импульсной обработки металлов / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов // *Электричество*. – 2011. – № 12. – С. 53–59.

3. Батыгин Ю.В. Расчет электродинамических процессов в согласующем устройстве цилиндриче-

ского типа с двумя разомкнутыми вторичными витками / Ю.В. Батыгин А.В. Гнатов И.С. Трунова // *Вестник ХНАДУ*. – 2012. – В. 56. – С. 30–36.

4. Белый И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И.В. Белый, С.М. Фертник, Л.Т. Хименко. – Харьков: Вища школа, 1977. – 189 с.

5. Туренко А.Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями / А.Н. Туренко, Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов. – Т. 3. – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 240 с.

6. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Аргун Щ.В., Смирнов Д.О., Трунова И.С., Чаплыгин Е.А., Щиголева С.А. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок з використанням узгоджувального пристрою // Патент України № 69467. – 2012. – Бюл. № 8.

7. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 200 с.

8. Комельков В.С. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / В.С. Комельков, П.Н. Дашук, С.Л. Зайенц – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.

9. Батыгин, Ю.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, Л.Т. Хименко. – Т. 1, под ред. Ю.В. Батыгина. – 2-е изд. – Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003. – 284 с.

10. Батыгин, Ю.В. Экспериментальные исследования магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов / Ю.В. Батыгин, С.Ф. Головащенко, А.В. Гнатов [и др.] // *Электротехника и электромеханика*. – 2010. – № 3. – С. 39 – 41.

11. *Экспериментальные исследования согласующих устройств – импульсных трансформаторов тока, в бесконтактной рихтовке транспортных средств: Міжнародна науково-технічна конференція [«Науково-прикладні аспекти автомобільної галузі»]* (Луцк 2012 г.) / А.В. Гнатов, Щ.В. Аргун, И.С. Трунова. – Луцк : Наукові нотатки, В.36. – 2012. – С. 53–57.

12. *Экспериментальные исследования импульсных трансформаторов тока – согласующих устройств цилиндрического типа в технике МИОМ. Часть 1. сборник трудов IV международной научно-технической конференция [«Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии»]*, (Тольятти, 24-25 апреля 2012 г.) / Ю.В. Батыгин А.В. Гнатов, Щ.В. Аргун, И.С. Трунова, А.В. Гопко. – Тольятти : Издательство ТГУ. 2012. – 280 с. – С. 154–161.



## The tool of magnetic-pulse repair technology based on combined matching device of cylindrical type

Yu.V. Batygin, A.V. Hnatov, I.S. Trunova

Kharkiv National Automobile and Highway University, Petrovskogo st., 25  
Kharkov, 61002, Ukraine

### Abstract

The electromagnetic processes analysis in the combined matching device that is presented by some base component of the tool for the non-contact electromagnetic metal forming technology of the dents removing in the sheet metals is conducted. The proposed design is a combination of proper matching device with an executive body, which significantly increases the level of energy transmitted from the source of power in the area of impacts to the object being processed. Analytical expressions for the components of the electromagnetic field excited in the system, and the currents, induced in the secondary coil of the metal considered constructive of the device were obtained by integration of Maxwell's equations. It is shown that the cylindrical geometry of the device made of, e.g., copper and being in actual pulsed magnetic metal processing time the current in the primary winding, conversion coefficient can reach its maximum value equal to the number of turns in the primary winding of the matching device considered. Research results are entirely consistent with those obtained from a previously published similar relationships for similar designs DC switching converters, which confirms the reliability of the conclusions of this work. The experimental results showed the high efficiency of the combined matching device cylindrical type of contactless technology for magnetic pulse alignment.

**Keywords:** magnetic-pulse metal working, external magnetic-pulse straightening, matching device, transformer ratio.

### References

1. Batygin Ju.V., Gnatov A.V., Shhigoleva S.A. *Jelektrichestvo*, 2011, no. 4, pp. 55-62.
2. Batygin Ju.V., Gnatov A.V. *Jelektrichestvo*, 2011, no. 12, pp. 53-59.
3. Batygin Ju.V., Gnatov A.V., Trunova I.S. *Vestnik KhNAHU*, 2012, no. 56, pp. 30-36.
4. Belyj I.V., Fertik S.M., Himenko L.T. *Spravochnik po magnitno-impul'snoj obrabotke metallov* (Magnetic pulse treatment of metals. Reference-book), Kharkov, Vishha shkola, 1977. 189 p.
5. Turenko A.N., Batygin Ju.V., Gnatov A.V. *Impul'snye magnitnye polja dlja progressivnyh tehnologij. Teorija i jeksperiment pritjazhenija tonkostennyh metallov impul'snymi magnitnymi poljami*. (Pulsed magnetic fields for progressive technologies. Theory and experiment of attraction of thin-walled metal pulsed magnetic fields), Kharkov, KhNAHU, 2009, vol. 3, 240 p.
6. Batygin Ju.V., Gnatov A.V., Argun Shh.V., Smirnov D.O., Trunova I.S., Chaplygin E.A. Shhigoleva S.A. *Sposib magnitno-impul'snoi' obrobky tonkostinnyh metalevyh zagotovok z vykorystannjam uzgodzhuval'nogo prystroju* (Method of magnetic pulse processing thin metal blanks using a matching device)/ Ukraine Patent no. 69467. 2012. Bulletin no. 8.
7. Shneerson G.A. *Polja i perehodnye processy v apparature sverhsil'nyh tokov* (Fields and transients in equipment of ultrastrong currents). Leningrad, Jenergoizdat, 1981. 200 p.
8. Komel'kov V.S., Dashuk P.N., Zajenc S.L. *Tehnika bol'shih impul'snyh tokov i magnitnyh polej* (Technique high pulse currents and magnetic fields). Moscow, Atomizdat, 1970. 472 p.
9. Batygin Ju.V., Lavinskij V.I., Himenko L.T. *Impul'snye magnitnye polja dlja progressivnyh tehnologij* (Pulse magnetic fields for progressive technologies). Kharkov, MOST-Tornado, Vol.1, Second edition, 2003. 284 p.
10. Batygin Ju.V., Golovashhenko S.F., Gnatov A.V. *Jelektrotehnika i jelektromehanika*, 2010, no. 3, pp. 39-41.
11. Gnatov A.V., Argun Shh.V., Trunova I.S. *Mizhnarodna naukovo-tehnichna konferencija "Naukovo-prykladni aspekty avtomobil'noi' galuzi"* (International Scientific Conference "Scientific and applied aspects of the automotive industry"), Lutsk, Naukovi notatky, 2012. V. 36, pp. 53-57.
12. Batygin Ju.V., Gnatov A.V., Argun Shh.V., Trunova I.S., Gopko A.V. *«Problemy jelektrotehniki, jelektrojenergetiki i jelektrotehnologii»: sbornik trudov IV Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencija* ("Problems electrical engineers, electric power industry and electrotechnology": Proceedings IV International Scientific and Technical Conference), Part 1, Togliatti, TSU, 2012, pp. 154-161.

# ЭФФЕКТИВНАЯ РАБОТА ИНСТРУМЕНТА ИЗ КОМПОЗИТА ПРИ СКОРОСТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ РЕЗЬБЫ

*Е.А. КУДРЯШОВ, доктор техн. наук, профессор  
И.М. СМЕРНОВ, канд. техн. наук, доцент  
(ЮЗГУ, г. Курск)*

Статья поступила 5 марта 2013 года

Кудряшов Е.А. – 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94,  
Юго-Западный государственный университет,  
e-mail: Kea@swsu.ru

Высокая эффективность обработки трудоемких, металлоемких и дорогостоящих деталей достигается разработкой и внедрением специальных технологий, основанных на применении лезвийных инструментов из композита. Различные марки композитов широко применяются в металлообработке в качестве инструментального оснащения чистовых и отделочных операций. Приведены результаты исследования возможностей резцов из инструментального материала композита 10 на примере скоростного фрезерования резьбы (вихревой метод). Сравнение процесса вихревого нарезания резьб композиционными и твердосплавными инструментальными материалами подтверждает преимущество первых, обеспечивающих высокую точность обработки, шероховатость резьбовой поверхности не грубее 1,25 мкм и высокую производительность.

**Ключевые слова:** фрезерование композитом, параметры образования, условия контакта резец-заготовка, режимы резания, качество обработки.

## Введение

В настоящее время производство резьбовых деталей как в России, так и за рубежом достигло больших размеров. Объясняется это высоким уровнем и темпами развития целого ряда отраслей машиностроения, таких как станкостроение, автомобилестроение, тракторное и сельскохозяйственное машиностроение, которые являются основными производителями и потребителями данного вида продукции.

Как показывает опыт работы машиностроительных предприятий, высокая эффективность обработки трудоемких, металлоемких и дорогостоящих деталей достигается разработкой и внедрением специальных технологий, основанных на применении лезвийных инструментов из композитов. Использование этих прогрессивных инструментальных материалов позволяет не только повысить эффективность процессов обработки резьбовых поверхностей, но также дает возможность выполнить высокопроизводительную обработку ряда деталей, технология изготовления

которых основана на традиционном сочетании черновой лезвийной и чистовой шлифовальной обработки [1–3].

Имеющиеся научные разработки и опыт промышленного использования резьбообразующих технологий свидетельствуют о том, что композиты практически малоизвестны в резьбообработке и их потенциальные возможности используются не в полной мере. Поэтому совершенствование технологии изготовления деталей с резьбовыми поверхностями является актуальной технологической и научной задачей, а применение композитов – эффективным и перспективным направлением.

Как показывает опыт исследования и практика промышленного использования, различные марки композитов широко применяются в металлообработке в качестве инструментального оснащения чистовых и отделочных операций. Эти прогрессивные инструментальные материалы обеспечивают высокую точность и качество. Оснащение композитами операций точения, растачивания и торцевого фрезерования дает возможность выполнить заданные технологиче-

ские показатели. Значительно в меньшей степени композиты известны при обработке резьбы, в том числе – при скоростном фрезеровании резьбы резцами из композитов [3,4].

Впервые описание скоростного фрезерования резьбы вращающимися резцами (вихревое нарезание резьбы) дано С.С. Черниковым в 1946 г.

Анализ литературных источников показывает, что несмотря на ряд достоинств этот один из самых производительных методов резьбообразования не получил в наше время широкого распространения. Известно, что для всех процессов резания прерывистых поверхностей характерно чередование рабочих ходов (снятие стружки) и холостых пробегов инструмента. В зависимости от конструктивных особенностей обрабатываемых поверхностей заготовки и способа резания соотношение рабочих и холостых ходов будет различным. Однако во всех случаях, в том числе и при скоростном фрезеровании резьбовых поверхностей, полный цикл (оборот заготовки) состоит из четырех этапов: 1) врезание; 2) рабочий ход; 3) выход режущей части инструмента из контакта с обрабатываемой поверхностью заготовки; 4) холостой пробег инструмента.

Особенность обработки резьбовых поверхностей вихревым методом заключается в том, что этот процесс также имеет прерывистый характер. Прерывистое резание, многократное чередование с большой частотой и скоростью врезания, резания и выхода резцов вихревой головки из контакта обрабатываемой поверхности заготовки являются признаками сколов и выкрашиваний режущей части твердосплавного инструмента. Низкая работоспособность твердосплавного инструмента объясняется как механическими ударами, так и резкими тепловыми колебаниями, являющимися следствием быстро чередующихся нагревов и охлаждений, соударений вершины инструмента и детали. Попытка замены твердосплавного инструмента на композиты путем простого переноса режимов резания и рекомендуемой геометрии режущей части также не обеспечивает удовлетворительной работоспособности инструмента.

Учитывая это обстоятельство, а также значительную хрупкость композитов становится проблематичным обеспечение не только заданного качества и точности обработки, но и работоспособности инструмента. Обычно традиционное

решение связано с применением у режущих композиционных элементов положительного угла наклона главной режущей кромки  $\lambda$ , поскольку при такой геометрии режущей части инструмента его врезание в прерывистую поверхность детали произойдет не хрупкой вершиной, а периферией режущей кромки. Однако эффект такого решения весьма мал, поскольку речь идет о переточке, ухудшении режущих свойств, ослаблении прочности композиционных элементов и постоянном контроле за состоянием режущей части инструмента.

В таких условиях проблема работоспособности инструмента может быть решена за счет создания особых условий контакта режущей части инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки [5, 7].

Первоначально Н.И. Резниковым, а затем Г.С. Андреевым, Н.Н. Зоревым, М. Кроненбергом, В.Н. Подураевым и другими учеными исследована и показана возможность повышения работоспособности инструмента за счет его оптимального расположения относительно обрабатываемой заготовки в процессах точения, растачивания, фрезерования и строгания прерывистых поверхностей деталей твердыми сплавами.

Исследования технологических особенностей процессов обработки прерывистых поверхностей современными инструментальными материалами за счет создания оптимальных контактных условий, проведенные Б.А. Кравченко, Е.А. Кудряшовым и их учениками, позволили более полно раскрыть свойства и использовать возможности композитов на чистовых операциях, осуществляемых в экстремальных условиях.

Задачей исследования является нахождение оптимального сочетания геометрии режущей части инструмента и угла наклона резьбонарезного приспособления, при котором обеспечивается требуемое условие контакта передней поверхности резца с обрабатываемой поверхностью заготовки (контакт STUV, U-контакт).

## 1. Теория

На примере точения прерывистой поверхности заготовки, аналогично процессу скоростного фрезерования резьбы, в упрощенной форме рассмотрим положение передней по-

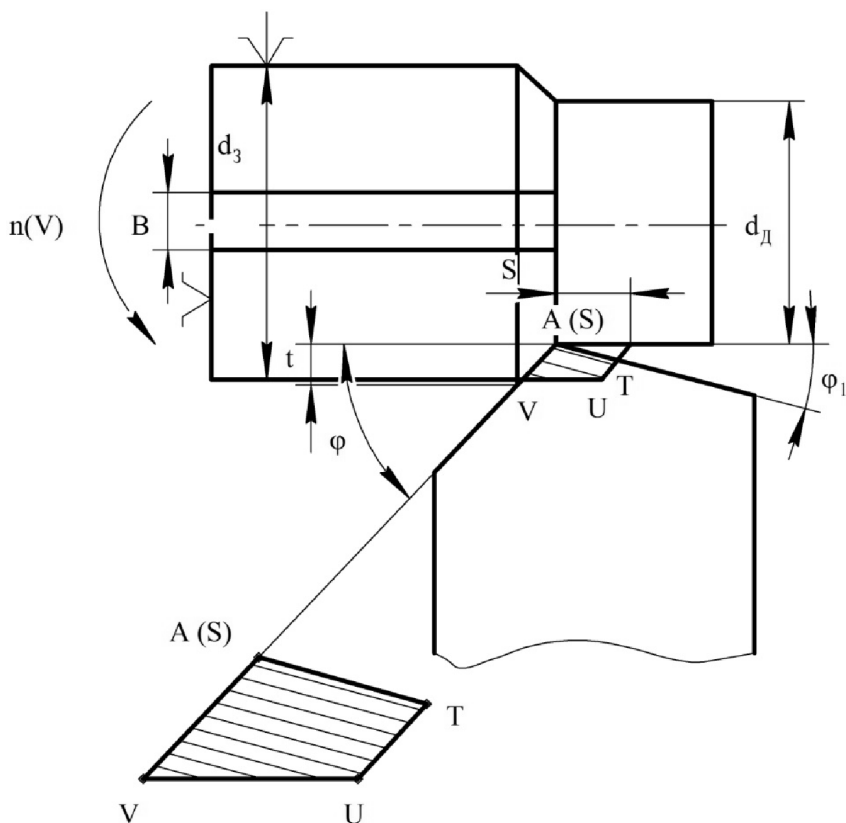


Рис. 1. Схема резания прерывистой поверхности заготовки

верхности инструмента относительно обрабатываемой поверхности заготовки на всех трех этапах резцообразования: врезание, установившееся резание, выход инструмента из контакта с заготовкой (рис. 1). В зависимости от геометрии режущей части резца и его положения относительно обрабатываемой поверхности заготовки первоначальный контакт может произойти в одном из следующих положений: а) точечный контакт S, T, U, V; б) линейный контакт: ST, TU, UV, VS; в) плоскостной контакт STUV.

Из всех возможных девяти способов первоначального контакта самый неблагоприятный – контакт в точке S (A – вершина инструмента) и наиболее выгодный – контакт плоскостной STUV, когда нагрузка должна равномерно распределяться по всей передней поверхности инструмента. В этом положении моменту контакта передней поверхности инструмента с прерывистой поверхностью заготовки соответствует угол  $\beta$  – угол поворота заготовки до первого касания с поверхностью заготовки.

Аналитическое решение позволило получить условия контакта передней поверхности резца с обрабатываемой (резьбовой) поверхностью:

а) на входе и выходе инструмента из контакта с заготовкой

$$\frac{\frac{ar_0}{\text{tg}\alpha} [\cos(\varphi + \varphi_1)] \sin(\varphi + \varphi_1)}{\text{tg}\varphi_1 \cdot \sin\varphi \left( \frac{d\sqrt{r_d^2 - b^2} - b\sqrt{r_d^2 - d^2}}{db + \sqrt{r_d^2 - d^2} \cdot \sqrt{r_d^2 - b^2}} \right) + \cos\varphi}; \quad (1)$$

б) установившееся резание (при максимальной толщине стружки)

$$\frac{\frac{ar_0}{\text{tg}\alpha} [\cos(\varphi + \varphi_1)] \sin(\varphi + \varphi_1)}{\text{tg}\varphi_1 \cdot \sin\varphi \left( \frac{d\sqrt{(r_d + a)^2 - b_1^2} - b_1\sqrt{(r_d + a)^2 - d^2}}{db_1 + \sqrt{(r_d + a)^2 - d^2} \cdot \sqrt{(r_d + a)^2 - b_1^2}} \right) + \cos\varphi}, \quad (2)$$

где  $a$  – толщина стружки, мм;  $r_0 = OB$  – наружный радиус резьбы, мм;  $\alpha$  – угол наклона

на резцовой головки;  $\varphi$  и  $\varphi_1$  – углы резца в плане;  $d = O_1P$ , мм;  $b = AM$ , мм;  $b_1 = BN$ , мм;  $r_d = O_1A$ , мм (рис. 2).

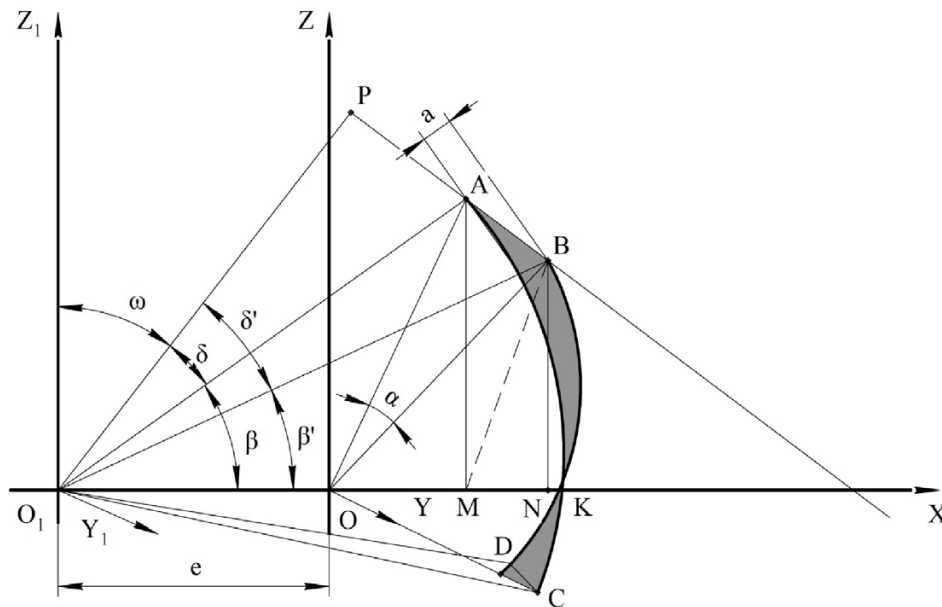


Рис. 2. Расчетная схема определения условий контактного взаимодействия

## 2. Результаты и обсуждение

С помощью ЭВМ, используя полученные расчетные зависимости (1) и (2), построим номограмму, характеризующую все возможные варианты контакта передней поверхности инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки в зависимости от угла наклона резбонарезного приспособления (рис. 3).

Аналитическое решение, на базе которого построена номограмма, свидетельствует о том, что все сочетания углов наклона резбонарезной головки приспособления, переднего угла, угла контакта, лежащих между линиями TU и UV, приводят к первоначальному контакту передней поверхности резбового резца полного профиля с заготовкой в точке U. Между линиями UV и SV – в точке V, между линиями ST и SV – в точке S.

Результаты расчета подтверждают, что наиболее благоприятный контакт инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки имеет место в точке U, затем в точках T и V, поскольку при

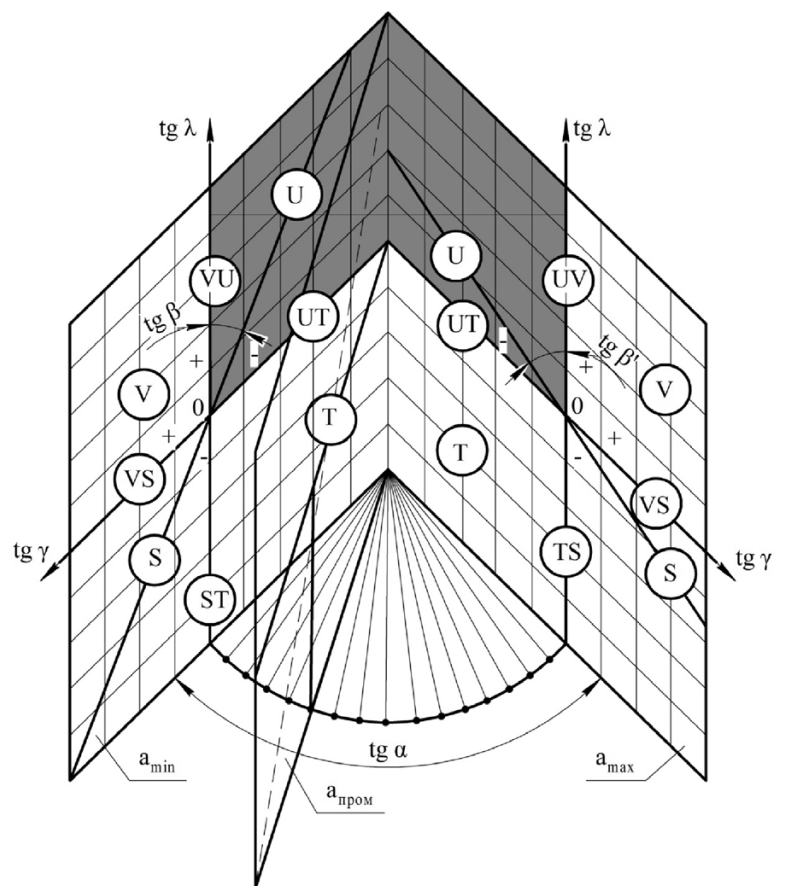


Рис. 3. Номограмма сочетаний различных условий контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки



оптимальном контакте (U-контакт) концентратор ударной нагрузки максимально удаляется от вершины инструмента.

Испытания показали, что выбор оптимального положения реза и геометрии позволяет увеличить стойкость инструментов из композитов более чем в два раза (табл. 1).

Таблица 1

**Стойкость инструмента из композита 10 в зависимости от условий контакта с заготовкой (Тг 38х6)**

Твердость обрабатываемой поверхности HRC <sub>э</sub>	Вид контакта инструмента с заготовкой	Расчетные данные		Стойкость инструмента, мин
		$\gamma^\circ$	$\lambda^\circ$	
20	U	-3	3	52
40	U	-5	4	49
20	T	-3	-2	44
40	T	-5	-4	41
20	V	3	4	20
40	V	5	6	13
20	S	5	-5	4
40	S	8	-6	2

Режимы:  $V = 6,5$  м/с;  $S_z = 0,6$  мм/резец;  $d_p/d = 1,30$ .  $\alpha = 10^\circ$

При одних и тех же значениях скорости резания, подачи, отношения диаметра окружности вершин резцов к наружному диаметру резьбы падение стойкости инструмента в зависимости от наиболее благоприятных к экстремальным условиям контакта с заготовкой составляет соответственно до 85, 50 и 20 % стойкости инструмента из композита 10 при U-контакте (табл. 2).

Как следует из уравнения

$R_a = 1,46 + 0,25S_z + 0,228d_p/d - 0,174V + 0,281h_3 - 0,0203HRC_{э}$  и графиков, изображенных на рис. 4, в условиях наиболее благоприятного U-контакта режущей части инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки в исследуемом диапазоне режимов резания мини-

мально возможной шероховатости поверхности соответствует максимальная скорость резания, минимальные значения круговой подачи и отношения диаметра окружности вершин резцов к наружному диаметру резьбы, что справедливо при  $h_3 \leq 0,40$  мм, принятому за технологический критерий.

С ростом значений  $S_z$  и  $d_p/d$  возрастает нагрузка на резец, интенсифицируется прерывистость процесса резания, появляются вибрации, ухудшается качество обработки, появляется огранка.

Однако условия U-контакта значительно улучшают условия врезания и выхода инструмента, уменьшают объем пластической деформации срезаемого металла, и при комплексном воздействии оптимальных факторов процесса резания обеспечивают стабильный уровень показателей точности и шероховатости обработанной поверхности резьбы.

Огранка резьбы (высота гребней на впадине резьбы) практически не зависит от режимов резания. Огранка очень мала (менее 1 мкм), что сопоставимо с высотой микронеровностей, характеризующих шероховатость резьбовой поверхности, и не снижает качества резьбы.

Контроль рассеивания размеров среднего диаметра резьбы  $d_2(\Delta d_2)$  шага  $S(\Delta S)$  и половины угла профиля  $\alpha_p(\Delta \alpha_p)$  показывает, что для треугольных и трапецидальных резьб в исследуемом диапазоне значений  $S_z$ ,  $d_p/d$  и  $V$  рассеивание размеров не превышает одной трети суммарного допуска номинального среднего диаметра резьб 7-го качества, что также хорошо согласуется и с теоретическими исследованиями и данными

Таблица 2

**Стойкость инструмента в зависимости от условий контакта с заготовкой и режимов резания**

Скорость резания $V$ , м/с	Стойкость, мин				Круговая подача $S_z$ , мм/резец	Стойкость, мин				$\frac{d_p}{d}$	Стойкость, мин			
	Условия контакта					Условия контакта					Условия контакта			
	U	T	V	S		U	T	V	S		U	T	V	S
2,5	63,5	54,0	38,1	8,0	0,47	55,3	47,2	33,2	6,6	1,10	52,5	44,6	31,5	8,7
3,5	58,1	49,4	34,8	7,4	0,63	53,1	45,1	31,8	5,9	1,20	51,8	44,0	31,1	8,5
4,5	54,2	46,1	32,5	6,2	0,79	51,5	43,8	30,9	5,4	1,30	51,4	43,7	30,8	7,4
5,5	51,4	43,7	30,8	5,4	0,95	50,5	42,9	30,3	5,1	1,40	51,0	43,4	30,6	6,3
6,5	49,1	41,7	29,4	4,7	1,11	49,0	41,6	29,4	4,1	1,50	50,4	42,8	30,2	3,1
7,5	47,3	40,2	28,4	4,2										
8,5	46,7	38,8	27,4	3,7										

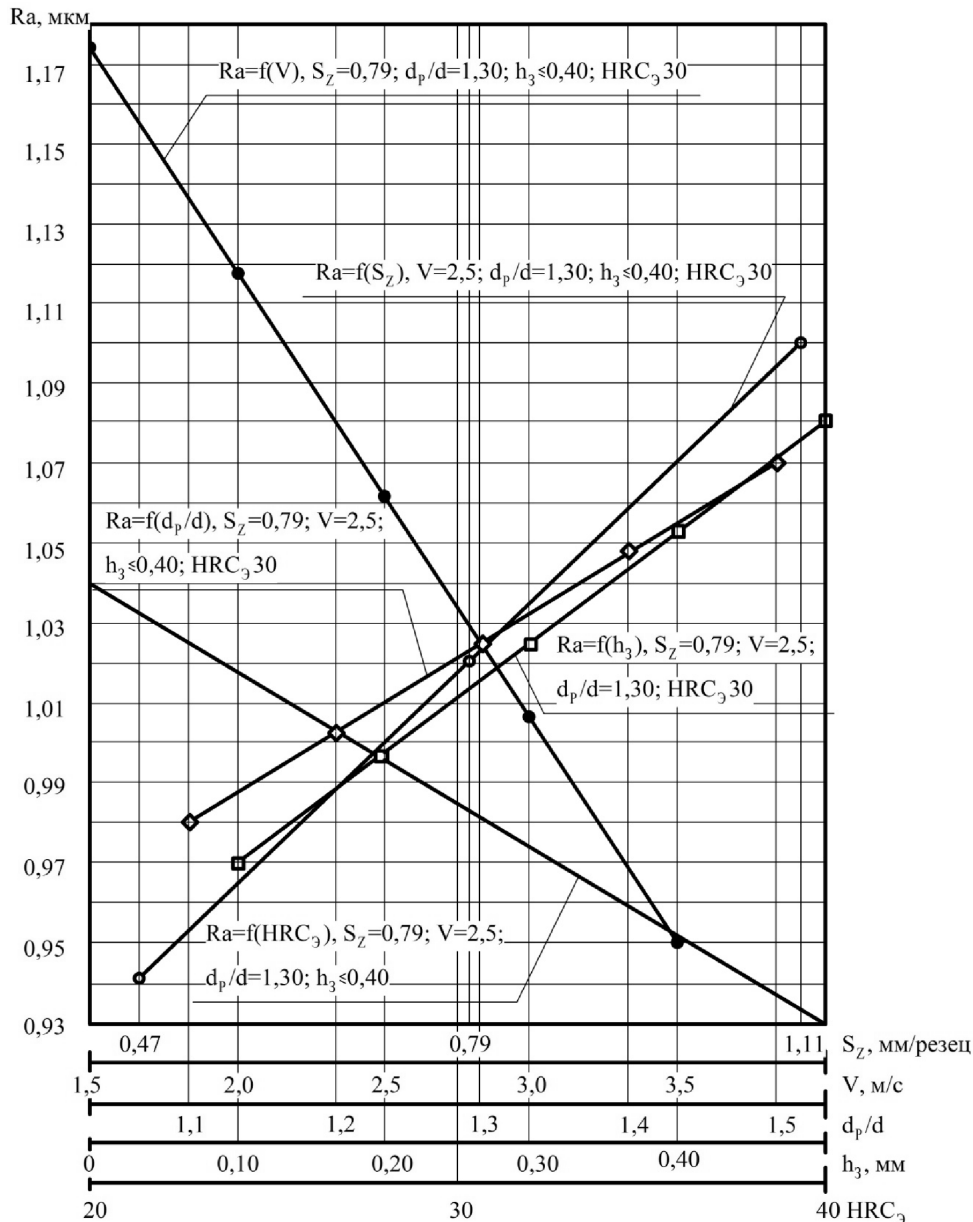


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности резьбы от основных факторов процесса вихревого резания композитом 10

для аналогичных условий работы твердосплавным инструментом.

Сравнение процесса вихревого нарезания резьб композиционными инструментальными материалами с явлениями, соответствующими процессу резания твердосплавным инструментом, неоспоримо подтверждает преимущество первых, обеспечивающих не только высокую точность обработки (6...7 квалитет) и шероховатость резьбовой поверхности не грубее 1,25 мкм, но и на порядок выше производительность процесса, что позволяет обрабатывать значительные по протяженности и диаметральным размерам резьбовые поверхности достаточно больших партий деталей.

Такие результаты не могут быть достигнуты твердосплавным инструментом даже в условиях наиболее благоприятного  $U$ -контакта режущей части инструмента и обрабатываемой поверхности заготовки, поскольку режущие свойства всех известных марок твердых сплавов не могут конкурировать с композитами [6, 8–10].

### 3. Общие выводы и рекомендации

1. Теоретически обоснованный, экспериментально подтвержденный и доведенный до промышленного использования способ резьбообразования скоростным фрезерованием резцами из композитов показал, что проблема обеспечения



высокой работоспособности инструмента может быть решена путем применения более стойкого инструментального материала (композит) при обеспечении гарантируемого запаса прочности режущей части за счет создания оптимальных условий контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки.

2. Результатом аналитического исследования работоспособности резцов из композитов, применяемых для скоростного резбонарезания, является получение оптимальных условий для реализации процесса в виде математических моделей и номограммы условий контакта режущей части инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки (U-контакт).

3. Анализ работоспособности композиционных инструментов при вихревом нарезании метрических и трапецеидальных резб позволил установить предельно допустимые границы износа по задней поверхности резцов  $h_3 \leq 0,40$  мм и соответствующую этому значению величину шероховатости обработанной поверхности резьбы  $R_a \leq 1,25$  мкм, принятых за технологический критерий.

4. Найденные значения геометрических углов резца и условия контакта режущей части с поверхностью заготовки позволяют увеличить стойкость инструментов из композитов при наличии оптимальных режимов обработки примерно в два раза.

5. Установлено влияние основных факторов процесса вихревого нарезания резб на формирование точности и качества поверхности резьбы. Расчетным методом найдена и экспериментально подтверждена область оптимальных скоростей резания и круговой подачи для получения метрических и трапецеидальных резб для широкого диапазона размеров.

6. В установленном диапазоне режимов резания исследуемых материалов заготовок и отношения  $d_p/d$  минимально возможной шероховатости поверхности соответствует максимальная скорость резания, минимальные значения круговой подачи и отношения диаметра окружности вершин резцов к наружному диаметру резьбы.

7. Оптимальное расположение резца и заготовки (U-контакт) позволяет уменьшить огранку резьбы до размеров, сопоставимых с высотой микронеровностей, характеризующих шерохо-

ватость резбовой поверхности, и не снижает качество резьбы.

### Список литературы

1. 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: межвуз. сб. ст. № 12(72) ВолГТУ. – Волгоград, 2010. – С. 15–20.

2. Алтухов А. Ю., Лунин Д. Ю., Фомичев Е. Н. Количественная оценка процессов в обработанном композитом поверхностном слое деталей машин // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. ст. № 12(72). – Волгоград, 2010. – С. 10–15.

3. Павлов Е. В., Яцун Е. И. Технологические особенности лезвийной обработки режущими инструментами оснащенными композитами // Материалы Международного станкостроительного форума: Современные тенденции в технологиях и конструкциях металлообрабатывающего оборудования. – М.: ЦВК Экспоцентр, 2011. – С. 74–76.

4. Иванов В.И., Локтионова О.Г., Учаев П.Н. Преимущества высокоэффективной лезвийной технологии обработки деталей инструментов из композита // Известия ЮЗГУ. – 2011. – № 5(38). – С. 103 – 106.

5. Ставровский М.Е., Ушаков М.В., Яцун С.Ф. О создании благоприятных условий резания прерывистых поверхностей на примере точения деталей инструментом из композита // Известия ЮЗГУ. – 2011. – № 5(38). – С. 112–119.

6. Яцун Е.И., Павлов Е.В., Ремнев А.И., Швец С.В. Моделирование и расчет шероховатости поверхности при точении резцами со вставками из композитов // Известия Самарского научного центра РАН. – Самара: Самарский научный центр РАН. – 2011. – Т. 13. № 4(40). – С. 975–979.

7. Алтухов А. Ю., Яцун Е. И. Эффективная работа инструмента из композита в условиях прерывистого резания // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: Госуниверситет. УНПК. – 2011. – № 6(290). – С. 79–84.

8. Павлов Е.В., Яцун Е.И. Модельный ряд энергосберегающих инструментов // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – г. Сумы, Украина, 2011. – № 2(24). – С. 50–53.

9. Кудряшов Е.А. Точение конструктивно сложных поверхностей деталей инструментом из композита // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 2(55). – С. 50–55.



10. Павлов Е.В., Яцун Е.И. Повышение эффективности процессов механической обработки конструктивно-сложных деталей инструментами из сверхтвердых материалов // Models and methods of solving farmland and applied scientific issues in physico-mathematical, technical and chemical research. Ma-

terials digest of the XXXII International Research and Practice Conference and the II stage of the Championship in physico-mathematical and technical sciences, the III stage of the Championship in chemical sciences. (London, September 25, 2012). – London, UK, 2012. – P. 25–29.

### Efficient tool of composite at high-speed thread milling

E.A. Kudryashov, I.M. Smirnov

Southwest State University, 50 let Oktyabrya st. 94,  
Kursk, 305040, Russian Federation

#### Abstract

The high efficiency of processing time-consuming and expensive parts is achieved by the development and implementation of special technologies, based on the use of a composite blade tools. Various marks of composites are widely used in metalworking as tooling finishing and finishing operations. The research results of the capabilities of the tool cutting edge composite material 10 on the example of high-speed milling of the thread (the vortex method) are presented. Comparison of the milling of threads by composite and carbide tool confirms the advantage of the first ones, ensuring high accuracy, surface roughness is not coarse 1.25 micron and high performance.

**Keywords:** milling by composite, forming parameters, conditions of contact cutter-workpiece, cutting, processing quality.

#### References

1. Altuhov A.Ju., Lunin D.Ju., Fomichev E.N. *Izvestija Volgogradskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta: mezhvuzovskij sbornik statej*, VSTU, Volgograd, 2010, no.12(72), pp. 15-20.
2. Altuhov A.Ju., Lunin D.Ju., Fomichev E.N. *Izvestija Volgogradskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta: mezhvuzovskij sbornik statej*, VSTU, Volgograd, 2010, no.12(72), pp. 10-15.
3. Pavlov E. V., Jacun E. I. *Materialy Mezhdunarodnogo stankostroitel'nogo foruma: Sovremennye tendencii v tehnologijah i konstrukcijah metalloobrabatyvajushhego oborudovanija* (Proceedings of the International Machine Tool Forum: Current trends in the technology and design of metal-working equipment), Moscow, Expocentre, 2011, pp. 74-76.
4. Ivanov V.I., Loktionova O.G., Uchaev P.N. *Izvestija SWSU*, Kursk, 2011, no. 5(38), pp. 103-106.
5. Stavrovskij M.E., Ushakov M.V., Jacun S.F. *Izvestija SWSU*, Kursk, 2011, no. 5(38), pp. 112-119.
6. Jacun E.I., Pavlov E.V., Remnev A.I., Shvec S.V. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAS*, Samara, Samarskij nauchnyj centr RAS, 2011, Vol. 13, no. 4(40), pp. 975-979.
7. Altuhov A.Ju., Jacun E.I. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii*, Oryol, State University Education-Science-Production Complex, 2011, no. 6(290), pp. 79-84.
8. Pavlov E.V., Jacun E.I. *Kompressornoe i jenergetičeskoe mashinostroenie*, Sumy, no. 2(24), pp. 50-53.
9. Kudryashov E.A. *Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty)*, Novosibirsk, 2012, no. 2(55), pp. 50-55.
10. Pavlov E. V., Jacun E. I. Models and methods of solving farmland and applied scientific issues in physico-mathematical, technical and chemical research. *Materials digest of the XXXII International Research and Practice Conference and the II stage of the Championship in physico-mathematical and technical sciences, the III stage of the Championship in chemical sciences*. London, September 25, 2012. London, UK, 2012, pp. 25-29.

УДК 621.9.06(75.8)

# НАДЕЖНОСТЬ ПРОГНОЗА КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ\*

*С.В. ПТИЦЫН, доцент**В.Ю. СКИБА, доцент, канд. техн. наук**Ю.С. ЧЕСОВ, доцент, канд. техн. наук**Е.В. МЕРЕЖКО, магистрант**(НГТУ, г.Новосибирск)*

Статья поступила 7 мая 2013 года

**Скиба В.Ю.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail:skeeba\_vadim@mail.ru

Рассматривается проблема прогностики качества при концептуальном проектировании технологического оборудования. Изложены основы методики прогнозирования распределений эксплуатационных параметров металлорежущих станков общего назначения. Для выбора оптимальных значений основных технических характеристик станков предложено применять крайние локальные максимумы вторых производных базовых функций. Для оценки достоверности прогноза качества используется надежность, которая определяется реализацией соответствующих оценок с наименьшим диапазоном неопределенности при выбранной величине вероятности. Методами статистического моделирования исследовано влияние неопределенности исходных эксплуатационных параметров станков на надежность прогноза. Установлена рациональная область применения предложенной методики в зависимости от степени универсальности технологического оборудования. Даются практические рекомендации по обеспечению надежности прогноза основных технических характеристик металлорежущих станков.

**Ключевые слова:** качество, надежность, прогнозирование, технологическое оборудование, статистическое моделирование.

## Введение

В современных условиях производства проблемы повышения производительности труда и снижения производственных затрат всегда остаются актуальными, так как определяют стратегию развития промышленности во всех странах мира. Решение этих задач возможно только при обеспечении высокого качества технологических машин, в первую очередь, металлообрабатывающих станков и комплексов, являющихся основой современного машиностроения.

При оценке целесообразности повышения качества необходимо исходить не только из тех-

нического уровня технологических машин, но и из конкретных условий их использования потребителями. Сложность заключается в том, что для металлообрабатывающих станков общего назначения эти условия не являются детерминированными, так как зависят от типа производства, переменной номенклатуры обрабатываемых деталей и применяемых режущих инструментов, а также часто меняющихся расходов на эксплуатацию.

Основные показатели качества металлообрабатывающих станков – эффективность и гибкость (мобильность), которые обычно закладываются на начальном этапе концептуаль-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке проекта, выполняемого в рамках гранта РФФИ в 2013 г. и в плановом периоде в 2013-2015 гг. (Номер проекта 13-08-01102 А «Проектно-исследовательская разработка технологической установки для плазменно-механической обработки деталей машин»).

ного проектирования оборудования. Причем принятый уровень качества должен сохраняться в пределах всего жизненного цикла изделия. Учитывая продолжительность проектирования и длительность эксплуатации создаваемого технологического оборудования, задача выбора оптимального качества относится к области долгосрочного прогноза [1], неопределенность которого возрастает с увеличением периода учреждения.

Так как с экономической точки зрения избыточное качество так же невыгодно, как и недостаточное [2], то возникает проблема обеспечения надежности прогнозных оценок. Цель настоящих исследований заключается в том, чтобы установить степень влияния неопределенности прогноза условий эксплуатации станков общего назначения на надежность выбора их оптимального качества.

## 1. Теория и методика исследования

Качество определяется технологическими возможностями оборудования, которые, в свою очередь, зависят от размерных, скоростных, силовых и энергетических характеристик станков. Первые зависят от структуры параметрических рядов оборудования [3], а остальные являются функциями используемых режимов резания и связаны между собой корреляционной зависимостью

$$N = \frac{nM}{9554},$$

где  $N$  – эффективная мощность резания, кВт;  $n$  – частота вращения шпинделя,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $M$  – крутящий момент на шпинделе, Н·м.

Все эти параметры имеют случайный характер и их распределения (рис. 1) хорошо описываются функцией

$$f(x) = \sum_{i=1}^m P_i f_i(x),$$

где  $P_i$  – вероятность  $i$ -го сочетания вида обработки, материалов деталей и применяемых режущих инструментов;  $f_i(x)$  – дифференциальная функция частного  $i$ -го распределения;  $m$  – количество сочетаний условий обработки;  $i$  – мультииндекс сочетаний условий обработки.

Ввиду недостатка информации на этапе концептуального проектирования оборудования оптимальных значений технических характеристик (ТХ) целесообразно использовать локальные максимумы (рис. 1) второй производной базовой функции  $f''(x) \rightarrow \max$ .

При достаточном объеме статистической информации за ретроспективный период прогноз вероятности  $P_i$  не представляет больших трудностей. Вместе с тем непосредственный прогноз распределений  $f_i(x)$  осуществить сложно ввиду невозможности учета всего разнообразия условий использования оборудования в отдаленной перспективе. Поэтому в работе [4] предложено заменить непосредственный прогноз технических характеристик на более простой прогноз эксплуатационных параметров процесса об-

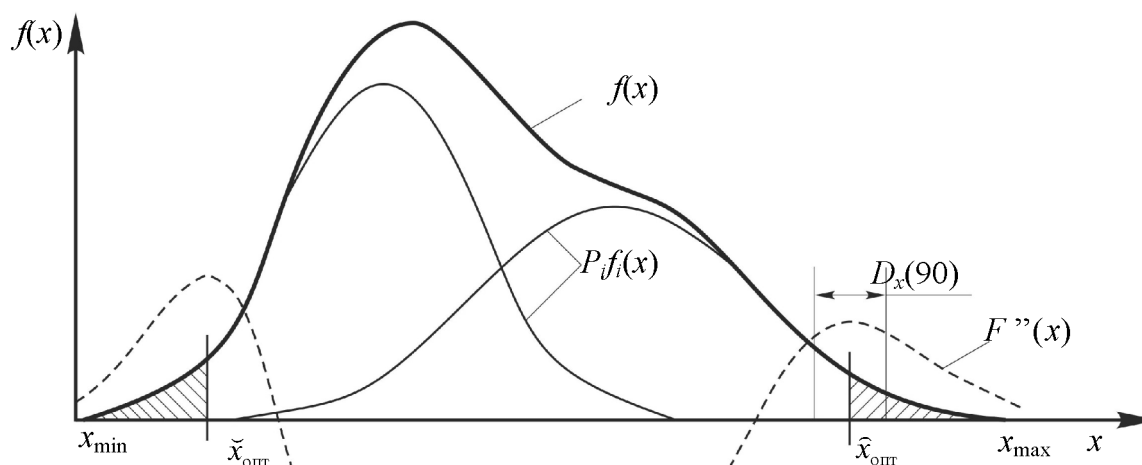


Рис. 1. Распределение эксплуатационных параметров



работки  $a$ . К ним относятся диаметры деталей или применяемых режущих инструментов:  $\alpha$ , скоростей  $V$  и сил резания  $P$ . Установлено, что при определенных условиях обработки  $m$ , все эти параметры имеют логнормальное распределение [4]. Последнее может быть построено при известных средних значениях указанных параметров  $E_{\ln a}$  и их средних квадратических отклонениях  $\sigma_{\ln a}$ . Для определения этих параметров можно воспользоваться зависимостями:

$$\sigma_{\ln a} = 3 - \sqrt{9 - 2(\ln a_{\max} - \ln \bar{a})},$$

$$E_{\ln a} = \overline{\ln a} = \ln a_{\max} - 3\sigma_{\ln a}.$$

Используя свойство устойчивости распределений и теорему о математических ожиданиях и дисперсиях [5] при композиции однотипных распределений случайных величин  $a$ , можно легко вычислить параметры распределений основных технических характеристик станков [4]. Но для этого необходимо дополнительно учесть наличие корреляционной связи между исходными эксплуатационными параметрами  $R_n$ ,  $R_M$  и  $R_N$  [6].

В общем случае достоверность прогноза какой-либо переменной может быть оценена такими понятиями, как точность и надежность. Но о точности можно судить только тогда, когда событие уже состоялось по величине разности между предполагаемым и фактическим значениями. Следовательно, при проектировании для оценки достоверности прогноза приходится оперировать надежностью.

Для определения надежности прогноза ТХ целесообразно использовать некоторый диапазон неопределенности  $D_x$ , который через соответствующие квантили распределений определяет интервал возможного варьирования значений ТХ. Надежность же прогноза будет зависеть от реализации соответствующей оценки с наименьшим диапазоном неопределенности и заданной величины вероятности.

Решение поставленной ранее задачи осуществлялось с использованием метода Монте-Карло [7], который предполагает наличие информации о законах распределения исходных данных. Были проанализированы четыре возможных варианта распределений на предмет оценки их влияния на неопределенность различных ТХ станка. Показатели исходных распределений устанавлива-

лись в зависимости от характера тренда анализируемых параметров и величины возможного от него отклонения  $\delta$  в пределах  $\pm 40\%$ .

Для сокращения трудоемкости в каждом эксперименте случайным образом разыгрывались 200 эксплуатационных ситуаций, что позволило формировать выводы с вероятностью  $p = 0,995$  при допустимой ошибке  $\varepsilon \leq 0,1$  [6]. Проверка адекватности полученных распределений ТХ теоретически выполнялась по критерию Пирсона  $\chi^2$  [5].

В результате проведенных предварительных экспериментов установлено, что при нормальном и равномерном распределениях исходных факторов неопределенность ТХ хорошо аппроксимируется логарифмически нормальной функцией, так как для всех исследуемых характеристик  $P(\chi^2) > 0,05$ . Если принять за основу эту гипотезу, то можно установить определенное соотношение между полудецильным диапазоном неопределенности  $D_x(90)$  и средним квадратическим отклонением  $\sigma$ . Это соотношение выражается зависимостью  $D_x(90) = \exp 3,29 \sigma$  [5].

Данный диапазон охватывает 90 % всех возможных вариантов ТХ, что позволяет в дальнейшем использовать его в качестве целевой функции. Следует отметить, что максимальные значения  $D_x(90)$  зафиксированы при нормальном распределении исходных факторов, а минимальные – при равномерном. Поэтому все дальнейшие исследования были ограничены рассмотрением только нормального распределения погрешности исходных параметров, которому присущ наибольший диапазон неопределенности ТХ.

## 2. Результаты и обсуждение

Исследованию неопределенности прогноза ТХ была подвергнута группа токарных станков, для которой выделены 20 сочетаний условий обработки, охватывающих более 95 % выполняемых на этом оборудовании работ [8]. Результаты экспериментов представлены на рис. 2.

Если из практических соображений принять  $D_x(90) \leq 2$ , то можно при прогнозировании ограничить предельную величину отклонения исходных данных от тренда  $\delta$  значениями  $\pm 37\%$ .

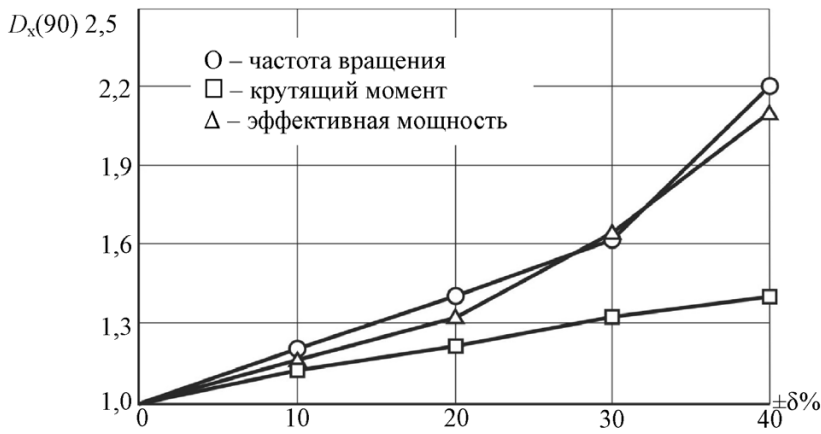


Рис. 2. Неопределенность прогноза технических характеристик станков

Представляет значительный практический интерес определение степени влияния каждого из исходных параметров на надежность прогноза ТХ станков. С целью установления значимости отдельных параметров было проведено специальное исследование. При этом осуществлялось варьирование анализируемого исходного параметра в заданных границах при фиксированных значениях всех остальных факторов. Результаты моделирования отражены на рис. 3.

Проведенные исследования показали, что в первую очередь внимание следует обращать на прогноз средних значений диаметров обрабатываемых поверхностей или применяемого режущего инструмента, а также средних режимов резания, поскольку именно им принадлежит наибольший вклад в неопределенность ТХ.

Максимальные же значения эксплуатационных параметров и все коэффициенты корреляции не оказывают столь заметного влияния на результат моделирования. Вероятность воспроизведения на станке конкретных условий обработки проявляет себя лишь при минимальных значениях  $\delta$  и  $m$ .

Так как методика обоснования качества [4] в основном ориентирована на станки общего назначения, то определенный интерес представляет выявление надежности прогноза ТХ от степени универсальности оборудования. Последняя обычно характеризуется количеством выполняемых на станке технологических опе-



Рис. 3. Влияние исходных параметров на надежность прогноза универсальных станков

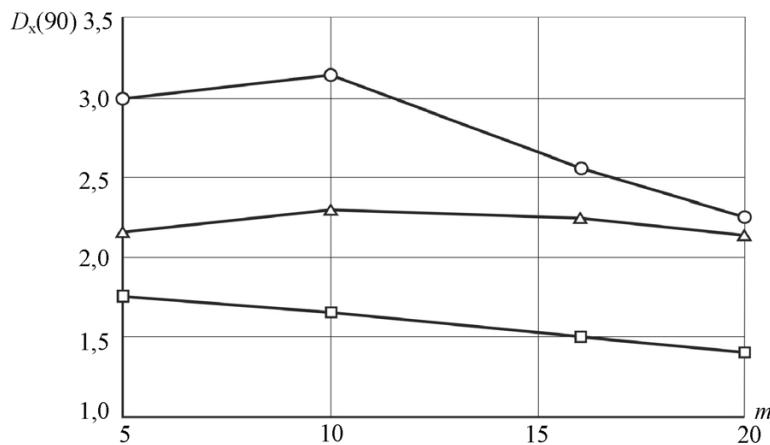


Рис. 4. Зависимость неопределенности прогноза от универсальности станка

раций  $m$ . Математическим моделированием установлено, что с увеличением универсальности станков неопределенность прогноза ТХ при  $m > 10$  стабильно уменьшается (рис. 4).

Этот результат согласуется с утверждением других авторов [1] о том, что неопределенность прогноза суммы большого числа микрообъектов уменьшается с увеличением их количества примерно в соотношении  $(\sqrt{m})^{-1}$ .

Результаты приведенных экспериментов открывают возможность выбора оптимальной стратегии подготовки исходных данных, которая позволяет реализовывать с минимальными затратами процедуру прогнозирования без существенного снижения ее надежности. Так, для прогноза несущественных исходных факторов целесообразно использовать более простой метод экспертных оценок, а для значимых – метод экстраполяции, требующий сбора статистической информации. При этом в качестве математической модели, адекватно отражающей эволюционный процесс изменения таких факторов, наиболее подходит логистическая кривая, параметры которой определяются путем выборочных исследований условий обработки деталей в ретроспективном периоде. Прогноз распределений геометрических размеров обрабатываемых деталей и применяемых режущих инструментов можно не выполнять, так как они устанавливаются на основе оптимизации параметрических рядов технологического оборудования [3] и поэтому не требуют каких-либо специальных исследований.

## Выводы

Проведенные исследования показали возможность обеспечения надежности прогноза качества на стадии концептуального проектирования металлообрабатывающих станков общего назначения.

Выявлена возможность замены детерминированного прогноза качества на интервальный, расширяющий область поиска оптимальных решений. Дана количественная оценка зависимости надежности прогноза технических характеристик станков от уровня неопределенности исходной информации. Определены факторы, оказывающие наибольшее влияние на качество оборудования, и даны практические рекомендации по его обеспечению.

Установлена область рационального использования разработанной методики оптимизации качества в зависимости от степени универсальности оборудования.

## Список литературы

1. Лисичкин В.А. Теория и практика прогностики. – М.: Наука, 1972. – 224 с.
2. Львов Д.С. Экономика качества продукции. – М.: Экономика, 1972. – 255 с.
3. Птицын С.В., Чесов Ю.С. Параметрическая оптимизация качества станочного оборудования // СТИН. – 2002. – № 6. – С. 19–23.
4. Математическое моделирование в машиностроении: учеб. пособие / под ред. проф. П.И. Остроменского; Новосибирский электротехнический институт. – Новосибирск, 1990. – 83 с.
5. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1972. – 216 с.
6. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. – М.: Наука, 1971. – 576 с.
7. Бахвалов Н.С. Численные методы. – [Т. 1]. – М.: Наука, 1975. – 631 с.
8. Птицын С.В., Чесов Ю.С. Прогнозирование технических характеристик металлорежущих станков: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. – 52 с.

## Reliability prediction of quality process equipment

Ptitsyn S.V., Skeebe V.Yu., Chesov Yu.S., Merezhko E.V.

Novosibirsk State Technical University, Karl Marx avenue, 20,  
Novosibirsk, 630073, Russian Federation

### Abstract

The problem prognostics of quality at conceptual designing of the process equipment is considered. The foundations of methods of prediction the distribution of performance parameters of general purpose machine tools are stated. To select the optimum values of the basic technical characteristics of the machinery it is proposed to use extreme local maxima of the second derivatives of basic functions. The reliability is used to assess of the quality prediction, and is determined by the implementation of relevant assessments with the lowest range of uncertainty in the chosen value of the probability. The effect of the uncertainty of initial operating parameters for reliability prediction tools is studied by the methods of statistical modeling. Rational scope of the proposed method depending on the degree of universality of process equipment is stated. Practical recommendations to ensure the reliability of the forecast of the basic characteristics of metal-cutting machine tools are given.

**Keywords:** prediction, quality, statistical modeling, processing equipment.

### References

1. Lisichkin V.A. *Teorija i praktika prognostiki* (Theory and practice of prognostication). Moscow: Nauka, 1972. 224 p.
2. L'vov D.S. *Ekonomika kachestva produkcii* (Economics of product quality). Moscow: Ekonomika, 1972. 255 p.
3. Ptitsyn S.V., Chesov Yu.S. *STIN*, 2002, no. 6, pp.19-23.
4. Ostromenskij P.I. *Matematicheskoe modelirovanie v mashinostroenii* (Mathematical modelling in mechanical engineering), Novosibirsk Electric Technical Institute (NETI), Novosibirsk, 1990. 83 p.
5. Solonin I.S. *Matematicheskaja statistika v tehnologii mashinostroenija* (Mathematical Statistics in Mechanical Engineering). Moscow, Mashinostroenie, 1972. 216 p.
6. Mitropol'skiy A.K. *Tehnika statisticheskikh vychisleniy* (Technique of static calculations). Moscow: Nauka, 1971. 576 p.
7. Bahvalov N.S. *Chislennyemetody [T.1]* (Numerical Methods. Vol.1). Moscow, Nauka, 1975. 631 p.
8. Ptitsyn S.V., Chesov Yu.S. *Prognozirovanie tehnikeskikh harakteristik metallovezhushhih stankov* (Technical characteristics prediction of metal-cutting machines), Novosibirsk, NSTU, 1998. 52 p.

# МЕТОД РАСЧЕТА ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СПЕКАНИЯ НАНОПОРОШКОВ

*Л.А. БОРЫНЯК, доктор физ.-мат. наук, профессор  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

*А.П. ЧЕРНЫШЕВ, канд. техн. наук, доцент  
(ИХТТМ СО РАН, г. Новосибирск)*

Статья поступила 12 марта 2013 года

**Борыняк Л.А.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Новосибирский государственный технический университет,  
e-mail: borynyak-leonid@mail.ru

Рассматриваются особенности спекания ультрадисперсных порошков и их смесей с грубодисперсными порошками. Показана необходимость учета зависимости коэффициента диффузии и температуры плавления от дисперсности нанопорошков для оптимизации технологических процессов порошковой металлургии. Разработана методика выбора оптимальной температуры спекания нанопорошков и их смесей с грубодисперсными порошками. Проведены расчеты для спекания грубодисперсного вольфрама с добавлением нанопорошка никеля или вольфрама. Дополнительно проведен расчет спекания нанопорошка вольфрама, железа и смеси ультрадисперсного и грубодисперсного порошков железа. Сопоставление результатов расчетов с литературными данными показало высокую эффективность предложенной авторами методики.

**Ключевые слова:** спекание, нанопорошки, температура плавления нанопорошков, температура спекания нанопорошков.

## Введение

Качество изделий порошковой металлургии в значительной мере зависит от условий протекания процесса спекания. Для экономии энергоресурсов необходима оптимизация процесса спекания – наиболее длительная и энергоемкая операция в порошковой металлургии. Одним из способов снижения энергетических затрат и улучшения качества спеченных изделий является использование ультрадисперсных порошков (нанопорошков). При линейных размерах частиц порошка менее 100 нм наблюдается зависимость физических свойств порошков от их дисперсности (от характерного размера и распределения по размерам частиц, образующих порошок).

Существенная усадка нанопорошков происходит при температуре на несколько сотен градусов ниже температуры усадки аналогичных грубодисперсных порошков [3]. Так, для порошков на основе железа, имеющих средний характерный размер частиц менее 50 нм, процессы

спекания происходят в интервале температур 350...500 °С, а для вольфрама 900–1600 °С. Плотность нанопорошковых заготовок после простого спекания обычно не превосходит 70 % от теоретической плотности соответствующего материала [2, 3]. Нанопорошки хуже прессуются, но лучше спекаются [2]. Это обусловлено тем, что в структуре прессовки сохраняется большое количество пор. Наблюдается также существенный рост зерна даже при низкотемпературном спекании.

Цель данной работы — разработка метода расчета температуры спекания ультрадисперсных порошков для оптимизации температурного режима получения изделий порошковой металлургии.

## 1. Теория

Важными для спекания характеристиками как грубодисперсных, так и ультрадисперсных порошков являются средний размер частиц



порошка  $r$  и их распределение по размерам, температура плавления  $T_m$ , температура плавления поверхностного слоя  $T_{sm}$  и температура начала интенсивного спекания порошка  $T_c$ . В основе спекания порошков лежат диффузионные процессы. Коэффициент диффузии  $D$  в нанодиапазоне характерных размеров сильно зависит от дисперсности порошка [4] и определяется выражением

$$D = D_0 \exp\left[-\frac{\Delta H_a}{RT}\right], \quad (1)$$

где  $D_0$  – предэкспоненциальный множитель;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура;  $\Delta H_a$  – энтальпия активации диффузии, определяемая соотношением

$$\Delta H_a = K_0 RT_{0m} (1 - (\zeta - 1)^{-1}) \exp\left[-(\alpha - 1)/(\zeta - 1)\right]. \quad (2)$$

Здесь  $K_0$  – постоянный коэффициент;  $\zeta = r/r_0$  – приведенный радиус наночастицы;  $r_0$  и  $\alpha$  – зависящие от химического состава наночастиц расчетные коэффициенты (приведены в таблице);  $r$  – характерный радиус наночастиц;  $T_{0m}$  – температура плавления массивного образца, имеющего такой же химический состав, как и нанопорошок. Значения расчетных параметров приведены в таблице. Диффузия в нанопорош-

#### Исходные данные для расчетов эквивалентной температуры

Вещество	$T_{0m}$	$\alpha$	$r_0$	$d_c$
	К			
W	3695	1.88	0.9363	6.0
Fe	1809	1.55	0.8466	7.4
Ni	1726	1.69	0.8262	6.0

ках происходит быстрее, чем в порошках микрометрового размера (в грубодисперсных порошках) [4]. Уравняв коэффициенты диффузии в нанопорошках и в грубодисперсных порошках при разных температурах, найдем эквивалентную температуру диффузии  $T_{eq}$  в нанопорошках ( $T_{eq} < T_b$ ):

$$\frac{T_{eq}}{T_b} = \left(1 - \frac{1}{\zeta - 1}\right) \exp\left[-\frac{\alpha - 1}{\zeta - 1}\right]. \quad (3)$$

Таким образом, нанопорошок при температуре  $T_{eq}$  и аналогичный грубодисперсный порошок при температуре  $T_b$  имеют одинаковые коэффициенты диффузии. Как непосредственно следует из формулы (3) и табличных значений  $r_0$ , при  $r > 100$  нм разница между  $T_{eq}$  и  $T_b$  не превосходит 2 %, т. е. ею можно пренебречь. Для ультрадисперсных порошков, состоящих преимущественно из наночастиц диаметром свыше 44 нм,  $T_b$  отличается от  $T_{eq}$  не более чем на 10 % (рис. 1).

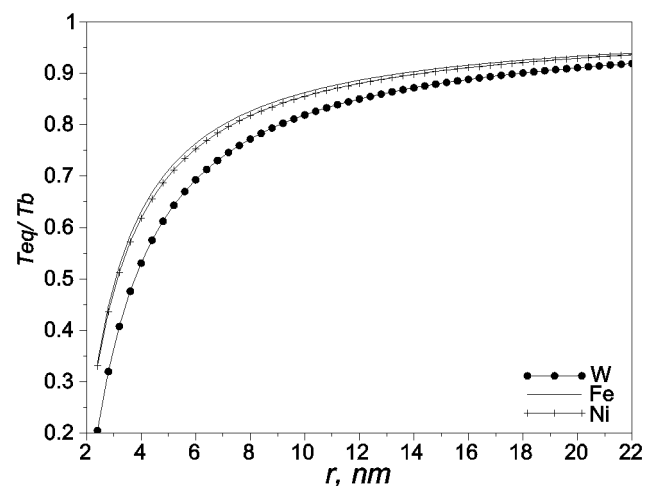


Рис. 1. Зависимость отношения  $T_{eq}/T_b$  от радиуса наночастиц

По современным представлениям при повышении температуры сначала плавится тонкий поверхностный слой при температуре плавления  $T_{sm}$  (рис. 2, б), затем по мере приближения к температуре плавления расплавленный поверхностный слой утолщается (рис. 2, в), однако его толщина остается малой по сравнению с диаметром наночастицы вплоть до температуры плавления  $T_m$  [1]. При температуре  $T_m$  наночастица плавится целиком (рис. 2, г).

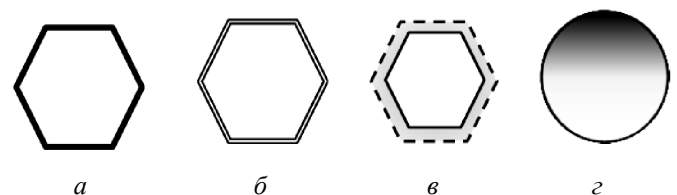


Рис. 2. Плавление наночастицы:

а – исходная наночастица; б – наночастица при температуре плавления поверхностного слоя  $T_{sm}$ ; в – наночастица при промежуточной температуре  $T_{sm} < T < T_m$ ; г – расплавленная наночастица при температуре плавления  $T_m$

Температура плавления зависит от приведенного размера наночастиц и определяется следующим соотношением [1]:

$$T_m(\zeta) = T_{0m} \exp\left[-\frac{\alpha-1}{\zeta-1}\right]. \quad (4)$$

Температура начала плавления поверхности наночастиц порошка может быть получена из соотношения

$$T_{sm} = T_m(\zeta)(1 + (\alpha-1)/(\zeta-1))/(0.75\alpha). \quad (5)$$

Как и в случае с эквивалентной температурой, зависимостью от  $\zeta$  температур  $T_{sm}$  и  $T_m$  можно пренебречь, если характерный размер частиц порошка больше 100 нм. Как было выявлено в работе [1], существует критический диаметр наночастиц  $d_c$  (см. таблицу), при котором поверхность наночастицы не плавится вплоть до температуры плавления. Плавление поверхности частиц ультрадисперсного порошка может использоваться для улучшения спекаемости тугоплавких материалов.

## 2. Результаты и обсуждение

Грубодисперсные порошки, которые с трудом поддаются спеканию, могут быть превращены в материалы с высокой плотностью и прочностью путем использования ультрадисперсных порошков, активирующих процесс спекания. Так, в работе [2] было проведено спекание грубодисперсного вольфрама с добавлением нанопорошка никеля или вольфрама. Отдельно было проведено спекание нанопорошка вольфрама. Прессовки спекали при давлении  $\sim 10^{-3}$  Па и температуре 1450 °С. Время изотермической выдержки составляло 1 ч. Прессовки из нанопорошка вольфрама без добавок не спекались до высокой плотности. В рамках развитой нами модели легко объяснить полученный результат. В грубодисперсных порошках при температурах ниже  $(0,5 - 0,6)T_{0m}$  процессы массопереноса путем пластического течения и объемной диффузии атомов не играют существенной роли [5]. Для наночастиц это соотношение нарушается, поскольку температура плавления зависит от ха-

рактерного размера наночастиц (см. формулу (4) и рис. 3). Расчет по формуле (3) для наночастиц вольфрама диаметром 44 и 22 нм дает значение отношения  $T_{eq}/T_b$ , равное 0.92 и 0.85 соответственно. Для гомологической температуры 0.6 получаем эквивалентную температуру 1770 и 1600 °С. Следовательно, температура отжига в работе [2] на 150...300 °С ниже минимально необходимой для спекания наночастиц вольфрама. Разумеется, нанопорошок представляет собой смесь наночастиц различного диаметра, поэтому частично нанопорошок будет спекаться и уплотняться при более низких температурах. Так, например, эквивалентная температура начала спекания частиц вольфрама диаметром 10 нм равна 1170 °С (расчет по формуле (3)). Однако в рассматриваемой работе использовались ультрадисперсные электровзрывные порошки W и Ni с диаметром частиц до 100 нм, поэтому доля наночастиц диаметром меньше 20 нм была недостаточна для высокой плотности спекания.

Добавление нанопорошка никеля до 1 мас. % увеличило усадку прессовок. Дальнейшее увеличение количества добавляемого нанопорошка никеля усадку заметно не меняет. Аналогична зависимость плотности спеченного материала от количества добавленного нанопорошка никеля: до содержания 1-2 мас. % никеля плотность растет, затем практически не изменяется. В рамках развитой нами модели это явление легко объяснить. Действительно, из зависимости температуры плавления от характерного размера нано-

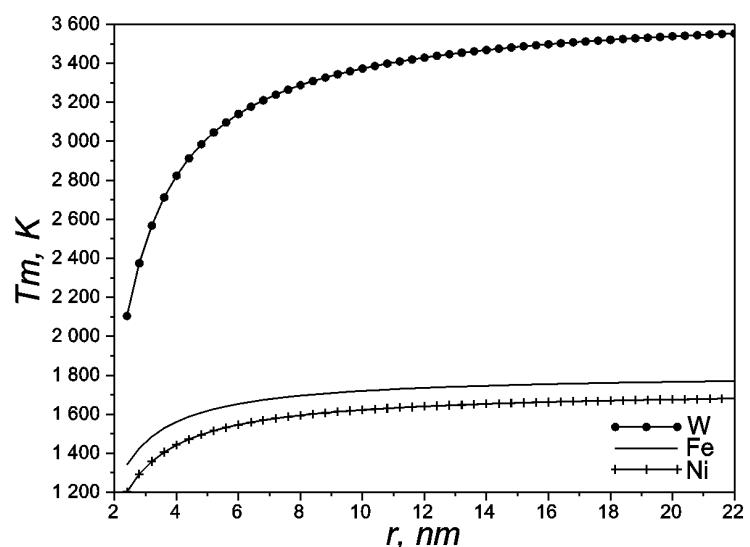


Рис. 3. Зависимость температуры плавления наночастиц вольфрама, железа и никеля от их радиуса

частиц никеля (см. рис. 3 и формулу (4)) мы имеем, что температура плавления наночастиц никеля диаметром 100 нм составляет всего 1433 °С, т. е. в процессе отжига весь нанопорошок никеля находится в жидком состоянии. С увеличением содержания нанопорошка поры эффективно заполняются активизирующим спеканием жидким никелем. После чего дальнейшее увеличение содержания никеля не приводит к увеличению спекаемости прессовки.

В работе [6] для активации процесса спекания использовали электровзрывной нанопорошок железа (средний диаметр частиц составлял 140 нм). Прессовки спекали в вакуумной печи при гомологических температурах 0,4...0,85. Время изотермической выдержки составляло 1 ч. Интенсивное уплотнение прессовок из нанопорошка железа начиналось при гомологической температуре 0,4 в отличие от образцов из грубодисперсного порошка, заметная усадка которых наблюдалась только при гомологической температуре выше 0,6. При 0,5  $T_m$  прессовки из нанопорошка спекались до относительной плотности 94 %, которая не достигалась при спекании обычного порошка даже при 0,85  $T_{0m}$  [6]. Процесс спекания нанопорошков железа также легко может быть объяснен в рамках нашей модели. Для этого рассчитаем для нанопорошка железа гомологическую температуру, эквивалентную гомологической температуре 0,6. Для диаметров частиц порошка 10, 20, 40 и 100 нм получаем 0,48, 0,54, 0,57 и 0,59. Таким образом, с увеличением температуры увеличивается характерный размер наночастиц, активизирующих процесс спекания нанопорошка. Соответственно растет и плотность образца после спекания. Спекание смесей порошков можно оптимизировать путем

подбора нанопорошков разной дисперсности. Например, более тугоплавкий материал может быть приготовлен в виде нанопорошка с более высокой дисперсностью, чем легкоплавкий. Повышения качества получаемых изделий можно также добиться, контролируя распределение частиц нанопорошка по размерам.

## Вывод

Разработана методика расчета оптимальной температуры отжига прессовок из нанопорошков и прессовок из грубодисперсных порошков, активированных добавками ультрадисперсных порошков. Распределение частиц нанопорошков по размерам определяет характер активирования спекания смесей порошков. Используя нанопорошки с различными распределениями наночастиц по размерам, можно управлять свойствами материалов, получаемых при спекании порошков.

## Список литературы

1. Chernyshev A.P. Effect of nanoparticle size on the onset temperature of surface melting // *Materials Letters*. – 2009. – V. 63. – P. 1525–1527.
2. Матренин С.В., Ильин А.П., Слосман А.И., Толбанова Л.О. Активированное спекание вольфрама // *Известия ТПУ*. – 2008. – Т. 313. – № 3. – С. 83 – 87.
3. Рудской А.И. Нанотехнологии в металлургии. – СПб.: Наука, 2007. – 186 с.
4. Chernyshev A.P. Effect of hydrostatic pressure on self-diffusion in metal nanoparticles // *Physica E*. – 2009. – V. 41. – P. 1738–1740.
5. Гегузин Я.Е. Физика спекания. – М.: Наука, 1984. – 312 с.
6. Матренин С.В., Ильин А.П., Слосман А.И., Толбанова Л.О. Спекание нанодисперсного порошка железа // *Перспективные материалы*. – 2008. – № 4. – С. 81 – 87.

## The method of the equivalent sintering temperature calculation

<sup>1</sup>L.A. Borynyak, <sup>2</sup>A.P. Chernyshev

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, Karl Marx avenue, 20, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS, st. Kutateladze, 18, Novosibirsk, 630128, Russian Federation

## Abstract

The features of the ultrafine powders and their mixtures with coarse powders sintering are considered. The necessity of taking into account the diffusion coefficient and the melting temperature of the dispersion of nanopowders for powder metallurgy process optimization is shown. The technique of selecting the optimal sintering temperature

of nanopowders and their mixtures with coarse powders is developed. The calculations for the coarse tungsten nanopowder with the addition of nickel and tungsten sintering are carried out. Additionally, the sintering of nanopowder tungsten, iron, and mixtures of the coarse and ultrafine powders of iron are calculated. A comparison of simulation results with published data showed the high efficiency of the method proposed by the authors.

**Keywords:** sintering; nanopowders; nanopowders melting temperature; nanopowders sintering temperature.

## References

1. Chernyshev A.P. Effect of nanoparticle size on the onset temperature of surface melting // *Materials Letters*, 2009, V. 63, pp. 1525-1527.
2. Matrenin S.V., Il'in A.P., Slosman A.I., Tolbanova L.O. *Izvestija TPU*, 2008, vol. 313, no. 3, pp. 83-87.
3. Rudskoj A.I. *Nanotehnologii v metallurgii* (Nanotechnology in the steel industry). St.Peterburg, Nauka, 2007. 186 p.
4. Chernyshev A.P. Effect of hydrostatic pressure on self-diffusion in metal nanoparticles // *Physica E*, 2009, V. 41, pp. 1738-1740.
5. Geguzin Ja.E. *Fizika spekanija* (Physics of sintering). Moscow, Nauka, 1984. 312 p.
6. Matrenin S.V., Il'in A.P., Slosman A.I., Tolbanova L.O. *Perspektivnye materialy*, 2008, no. 4, pp. 81-87.

# НАПЛАВКА ПОВЕРХНОСТИ СЕРОГО ЧУГУНА С ПРИСАДКОЙ ИЗ ЧУГУННОЙ СТРУЖКИ\*

*А.О. ТОКАРЕВ, доктор техн. наук, доцент  
(НГАВТ, г. Новосибирск)*

*В.М. ПОТАПОВ, канд. техн. наук, профессор,  
(НГПУ, г. Новосибирск)*

Статья поступила 02 апреля 2013 года

**Токарев А.О.** – 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33,  
Новосибирская государственная академия водного транспорта,  
e-mail: aot51@ngs.ru

Рассматриваются актуальные проблемы увеличения ресурса деталей, изготовленных из серого чугуна. Для восстановления размеров изношенных поверхностей применена электродуговая наплавка. Разработаны различные технологические схемы наплавки. В качестве присадочного материала использован порошок, полученный из чугунной стружки.

Методом расплавления слоя порошка, дугой сварочного электрода марки ОК-46 получен слой с твердостью HRC 32 – 37. Пористость наплавленного слоя невелика. Структура зоны сплавления не имеет твердых хрупких составляющих. Данная технология рекомендуется для восстановления и упрочнения поверхностей чугунных деталей. Возможно также применение предлагаемой технологии для исправления дефектов литья.

**Ключевые слова:** восстановление, детали из серого чугуна, электродуговая наплавка, присадочный материал из чугунной стружки.

## Введение

Одним из основных конструкционных материалов в машиностроении является серый чугун. Чугунные детали составляют до 70 % массы машин и механизмов. Одной из актуальных задач, стоящих перед эксплуатационно-ремонтными предприятиями, является продление срока службы изношенных деталей, в том числе и чугунных. При ремонте различного оборудования, а также для исправления дефектов отливок широко применяется сварка и наплавка чугуна. Однако применение этой технологии связано со значительными трудностями. Это вызвано тем, что металл шва и околошовной зоны склонен к образованию твердых хрупких структур (карбидной эвтектики – ледебурита и закалочной структуры – мартенсита) и возникновению в них трещин вследствие больших скоростей охлаждения при сварке и наплавке.

## 1. Теория

Частично избежать появления хрупкой переходной зоны удастся за счет снижения теплового воздействия на основной металл. Однако это приводит к вероятности появления непроваров – несплошностей в наплавленном слое. Другой путь – предварительный подогрев свариваемых, наплавляемых деталей. Для предупреждения образования ледебурита в сером чугуне скорость его остывания в интервале критических температур не должна превышать 10-11°С/с. Это, в свою очередь, усложняет и удорожает технологию.

Применяется ряд способов сварки, наплавки чугуна [1–3]. Одной из причин неудовлетворительного качества наплавленного металла часто является стремление к обеспечению высокой износостойкости за счет получения на поверхности твердых структурных составляющих с твердофазным или твердорастворным упрочнением. Формирование оптимальных свойств материала

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (ГК № 14.518.11.7029).

поверхностного слоя деталей является важнейшей частью проблемы повышения эксплуатационной надежности технических средств. При этом процесс формирования необходимой структуры базируется на рациональном сочетании химико-физических свойств присадочного материала с технологическими параметрами процессов нанесения металлопокрытия и упрочнения материала. При наплавке и сварке чугуна важны близкие по своим значениям коэффициенты линейного расширения присадочного материала и чугуна основы, что снижает вероятность образования трещин в сварном соединении от напряжений при кристаллизации шва и обеспечивает малый градиент термических напряжений в восстановленной детали в условиях эксплуатации при высоких температурах. Для большей части деталей твердость в наплавленном состоянии достаточна на уровне HB 1800 ... 2150 МПа.

## 2. Методика экспериментального исследования

В настоящей работе для снижения теплового воздействия на основной металл наплавляемой детали в зоне сплавления и получения наплавленного слоя, совместимого с основой по коэффициенту теплового линейного расширения, в качестве наплавочного материала использовали стружку серого чугуна, полученную при механической обработке заготовок. Кроме того, применение порошка из серого чугуна – перспективный путь снижения стоимости наплавленных покрытий на деталях из чугуна и экономии никелевых и кобальтовых сплавов.

Наплавку выполняли методом ручной электродуговой сварки. Подготовку наплавочного порошка производили, используя обычные приемы порошковой металлургии [4].

При наплавке поверхности чугунных образцов применяли следующие технологии электродуговой сварки (технологические схемы, табл. 1, параметры режимов наплавки, табл. 2):

схема № 1 – оплавление уложенного на поверхность слоя стружки угольным электродом диаметром 10 мм;

схема № 2 – наплавка специально изготовленным трубчатым порошковым электродом. В качестве оболочки электродов использовали

малоуглеродистую сталь толщиной 0,3 мм. Диаметр порошкового электрода составил 8 мм;

схема № 3 – наплавка гибким порошковым электродом. Для получения гибкого электрода изготавливали оболочку из завитой в спираль сварочной проволоки диаметром 1 мм марки СВ08Г2С. Наружный диаметр полученного электрода равнялся 8 мм;

схема № 4 – оплавление уложенного на поверхность слоя стружки покрытым электродом типа Э46 марки ОК-46. Плавящийся электрод из малоуглеродистой стали использовали для разбавления металлом электрода металла сварочной ванны и уменьшения концентрации углерода в наплавленном слое.

Режимы наплавки приведены в табл. 2.

## 3. Результаты и обсуждение

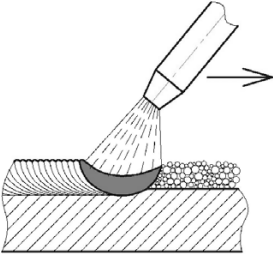


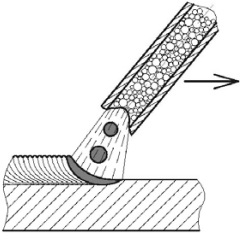
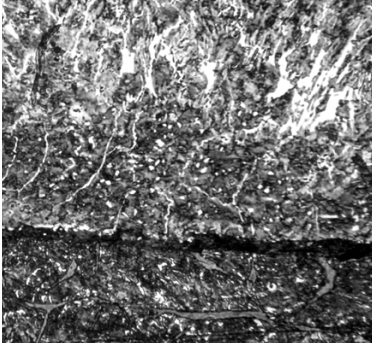
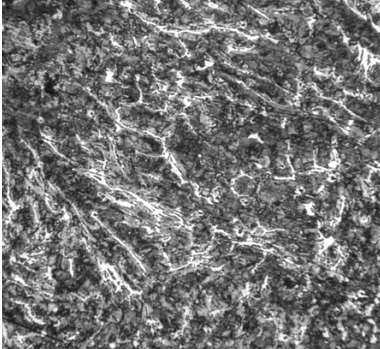
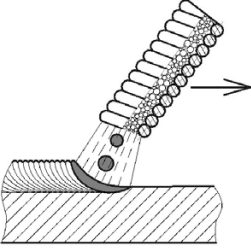
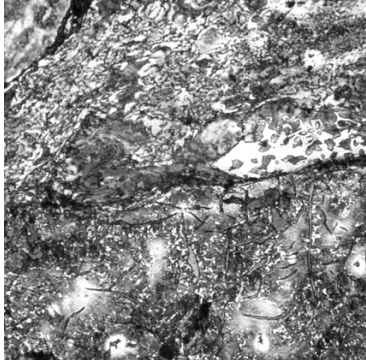
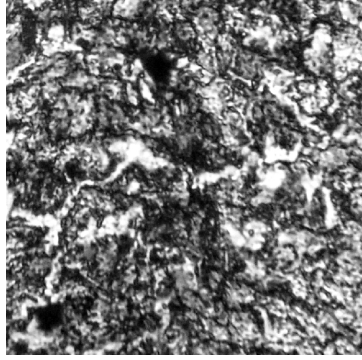
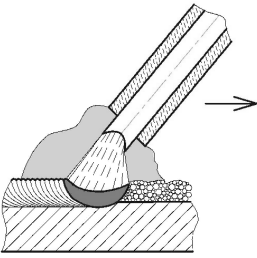
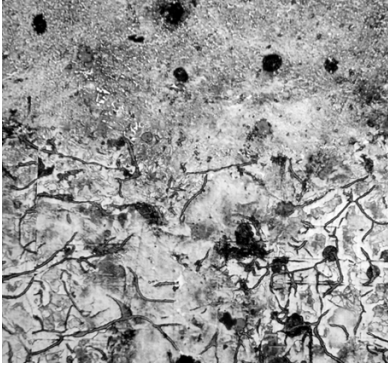
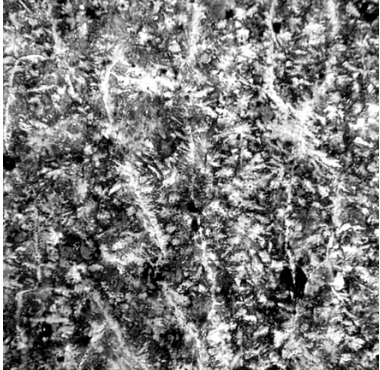
Схемы наплавки и полученная в результате микроструктура зоны сплавления и наплавленного металла с указанием его твердости приведены в табл. 1.

При наплавке чугуна по схеме № 1 методом расплавления уложенного на поверхность слоя стружки угольным электродом диаметром 10 мм получен наплавленный слой с эвтектической структурой. Форма цементита эвтектоида, входящего в состав карбидной эвтектики, глобулярная. Твердость наплавленного слоя составила HRC 45–49. В наплавленном металле не отмечается пористость и другие макродефекты. Однако в зоне сплавления не удалось избежать образования хрупких структур ледебурита и мартенсита. Кроме того, способ наплавки чугуна расплавлением порошкового слоя, уложенного на поверхность ремонтируемого изделия, имеет ограничения по пространственному положению поверхностей деталей при наплавке, которое должно быть, главным образом, нижним.

Наплавка с использованием трубчатых порошковых электродов (схемы № 2 и 3) расширяет технологические возможности с точки зрения пространственного положения шва.

При наплавке обоими порошковыми электродами получили наплавленный слой с заэвтектидной и доэвтектической структурой металла и твердостью HRC 40–44. Присутствуют отдельные мелкие графитовые включения.

**Технологические схемы наплавки чугунного порошка на поверхность серого чугуна и структура наплавленного слоя**

Схема наплавки	Структура наплавленного слоя	
	Зона сплавления	Наплавленный слой
 <p>Схема № 1</p>		
HRC 45 – 49		
 <p>Схема № 2</p>		
HRC 40 – 41		
 <p>Схема № 3</p>		
HRC 40 – 44		
 <p>Схема № 4</p>		
HRC 32 – 37		

Параметры режимов наплавки

Номер схемы	Диаметр электрода, мм	Род тока, полярность	Напряжение, В	Сила тока, А
1	10	Постоянный обратной полярности	32...34	130...140
2	4	Постоянный прямой полярности	32...34	140...160
3	8		30...32	120...140
4	8		30...32	120...140

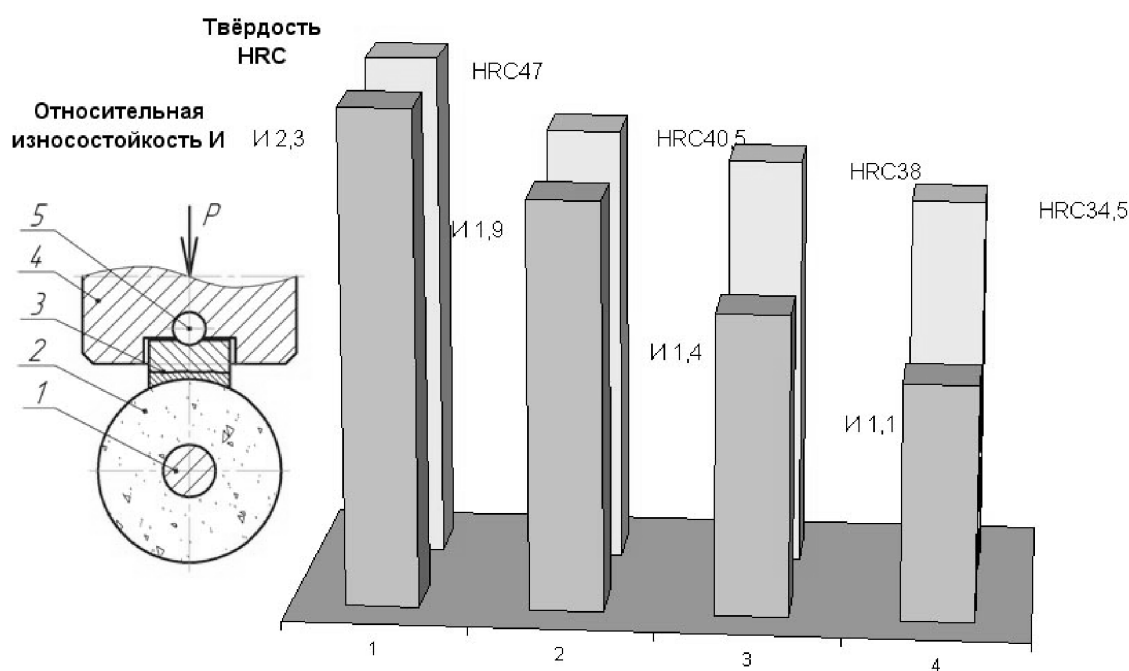
Однако и в том и в другом случае (схемы № 3 и 4) имели место непровары, наличие оксидных пленок в зоне сплавления и поры в наплавленном слое. При дальнейших исследованиях для устранения указанных макродефектов планируется включение в состав порошковой шихты раскисляющих компонентов.

При формировании наплавленного слоя методом расплавления порошка, полученного из чугунной стружки, дугой обмазанного электрода марки ОК-46 (режим № 4) получен слой с преимущественно эвтектоидной структурой твердостью HRC 32–37. Пористость наплавленного слоя составляет не более 3 %. В структуре зоны сплавления нет твердых хрупких составляющих. Защита и раскисление металла сварочной ванны

при этом были обеспечены действием обмазки электрода.

Стойкость наплавленных слоев к абразивному воздействию оценивали при трении о жестко закрепленный абразив. На вал испытательной машины 1 крепили абразивный круг 2 диаметром 120 мм (см. рисунок). Испытуемый образец 3 помещен в оправку 4 и прижат к абразивному кругу через шариковую опору 5 с усилием 30 Н. Абразивный круг диаметром 250 мм, шириной 20 мм, зернистости 25, твердости СТ-2, помещенный в ванночку с водой 6, вращается с частотой 200 об/мин.

В качестве образца сравнения использовали образец, изготовленный из стали Ст 3.



Схемы наплавки

Износостойкость наплавленного материала при трении о жестко закрепленный абразив в зависимости от технологии наплавки



Несмотря на наличие макродефектов в некоторых образцах наплавленных слоев их износостойкость определяется полученной твердостью. Откалывания фрагментов покрытия при испытании не наблюдалось.

### Выводы

Применением различных технологий наплавки удается изменять состав сварочной ванны при расплавлении слоя, уложенного на поверхности обрабатываемой детали чугуна.

Использование чугунной стружки в качестве присадки при электродуговой обработке поверхности чугунных изделий обеспечило получение слоев с твердостью от HRC 32 – 37 до HRC 45 – 49.

Отсутствие в зоне сплавления хрупких структурных составляющих позволяет рекомендовать способ наплавки с присадкой из чугунной стружки для восстановления и упрочнения поверхностей чугунных деталей в ремонтном производстве и исправлении брака в литейных цехах.

### Список литературы

1. Асиновская Г.А., Журавицкий Ю.И. Газовая сварка чугуна. – М.: Машиностроение, 1974. – 118 с.
2. Воцанов К.П. Ремонт оборудования сваркой. – М.: Машиностроение, 1967. – 192 с.
3. Леонтьев Л.Б., Седых В.И. Восстановление посадочных поверхностей втулок цилиндров судовых малооборотных дизелей // ЦБНТИ Минморфлота. Сер. «Судоремонт». – 1984. – Вып. № 6 (515). – С. 1–12.
4. Мамедов А.Т., Алиев А.А., Гулиев А.А. Опыт переработки стружковых отходов чугуна в порошок // Порошковая металлургия. – 1993. – № 2. – С. 93–98.

### Hard surface of grey cast iron with addition of iron shavings

<sup>1</sup>A.O. Tokarev, <sup>2</sup>V.M. Potapov

<sup>1</sup>Novosibirsk State Academy of Water Transport, Shhetinkina st., 33, Novosibirsk, 630099, Russian Federation

<sup>2</sup>Novosibirsk State Pedagogical University, Viljujskaja st., 28, Novosibirsk, 630126, Russian Federation

#### Abstract

The urgent problems of increasing the share of parts made of gray cast iron is considered. To restore the size of the worn surfaces electric arc welding is applied. Different technological schemes of surfacing are developed. Powder obtained from iron shavings is used as the filler.

The layer with a hardness of HRC 32–37 is obtained by melting the powder layer using arc welding electrode grade ОК-46. The porosity of the deposited layer is not high. The structure of the fusion zone has hard brittle components. This technology is recommended for the restoration and surface hardening of cast iron parts. One also can use the proposed technology to correct defects in the casting.

**Keywords:** restoration; hardening; grey cast iron details; electric arc welding; iron shavings filler materials.

#### References

1. Asinovskaja G.A., Zhuravickij Ju.I. *Gazovaja svarka chuguna* (Gas welding of cast iron). Moscow, Mashinostroenie, 1974. 118 p.
2. Voshhanov K.P. *Remont oborudovanija svarkoj* (Repair welding equipment). Moscow, Mashinostroenie, 1967. 192 p.
3. Leont'ev L.B., Sedyh V.I. *Central'noe bjuro nauchno-tehnicheskoi informacii Ministerstva morskogo flota, Serija Sudoremont*, 1984, no. 6 (515), pp. 1-12.
4. Mamedov A.T., Aliev A.A., Guliev A.A. *Poroshkovaja metallurgija*, 1993, no. 2. pp. 93-98.

# КОЭФФИЦИЕНТ ТЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ СПЛАВОВ С ФАЗОВЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ

*М.Н. ИГНАТОВ, доктор техн. наук, профессор  
А.М. ИГНАТОВА, канд. техн. наук, ассистент  
А.О. АРТЕМОВ, аспирант, ассистент  
(ПНИПУ, г. Пермь)  
А.Ю. ЧУМАЧЕНКО, аспирант,  
Л.И. ШЕВЦОВА, аспирант  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Статья получена 2 апреля 2013 года

**Артемов А.О.** – 614000, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29,  
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,  
e-mail: artemoff87@mail.ru

Исследуется влияние фазового разделения ликвационного характера на коэффициент термического расширения синтетических минеральных сплавов. Показано явление ликвационной дифференциации, которое возникает, когда одна жидкая фаза (расплав каменного литья) распадается на две несмешивающиеся между собой жидкости. Представлены кривые термического расширения для неоднородных симиналов, содержащих две фазы, на которых выделены две точки перехода в стеклообразное состояние. Определена связь между температурами стеклообразного состояния  $T_g$  и состояния размягчения  $T_d$  с фазовым составом симиналов.

**Ключевые слова:** дилатометрия, синтетические минеральные сплавы, фазовый состав, каменное литье, коэффициент термического расширения, ликвация, структурные изменения, стеклообразное состояние, температура дилатометрического размягчения.

## Введение

При получении камнелитых отливок из синтетических минеральных сплавов (симиналов) актуальной проблемой является склонность расплава к разделению фаз ликвационного характера [1]. Ликвационное разделение приводит к тому, что симиналы одинакового состава могут иметь не только разное соотношение кристаллических и аморфных фаз, но и различное строение, что неизменно повлияет на величину коэффициента термического расширения (КТР) этого материала [2].

Настоящая работа рассматривает влияние разделения фаз на характер кривой КТР симиналов (каменное литье), температуру перехода в стеклообразное состояние  $T_g$  и температуру дилатометрического размягчения  $T_d$ .

КТР – это усредненная по объему характеристика материала, свой вклад в него вносит каждая из присутствующих фаз. Образование кристаллов может существенно изменить КТР многокомпонентного материала, если КТР образующихся кристаллов сильно отличается от КТР исходных составляющих. В симиналах разное соотношение кристаллической и аморфной фазы может привести к изменению состава разнородных составляющих и помешать деформации образца при изменении КТР, в результате изменяются величины  $T_g$  и  $T_d$ . Температура перехода в стеклообразное состояние  $T_g$  указывает начало перехода в вязкоупругое состояние, а температура дилатометрического размягчения  $T_d$  соответствует началу течения в условиях умеренной нагрузки [3].

### 1. Материалы и методики исследования

Исследуемый материал базового состава симинала имел следующий состав, %:  $\text{SiO}_2$  - 37,0;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - 14,0;  $\text{CaO}$  - 11,3;  $\text{FeO}$  - 5,8;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  - 9,9;  $\text{MgO}$  - 10,8;  $\text{MnO}$  - 0,3;  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  - 1,5;  $\text{TiO}_2$  - 0,1. Технология получения симинала включает перегрев, достижение в расплаве ликвации и последующее быстрое охлаждение для фиксации этого строения в твердом состоянии [4].

Явление ликвационной дифференциации возникает, когда одна жидкая фаза (расплав каменного литья) распадается на две несмешивающиеся между собой жидкости (рис. 1).

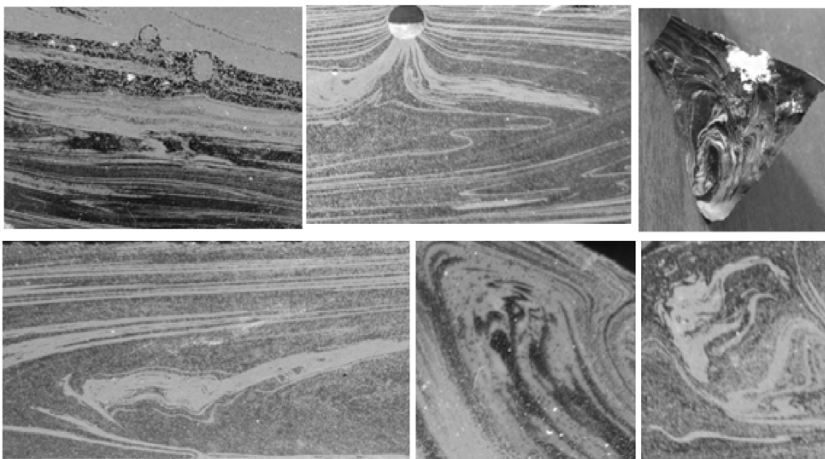


Рис. 1. Структура симинала с ликвационным разделением

Предельный случай полного ликвационного разделения – образование двух несмешивающихся слоев жидкости, различных по составу и свойствам [5]. Состояние ликвационной дифференциации расплава можно проследить на диаграмме состояния.

Дилатометрические испытания проводились в динамической атмосфере He (гелий особой чистоты) со скоростью потока 50 мл/мин, при этом скорость нагрева образца составляла 5 К/мин.

Измеряемый КТР представляет собой средний по объему КТР для двух фаз, присутствующих в структуре симинала. В то же время, ни  $T_g$ , ни  $T_d$  не являются средними величинами. Любой переход в стеклообразное состояние независимо от других влияет на форму кривой расширения. Таким образом, может быть определена каждая  $T_g$ . Поскольку в структуре симинала содержится две фазы с разными физическими свойствами, температура размягчения материала  $T_d$  зависит от температуры более легкоплавкой фазы, кото-

рая, в свою очередь, является более вязкой. Более тугоплавкие фазы с увеличением температуры не растворяются в легкоплавкой фазе, а образуют отдельные участки, по форме повторяющие течение расплава.

На рис. 2 показаны кривые термического расширения для неоднородных симиналов, содержащих две фазы. На этих кривых видны две точки перехода в стеклообразное состояние. Такая форма кривой наблюдается в том случае, когда более вязкая фаза является непрерывной, и температура несмешиваемости располагается выше  $T_g$  более вязкой фазы. Кривые этого типа характерны для бариевосиликатных систем, где температуры несмешиваемости превышают  $T_g$  каждой фазы.

На кривой термического расширения неоднородного образца может быть только одна точка перехода в стеклообразное состояние (см. рис. 2). В этом случае кривая может напоминать соответствующую кривую для гомогенного материала, если более вязкая фаза существует только в виде более мелких обособленных участков, или демонстрировать широкую область постепенного размягчения, если более вязкая фаза изначально обладает связанной морфологией. Первый тип кривой присущ натрий-хромит-силикатным системам, в которых концентрация оксида-модификатора превышает спинодальный предел [6].

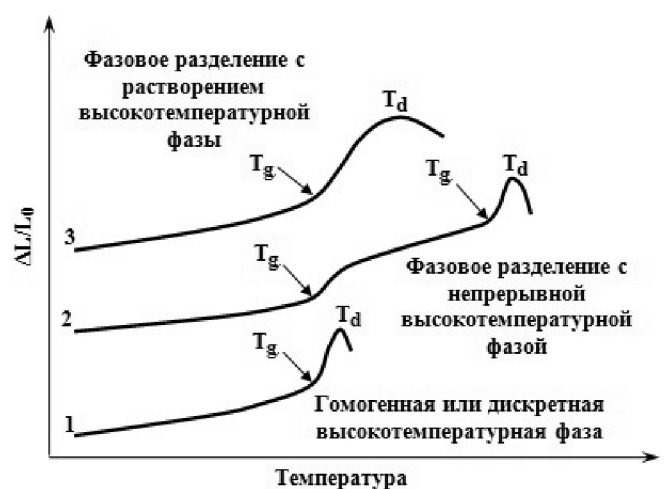


Рис. 2. Влияние фазового разделения на форму кривых термического расширения симиналов (1, 2, 3 – типы кривых)

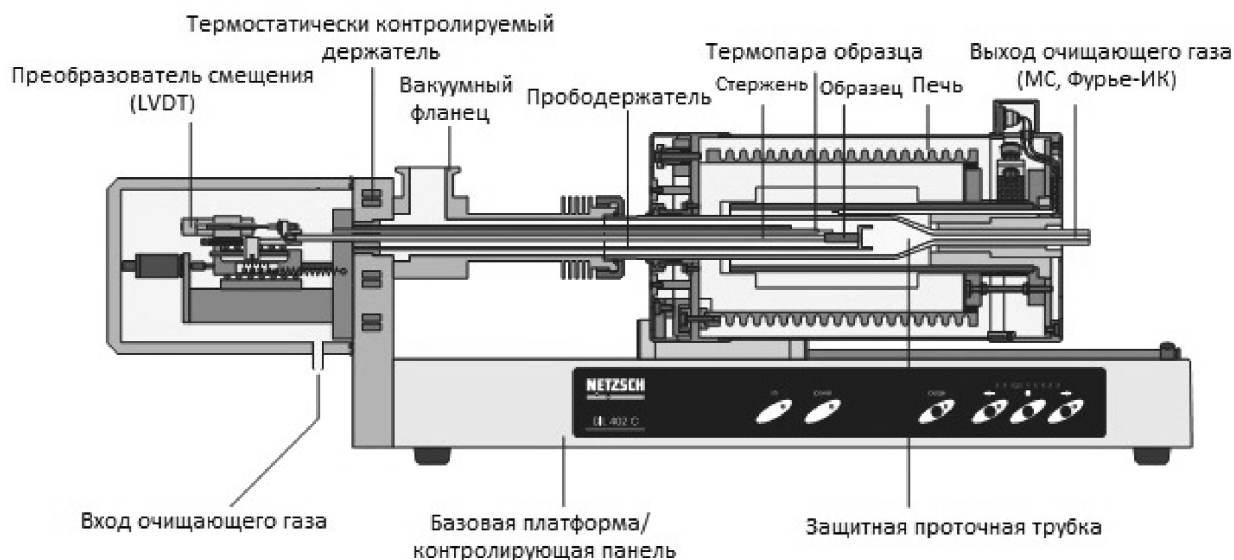


Рис. 3. Схема двойного дифференциального dilatометра марки ETZSCH DIL 402C

Кривые второго типа появляются в тех случаях, когда растущая температура образца проходит предел несмешиваемости или спинодаль до того, как достигается температура  $T_g$ , соответствующая этой фазе. Таким образом, исчезает связность высоковязкой фазы. Кривые такого типа характерны для натрий-хромит-силикатных систем с невысоким содержанием щелочного оксида. В общем случае, если разность между  $T_g$  и  $T_d$  более  $\sim 50$  К, исследуемый образец, скорее всего, неоднородный с непрерывной более вязкой фазой. Если разность между  $T_d$  и  $T_g$  составляет менее 40 К, образец или гомогенный, или более вязкая фаза существует только в виде небольших участков.

Третий тип кривой соответствует системам, с растворением высокотемпературной фазы при разделении расплава.

КТР симинала с разделением были установлены экспериментально при измерениях, выполненных на дифференциальном dilatометре марки NETZSCH DIL 402C [7]. Dilatометр (рис. 3) состоит из цилиндра, сделанного из материала с известным КТР, который закреплен одним концом и помещен в нагреватель. В конце цилиндра располагается образец. Напротив образца устанавливается стержень, сделанный из того же материала, что и цилиндр. Другой конец стержня соединяется с устройством, способным фиксировать даже очень малое изменение своего положения. Данная система имеет чрезвычайно маленький дрейф, поэтому измерения выполняются с высокой воспроизводимостью и

точностью. Предел допускаемой относительной погрешности измерений линейных приращений составляет  $\pm 3$  %.

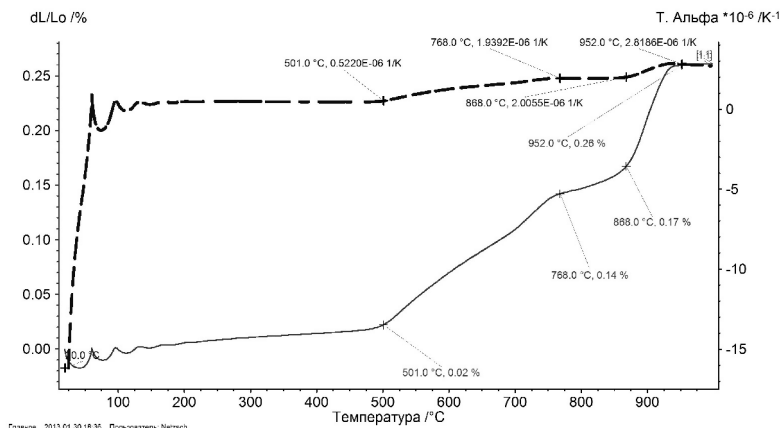
Нагревание пространства вокруг образца вызывает его расширение, а также расширение цилиндра. Если КТР образца отличается от КТР материала аппаратуры, то конец стержня сместится на расстояние, зависящее от длины образца и разницы КТР образца и материала аппаратуры. Для определения истинного КЛТР образца необходимо вводить коррекцию на расширение материала аппаратуры.

Образец, который помещается против плоской стенки измерительной системы, при нагревании перемещается в горизонтальном направлении пружинным толкателем. Это перемещение образца относительно либо цилиндра системы, либо второго стержня-толкателя измеряется с помощью LVDT (линейный датчик дифференциальной переменной).

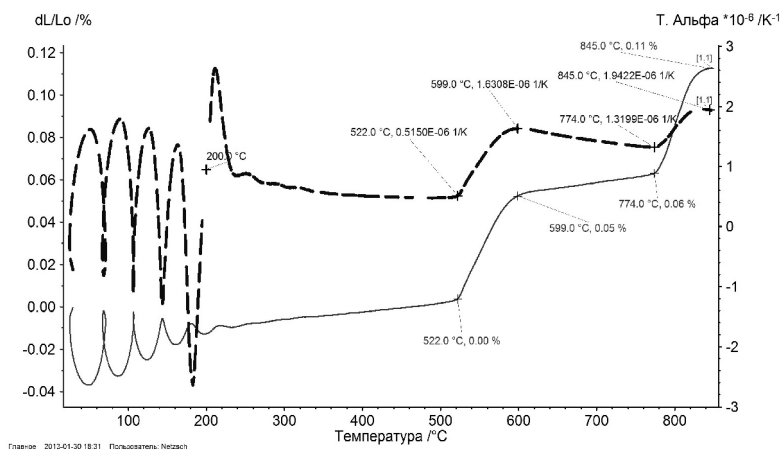
## 2. Результаты и обсуждения

Кривые, полученные на dilatометре для образцов симинала с разделением фаз и без их разделения, представлены на рис. 4. Dilатометрическая кривая (рис. 4, б) характерна для образцов с фазовым разделением с растворением высокотемпературной фазы.

Независимо от общей формы кривой термического расширения более низкое или единственное наблюдаемое значение относится к менее вязкой фазе. Следовательно, если обнаружены



а



б

Рис. 4. Результаты дилатометрических исследований:

- а – образец симинала без разделения фаз;  
 б – образец симинала с разделением фаз

две температуры перехода в стеклообразное состояние, то более низкая отвечает менее вязкой фазе, а более высокая — более вязкой фазе.

Наличие колебаний на дилатометрической кривой и кривой изменения температур в диапазоне от 20 до 200 °C (рис. 4) обусловлено выходом дилатометра на заданный режим, и при анализе не учитывалось.

Связь между  $T_g$  и составом менее вязкой фазы говорит о том, что изменение температурного расширения можно использовать для определения положения линий, обозначающих участок ликвационного разделения в двойных и тройных системах, имеющих области фазового разделения. Все системы, составы которых лежат в одной такой области, содержат одинаковые по составу фазы, поэтому системы с суммарными составами, лежащими в рамках одной области разделения, обладают одинаковыми значениями  $T_g$ .

Доказано, что в области фазового разделения тройной системы определение положения линий постоянных значений  $T_g$  является наилучшим методом определения линий, объединяющих участки ликвации. Те же данные могут быть использованы для определения границ несмешиваемости по конечным точкам линий границ участков ликвации, в которых  $T_g$  перестает быть постоянной.

## Выводы

1. Фазовое разделение оказывает влияние на КТР симиалов, величина КТР симиалов с разделением находится в диапазоне 1,0...2,8, что отличается от величины КТР симинала такого же симинала без фазового разделения.

2. Температуры перехода в стеклообразное состояние и дилатометрического размягчения составляют 520 и 600 °C соответственно для образца симинала с фазовым разделением; 500 и 760 °C – для образца симинала без фазового разделения.

3. Установлено, что величина и интервал между  $T_g$  и  $T_d$  зависят в большей степени не от состава, а от структуры материала, которая, в свою очередь, зависит от технологических параметров. Следовательно, этими характеристиками материала можно управлять на уровне изменения структуры.

## Список литературы

- Игнатова А.М., Игнатов М.Н. Роль ликвационных явлений в структурообразовании синтетических минеральных сплавов // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2012. – Т. 9. № 2. – С. 169-179.
- Шелби Дж. Структура, свойства и технология стекла. – М.: Изд-во: Мир. – 2006. – 288 с.
- Arun K. Varshneya *Fundamentals of Inorganic Glasses*. – Gulf Professional Publishing, 1994. – 570 p.
- Игнатова А.М., Игнатов М.Н., Ханов А.М. Использование ликвационных явлений для достижения декоративной текстуры синтетических минеральных сплавов // *Дизайн. Теория и практика*. – 2011. – № 8. – С. 15–24.



5. Игнатова А.М., Ханов А.М., Чернов В.П. Ликвация расплава как неотъемлемый этап структурообразования синтетических минеральных сплавов // Сб. науч. тр. Sworld по материалам международной науч.-практ. конф. – 2011. – Т. 3. – № 2. – С. 67–71.

6. Игнатова А.М. Правила управления структурой и свойствами материала каменного литья // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Машиностроение, материаловедение. – 2010. – Т. 12. – № 3. – С. 94–102.

7. Игнатов М.Н., Игнатова А.М., Наумов С.В., Корниенко Е.Е., Чумаченко А.Ю. Исследование зависимости коэффициентов термического расширения металла шва и сварочных шлаков от температуры в диапазоне 100...1000 °С // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2012. – № 3. – С. 116–119.

### Coefficient of thermal expansion of synthetic mineral alloys with phase separation

<sup>1</sup>M. N. Ignatov, <sup>1</sup>A.M. Ignatova, <sup>1</sup>A.O. Artemov,  
<sup>2</sup>A.J. Chumachenko, <sup>2</sup>L.I. Shevtsova

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky Av. 29,  
Perm, 614990, Russian Federation

<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University, Karl Marx avenue, 20,  
Novosibirsk, 630073, Russian Federation

#### Abstract

The influence of the phase separation of liquation character on the coefficient of thermal expansion of synthetic mineral alloys is studied. The phenomenon of segregation of liquation differentiation, which occurs when one liquid phase (melt stone casting) splits into two immiscible liquids together is showed. The curves of thermal expansion for inhomogeneous synthetic mineral alloys containing two phases, in which two points of the glass transition are marked, are presented. A relation between the temperatures of the glassy state  $T_g$  and the state of softening  $T_d$  with the phase composition synthetic mineral alloys is defined.

**Keywords:** dilatometry, synthetic mineral alloys, phase composition, stone casting, thermal expansion coefficient, segregation, structural change, glassy state, temperature of dilatometric softening.

#### References

1. Ignatova A.M., Ignatov M.N. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*, 2012, vol. 9, no. 2, pp. 169-179.
2. Shelbi Dzh. *Struktura, svojstva i tehnologija stekla* (The structure and properties of Glass Processing). Mir, 2006. 288 p.
3. Arun K. Varshneya *Fundamentals of Inorganic Glasses*. Gulf Professional Publishing, 1994. 570 p.
4. Ignatova A.M., Ignatov M.N., Hanov A.M. *Dizajn. Teorija i praktika*, 2011, no. 8, pp. 15-24.
5. Ignatova A.M., Hanov A.M., and Chernov V.P. *Likvacija rasplava kak неотъемлемый этап структурообразования синтетических минеральных сплавов: Сборник научных трудов Sworld по материалам международной научно-практической конференции* (Melt liquation as an integral phase of structure formation of synthetic mineral alloys: Collection of scientific papers based on international scientific-practical conference Sworld), 2011, vol. 3, No. 2, pp. 67-71.
6. Ignatova A.M. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2010, vol. 12, no. 3, pp. 94-102.
7. Ignatov M.N., Ignatova A.M., Naumov S.V., Kornienko E.E., Chumachenko A.Ju. *Obrabotka metallov: tehnologija, oborudovanie, instrumenty*, 2012, no. 3, pp. 116-119.

# СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЛИСТОВОЙ СТАЛИ 30ГСЮ6, ИЗГОТОВЛЕННОЙ ПО СОВМЕЩЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА В ТВЕРДОЖИДКОМ СОСТОЯНИИ\*

*Е.А. ПУТИЛОВА, аспирант*

*Э.С. ГОРКУНОВ, доктор техн. наук, академик РАН*

*С.М. ЗАДВОРКИН, канд. физ.-мат. наук, с.н.с.*

*Д.И. ВИЧУЖАНИН, канд. техн. наук*

*(ИМаш УРО РАН, г. Екатеринбург);*

*В.В. ЧЕРНОМАС, доктор техн. наук, доцент*

*И.Г. САПЧЕНКО, доктор техн. наук, доцент*

*О.Н. КОМАРОВ, канд. техн. наук, доцент*

*(ИМиМ ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре)*

Статья получена 03 апреля 2013 года

**Путилова Е.А.** – 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, д. 34,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения  
Уральского отделения Российской академии наук,  
e-mail: tuevaevgenya@mail.ru

Представлены результаты исследования структуры, механических и магнитных свойств металлоизделий из стали 30ГСЮ6, полученных в ходе алюмотермического восстановления из окалина с последующим формообразованием по совмещенной технологии непрерывного литья и горячей обработки металлов давлением. В результате металлографических исследований образцов металлоизделий установлено, что размер зерна увеличивается от контактной поверхности в глубь образца и имеет равноосную форму с неоднородным распределением карбидов по их границам. При проведении механических испытаний образцов установлено, что при одноосном растяжении материал металлоизделия разрушается по хрупкому механизму – относительное удлинение составило 1,5 % при значении временного сопротивления –460 МПа. Определение магнитных свойств образцов показало, что в диапазоне приложенных нормальных напряжений от –100 МПа до 130 МПа коэрцитивная сила, максимальная магнитная проницаемость и остаточная индукция изменяются однозначно, что дает принципиальную возможность для применения методики неразрушающего магнитного контроля для диагностики напряженно-деформированного состояния деталей и элементов конструкций из подобных материалов.

**Ключевые слова:** металл, полученный алюмотермитным восстановлением, деформация в твердожидком состоянии, структура, механические и магнитные свойства.

## Введение

Выбор и разработка того или иного технологического процесса формирования металлоизделий напрямую связаны с их свойствами и экономической эффективностью производства. Наиболее распространенными технологиями получения протяженных фасонных металло-

изделий для нужд машиностроения являются способы получения изделий методами литья и пластического деформирования материала. Однако комплекс свойств, которыми обладают новые сплавы (например, пластические свойства – для технологий обработки металлов давлением; жидкотекучесть и склонность к ликвации – для технологий литейного производства) не всегда

\* Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 13-01-00732, совместного проекта УРО РАН и ДВО РАН № 12-С-1-1016 и № 12-II-УО-03-005, а также гранта ДВО РАН №12-I-П26-02.

соответствуют требованиям традиционных технологий формообразования протяженных металлоизделий, что является сдерживающим фактором в их широком применении.

Поиск способов формирования металлоизделий методами пластического деформирования таких сплавов и повышение эффективности существующих в мировой практике ведется по нескольким направлениям, среди которых можно выделить формирование изделий из материалов в твердожидком состоянии (SSM-технологии). Однако данная технология имеет ограничения, обусловленные принадлежностью к изготовлению металлоизделий ограниченных размеров [1, 2].

В Институте машиноведения и металлургии ДВО РАН проводятся работы по разработке новых технологий получения конструкционных материалов и способов формирования металлоизделий из этих материалов. Сущность новой технологии получения конструкционных сплавов заключается в высокотемпературном алюмотермическом восстановлении железа из окалины с добавлением компонентов, лигатур и добавок с последующим кавитационным перемешиванием расплава для усреднения его химического состава [3]. Для формирования протяженных металлоизделий в твердожидком состоянии разработана технология, позволяющая совместить в одном устройстве непрерывную разливку и деформирование металла в профиль заданного поперечного сечения [4].

Для оценки качества металлоизделий и устойчивости процессов их формообразования актуальными становятся задачи исследования структуры и свойств полученных изделий, а также разработка неразрушающих методов диагностики их состояния.

Целью данной работы являлось исследование структуры и физико-механических свойств полосы из стали 30ГСЮб, изготовленной по совмещенной технологии непрерывного литья и деформации металла, восстановленного из окалины методом алюмотермии.

## 1. Методика проведения исследований

Заливку расплавленного металла, полученного алюмотермическим восстановлением из окалины и имеющего температуру 1800 °С, производили из раздаточного стопорного ковша-дозатора емкостью 0,005 м<sup>3</sup> в водоохлаждаемый подвижный кристаллизатор, изготовленный из стали 45. На рабочие поверхности кристаллизатора наносили специальное противопопригарное покрытие (паста «ПолиTERM 1400») толщиной 0,8...1 мм. Расплавленный металл, химический состав которого соответствует стали 30ГСЮб и приведен в табл. 1, затвердевает и одновременно деформируется в кристаллизаторе устройства вертикального литья и деформации металла (УВЛДМ), формируя заготовку (металлоизделие) в виде стальной полосы поперечного сечения 60×5 мм. При этом степень обжатия заготовки в калибрующей части кристаллизатора составляла 0,6. В процессе разливки стали в кристаллизатор температура вблизи его рабочей поверхности (на расстоянии 4 мм от рабочей поверхности) не превышала 120 °С. Согласно расчетам температура деформирования стали в кристаллизаторе УВЛДМ была близка к температуре солидуса данного сплава.

Охлаждение металлоизделия до комнатной температуры происходило на воздухе без принудительного охлаждения. Полученная стальная полоса длиной 470 мм дополнительной термической обработке не подвергалась. Плоские разрывные образцы с головками для исследований были вырезаны из противоположных концов заготовки, соответствующих начальной (образец № 1) и заключительной (образец № 2) стадиям технологического процесса. Различия в структуре и уровне физико-механических свойств образцов двух этих групп может быть обусловлено только различной величиной температуры деформации металла из-за прогрева рабочих поверхностей кристаллизатора при литье и прокатке. По нашим оценкам, эта разница температур не превышала 70...100 °С.

Таблица 1

Химический состав исследованной стали

C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	Cr, %	Ni, %	Mo, %	Al, %	Cu, %	Co, %
0,28	0,59	0,74	0,02	0,009	0,06	0,10	0,20	>2,5	0,3	0,01



Определение механических характеристик материала и построение диаграммы напряжение–деформация проводили по результатам испытания на одноосное растяжение при непрерывном нагружении на испытательной машине Instron 8801.

С целью исследования влияния приложенных нормальных напряжений на магнитные свойства исследуемой стали образцы подвергали упругопластическому деформированию по схеме одноосного растяжения-сжатия с одновременной регистрацией магнитных характеристик материала. Деформацию образцов определяли бесконтактно при помощи видеоэкстензометра. Деформация образцов на  $i$ -м шаге деформирования растяжением определяли как

$$\varepsilon_i = \ln(l_i / l_0), \quad (1)$$

где  $l_0$  – начальная длина рабочей части образца;  $l_i$  – длина рабочей части образца после  $i$ -го шага нагружения.

Исследование влияния нормальных напряжений на магнитные характеристики проводили при комнатной температуре на универсальной испытательной машине с максимальным усилием растяжения 50 кН. По достижении определенной степени деформации процесс нагружения приостанавливали, и при помощи магнитно-измерительного комплекса Remagraph C-500 регистрировали петли магнитного гистерезиса. Магнитные измерения проводили в замкнутой магнитной цепи по схеме пермеаметра. Магнитное поле напряженностью до 50 кА/м прикладывали вдоль оси образца. Из петель магнитного гистерезиса определяли значения коэрцитивной силы  $H_c$ , остаточной индукции  $B_r$  и намагниченности в максимальном приложенном поле  $\mu_0 M_{\max}$  ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная). Погрешность измерения поля и индукции не превышала 3 %. Из основной кривой намагничивания определяли максимальную магнитную проницаемость  $\mu_{\max}$  и поле максимальной магнитной проницаемости  $H(\mu_{\max})$ . Перед началом каждого измерения магнитных свойств и по его окончании образец размагничивали. После каждого измерения в нагруженном состоянии проводили снятие нагрузки с образца

и аналогичным образом определялись магнитные характеристики.

Для проведения микроструктурных исследований на поперечном сечении образцов были подготовлены шлифы. Травление шлифов проводили в 4 %-м спиртовом растворе азотной кислоты. Микроструктуру исследовали при помощи оптического микроскопа Neophot 21. Микротвердость HV образцов в поперечном сечении определяли на микротвердомере Leica при нагрузке на индентор 0,1 Н. Фрактографические исследования поверхностей разрушения образцов после испытаний на одноосное растяжение и определение локального химического состава структурных включений проводили при помощи растрового электронного микроскопа Tescan VEGA II XMU с волновой приставкой INCA WAVE 500.

## 2. Результаты и их обсуждение

Анализ микроструктуры образцов показал, что материал имеет разнотернистую структуру с размером зерна от 50 до 270 мкм. Зерна имеют равноосную форму, балл зерна, по ГОСТ 5639-82, составляет 4, местами 3. На рис. 1 представлены полученные при помощи оптической микроскопии фотографии структуры. Видно, что вблизи поверхности образцов зерна имеют меньший размер (балл зерна 3, рис. 1, а, б), чем в сердцевине (балл зерна 4, рис. 1, в, г). По результатам распределения значений микротвердости по поперечному сечению образца установлено, что твердость по сечению меняется незначительно, немного увеличиваясь у поверхностей заготовки. Также из приведенных фотографий видно, что по границам зерен наблюдаются выделения, причем по мере приближения к поверхности образца их количество увеличивается. Измерения микротвердости определили, что твердость этой граничной фазы ( $HV_{0,01}$  514) в полтора раза превышает значения твердости для остального объема металла ( $HV_{0,01}$  330). Локальный химический анализ показал повышенное содержание углерода и меди в этих выделениях. Повышенное содержание углерода и возможное образование карбидов в этих зонах объясняет более высокие значения твердости по сравнению с ферритной основой. Повышенное содержание меди по границам зерен при допустимых значениях ее об-

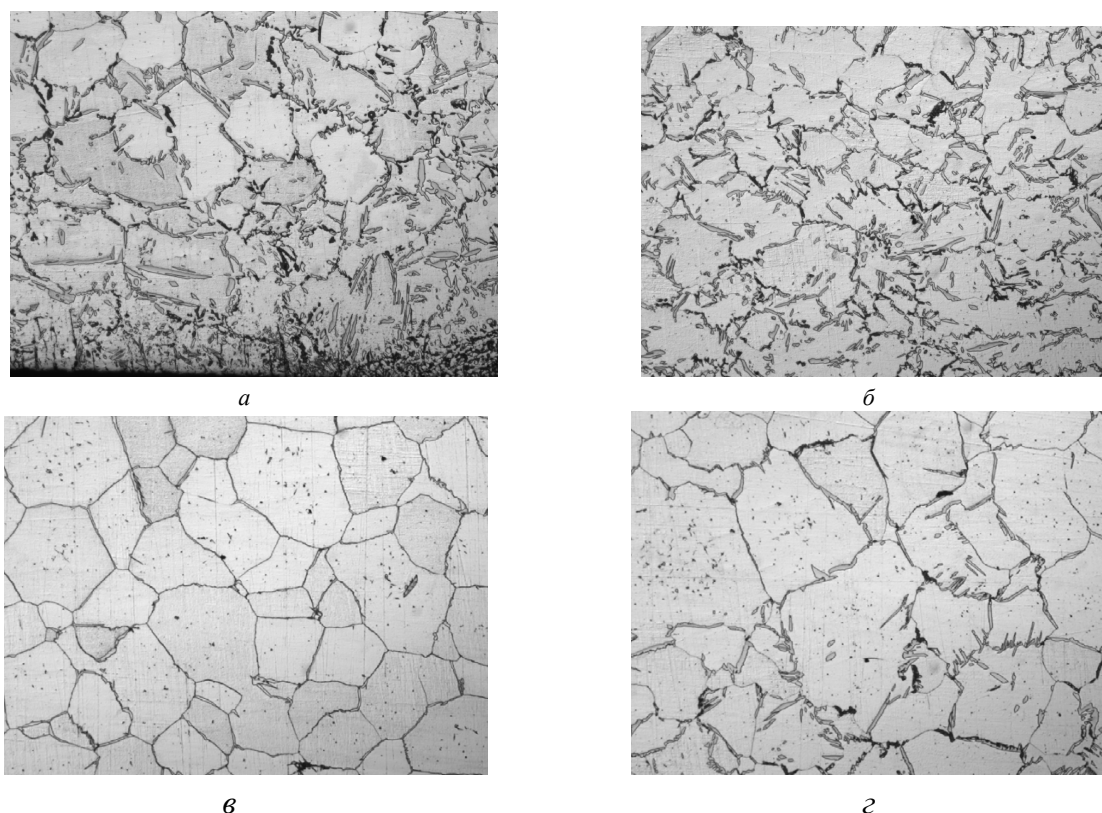


Рис. 1. Микроструктура образцов, полученная после кратковременного травления: увеличение  $\times 100$

щего содержания в структуре стали, возможно, объясняется ликвацией химических элементов в процессе изготовления заготовок.

На рис. 2 приведены диаграммы напряжение–деформация двух образцов, вырезанных из противоположных концов заготовки. Диаграммы имеют вид, не характерный для среднеуглеродистых сталей, полученных с помощью традиционных технологий. Такой вид диаграмм приводит к сложностям в определении предела текучести материала. Временное сопротивление

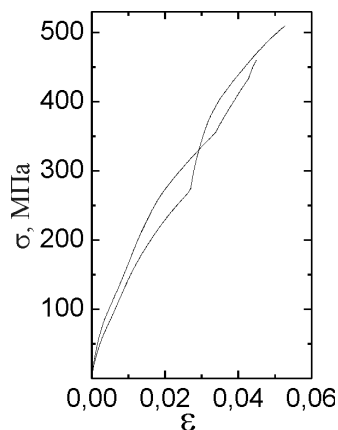


Рис. 2. Диаграммы растяжение–деформация двух образцов исследованного материала

одного образца 440 МПа, второго 480 МПа. Разрушение происходило по хрупкому механизму, о чем свидетельствуют отсутствие шейки (относительное сужение  $\psi = 0,58 \%$ ), малая величина относительного удлинения  $\delta$  после разрушения образцов и характер излома.

В табл. 2 приведены средние значения механических и магнитных свойств стали 30ГСЮ6. Свойства определяли на образцах, вырезанных из начала и конца темплета. Как видно из табл. 2, разница в температуре прокатки этих образцов слабо сказалась на значениях их механических и магнитных характеристик – различие для разных образцов не превышало 10 %.

Таблица 2

Механические и магнитные свойства стали 30ГСЮ6\*

$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	HV <sub>0,01</sub>	$H_c$ , А/см	$B_r$ , Тл	$\mu_{max}$	$\mu_0 M_{max}^2$ , Тл
460	1,3	0,58	330	3,8	0,26	300	1,68

\* В таблице приведены усредненные значения по нескольким образцам.

На рис. 3 представлены результаты изменения магнитных характеристик в зависимости от приложенных нормальных напряжений в условиях нагружения. Видно, что представленные магнитные характеристики изменяются неоднозначно. Для коэрцитивной силы и поля максимальной магнитной проницаемости экстремум наблюдается при напряжениях примерно 220 МПа, а для значений остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости – 100...120 МПа.

Экстремумы, наблюдаемые на зависимостях  $H_c$ ,  $B_r$ ,  $\mu_{\max}$  и  $H(\mu_{\max})$  от приложенных напряжений, можно представить как результат действия целого ряда факторов. В частности, растяжение образцов в упругой области приводит к формированию магнитной текстуры напряжений, получившей также название наведенной магнитной анизотропии [5]. На начальном этапе растяже-

ния магнитострикция  $\lambda$  железа и его сплавов положительна [5, 6], соответственно произведение  $\sigma\lambda > 0$ . Вследствие этого идет образование магнитной текстуры типа “ось легкого намагничивания”, при которой векторы намагниченности выстраиваются преимущественно вдоль направлений легкого намагничивания, т. е. вдоль направления намагничивающего и перемгничивающего поля. Последнее облегчает процессы намагничивания и перемгничивания, и коэрцитивная сила, и поле максимальной магнитной проницаемости, измеренные вдоль направления растяжения, уменьшаются, а максимальная магнитная проницаемость возрастает. Поскольку при этом происходит рост объема доменов, векторы намагниченности которых составляют наименьший угол с направлением нагружения, остаточная индукция, характеризующая распределение магнитных фаз в ферромагнетиках в остаточном намагниченном состоянии, также увеличивается.

При более сильных растягивающих напряжениях магнитострикция железа и его сплавов меняет свой знак [7, 8], так что произведение  $\sigma\lambda$  становится отрицательным. При отрицательных значениях магнитострикции в процессе растяжения идет образование текстуры типа “плоскость легкого намагничивания”, при которой энергетически выгодна ориентация вектора спонтанной намагниченности перпендикулярно оси растяжения и, следовательно, намагничивающему и перемгничивающему полю. Это приводит к затруднению процессов перемгничивания и соответственно повышению коэрцитивной силы и уменьшению величин  $B_r$  и  $\mu_{\max}$ . В результате на кривых  $H_c(\sigma)$ ,  $B_r(\sigma)$  и  $\mu_{\max}(\sigma)$  формируются экстремумы. Более подробно влияние приложенных упругих напряжений на значения продольной и поперечной магнитострикции среднеуглеродистых сталей рассмотрено в работе [9].

Для изучения особенностей магнитоупругого эффекта было проведено также исследование влияния сжимающих напряжений в упругой области (до –100 МПа) на поведение магнитных характеристик (рис. 3).

При сжатии магнитные моменты ориентируются перпендикулярно направлению приложения нагрузки, так как знаки магнитострикции материала и внешних напряжений не совпадают, и  $\sigma\lambda < 0$ . Происходит формирование магнитной

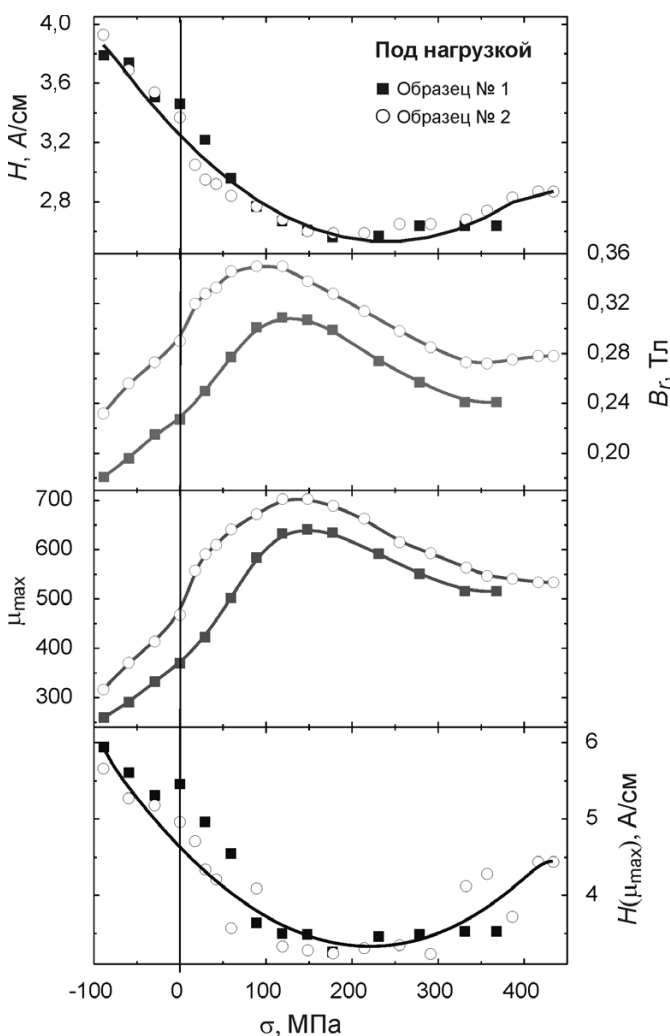


Рис. 3. Зависимости магнитных характеристик от приложенных нормальных напряжений в условиях нагружения

текстуры типа «плоскость легкого намагничивания», которая перпендикулярна продольной оси образца. Значения коэрцитивной силы, измеренной вдоль направления приложения нагрузки, возрастают, а остаточной индукции и максимальной магнитной проницаемости – уменьшаются.

Действие напряжений, достигающих и превышающих предел текучести, приводит к разрушению магнитной текстуры напряжений, и основным фактором, влияющим на коэрцитивную силу в области пластической деформации, является увеличение плотности дислокаций и дислокационных скоплений ( $H_c \sim N^{1/2}$ , где  $N$  – плотность дислокаций [10]). Остаточная индукция и максимальная магнитная проницаемость при этом уменьшаются.

Иногда, как, например, в нашем случае, по диаграмме напряжение–деформация сложно или даже невозможно определить значение предела текучести материала. Измерения магнитных характеристик под нагрузкой и при последующем разгрузении позволяют установить, достигнуты ли напряжения, соответствующие стадии развитой пластической деформации, или же еще нет. В упругой области деформаций после снятия нагрузки значения магнитных характеристик будут оставаться примерно на исходном уровне [11].

На рис. 4 приведены зависимости магнитных характеристик стали 30ГСЮ6 от нормальных напряжений, но после снятия нагрузки. Видно, что приложение нормальных напряжений в области от  $-100$  МПа до  $130$  МПа не приводит к изменению магнитных характеристик. При увеличении приложенных нагрузок более  $130$  МПа коэрцитивная сила и поле максимальной магнитной проницаемости изменяются с максимумом в районе  $350$  МПа, остаточная индукция и максимальная магнитная проницаемость – с минимумом при этих же напряжениях. Можно предположить, что сохранение магнитных свойств на одном уровне до  $\sigma = 130$  МПа говорит о том, что измерения проводятся в упругой области деформаций, и после снятия нагрузки материал возвращается в свое исходное состояние. А превышение этих напряжений приводит уже к необратимым изменениям в материале, и мы, достигая значения предела текучести материала, переходим в область развитой пластической деформации.

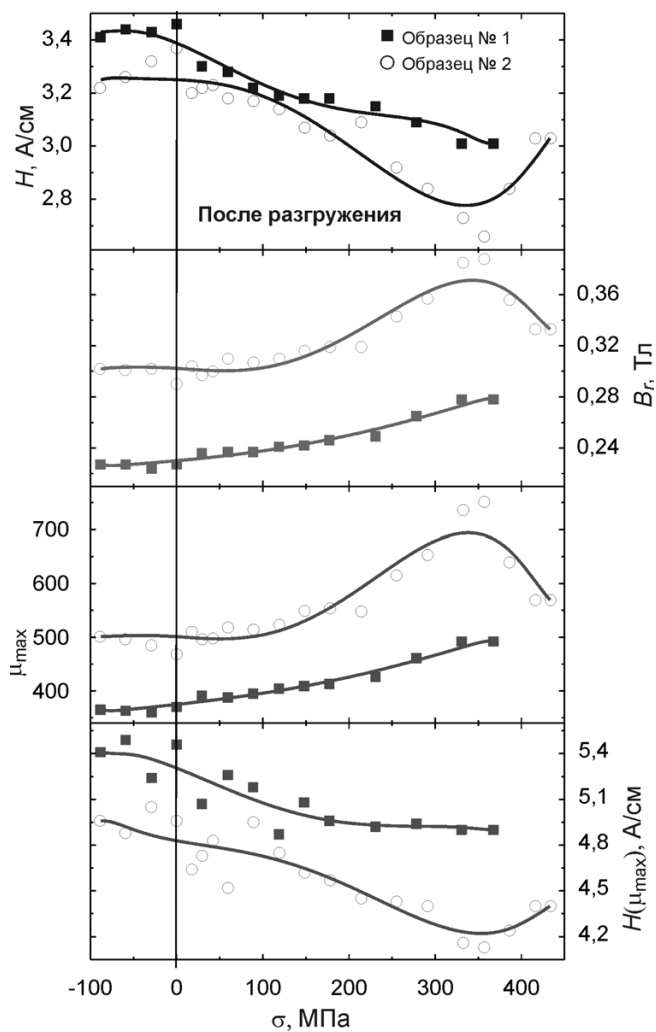


Рис. 4. Зависимости магнитных характеристик от приложенных нормальных напряжений после снятия нагрузки

## Заключение

Исследованы структура, определены механические и магнитные свойства заготовок стали 30ГСЮ6, получаемой в ходе алюмотермического процесса по технологии непрерывного литья и горячей обработки металлов давлением. Исследованная сталь имеет крупнозернистую структуру ( $50 \dots 270$  мкм) с неоднородным распределением карбидов по границам зерен. Твердость этих выделений в полтора раза превышает значения твердости для остального металла. При одноосном растяжении материал разрушается по хрупкому механизму: относительное удлинение составило всего  $1,5\%$  при значении временного сопротивления –  $460$  МПа.

В диапазоне приложенных нормальных напряжений от  $-100$  МПа до  $130$  МПа такие магнитные характеристики, как коэрцитивная сила, мак-

симальная магнитная проницаемость и остаточная индукция, изменяются однозначно, что дает принципиальную возможность для применения методики неразрушающего магнитного контроля для диагностики напряженно-деформированного состояния деталей и элементов конструкций из подобных материалов.

### Список литературы

1. Семенов Б.И., Куштаров К.М. Производство изделий из металла в твердожидком состоянии. Новые промышленные технологии. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 223 с.
2. Современные технологии формообразования в твердожидком состоянии / Б.И. Семенов, Ю.А. Бочаров, К.М. Куштаров, Ю.А. Гладков // Кузнечно-штамповочное производство // Обработка материалов давлением. – 2006. – № 10. – С. 33–43.
3. Сапченко И.Г., Комаров О.Н., Жилин С.Г. Исследование термитных материалов в технологиях получения стальных отливок. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 166 с.
4. Одинокое В.И., Черномас В.В., Ловизин Н.С. Исследование процесса получения металлоизделий из цветных и черных сплавов на установке вертикального литья и деформации металла. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – 107 с.

сток: Дальнаука, 2011. – 107 с.

5. Вонсовский С.В., Шур Я.С. Ферромагнетизм. – М.; – Л.: ОГИЗ, 1948. – 816 с.
6. Бозорт Р. Ферромагнетизм. – М.: ИИЛ, 1956. – 784 с.
7. Дунаев Ф.Н. О магнитной текстуре упруго растянутой трансформаторной стали // Известия вузов, сер. Физика. – 1962. – № 1. – С. 151–153.
8. Зайкова В.А., Шур Я.С. О влиянии растяжения на магнитные свойства и кривые магнитоотрицания кремнистого железа // ФММ. – 1966. – Т. 21. № 5. – С. 664–673.
9. Влияние магнитоупругого эффекта на гистерезисные свойства среднеуглеродистой стали при одноосном нагружении / Э.С. Горкунов, А.М. Поголоцкий, К.Е. Соловьев, С.М. Задворкин // Научные известия на ИТСМ. – 2010. – № 5(115). – С. 29–35.
10. Kersten M. Über die Bedeutung der Koerzitivkraft // Probleme der Technischen Magnetisierungskurve / Hrsg. R.Becker. В.: Springer, 1938. – S. 42–72.
11. Применение магнитных методов для оценки нагруженности и поврежденности стали для магистральных трубопроводов / Э.С. Горкунов, С.Ю. Митропольская, Д.И. Вичужанин, Е.А. Туева // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13. – № 1. – С. 73–82.

### Structure and properties of steel 30GSYU6 has been obtained by continuous casting technology combined deformation of the metal in the solid-liquid

<sup>1</sup>E.A. Putilova, <sup>1</sup>E.S. Gorkunov, <sup>1</sup>S.M. Zadvorkin, <sup>1</sup>D.I. Vichuzhanin,  
<sup>2</sup>V.V. Chernomas, <sup>2</sup>I.G. Sapchenko, <sup>2</sup>O.N. Komarov

<sup>1</sup>Institute of Machinery and Metallurgy, Metallurgov st., 1,  
Komsomolsk-on-Amur, 681005, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of Engineering Science, st. Komsomol'skaja, 34,  
Yekaterinburg, 620049, Russian Federation

#### Abstract

The study results of the structure, mechanical and magnetic properties of hardware item made of steel 30GSYU6 received during aluminothermal reduction of the scale, followed by shaping the combined technology of continuous casting and hot metal forming are presented. By the mean of hardware item samples metallographic study it was found that the grain size increases from the contact surface into the sample and has an equiaxed shape with an inhomogeneous distribution of carbides at their boundaries. Samples mechanical testing showed that the material was destroyed by brittle metal mechanism during uniaxial tensile - the elongation was 1.5 % at the value of tensile strength - 460 MPa.

Determination of the magnetic properties of the samples showed that the range of the applied normal stress of –100 to 130 MPa coercive force, maximum magnetic permeability and remanence change unequivocally, that gives the principal possibility of using the technique for non-destructive magnetic testing for the diagnosis of stress-strain state of parts and structures of these materials.

**Keywords:** metal has been obtained aluminothermal recovery, deformation in a solid-liquid state, structure, mechanical and magnetic properties.

## References

1. Semenov B.I., Kushtarov K.M. *Proizvodstvo izdelij iz metalla v tverdozhidkom sostojanii. Novye promyshlennye tehnologii* (Manufacture of metal fabric in the solid-liquid state. New industrial technology). Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2010. 223 p.
2. Semenov B.I., Bocharov Ju.A., Kushtarov K.M., Gladkov Ju.A. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*, 2006, no. 10, pp. 33-43.
3. Sapchenko I.G., Komarov O.N., Zhilin S.G. *Issledovanie termitnyh materialov v tehnologijah poluchenija stal'nyh otlivok* (Thermite materials analysis in steel castings technology). Vladivostok, Dal'nauka, 2008. 166 p.
4. Odinkov V.I., Chernomas V.V., Lovizin N.S. *Issledovanie processa poluchenija metalloizdelij iz cvetnyh i chernyh splavov na ustanovke vertikal'nogo lit'ja i deformacii metalla* (Process research of obtaining metal fabric from nonferrous and ferrous alloys casting and installing a vertical deformation of the metal). Vladivostok, Dal'nauka, 2011. 107 p.
5. Vonsovskij S.V., Shur Ja.S. *Ferromagnetizm* (Ferrimagnetism). Moscow – Leningrad, OGIz, 1948. 816 p.
6. Bozort R. *Ferromagnetizm* (Ferrimagnetism). Moscow, IIL, 1956. 784 p.
7. Dunaev F.N. *Izvestija vuzov, ser. Fizika*. 1962, no. 1, pp. 151-153.
8. Zajkova V.A., Shur Ja.S. *Fizika metallov i metallovedenie*. 1966, vol. 21, no. 5, pp. 664-673.
9. Gorkunov Je.S., Povolockaja A.M., Solov'ev K.E., Zadvorkin S.M. *Nauchni izvestija na NTSM*. 2010, no. 5(115), pp. 29-35.
10. Kersten M. *Probleme der Technischen Magnetisierungskurve*, Hrsg. R.Becker. B.: Springer, 1938. S. 42-72.
11. Gorkunov Je.S., Mitropol'skaja S.Ju., Vichuzhanin D.I., Tueva E.A. *Fizicheskaja mezomehanika*. 2010, vol. 13, no. 1, pp. 73-82.

# КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ С МАРТЕНСИТО-БЕЙНИТНЫМ ПРЕВРАЩЕНИЕМ АУСТЕНИТА\*

*П.А. ПОПЕЛЮХ, аспирант  
А.И. ПОПЕЛЮХ, канд. техн. наук, доцент  
М.Р. ЮРКЕВИЧ, студентка  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Статья поступила 06 мая 2013 года

**Попелюх А.И.** - 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский  
государственный технический университет, e-mail: [air13@mail.ru](mailto:air13@mail.ru)

Разработан новый способ комбинированной высокотемпературной термомеханической обработки стали 40X2H2MA со смешанным мартенсито-бейнитным превращением аустенита, обеспечивающий сочетание высоких показателей прочности, ударной вязкости и трещиностойкости. В результате термообработки в стали формируется мелкодисперсная структура, состоящая из 60 % нижнего бейнита и 40 % продуктов отпуска мартенсита. Предложенная термическая обработка по сравнению с традиционной технологией закалки с отпуском позволяет при сопоставимых показателях прочности обеспечить двукратное повышение ударной вязкости и трехкратное увеличение усталостных свойств стали 40X2H2MA.

**Ключевые слова:** термическая обработка, термомеханическая обработка, мартенсит, бейнит, ударные механизмы, надежность.

## Введение

В строительной индустрии и добывающих отраслях промышленности получили широкое распространение машины ударного действия, обладающие высокой энергией ударного нагружения. Для их производства необходимо применять материалы, обладающие высокой прочностью и значительным сопротивлением усталостному разрушению при воздействии циклических ударных нагрузок [1]. В настоящее время для изготовления наиболее нагруженных деталей ударных машин используют среднеуглеродистые легированные стали, упрочненные закалкой с последующим отпуском. Однако такой вид термической обработки не позволяет обеспечить высокую надежность и долговечность ударных машин, ресурс работы которых обычно не превышает нескольких сотен часов машинного времени [2]. Проведенные ранее исследования по созданию в стали высокопрочной структуры, обладающей значительным сопротивлением усталостному разрушению, показали, что одной

из перспективных технологий является термическая обработка со смешанным мартенсито-бейнитным превращением аустенита [3]. Высокие механические свойства стали могут быть также обеспечены технологическими процессами, основанными на совмещении термического упрочнения и деформационного воздействия. Исследования, выполненные в научных коллективах М.Л. Бернштейна, Л.И. Тушинского и других ученых, свидетельствуют о том, что использование технологического процесса высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) позволяет увеличить прочностные характеристики высокопрочных среднелегированных сталей по сравнению с традиционным технологическим процессом закалки с отпуском на 200...300 МПа без уменьшения показателей пластичности, и повышает сопротивление стали усталостному разрушению в 1,5–2 раза [4, 5]. Деформация может осуществляться на различных стадиях нагрева и охлаждения, однако для упрочнения деталей ударных машин наиболее рациональным является способ, при котором

\* Работа выполнена в рамках программы «Формирование государственных заданий высшим учебным заведениям на 2013 год и на плановый период 2014 и 2015 годов в части проведения научно-исследовательских работ». Регистрационный номер: 7.759.2011.

сталь деформируют в области существования стабильного аустенита. В этом случае высокотемпературная термомеханическая обработка может являться основой непрерывного высокопроизводительного технологического процесса производства деталей ударных машин, сочетающего операции формообразования и упрочнения. Применение данного технологического процесса повышает дисперсность формируемой структуры мартенсита или бейнита, уменьшает пересыщенность  $\alpha$ -твердого раствора углеродом, что в конечном итоге обеспечивает высокую способность стали к релаксации локальных напряжений и значительное сопротивление разрушению с гарантированно высокими показателями прочности и ударной вязкости.

Цель исследования заключалась в разработке технологии, сочетающей пластическую деформацию в горячем состоянии с получением в стали смешанной высокопрочной мартенсито-бейнитной структуры, которая позволит достичь высоких показателей конструктивной прочности в условиях циклического ударного нагружения.

## 1. Материалы и методы исследования

Суть термомеханической обработки со смешанным мартенсито-бейнитным превращением аустенита (ВТММБ), разработанной на кафедре

материаловедения в машиностроении НГТУ, заключается в следующем. Стальные заготовки нагревают до температуры аустенизации и деформируют, в результате чего в стали формируется структура мелкозернистого аустенита (рис. 1). После деформации заготовки охлаждают с высокой скоростью в расплаве селитры до температуры  $T_n$ , находящейся между температурами начала и окончания мартенситного превращения. В условиях переохлаждения происходит частичный распад аустенита с образованием в стали определенного количества мартенсита. Финальная стадия термической обработки заключается в нагреве заготовки до температуры промежуточного превращения  $T_{из}$ , при которой оставшийся аустенит превращается в структуру нижнего бейнита, а образовавшийся ранее мартенсит отпускается. Принципиальное отличие разработанной технологии высокотемпературной термомеханической обработки со смешанным мартенсито-бейнитным превращением аустенита (ВТММБ) от известных технологических процессов высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) (рис. 1, б) и термомеханической изотермической обработки с бейнитным превращением переохлажденного аустенита (ВТМИЗО) заключается в том, что в стали формируется мелкодисперсная смешанная структура, состоящая из нижнего бейнита и продуктов отпуска мартенсита.

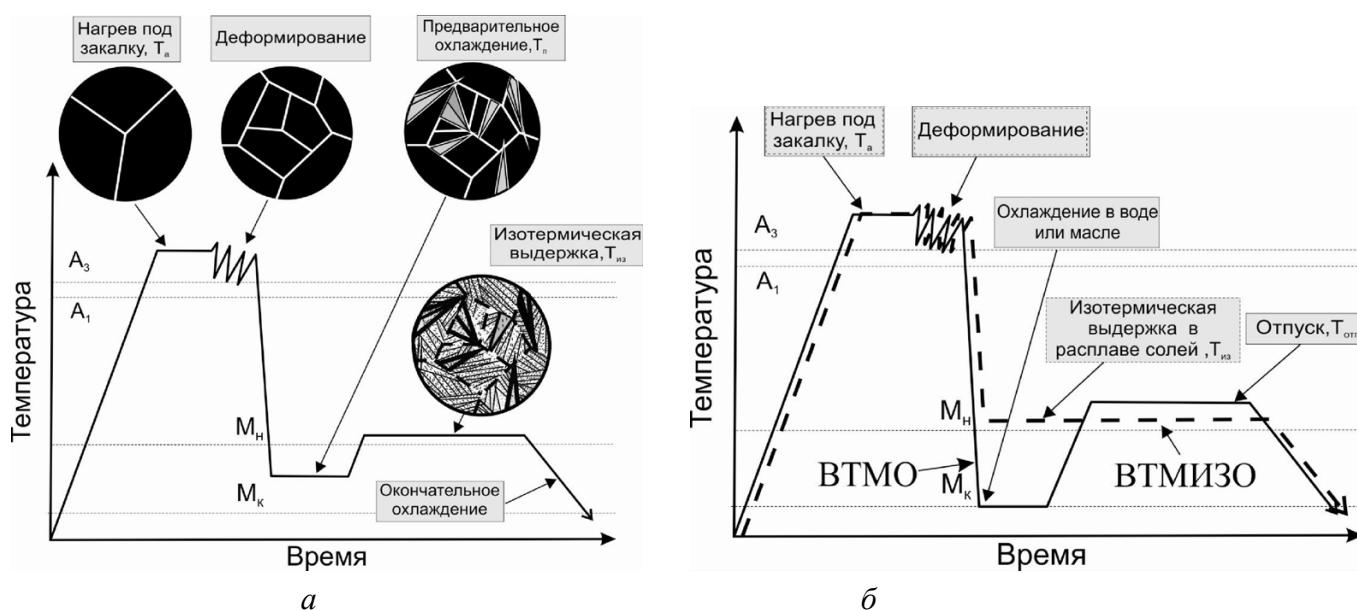


Рис. 1. Схема высокотемпературной термомеханической обработки со смешанным мартенсито-бейнитным превращением аустенита ВТММБ (а), высокотемпературной термомеханической обработки ВТМО и термомеханической изотермической обработки с бейнитным превращением переохлажденного аустенита ВТМИЗО (б)



Предлагаемая обработка имеет ряд достоинств. Горячая деформация приводит к измельчению зерен аустенита, способствует формированию при охлаждении развитой субструктуры  $\alpha$ -твердого раствора и измельчению пластин мартенсита и бейнита. При ВТММБ-обработке мартенситное превращение характеризуется своей незавершенностью. Мартенситные кристаллы окружены аустенитом, обеспечивающим релаксацию внутренних напряжений в стали. Кроме того, мартенсит преимущественно образуется в микрообъемах, обедненных углеродом и обладающих повышенной температурой начала мартенситного превращения  $M_{\text{н}}$ , что способствует образованию в структуре стали речного мартенсита, характеризующегося по сравнению с двойникованным повышенной вязкостью разрушения.

В качестве материала для исследования была использована высококачественная среднеуглеродистая легированная сталь марки 40X2H2MA, которая широко используется для изготовления наиболее ответственных деталей ударных машин. Высокотемпературную термомеханическую обработку стали 40X2H2MA с мартенситобейнитным превращением аустенита (ВТММБ) проводили по следующему режиму. Заготовки из стали размером 20×50×7 мм нагревали до температуры 910 °С и выдерживали при этой температуре в течение 20 минут. Затем производили прокатку заготовок с деформацией 40 % с последующим ускоренным охлаждением в расплаве солей при температуре 270 °С в течение 5 минут. Дальнейшую изотермическую выдержку производили в камерной печи при температуре 350 °С. Окончательное охлаждение заготовок осуществляли на спокойном воздухе. Режим деформирования стали был выбран на основании результатов научных исследований технологии регулируемого термопластического упрочнения, длительное время проводимых под руководством Л.И. Тушинского на кафедре материаловедения в машиностроении НГТУ [5]. Деформация со степенью 40 % обеспечивает эффективное измельчение структуры аустенита и формирование мелкодисперсной структуры с высоким уровнем механических свойств. Температуры предварительного охлаждения 270 °С и изотермического превращения с распадом в бейнитной области 350 °С были выбраны в соответствии с резуль-

татами научных исследований [3]. При данных режимах в стали формируется структура с объемными долями мартенсита и бейнита 40 и 60 % соответственно, что обеспечивает сочетание высоких прочностных характеристик со значительными показателями сопротивления усталостному разрушению.

Эффективность предлагаемого способа термической обработки оценивалась путем сравнения со свойствами стали после закалки и отпуска, изотермической закалки, высокотемпературной термомеханической обработки с бейнитным превращением (ВТМИЗО) и технологии высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО). Все вышеуказанные технологические процессы обеспечивали формирование в стали структуры твердостью HRC 36-46, которая, по литературным данным, обеспечивает наивысшие показатели сопротивления усталостному разрушению.

Закалку с отпуском проводили по следующим режимам: нагрев до 870 °С с выдержкой при этой температуре в течение 20 минут, охлаждение в масле и отпуск в камерной печи в течение одного часа при температуре 400 °С. Изотермическую обработку с распадом аустенита в бейнитной области выполняли следующим образом: нагрев до 870 °С с выдержкой при этой температуре в течение 20 минут, охлаждение в расплаве солей при температуре 350 °С с выдержкой в течение одного часа. Технологический процесс ВТМИЗО проводили по следующей схеме: нагрев стали до 910 °С с выдержкой при этой температуре в течение 20 минут, прокатка со степенью деформации 40 %, охлаждение и изотермическая выдержка в расплаве солей при температуре 350 °С в течение одного часа. Обработку ВТМО осуществляли по следующим режимам: нагрев стали до 910 °С, выдержка при этой температуре в течение 20 минут, прокатка со степенью деформации 40 %, быстрое охлаждение в масле и последующий отпуск в камерной печи при температуре 400 °С в течение одного часа.

В качестве критериев для сравнения эффективности различных видов термической и термомеханической обработки стали использовали твердость по Роквеллу, механические свойства при испытаниях на растяжение, ударный изгиб и усталость. Определение прочностных характеристик материалов при статических испыта-

ниях на растяжение проводили на универсальной сервогидравлической системе Instron 3369. Использовали плоские пропорциональные образцы XIII типа. Испытания на ударный изгиб проводили на маятниковом копре Instron 9050 на образцах 14 типа V образным надрезом. Оценка сопротивления усталостному разрушению проводили на испытательном комплексе Instron 8801. Плоские образцы размером  $3,4 \times 20 \times 100$  с концентратором напряжения испытывали по схеме растяжения-сжатия с частотой 5 Гц. Амплитуда нагрузки составляла  $\pm 17,5$  кН. При проведении испытаний фиксировали время зарождения и распространения в образцах усталостных трещин, а также использовали метод оценки трещиностойкости материалов, основанный на построении и анализе кинетических диаграмм усталостного разрушения (КДУР). Механические свойства рассчитывали по результатам испытаний серии из трех образцов. Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе Carl Zeiss AxioObserver A1m при увеличении от 25 до 1000 крат. Фрактографические исследования разрушенных образцов осуществляли на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO 50 XVP.

## 2. Результаты экспериментов и их обсуждение

Результаты статических испытаний на растяжение показывают, что высокие прочностные характеристики стали могут быть обеспечены различными видами обработки, основанными на получении структуры мартенсита (см. таблицу). Это технологические процессы закалки с отпуском, высокотемпературной термомеханической

обработки (ВТМО) и высокотемпературной термомеханической обработки с мартенсито-бейнитным превращением аустенита (ВТММБ). Технологии ИЗО или ВТМИЗО, при которых в стали формируется структура нижнего бейнита различной дисперсности, обеспечивают показатели условного предела текучести и временного сопротивления стали на 400...500 МПа меньше, чем традиционный технологический процесс закалки с отпуском (при сопоставимых температурах изотермического превращения и отпуска). Технологические процессы, в которых используется горячая пластическая деформация аустенита, обеспечивают 10...15 %-е увеличение прочности стали при одновременном 10...20 %-м росте показателей ударной вязкости и усталостной долговечности по сравнению с аналогичными технологиями без этой операции.

Фрактографические исследования образцов после испытаний на ударный изгиб показали, что закаленная и отпущенная сталь имеет смешанный излом с локализованными участками хрупкого и вязкого разрушения приблизительно равной площади (рис. 2, а). Анализ поверхности разрушения образцов, упрочненных по технологии ВТМО, показывает, что пластическая деформация стали в горячем состоянии приводит к увеличению доли вязкой составляющей и, как следствие, росту вязкости разрушения. Площадь участков, на которых разрушение происходит хрупко, составляет 10...15 % от общей площади поверхности разрушения (рис. 2, б). Разрушение образцов, упрочненных по технологии ВТМИЗО или изотермической закалки с распадом аустенита в бейнитной области, происходит преимущественно по механизму хрупкого квазискола с образованием на поверхности разрушения мел-

Механические свойства стали 40X2H2MA после различных видов термического упрочнения

Способ термического упрочнения	HRC	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	KCV, Дж/см <sup>2</sup>	Долговечность, цикл
Закалка с отпуском, $T_{отп} = 400$ °C	45	1267	1484	46	31920
Изотермическая закалка, $T_{из} = 350$ °C	35	750	1080	42	45390
ВТМИЗО	37	876	1094	45	50190
ВТМО	46	1446	1483	59,7	33000
ВТММБ	47	1439	1597	96,6	67320

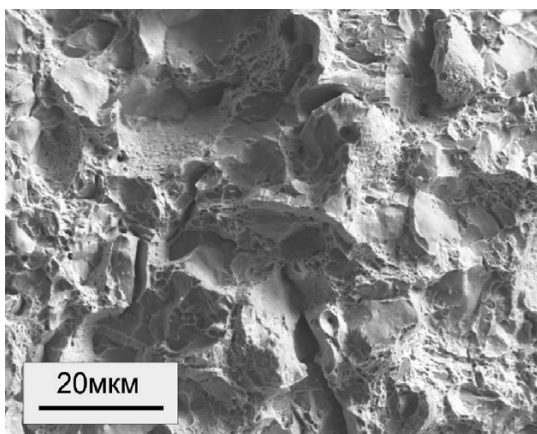
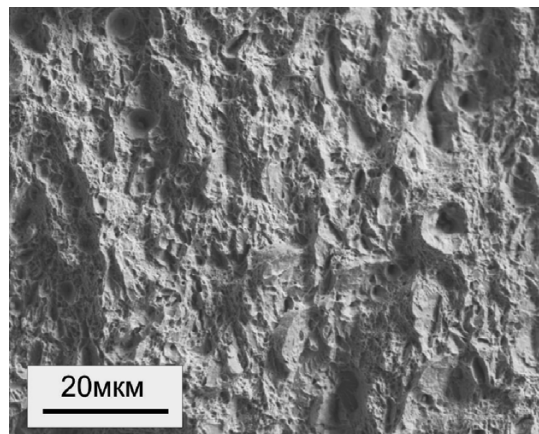
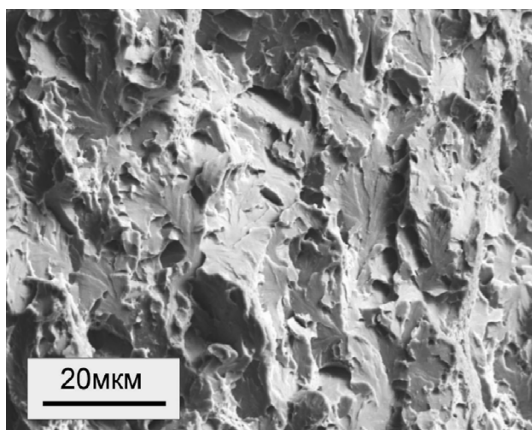
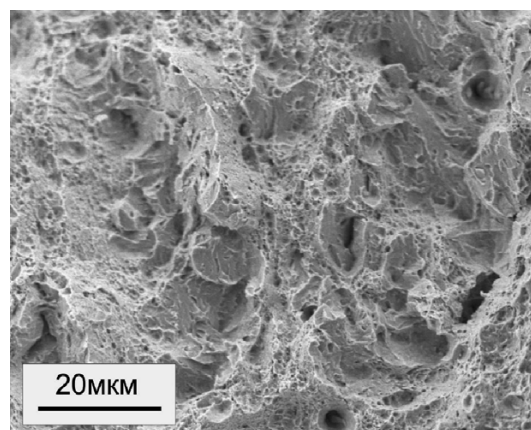

*a*

*б*

*в*

*г*

Рис. 2. Поверхность разрушения образцов после испытаний на ударный изгиб:

*a* – закалка + отпуск при 400 °С; *б* – обработка по технологии VTMO;  
*в* – обработка по технологии VTMIZO; *г* – обработка по технологии VTMMБ

ких фасеток со слабо выраженными следами пластической деформации (рис. 2, *в*). Сталь после комбинированной термической обработки со смешанным мартенсито-бейнитным превращением аустенита (VTMMБ) разрушается преимущественно вязко с незначительным количеством участков хрупкого разрушения (рис. 2, *г*). Поверхность излома имеет развитый рельеф, что может быть объяснено тем, что трещина часто меняет свое направление. Распространение трещины, как правило, совпадает с границами областей отпущенного мартенсита и нижнего бейнита. Частая переориентация трещины увеличивает энергоемкость процесса разрушения и соответственно сопротивление стали разрушению в условиях динамического изгиба.

Одним из важнейших показателей конструктивной прочности деталей ударных машин является их сопротивление усталостному разрушению. Оценку эффективности различных

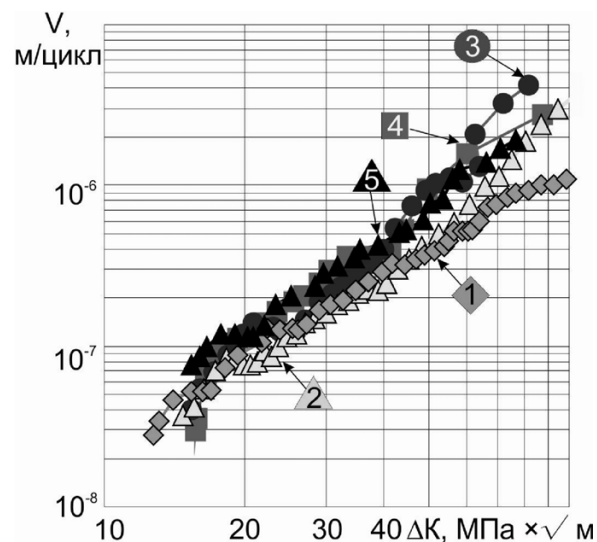


Рис. 3. Кинетические диаграммы усталостного разрушения стали, после различных видов упрочнения:

1 – VTMMБ; 2 – VTMIZO; 3 – изотермическая закалка при 350 °С; 4 – закалка + отпуск 400 °С; 5 – VTMO

способов термической обработки осуществляли путем сравнения показателей циклической долговечности и скорости роста усталостной трещины на втором (линейном) участке кинетической диаграммы усталостного разрушения. Установлено, что высокотемпературная пластическая деформация увеличивает сопротивление зарождению и распространению усталостных трещин. Наилучшими свойствами обладают образцы, упрочненные по технологии ВТММБ (рис. 3). Скорость роста усталостных трещин в них в 2-3 раза ниже, а общая долговечность более чем в два раза выше по сравнению с образцами из стали 40Х2Н2МА, упрочненными традиционной технологией закалки с отпуском. Значительным сопротивлением распространению усталостных трещин обладает также сталь, обработанная по технологии изотермической закалки или ВТМИЗО. Однако использование технологического процесса ВТМИЗО не обеспечивает высоких показателей прочности и твердости стали.

### Выводы

Высокотемпературная термомеханическая обработка с мартенсито-бейнитным превращением аустенита (ВТММБ) является эффективным способом упрочнения, позволяющим обеспечить высокую прочность и трещиностойкость стали. Сталь 40Х2Н2МА, обработанная по технологии ВТММБ, при сопоставимых показателях прочности имеет в три раза выше усталостные свойства по сравнению с закаленной и отпущенной

сталью и в полтора раза выше по сравнению со сталью, упрочненной по известным технологиям ВТМО и ВТМИЗО. Технологический процесс высокотемпературной термомеханической обработки со смешанным мартенсито-бейнитным превращением аустенита может быть применен при прокатке заготовок бурового инструмента или штамповке малогабаритных деталей ударных машин, например, ударников отбойных молотков и перфораторов.

### Список литературы

1. Червов В.В. Перспективы совершенствования пневмоударных машин для строительных технологий. «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды». Труды конференции с участием зарубежных ученых (28 июня–2 июля 2010). ТП. Машиноведение. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010. – С. 59–65.
2. Иванов К.И., Латышев В.А., Андреев В.Д. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. – М.: Недра, 1987. – 272 с.
3. Попелюх А.И., Батаев А.А., Теплых А.М., Огнев А.Ю., Головин Е.Д. Способ термической обработки инструментальной стали со смешанным мартенситно-бейнитным превращением аустенита // Сталь. – 2011. – № 4. – С. 69–73.
4. М.Л. Бернштейн, В.А. Займовский, Л.М. Капуткина. Термомеханическая обработка стали. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.
5. Тушинский Л.И. Теория и технология упрочнения металлических сплавов / отв. ред. Е.И. Шемякин; Акад. наук СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела. – Новосибирск: Наука, 1990. – 303 с.

### Combined thermomechanical treatment of steel with martensite-bainite transformation of austenite

P.A. Popelyukh, A.I. Popelyukh, M.R. Yurkevich

Novosibirsk State Technical University, Karl Marx avenue, 20,  
Novosibirsk, 630073, Russian Federation

### Abstract

A new method for thermo-mechanical treatment of steel 40H2N2MA concerned mixed martensite-bainite transformation of austenite is developed. The thermo-mechanical processing includes hot deformation and rapid cooling down to the temperature in the range between the beginning and finishing of martensitic transformation accompanying with 40% martensite formation. The final stage of heat treatment is to heat up to the temperature of bainite transformation in which the remaining austenite transforms into the structure of bainite and previously formed martensite tempers. The superfine steel structure consists of 60 % bainite and 40% the tempered martensite

is obtained. In comparison with well known techniques of thermal treatment, the developed thermo-mechanical treatment increases the impact toughness of the steel 40H2N2MA up to 1.3 - 2 times and fatigue crack resistance up to 1.5 - 3 times (at equal values of strength parameters). The technological process of high-temperature thermo-mechanical treatment with mixed martensitic-bainitic transformation of austenite is recommended for treatment of rolling billets, drilling tools or small parts of stamping impact machines.

**Keywords:** thermal treatment, thermo mechanical treatment, martensite, bainite, impact machines, reliability.

## References

1. Chervov V.V. *Perspektivy sovershenstvovanija pnevmoudarnyh mashin dlja stroitel'nyh tehnologij* (Prospects for improving pneumatic percussive machines for building technologies.) "Fundamental problems of technogenic geoenvironment formation." Proceedings of the conference with foreign participants (June 28-July 2, 2010). Vol.III, Mashinovedenie, Novosibirsk, Institute of Mining of SB RAS, 2010, pp. 59-65.
2. Ivanov K.I. Latyshev V.A. Andreev V.D. *Tehnika burenija pri razrabotke mestorozhdenij poleznych iskopajemyh* (Drilling technique in the development of mineral deposits). Moscow, Nedra, 1987. 272 p.
3. Popelyukh P.A., Bataev A.A., Teplyh A.M., Ognev A. Yu., Golovin E.D. *Stal'*, 2011, no. 4, pp. 69-73.
4. Bernshtejn M.L., Zajmovskij V.A., Kaputkina L.M. *Termomehanicheskaja obrabotka stali* (Thermomechanical processing of steel). Moscow, Metallurgija, 1983. 480 p.
5. Tushinskij L.I. *Teorija i tehnologija uprochnenija metallicheskih splavov* (Theory and technology of hardening of metal alloys). USSR Academy of Sciences, Siberian Branch, Institute of Mining, Novosibirsk, Nauka, 1990. 303 p.



**mashEX**  
SIBERIA  
Международная выставка  
машиностроения  
и металлообработки

## ПРЕСС-РЕЛИЗ

Новосибирск, 4 апреля 2013

### Mashex Siberia 2013: Итоги выставки

*С 26 по 29 марта «ITE Сибирская Ярмарка» провела в Новосибирском Экспоцентре международную выставку машиностроения, металлургии и металлообработки. Мероприятие прошло в 15-й раз, но впервые – под новым названием Mashex Siberia.*

В этом году в выставке приняли участие 170 компаний из 24 городов России, а также из Китая, Турции, Чехии, Германии и Латвии. Экспозиция заняла площадь более 2200 м<sup>2</sup> нетто, что на 24 % больше, чем в 2012 году. За четыре дня работы выставку посетили 3125 специалистов отрасли, большая часть которых – жители регионов СФО.

Впервые на Mashex Siberia был организован объединенный стенд машиностроительных предприятий Баварии (Германия), на котором семь компаний представили очистные системы, предохранительные муфты и автоматические тормоза, системы фильтрации для промышленности, датчики и джойстики для управления, смазочные материалы, системы автоматизированного программирования.

«Три года назад мы приезжали с делегацией в Новосибирск, чтобы оценить регион, рынок, стали подробнее изучать те выставки, в которых можно участвовать, – говорит представитель комитета Баварии по внешнеэкономической деятельности Кай Валлизер. – Большинство компаний довольны участием в выставке: первые два дня были очень насыщенными. Мы планируем участвовать в следующем году, возможно, немного изменится состав: какие-то участники останутся, но мы планируем найти новых экспонентов».

В экспозиции были представлены пять разделов: машиностроение, металлообработка, сварка, металлургия и промышленная автоматизация. Среди участников выставки – DMG Rusland, «Абамет-НСК», «Станкомашстрой», «Совместное предприятие «Донпрессмаш», «ЦЭПР», «Шторм», «Арсил», «Государственный Рязанский приборный завод», «НПК Томский инструмент», «Компания МЕГАТУЛС», «Клингспор», «Клинкманн СПб», «Альфа Инжиниринг», «НПК Альфа-Интех».

В рамках деловой программы состоялся промышленный форум «Кооперация науки и производства», организаторами которого выступили Новосибирский региональный центр субконтракта и министерство промышленности, торговли и развития предпринимательства Новосибирской области. Помимо докладов представителей производственных и консалтинговых предприятий (НРЦСК, ООО ТД «СибПГП», «МГ Консалтинг») на форуме была организована дискуссия на тему «Почему на промышленных предприятиях упразднена система технического обслуживания и ремонта оборудования?», в которой активно участвовали представители

26 – 29 марта, 2013 года

Россия, Новосибирск,  
Станционная, 104



ITE Сибирская Ярмарка  
Тел.: +7 (383) 363-00-63  
+7 (383) 363-00-36  
Email: Shnitova@sibfair.ru  
www.mashex-siberia.ru

Международная выставка  
машиностроения  
и металлообработки



крупных региональных промышленных предприятий («Завод Труд», НЗХК, «Акор Директ» и др.)

Участники дискуссии спорили о том, что выгоднее — отдавать обслуживание оборудования на аутсорсинг или справляться собственными силами, насколько дорого обходится содержание собственного ремонтного отдела и готовы ли предприятия формулировать рыночный заказ на услуги аутсорсера. Представители предприятий жаловались также на серьезное отставание в системе технического ремонта оборудования и отсутствие хороших управленческих кадров.

В этот же день в соседнем конференц-зале прошла XI Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе». Ее организаторами выступили ОАО НПТ и ЭИ «ОРГСТАНКИНПРОМ» (Новосибирск), ООО НПК «МАШСЕРВИСПРИБОР» (Новосибирск), НГТУ, журнал «Обработка металлов», КузГТУ, АлтГТУ им. И. И. Ползунова, Бийский технологический институт АлтГТУ, Сибирский государственный индустриальный университет, ОАО «Первый Кемеровский авторемонтный завод», Томский политехнический университет.

К конференции выпущен сборник материалов, включающий разделы: «Инновационные технологии в машиностроении», «Оборудование. Инструмент», «Материаловедение в машиностроении», «Экономика и организация инновационных процессов в машиностроении».

Завершилась выставка традиционным награждением победителей конкурса «Золотая медаль «ITE Сибирская Ярмарка». Главную награду — большую золотую медаль получили: «Предприятие «Сенсор» (за разработку и реализацию наукоемкой технологии наноструктурирования поверхностных слоев конструкционных сталей), ТД «Воткинский завод» (за успешную модернизацию, выпуск и реализацию вертикально-фрезерного станка VM127M), DIS Dry Ice Systems GmbH & Co, Германия (за трансфер высоких технологий и оборудования очистки загрязненных поверхностей и широкий спектр применения в различных сферах), «Фишер Шпиндель Технолоджи» (за внедрение диагностики, ремонт фрезерных и шлифовальных шпинделей всех производителей на основе разработанной оснастки и новых алгоритмов уникальных технологий плазменного напыления) и «Акор Директ» (за внедрение новых технологий высокотехнологичных производств в металлообработке).

«Группа компания «Акор Директ» участвует в Mashex второй раз, и для нас — это самая главная выставка, потому что мы компания, вся история которой связана с Новосибирском, — говорит исполнительный директор «Акор Директ» Александр Рубцов. — Мы участвуем во многих выставках в регионах России, в Москве, в Германии и всегда стараемся принести сюда, на наш российский рынок, новые идеи. В то же время мы уже понимаем, что и европейский рынок заинтересован в наших идеях и в нашем умении творчески переработать то хорошее, доброе, светлое, что на сегодняшний день уже есть — в конструктиве, в инжиниринге и других направлениях. Для нас Mashex — это апробация этих идей и реализация».

В 2014 году выставка Mashex Siberia пройдет с 25 по 28 марта в новосибирском Экспоцентре.



ITE Сибирская Ярмарка  
Тел.: +7 (383) 363-00-63  
+7 (383) 363-00-36  
Email: Shnitova@sibfair.ru  
www.mashex-siberia.ru

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

**Научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)»** публикует статьи, содержащие новые и оригинальные результаты исследований по следующим научным направлениям (рекомендованные ВАК): 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, 05.02.08 – Технология машиностроения, 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение).

Статью с приложениями и их электронные версии на CD можно направлять в редакцию **по почте** либо **по электронной почте (metal\_working@mail.ru)**. Одновременно со статьей высылается **оригинал экспертного заключения** о возможности открытого опубликования статьи на почтовый адрес редакции: 630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 274, зам. гл. редактора *Атапин В.Г.*

Все рукописи рецензируются.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

### Требования к оформлению рукописей

Текст набирается в русифицированном редакторе **Microsoft Word 97-2003**. Формат оригиналов – **A4**. Шрифт – **Times New Roman**, размер шрифта основного текста – **14 пт**, параметры страницы – все поля **2 см**. Выравнивание по ширине. Межстрочный интервал **полуторный**. Абзацный отступ – **1,25 см**. Переносы включены. Рисунки, таблицы, графики, фотографии должны быть четкими и понятными, могут быть включены в текст статьи.

Научная публикация должна иметь следующую структуру:

1. **Заглавие** (должно быть как можно короче и отражать содержание текста).

2. **Аннотация:**

- на русском языке на основе ГОСТ 7.9-95 – сжатый обзор содержания работы (по ГОСТ **не менее 10 строк, 850 знаков**), указывает на ключевые проблемы, на подход к этим проблемам и на достижения работы; следует применять значимые слова из текста статьи;

- на английском языке - по объему больше аннотации на русском языке и включает **100-250 слов**, рекомендуется следовать хронологии статьи, использовать англоязычную специальную терминологию, не включать несущественные детали и использовать активный, а не пассивный залог, избегать сложных грамматических конструкций (не применимых в научном английском языке).

3. **Ключевые слова** (должны отображать содержание работы). На английском языке - использовать термины из контролируемых словарей.

4. **Введение** (краткий обзор по состоянию проблемы с цитатами или ссылками на актуальную литературу; в конце раздела необходимо сформулировать цель или задачу нового исследования и то как вы это сделали).

5. **Теория** (для теоретических работ) или **методика экспериментального исследования** (для экспериментальных работ). Следует избегать повторений, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

6. **Результаты и обсуждение.**

7. **Выводы** (по результатам работы, описанной в данной статье; следует быть лаконичным).

8. **Список литературы** (оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка»).

### Краткие требования к набору рукописей

**Единицы физических величин.** При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц (СИ).

**Таблицы** нумеруются, если их число более одной. Заголовок необходим, когда таблица имеет самостоятельное значение, без заголовка дают таблицы вспомогательного характера.

**Математические формулы.** Сложные и многострочные формулы должны быть целиком набраны в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. Используется только сквозная нумерация.

**Рисунки** представляются в форматах TIFF, PNG, JPEG, BMP, WMF. *Рисунки, сканированные откуда-либо, не принимаются.* Рекомендуемые размеры рисунков: 60 × 150, 60 × 70 мм. **Библиографический список**, оформленный в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка», составляется по



ходу упоминания литературы в тексте и приводится в конце рукописи. Ссылки в тексте на литературу даются в квадратных скобках, например [1], [2, 3], [4–7], [4, стр. 23–28].

### Пример оформления статьи

УДК 621.9.06:518.4

#### ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БАЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

*В.Г. ИВАНОВ, доктор техн. наук, профессор,  
....., канд. техн. наук, доцент,  
В.С. ПЕТРОВ, аспирант, ....., магистрант,  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

**Иванов В.Г.** – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский  
государственный технический университет, e-mail: **metal\_working@mail.ru**

**Аннотация** (не менее 10 строк, 850 знаков)

**Ключевые слова**

<текст статьи с четко выраженной структурой>

1. Введение
2. Теория или методика экспериментального исследования или материалы и методы и др.
3. Результаты и обсуждение
4. Выводы
5. Список литературы

**Choice of design parameters of base details at the design stage**

V.G. Ivanov, ....., V.S. Petrov, .....

**Abstract** (100-250 слов)

**Key words**

На отдельном листе приводится информация для РИНЦ (исполнение обязательно).

### Пример оформления сведений для РИНЦ:

УДК  
621.9.06

**Расчетная оценка упругих деформаций фундамента многоцелевого станка**

Иванов Владимир Григорьевич, Петров Виктор Сергеевич, ....

*Новосибирский государственный технический университет, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20*

**Аннотация**

Рассматривается расчет упругих деформаций фундамента тяжелого многоцелевого станка на абсолютно жестком основании и на упругом винклеровом основании. Показано, что от толщины фундамента существенно зависит деформирование его поверхности. ...

**Ключевые слова**

фундамент, многоцелевой станок, упругие деформации, метод конечных элементов.

**Литература**

1. Каминская В.В., Решетов Д.Н. Фундаменты и установка металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1975. – 208 с.
2. Атапин В.Г. Проектирование рациональных несущих конструкций многоцелевых станков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2008. – №4(41). – С. 18–25.
3. Атапин В.Г. Оценка параметров несущих конструкций тяжелого многоцелевого станка на этапе проектирования // Вестник машиностроения. – 2007. – № 2. – С. 61–64.

**Calculation of elastic deformations the base of the multi-purpose machine tool**

V.G. Ivanov, V.S. Petrov, ....

The calculation of the elastic deformations of the heavy multi-purpose machine for absolutely rigid basis and on an elastic basis is considered. It is shown that the thickness of substantially depends on the deformation of its surface. ...

**Keywords**

foundation, machining center, elastic deformations, finite element method.