

# УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 7 (91)

ИЮЛЬ

2012

Издается с января 2005 г.

**Главный редактор**

д-р техн. наук  
Ю.В. ПАНФИЛОВ

**Председатель редакционного совета**

д-р техн. наук, заслуженный  
деятель науки и техники РФ  
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

**Заместитель главного редактора**

д-р физ.-мат. наук  
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

**Заместители председателя редакционного совета:**

д-р техн. наук  
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН

д-р техн. наук  
А.В. КИРИЧЕК

д-р техн. наук  
О.В. ЧУДИНА

**Редакционный совет:**

Ю.П. АНКУДИМОВ  
А.П. БАБИЧЕВ  
В.П. БАЛКОВ  
В.М. БАШКОВ  
А.И. БЕЛИКОВ  
С.Н. ГРИГОРЬЕВ  
В.А. ЗЕМСКОВ  
С.А. КЛИМЕНКО  
В.А. ЛАШКО  
В.А. ЛЕБЕДЕВ  
В.В. ЛЮБИМОВ  
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО  
Х.М. РАХИМЯНОВ  
Б.П. САУШКИН  
В.П. СМОЛЕНЦЕВ  
А.М. СМЫСЛОВ  
Г.А. СУХОЧЕВ  
В.П. ТАБАКОВ  
В.А. ШУЛОВ  
М.Л. ХЕЙФЕЦ

**Редакция:**

Е.П. ЗЕМСКОВА  
Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогам: "Роспечать" 85159, "Пресса России" 39269, "Почта России" 60252) или в издательстве.  
Тел.: (499) 269-52-98, 269-66-00, 268-40-77.  
Факс: (499) 269-48-97.  
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.  
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-17733 от 09.03.04 г.

## СОДЕРЖАНИЕ



### МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

**Беляев В.Н., Татаркин Е.Ю.** Повышение износостойкости деталей нанесением меди на поверхность при обкатывании с гидроприводом ..... 3

**Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А., Махалов М.С.** Современные конкурентоспособные технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностей пластическим деформированием ..... 7

**Отений Я.Н., Никифоров Н.И., Алабин В.И., Лаврентьев А.М.** Обеспечение точности формы при обработке ротационным обжатием длинных тонкостенных труб ..... 12



### ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

**Беликов А.И., Белов С.Е., Боровков М.Н., Иляхинский И.А., Долгов С.А., Калинин В.Н., Седых Н.С., Шарапков М.А.** Исследование трибологических характеристик тонкопленочных антифрикционных упрочняющих композитных покрытий при сухом трении в среде гелия ..... 17

**Штерцер А.А., Злобин С.Б., Ульяницкий В.Ю.** Термоциклические свойства градиентных покрытий керамика–металл, полученных детонационным напылением ..... 23

**Шулов В.А., Теряев Д.А., Перлович Ю.А., Исаенкова М.Г., Фесенко В.А., Быценко О.А., Энгелько В.И., Ткаченко К.И.** Текстуробразование в поверхностных слоях мишеней из сплава ВТ9 при их облучении сильноточными импульсными электронными пучками ..... 27

**Ярьско С.И., Горяинов Д.С.** Формирование температурного поля в режущем клине инструмента при импульсной упрочняющей лазерной обработке ..... 30



### ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

**Гадалов В.Н., Романенко Д.Н., Маркелов Е.А., Квашнин Б.Н., Романенко А.Г.** Перспективы использования коррозионно-стойкой стали 40X13 ..... 37



### ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

**Небольсин Д.М., Сухочев Г.А., Коденцев С.Н., Смольяникова Е.Г.** Технологические параметры комбинированной струйно-динамической обработки внутренних поверхностей ..... 41

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Упрочняющие технологии и покрытия", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

# STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 7 (91)

July

2012

Since 2005, January

**Editor-in-Chief**  
Dr of Eng. Sci.  
Yu.V. PANFILOV

**Chair of Editorial Council**  
Dr of Eng. Sci., The honoured  
worker of a science and  
technics of the RF  
V.F. BEZYAZHCHNYI

**Editorial Assistants**  
Dr of Phys. Math. Sci.  
V.Yu. FOMINSKY

**Chairman Assistants:**  
Dr of Eng. Sci.  
V.Yu. BLUMENSTEIN  
Dr of Eng. Sci.  
A.V. KIRICHEK  
Dr of Eng. Sci.  
O.V. CHUDINA

**Editorial council:**  
Yu.P. ANKUDIMOV  
A.P. BABICHEV  
V.P. BALKOV  
V.M. BASHKOV  
A.I. BELIKOV  
S.N. GRIGORIEV  
V.A. ZEMSKOV  
S.A. KLIMENKO  
V.A. LASHKO  
V.A. LEBEDEV  
V.V. LYUBIMOV  
F.I. PANTELEENKO  
H.M. RAHIMYANOV  
B.P. SAUSHKIN  
V.P. SMOLENTSEV  
A.M. SMYSLOV  
V.A. SHULOV  
G.A. SUHOCHEV  
V.P. TABAKOV  
M.L. KHEIFETS

**Edition:**  
E.P. ZEMSKOVA  
T.V. PARAYSKAYA

Journal is spreaded on a subscription,  
which can be issued in any post office  
(index on the catalogues: "Rospechat"  
85159, "Pressa Rossii" 39269, "Pochta  
Rossii" 60252) or in publishing office.  
Ph.: (499) 269-52-98, 269-66-00,  
268-40-77. Fax: (499) 269-48-97  
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Journal is registered by RF Ministry  
Tele- and Broadcasting of Mass  
Communications Media. The certificate  
of registration ПИ № 77-17733,  
March 9, 2004

## CONTENTS



### MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

**Belyaev V.N., Tatarkin E.Yu.** Increase in parts wear resistance by applying copper onto the surface on rolling with hydraulic drive . . . . . 3

**Blumenstein V.Yu., Krechetov A.A., Mahalov M.S.** State-of-the-art competitive technologies of finishing and strengthening treatment with surface plastic deformation . . . 7

**Oteniy Ya.N., Nikiforov N.I., Alabin V.I., Lavrentiev A.M.** Ensuring the accuracy of the form of rotary processing of long thin-walled tubes . . . . . 12



### PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

**Belikov A.I., Belov S.E., Borovkov M.N., Iliahinskiy I.A., Dolgov S.A., Kalinin V.N., Sedyh N.S., Sharapkov M.A.** Hardened solid lubricant thin film composite coatings tribological properties in helium conditions researches . . . . . 17

**Shtertser A.A., Zlobin S.B., Ulianitsky V.Yu.** Thermocyclic properties of gradient ceramics–metal coatings made by detonation spraying . . . . . 23

**Shulov V.A., Teryaev D.A., Perlovich Yu.A., Isaenkova M.G., Fesenko V.A., Bytzenko O.A., Engelko V.I., Tkachenko K.I.** Creation of texture into surface layers of targets from BT9 titanium alloy during their irradiation with intense pulsed electron beams . . . . . 27

**Yaresko S.I., Goryainov D.S.** Formation of a temperature field in a cutting wedge of the tool at pulse laser hardening . . . . . 30



### CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

**Gadalov V.N., Romanenko D.N., Markelov E.A., Kvashnin B.N., Romanenko A.G.** Prospects of use of stainless steel 40X13. . . . . 37



### PROCESSING BY COMBINED METHODS

**Nebolsin D.M., Suhochev G.A., Kodentsev S.N., Smolyannikova E.G.** Technological parameters of combination of jet-dynamic processing of internal surfaces . . . . . 41

Reprint is possible only with the reference to the journal  
"Strengthening technologies and coatings"

Journal is included in the List of the Highest Attestation Committee of Russian Federation (VAK RF) for publication of basic results of doctoral theses



## Повышение износостойкости деталей нанесением меди на поверхность при обкатывании с гидроприводом

*Представлены результаты исследований обкатывания деталей деформирующим шаром через слой жидкости. Показана возможность увеличения износостойкости деталей нанесением медных покрытий при упрочняющей обработке обкатыванием с гидроприводом. Разработан способ совмещенной обработки деталей точением и обкатыванием с гидроприводом, обеспечивающий нанесение меди на изделия из алюминиевых сплавов.*

**Ключевые слова:** обкатывание с гидроприводом, покрытие, поверхность, совмещенная обработка.

*Research results of rolling parts with a deforming ball through a liquid layer have been presented. The possibility of increasing in parts wear-resistance by applying copper coatings during strengthening treatment when rolling with hydraulic drive has been shown. The method of simultaneous treatment of parts by turning and rolling with hydraulic drive providing the coating of aluminum alloy parts with copper has been developed.*

**Keywords:** rolling with hydraulic drive, copper, surface, simultaneous treatment.

В настоящее время в области контактного взаимодействия материалов существуют фундаментальные открытия и исследования (гидродинамическая теория смазки, эффект Ребиндера, явление избирательного переноса и др.), формирующие понимание основных явлений, происходящих на границах раздела фаз, в том числе и при механической обработке материалов. В то же время создание и исследование новых эффективных технологий, обеспечивающих улучшение эксплуатационных характеристик изделий и базирующихся на существующих фундаментальных основах с применением новых подходов к обработке материалов, всегда являются актуальными.

Многофакторное исследование процессов, происходящих на границах раздела фаз металл–металл (инструмент–деталь), металл–жидкость–металл (инструмент–СОЖ–деталь) при механической обработке, и разработка методов управления ими могут расширить технологические возможности практически любого способа обработки деталей, одновременно обеспечивая улучшение эксплуатационных характеристик изделий. Анализ технической литературы в области контактного взаимодействия материалов выявил, что при накатывании с гидроприводом (рис. 1) наличие рабочей жидкости между поверхностями деформирующего шара и обрабатываемой детали может обеспечить:

– эффективную подачу СОЖ в зону обработки через внутренний канал в корпусе инструмента и относительно малые потери рабочей жидкости [1];

– постоянство усилия деформирования на обрабатываемой поверхности и, как следствие, однородное качество обрабатываемой поверхности;

– проявление эффектов Ребиндера, Киркендала и др., в том числе и при введении ПАВ в рабочую жидкость в процессе деформации металла;

– модифицирование поверхностного слоя ультрадисперсными материалами, специально введенными в рабочую жидкость;

– формирование тонких покрытий из различных металлов на поверхности детали [2, 3];

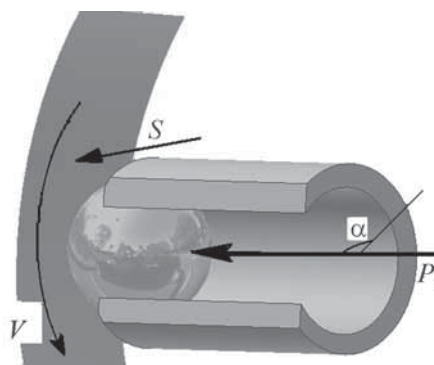


Рис. 1. Схема накатывания с гидроприводом

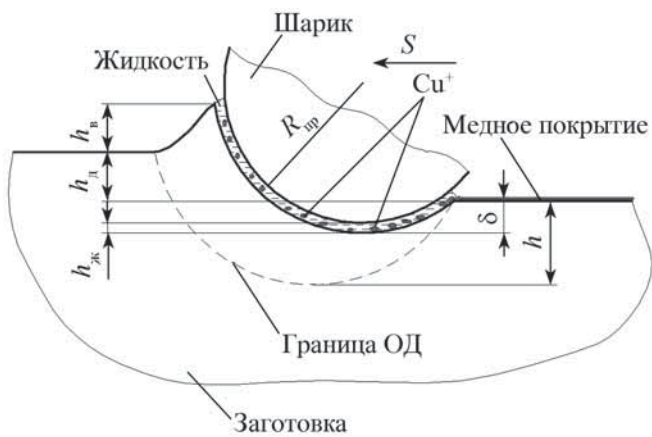


Рис. 2. Схема осаждения меди на поверхность детали

– ускорение химических процессов, происходящих на обрабатываемой поверхности из-за наличия процессов трения, деформации металла, сопровождающихся тепловыделением, а также высокого давления в рабочей жидкости в слое между деформирующим шаром и обрабатываемой поверхностью.

Проведенный анализ позволил выдвинуть гипотезу о возможности нанесения тонких пленок металлов на поверхности деталей при обкатывании с гидроприводом при реализации контактного способа, основанного на замещении ионов металла из раствора более активным металлом, и контактно-химического способа, основанного в создании гальванической пары между металлом основы и более активным металлом.

Например, введение солей меди в рабочую жидкость может обеспечить образование ионов меди в растворе и формирование медного покрытия на поверхности изделий из металлов, более активных, чем медь, по электрохимическому ряду напряжений (рис. 2), что позволит улучшить эксплуатационные характеристики изделий, в частности повысить износостойкость деталей машин.

Для подтверждения выдвинутой гипотезы проводили экспериментальные исследования обкатывания с гидроприводом.

В машино- и автомобилестроении всегда существует задача повышения износостойкости и антифрикционности пар трения (валы, оси, поршни ДВС и т.д.), изготавливаемых из конструкционных сталей,

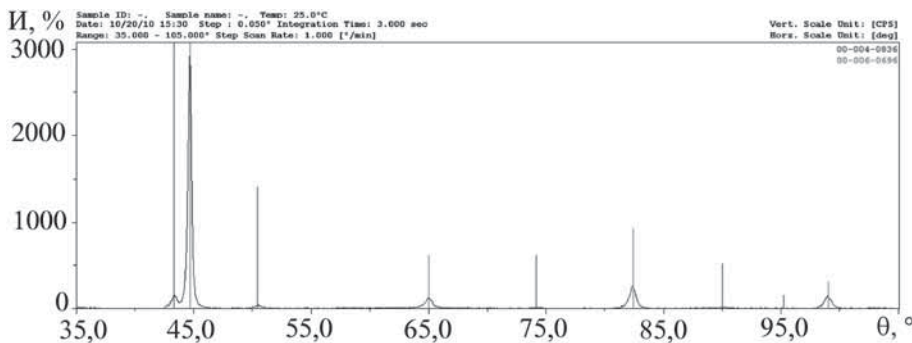


Рис. 3. Фрагмент дифрактограммы стальной обработанной поверхности образца с покрытием

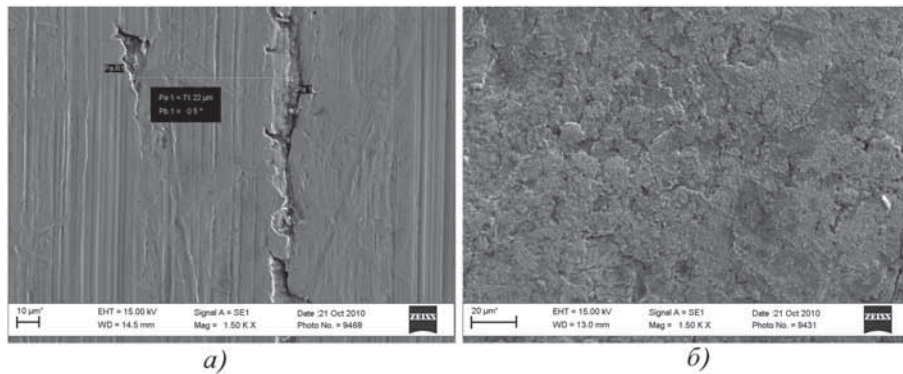


Рис. 4. Поверхности обкатанных стальных образцов:  
a – без Cu; б – с Cu

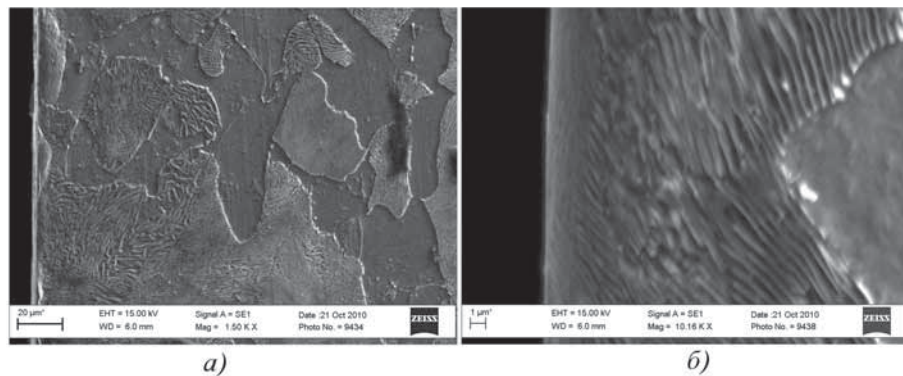


Рис. 5. Структуры стального образца с медным покрытием:  
a – ×1500; б – ×10160

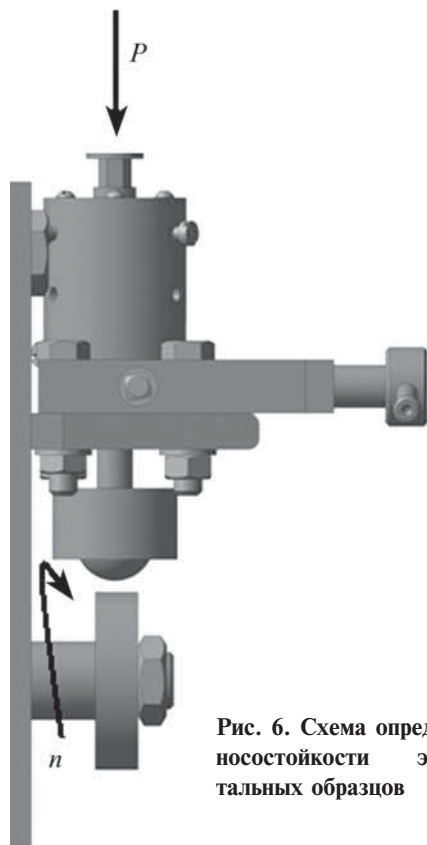


Рис. 6. Схема определения износостойкости экспериментальных образцов

литейных алюминиевых сплавов и других материалов. Исходя из этого, эксперименты проводили на образцах из стали 45 ГОСТ 1050–88, предварительно подвергнутых полному отжигу, а также образцах из алюминиевого сплава АЛ30.

Обработку осуществляли на токарно-винторезном станке мод. 16К20Ф3. Давление жидкости на деформирующий шар в системе варьировали в пределах 2...5 МПа. В качестве рабочей жидкости использовали глицерин с растворенным в нем пятиводным сульфатом меди  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  концентрацией 25...30 г/л.

В результате обработки на стальных образцах одновременно с упрочнением происходило образование покрытия на поверхности детали. Химический состав полученного на стальных образцах покрытия анализировали с помощью рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA. В результате обработки полученных дифрактограмм (рис. 3) выявлено, что основной состав полученного покрытия — медь.

Исследования поверхности и структуры стальных образцов проводили на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss "EVO 50 XVP". Результаты представлены на рис. 4, 5. Толщина медного покрытия не менее 1 мкм (см. рис. 5).

Оценку износостойкости полученных стальных образцов осуществляли на машине трения СМТ-12070 по схеме ролик–шар (рис. 6). Пара трения сталь–сталь с покрытием; смазочная среда — индустриальное масло И-40А; нагрузка на пару трения — 200 Н. Число оборотов ролика  $N = 5 \cdot 10^3$ .

Исследования показали, что наличие медного слоя на поверхности обеспечивает снижение износа до 35 % в сравнении с обкатанными деталями без нанесенного медного покрытия.

При обработке образцов из алюминиевого сплава формирования медного покрытия на поверхности не происходило. Отсутствие медного покрытия можно объяснить наличием оксидной пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , препятствующей образованию участков чистой ювенильной поверхности и взаимодействию основного металла с ионами меди [2].

В гальванотехнике наличие оксидных и жировых пленок на обрабатываемой поверхности ухудшает адгезию и снижает возможность формирования качественных электрохимических покрытий на поверхности детали, что определяет повышенные требования к подготовке поверхности детали перед нанесением металлопокрытий.

Таким образом, возможное решение задачи формирования покрытия на алюминиевых образцах заключается в удалении оксидной пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и образовании чистой ювенильной поверхности. Время формирования оксидной пленки на металлах составляет 0,01...0,1 с [2]. Для получения качественных покрытий на поверхности детали необходимо, чтобы промежуток времени между удалением оксидных пленок и контактом с рабочей жидкостью при обкатывании с гидроприводом не превышал 0,01...0,1 с.

Для решения данной задачи разработаны способ [4] и инструмент для его реализации (рис. 7), позволяющий за счет точения режущим элементом предварительно перед обкатыванием с гидроприводом удалять оксидные пленки с поверхности детали. При такой совмещенной обработке деталей точением и обкатыванием с гидроприводом обеспечивается:

- удаление оксидных пленок и других загрязнений поверхностного слоя;
- уменьшение времени контакта обработанной точением поверхности с воздушной средой;
- повышение производительности обработки за счет одновременного выполнения двух операций.

В результате совмещенной обработки алюминиевых деталей точением и обкатыванием с гидроприводом были получены экспериментальные образцы с покрытием на поверхности (рис. 8). Прове-

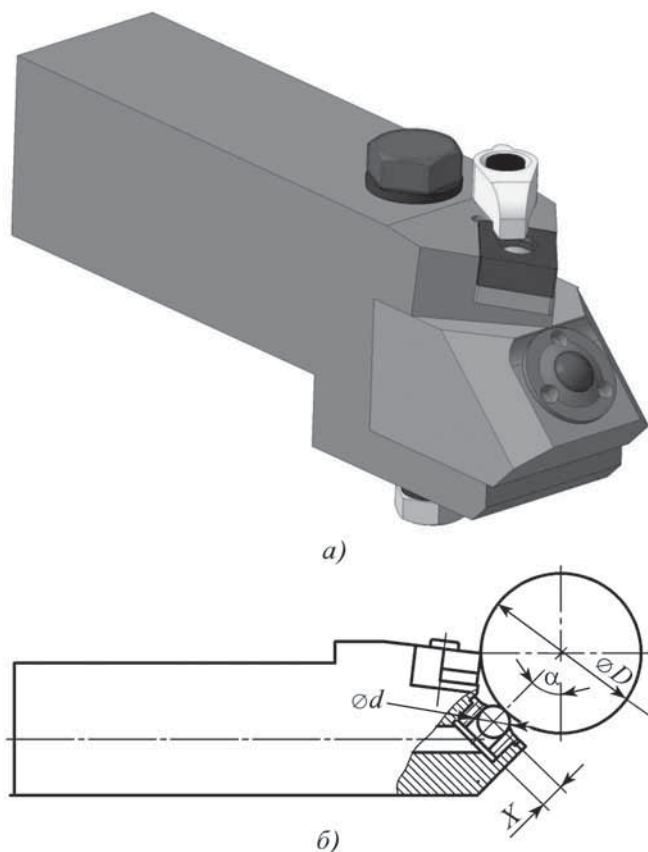


Рис. 7. Инструмент для совмещенной обработки деталей:  
а – 3D-модель; б – схема обработки

денный при помощи растрового электронного микроскопа Carl Zeiss "EVO 50 XVP" энергодисперсионный анализ подтвердил наличие меди на поверхности алюминиевых образцов. Алюминиевый сплав АЛ30 содержит в своем составе медь, поэтому проводили сравнительный энергодисперсионный анализ поверхности необработанных образцов. Концентрация меди на поверхности обработанных алюминиевых образцов составила в среднем 11 %, необработанных – 3 %.

Оценка износостойкости полученных алюминиевых образцов при нагрузке 100 Н показала увеличение износостойкости до 25 %.

### Выводы

Показана возможность при обкатывании с гидроприводом одновременно с известным фактом упрочнения формировать на обрабатываемой поверхности металлическое покрытие, улучшающее эксплуатационные свойства изделий, в частности износостойкость.

Разработан способ совмещенной обработки деталей точением и обкатыванием с гидроприводом, который одновременно с размерной и упрочняющей обработками обеспечивает подготовку поверхности к нанесению покрытий на детали, в том числе и с плотными оксидными пленками.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фирсов А.М., Беляев В.Н. Обработка отверстий раскатыванием // Обработка металлов. 2007. № 1. С. 16–17.
2. Гаркунов Д.Н. Триботехника. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.
3. Берсудский А.Л. Технологическое обеспечение долговечности деталей машин на основе упрочняющей обработки с одновременным нанесением антифрикционных покрытий: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08. Саратов, 2008. 294 с.
4. Пат. 2423219 РФ. Способ совмещенной обработки деталей / В.Н. Беляев, М.В. Овчинников и др. 10.07.11.

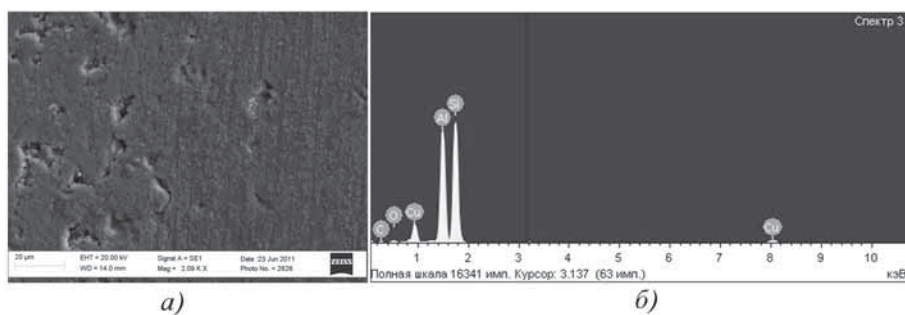


Рис. 8. Алюминиевый образец после совмещенной обработки:  
а – поверхность образца; б – диаграмма энергодисперсионного анализа



УДК 621.787

В.Ю. Блюменштейн, А.А. Кречетов, М.С. Махалов  
(Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева)  
E-mail: blumenstein@rambler.ru

## Современные конкурентоспособные технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием\*

*Представлен анализ особенностей статических методов, показаны актуальные научные и практические задачи в области отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием. Показано, каким образом эти и другие задачи решаются при создании патентов.*

**Ключевые слова:** *поверхностный слой, отделочно-упрочняющая обработка, поверхностное пластическое деформирование, современные конкурентоспособные технологии, упрочняющая обработка, механическое состояние.*

*The article produces the analysis of the static methods details and investigates the problems of scientific and practical importance in the finishing and strengthening treatment with surface plastic deformation. The ways to solve these and other such problems in the creation of intellectual property items are shown.*

**Key words:** *surface layer, finishing and strengthening treatment, surface plastic deformation, state-of-the-art competitive technologies, hardening processing, mechanical condition.*

### Особенности традиционных статических методов отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием

Среди методов *отделочно-упрочняющей обработки* (ОУО) *поверхностным пластическим деформированием* (ППД) наиболее широкое применение имеет накатывание роликами или шариками. Обработка осуществляется инструментом, *деформирующие элементы* (ДЭ) которого (шарики или ролики) взаимодействуют с обрабатываемой поверхностью [1–2].

Методы накатывания обладают рядом преимуществ [3–5]. Это отсутствие термических дефектов в поверхностном слое деталей, сохранение целостности волокон металла и образование мелкозернистой структуры — текстуры металла поверхностного слоя, уменьшение шероховатости поверхности в несколько раз за один рабочий ход, простота конструкции и универсальность обкатных устройств и др.

При ППД накатыванием в результате деформационного упрочнения поверхностного слоя, возникновения в нем сжимающих остаточных напряжений, сглаживания неровностей и улучшения их профиля повышается прочность деталей при переменных нагрузках в 1,5–2,5 раза, а долговечность в 5–10 раз и более. Накатывание во многих случаях позволяет так-

же повысить износостойкость, контактную выносливость и другие эксплуатационные характеристики детали.

Однако необходимо учитывать, что большинство методов накатывания не повышает геометрической точности поверхности, обычно сохраняется точность, достигнутая на предшествующей операции. При интенсивных режимах обработки локальные участки поверхностных слоев могут нагреваться до температуры 300...400 °С, что обуславливает термопластическое деформирование и другие явления, снижающие эффект упрочнения. При неправильно выбранных режимах накатывания может происходить деформационное разрушение с образованием частичек отслаивающегося металла и резкое увеличение шероховатости поверхности.

Накатывание наружных и внутренних, плоских и фасонных поверхностей осуществляется одно- и многороликовым, одно- и многошариковым, регулируемым и нерегулируемым инструментом, в упругом и жестком режимах, при совмещении с процессом резания, с наложением и без наложения дополнительных движений, с установкой ДЭ на опорах качения или в сепараторах и др.

Накатыванием обрабатывают тяжелонагруженные детали машин и механизмов, от работоспособности которых зависят надежность и долговечность изделий в целом, в том числе:

- детали, работающие в условиях знакопеременных нагрузок, вызывающих усталостные разрушения (валы редукторов, торсионы, силовые болты, балансиры, вилки, коленчатые и кулачковые валы, шатуны, полуоси, диски);

\* Статья выполнена в рамках проектов Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг." и Аналитической ведомственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы на 2009–2011 гг."

- детали, работающие в условиях высоких скоростей относительно перемещения и больших давлений с минимальными зазорами при обедненном смазочном материале, что приводит к схватыванию металла (распределители, поршни, шатуны со сферическими головками, золотники, плунжеры, шпиндели);

- детали манжетных уплотнений, к герметичности и износостойкости которых предъявляются высокие требования (валы, втулки, оси, штоки);

- детали, работающие в условиях контактно-усталостных напряжений (беговые дорожки подшипников, цапфы шестерен, опорные шейки, крестовины, поворотные кулаки);

- детали инструментального производства, работающие в тяжелых условиях трения скольжения (валки холодной прокатки, пуансоны, матрицы, протяжки).

Кроме того, методами накатывания эффективно упрочняют детали, работающие в условиях абразивного и окислительного изнашивания, подвергаемые коррозионно-усталостному воздействию, фреттинг-коррозии, ударным нагрузкам, кавитационному воздействию и многим другим видам и условиям нагружения, а также детали, имеющие сложные поверхности: наружные и внутренние сферические; профильные типа кулачков; фасонные, диаметр которых по длине изменяется нелинейно; поверхности галтелей и радиусных переходов; поверхности резьб; поверхности шлиц и канавок; поверхности зубьев зубчатых колес и др.

Сложны для обработки прерывистые поверхности, т.е. геометрически правильные поверхности, имеющие углубления в виде отверстий, шпоночных канавок, проточек и др., а также глубокие отверстия.

Для накатывания сложных поверхностей в сравнении с обработкой простых поверхностей необходимо дополнительно решить ряд технологических и конструкторских задач, связанных с созданием деформирующего инструмента специального профиля, с необходимостью огибать обрабатываемую поверхность по криволинейной образующей и ориентировать инструмент определенным образом, с необходимостью изменять во время обработки диаметр и некоторые другие размеры устройств и т.д. Однако большинство из этих вопросов успешно решаются обработкой сложных поверхностей деталей на станках с ЧПУ.

Рыночный характер взаимоотношений между разработчиками и покупателями технологий в последние 20 лет привел к тому, что большая часть информации стала закрытой, конфиденциальной; в открытых источниках мал объем информации о технологиях ОУО ППД, либо информация ограничена лишь упоминанием о наличии определенных технологий или средств технологического оснащения для их реализации. На сайтах ведущих отечественных и мировых производи-

телей имеется лишь информация об услугах по проектированию и изготовлению соответствующих станков, оснастки, инструментов и др.

Поэтому материалы статьи базируются на анализе доступных для авторов источников: изобретений, представленных в базах данных ФГУ ФИПС; статей, опубликованных в журналах ООО "Издательство Машиностроение": "Упрочняющие технологии и покрытия", "Автомобильная промышленность", "Технология машиностроения"; книг, изданных в РФ и республике Беларусь.

Анализ информации в исследуемой области знаний в последние 50–60 лет показал, что в настоящее время актуальными являются следующие научные и практические задачи в области ОУО ППД [6]:

- 1) научное обоснование создания новых и повышения эффективности существующих способов ППД. Основное внимание уделяется свойствам металла *поверхностного слоя* (ПС), явлениям в контакте инструмента с деталью, интенсификации режимов, стойкости инструментов, применению новых материалов для инструментов и др.;

- 2) одновременное обеспечение точности, качества ПС, производительности, эффективности, что достигается совмещенной и комбинированной обработкой, наложением *ультразвуковых колебаний* (УЗК), физических полей, нагревом ТВЧ, лазером, плазмой и др.; обеспечение стабильности и равномерности параметров упрочнения по глубине ПС и по всем сечениям детали;

- 3) комбинирование технологий нанесения эффективных многофункциональных покрытий с технологиями ППД, включая обработку ППД под покрытие, ППД покрытий и др.;

- 4) повышение пластичности и использование в максимально возможной мере запаса пластичности металла в процессе обработки ППД, что достигается за счет создания высоких давлений в соответствующих зонах очага деформации, наложением мощного ультразвука, построением рациональных программ нагружения;

- 5) учет технологической наследственности, учет эффектов, проявляющихся в тонком поверхностном слое, что особенно важно для деталей, работающих в сложных условиях нагружения;

- 6) моделирование процессов, прогнозирование параметров ПС и эксплуатационных свойств деталей, что стало возможным благодаря программам, реализующим *метод конечных элементов* (МКЭ), OLAP-технологии и др.;

- 7) прогнозирование остаточных напряжений упрочненного поверхностного слоя на основе разработки и использования расчетных алгоритмов и физических методов неразрушающего контроля;



8) автоматизация проектирования, в том числе путем создания специализированного программного обеспечения для ЭВМ, позволяющего выполнять необходимые конструкторские и технологические расчеты, разработки встроенных программ – макросов в существующие САПР и др.;

9) разработка, адаптация и применение эффективных методов контроля металла ПС, учитывающих тонкие физические явления, включая акустико-эмиссионные, акустико-структурометрические, метод магнито-шумового анализа, метод магнитной памяти металла и коэрцитиметрии и др.

Особую актуальность приобретают исследования, ориентированные на создание наноструктурированного металла поверхностного слоя, учет тонких явлений в наноразмерном диапазоне, что стало возможным благодаря развитию системы наночипов в ведущих университетах в России и за ее пределами.

В предыдущие годы обзоры в области ОУО ППД выполняли ведущие ученые-специалисты в области ОУО ППД – профессора И.В. Кудрявцев, Д.Д. Папшев, А.Г. Суслов, В.М. Смелянский, А.П. Бабичев, что отражало достижения в истекший период времени и всегда имело целью уточнить роль и место ППД в системе отделочно-упрочняющих методов (например, [7]).

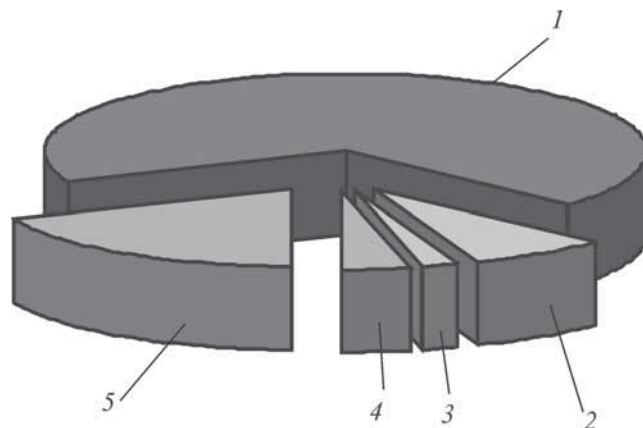
Ниже показано, каким образом решаются эти и другие задачи при создании патентов на изобретения, разработке и внедрении современных технологий ОУО ППД.

#### Анализ патентов на изобретения в области ОУО ППД

Патентный поиск проводили в соответствии с Международной патентной классификацией (МПК) по следующим рубрикам: В 24 В 39, В 24 В 1, В 24 D 17, В 24 В 31, В 23 В 31, В 23 Н 9, В 23 Р 9, В 06 В 3, С 21 D 7, С 23 С 8, С 23 С 4, С 23 D 5 и др.; по ключевым терминам; ППД, совмещенное ППД, комбинированное ППД; по авторам, названиям учреждений и организаций. Глубина патентного поиска составила 17 лет.

В базах данных ФГУ ФИПС по указанным рубрикам было выявлено всего 89 изобретений, 52 % из которых составляют способы и 48 % – устройства, используемые для различных видов обрабатываемых поверхностей (см. рисунок).

Из всего перечня изобретений 74 % относятся к ОУО ППД, 3 % – к совмещенной обработке ППД, 23 % – к комбинированной обработке ППД. Как известно, совмещенное ППД выполняется одновременно несколькими методами обработки, а комбинированное ППД выполняется последовательно несколькими мето-



**Распределение изобретений по видам обрабатываемых поверхностей ОУО:**

1 – цилиндрических (69 %); 2 – сферических (7 %); 3 – сложнопрофильных (2 %); 4 – плоских (4 %); 5 – маложестких деталей (19 %)

дами [1–2]. Также 81 % изобретений относится к обработке наружных и 19 % – внутренних цилиндрических поверхностей.

Совмещают и комбинируют ППД, в том числе металлопокрытий, путем пропускания через зону контакта электрического тока, с наложением магнитного поля, с опережающим резанием, с опережающим резанием и нанесением химического или электрохимического покрытия, с абразивно-алмазной обработкой, с наложением УЗК, с предварительным нагревом ПС плазменной струей и др.

Одним из наиболее простых способов является совмещение и комбинирование с механической обработкой резанием, что наряду с упрочнением ПС детали обеспечивает также размерную точность, достигаемую в основном за счет резания.

По последовательности работы инструментов различают схемы:

резание–ППД, являющиеся наиболее распространенными и применяемыми как при размерно-чистой, так и при упрочняющей обработке различных конструкционных материалов;

ППД–резание, предназначенные для облегчения процесса резания при обработке труднообрабатываемых материалов (высоколегированных сталей и сплавов) за счет предварительного упрочнения;

резание–ППД–резание, являющиеся развитием схем второго типа и обеспечивающие помимо роста производительности и повышения стойкости режущего инструмента высокое качество ПС, свойственное ППД и др.

Одновременное воздействие на обрабатываемую поверхность деформирующим инструментом и циклически изменяющимся, переменным по величине

магнитным полем, перемещающимся относительно обрабатываемой поверхности совместно с инструментом, позволило добиться увеличения микротвердости детали, изготовленной из стали 45, в 1,3 раза, из стали 38ХС – в 1,34 раза в сравнении с алмазным выглаживанием [8].

Для обработки ППД (раскатывания) маложестких деталей машин разработан способ, в котором в полость обрабатываемой детали помещают деформирующие элементы, которые сообщают вращательное движение вокруг продольной оси детали посредством магнитного поля, вводят деформирующие элементы во взаимодействие с обрабатываемой поверхностью, а затем перемещают деформирующие элементы параллельно продольной оси изделия [9]. Для усиления воздействия на обрабатываемую поверхность на деформирующие элементы дополнительно в зоне деформации воздействуют кольцевым магнитным полем, величина магнитной индукции которого составляет 0,4...1,9 Тл.

Для расширения технологических возможностей статико-импульсной обработки ППД деформированием за счет управления глубиной упрочненного слоя и микрорельефом поверхности разработан способ, который включает приложение к деформирующему инструменту в виде клинового ролика нормально к обрабатываемой поверхности вращающейся заготовки статической нагрузки и периодической импульсной нагрузки [10].

Этими же авторами разработан способ, который включает алмазно-абразивную обработку и одновременное ППД заготовки комбинированным инструментом [11]. Комбинированный инструмент выполняют в виде оправки, на которой соосно устанавливают алмазно-абразивный круг и деформирующие элементы в виде витков свернутой в кольцо стальной винтовой цилиндрической пружины из проволоки круглого сечения. На торце оправки, выполненной с радиальными выступами, закрепляют сектора. При обработке валков  $\varnothing 40$  мм и длиной 110 мм (сталь 45, 40...42 HRC,  $Ra_{исх} = 3...4$  мкм) необходимый параметр шероховатости  $Ra = 0,16...0,32$  мкм, точность и микротвердость 2600...2950 МПа поверхности были достигнуты в 1,9–2 раза быстрее.

Авторы способа комбинированной упрочняюще-чистовой обработки поверхностей одним и тем же режущим инструментом, имеющим вспомогательный угол  $0^\circ < \varphi_1 < 5^\circ$ , снимают припуск и производят последующее ППД вспомогательной поверхностью инструмента [12].

Процесс резания производят с передним углом  $\gamma$ , рассчитанным по следующей зависимости:

$$\gamma_{\min} < \gamma \leq (\psi - 90^\circ),$$

где  $\gamma_{\min}$  – минимально допустимое значение переднего угла, при котором возможен процесс резания данного материала;

$\psi$  – угол сдвига стружки для обрабатываемого материала. Эффективность способа достигается за счет отделки и существенного упрочнения поверхности на заданную глубину за один технологический ход одним инструментом.

Для финишной обработки отверстий разработан способ, который включает обработку поверхности отверстий растачиванием и ППД комбинированным инструментом, которому, в свою очередь, сообщают УЗК [13]. При этом используют комбинированный инструмент с противоположно расположенными на волноводе режущим и деформирующим элементами, рабочие части которых выполнены из условия их расположения в плоскости максимальных колебательных смещений.

За счет применения УЗК способ позволяет снизить силы резания, улучшить дробление стружки, повысить виброустойчивость технологической системы, уменьшить силы трения, повысить износостойкость обрабатываемого инструмента, уменьшить шероховатость поверхности, увеличить микротвердость поверхностного слоя, получить остаточные сжимающие напряжения, увеличить глубину наклепа, повысить производительность.

Способ комбинированного упрочнения включает пластическое деформирование деталей из железоуглеродистых сплавов, что осуществляется инструментом с одновременным пропусканием через зону контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью переменного электрического тока [14]. Деформирование ПС проводят при перемещении инструмента относительно обрабатываемой поверхности со скоростью и продольной подачей, обеспечивающими необходимое расположение фрагментов "белого" слоя, и осуществляют химическое или электрохимическое травление неупрочненных зон ПС на глубину образования масляных карманов. Обработка по данному способу партии образцов (сталь 45, 224...240 НВ) позволила сформировать на поверхности фрагменты "белого" слоя толщиной 0,2 мм, размерами  $a = 0,8$  мм,  $b = 1,6$  мм, глубиной масляных карманов 0,1 мм. При этом износ образцов, упрочненных по предложенному способу, в 2 раза меньше, чем по известным способам.

Технической задачей, решаемой полезной моделью, является повышение качества обрабатываемых поверхностей деталей методом ППД, в том числе металлических деталей с покрытиями различного типа, повышение производительности обработки за счет стабилизации давления в зоне обработки и подавления (гашения) вибраций (автоколебаний), возникаю-

щих при работе [15]. Поставленная задача решается за счет использования гидроамортизатора, установленного параллельно упругому элементу. Предлагаемое устройство опробовано при обработке кольцевой плоскости диска сцепления нажимного из чугуна марки СЧ24, твердостью 170...190 НВ,  $Ra_{исх} < 0,73...084$  мкм. Применение устройства для ОУО металлических поверхностей ППД позволило повысить качество обрабатываемых поверхностей деталей, уменьшить величину их шероховатости.

Эффективным является шлифование и ППД заготовок, имеющих фасонную поверхность и сопряженную с ней часть заготовки [16]. Обрабатывали заготовку верхнего шарового пальца (сталь 20Х ГОСТ 1050–89), сфера  $\varnothing (32,7 \pm 0,1)$  мм. Параметр шероховатости обработанных фасонных поверхностей уменьшился до  $Ra = 0,32...0,63$  мкм при исходном  $Ra_{исх} = 3,2...6,3$  мкм, производительность повысилась более чем в 5 раз в сравнении с раздельной обработкой шлифованием и обкатыванием, энергоемкость процесса уменьшилась в 2,2 раза.

Способ обработки стальных деталей ППД с использованием энергии УЗК позволяет формировать нанокристаллическую структуру в ПС и субструктуру в нижележащих слоях, повысить износо- и коррозионную стойкость, надежность и долговечность [17]. Для этого деталь предварительно подвергают механической обработке точением на токарном станке с созданием на ее поверхности шероховатости в виде гребней с профилем трапециевидной формы с высотой 10...20 мкм, шириной при основании 25...35 мкм и углом наклона боковых сторон 5...10° с последующим воздействием на поверхность детали индентором, нормально колеблющимся с ультразвуковой частотой.

Способ комбинированной обработки деталей включает точение и проведение ППД накатыванием деформирующим шаром, при этом точение и накатывание совмещают с нанесением химического или электрохимического покрытия при использовании технологической жидкости, а нанесение покрытия и ППД накатыванием проводят одним деформирующим шаром [18].

Предлагаемое техническое решение направлено на обеспечение обработки поверхностей деталей и модифицирование ПС детали путем нанесения защитного покрытия, которое расширяет технологические возможности комбинированных методов обработки металлов электролизом и ППД. Данным способом возможна обработка как наружных, так и внутренних цилиндрических и конических поверхностей. Одновременно с этим повышается эффективность использования электролита за счет минимального зазора между деформирующим элементом в виде

шара и его держателем, что уменьшает расход электролита.

Для обеспечения прочности порошкового покрытия, нанесенного плазменным напылением, а также прочности сцепления на границе порошковое покрытие–основной металл и, как следствие, увеличения износостойкости предложен способ комбинированного упрочнения [19]. На поверхность плазменным напылением наносят порошковое покрытие, далее выполняют его пластическое деформирование, пропуская электрический ток через зону контакта инструмента с покрытием. Плотность электрического тока определяют из условия достижения температуры 900...1200 °С на границе основного металла с порошковым покрытием.

Величину деформирующего усилия инструмента определяют из условия протекания пластической деформации на глубину, равную толщине нанесенного порошкового покрытия. Результаты исследований показали, что плотность покрытия после обработки по предложенному способу увеличилась на 25...35 %, поры практически отсутствуют, микротвердость возросла на 30...40 %, что является подтверждением увеличения когезионной прочности. На границе раздела покрытие–основной металл несплошности практически отсутствуют в результате улучшения адгезии порошкового покрытия с основным металлом.

Установлено, что в 95 % случаев заявителями изобретений являются физические лица, в 19 % случаев правообладателями являются физические лица, в 81 % – юридические лица (университеты, ООО, ОАО, МИП и др.). Из 89 патентов на изобретение: 23 – действуют; 18 – могут прекратить свое действие; 14 – прекратили действие, но могут быть восстановлены; 34 – в силу ряда причин прекратили действие.

Авторы благодарят магистров техники и технологий К.А. Александрову и Е.Г. Ничипарук за помощь в проведении патентных исследований.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 18295–72. Обработка упрочняющая. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1973. 3 с.
2. ГОСТ 18296–72. Обработка поверхностным пластическим деформированием. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1973. 10 с.
3. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
4. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
5. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.

6. Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение-1, 2007. 400 с.

7. Кудрявцев И.В. Современное состояние и перспективы развития методов повышения прочности и долговечности деталей машин поверхностным пластическим деформированием (ППД) // Повышение прочности и долговечности деталей машин ППД. ЦНИИТМАШ. 1970. № 90. С. 5–14.

8. Пат. 2078676 РФ, МПК<sup>6</sup> В 24 В 39/00. Способ комбинированной упрочняющей обработки / А.В. Киричек, Н.Л. Соколик; заявитель и патентообладатель А.В. Киричек, Н.Л. Соколик. № 95102956/02; заявл. 02.03.1995; опубл. 10.05.1997.

9. Пат. 2068770 РФ, МПК<sup>6</sup> В 24 В 39/02. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления / А.М. Довгалева; заявитель и патентообладатель А.М. Довгалева. № 4922542/27; заявл. 29.03.1991; опубл. 10.11.1996.

10. Пат. 2286240 РФ, МПК В 24 В 39/00. Способ поверхностного пластического деформирования / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек и др.; патентообладатель ГОУ ВПО ОрелГТУ. № 2005119319/02; заявл. 21.06.05; опубл. 27.10.06.

11. Пат. 2303513 РФ, МПК В 24 В 39/00. Способ комбинированной чистовой и упрочняющей обработки / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек и др.; патентообладатель ГОУ ВПО ОрелГТУ. № 2005133930/02; заявл. 02.11.05; опубл. 27.07.07.

12. Пат. 2240206 РФ, МПК<sup>7</sup> В 23 В 1/00. Способ отделочно-упрочняющей обработки поверхностей резанием / А.Ю. Албагачиев, В.А. Комаров, Е.В. Преображенская; патентообладатель Преображенская Е.В. № 98123810/63; заявл. 28.12.1998; опубл. 20.07.1999.

13. Пат. 2293012 РФ, МПК В 23 В 39/02, В 06 В 3/00. Способ комбинированного упрочнения поверхностей деталей / А.М. Фирсов, В.Н. Хмелев, И.И. Савин, В.Н. Беляев; патентообладатель ГОУ ВПО АлтГТУ. № 2005112062/02; заявл. 21.04.05; опубл. 10.02.07.

14. Пат. 2203173 РФ, МПК<sup>7</sup> В 24 В 39/00. Комбинированный способ обработки отверстий и устройство для его осуществления / С.Н. Паршев, Н.Ю. Полозенко; патентообладатель ГОУ ВПО ВолГТУ. № 2001110450/02; заявл. 17.04.01; опубл. 27.04.03.

15. Пат. на полезную модель 41665 РФ, МПК<sup>7</sup> В 24 В 39/04. Устройство для поверхностного пластического деформирования / В.Ф. Казнов, В.А. Митюгов, С.М. Беляев, В.Н. Зайцев; патентообладатель ОАО "ГАЗ". № 2004120142/22; заявл. 05.07.04; опубл. 10.11.04.

16. Пат. 2325261 РФ, МПК В 24 В 39/04. Комбинированный способ шлифования и поверхностного пластического деформирования / Ю.С. Степанов, А.В. Киричек и др.; патентообладатель ГОУ ВПО ОрелГТУ. № 2006122342/02; заявл. 22.06.06; опубл. 27.05.08.

17. Пат. 2354715 РФ, МПК С 21 D 7/06, В 23 Р 9/00. Способ упрочнения деталей из конструкционных материалов / В.А. Клименов, Ж.Г. Ковалевская, К.В. Зайцев и др.; патентообладатель ГОУ ВПО ТПУ. № 2007148749/02; заявл. 24.12.07; опубл. 10.05.09.

18. Пат. 2355826 РФ, МПК С 25 D 5/22. Способ комбинированной обработки деталей / В.Н. Беляев, Е.Н. Беляев; патентообладатель ЗАО "Алтайгражданпроект". № 2007118315/02; заявл. 16.05.07; опубл. 20.05.09.

19. Пат. 2338005 РФ, МПК С 23 С 4/18, В 23 Н 9/00. Способ комбинированного упрочнения поверхностей деталей / В.П. Багмутов, В.И. Калита, С.Н. Паршев и др.; патентообладатель ГОУ ВПО ВолГТУ. № 2006145603/02; заявл. 20.12.06; опубл. 10.11.08.

УДК 621.787.4

Я.Н. Отений, Н.И. Никифоров, В.И. Алабин, А.М. Лаврентьев  
(Камышинский технологический институт (филиал)  
ГОУ "Волгоградский государственный технический университет")  
E-mail: nikiforovni@rambler.ru

## Обеспечение точности формы при обработке ротационным обжатием длинных тонкостенных труб

*Представлена разработанная математическая модель для определения прогиба стенки трубы при ее обработке ротационным обжатием. Установлены основные закономерности формирования контактной зоны между поверхностями ролика и детали при различных формах наружных поверхностей обжимающих роликов.*

**Ключевые слова:** дефект круглости, тонкостенные трубы, ротационное обжатие, прогиб стенки трубы.

*The paper developed a mathematical model to determine the deflection of the pipe wall with formation of a rotary compression processing. In this paper, the basic laws of formation of the contact zone between the roller surface and the detail in various forms of outer surfaces of rollers.*

**Keywords:** roundness defect, thin-walled tubes, rotary compression, deflection of the wall are rough.

В настоящее время существует большое разнообразие товаров широкого потребления, в которых применяются длинные тонкостенные трубы диаметром

16...32 мм. К таким товарам относятся различные бытовые тележки, инвалидные и детские коляски, гардины, светильники, велосипеды, предметы мебели и

др. Кроме того, длинные тонкостенные трубы могут применяться для оформления бытовых помещений, аптек, магазинов и для других целей.

Главными требованиями, предъявляемыми к длинным тонкостенным трубам в перечисленных случаях, являются обеспечение низкой шероховатости ( $Ra = 0,12...0,32$  мкм), требования по допуску круглости в пределах  $0,05$  мм при допуске на диаметр наружной поверхности трубы по 14-му и более низким качествам точности.

Согласно справочным данным трубы в состоянии поставки имеют достаточно большие отклонения как по круглости, так и по шероховатости.

Традиционным методом обработки тонкостенных труб является круглое или бесцентровое шлифование с последующей доводкой полированием лепестковыми шлифовальными или войлочными кругами с нанесенными на них полировальными пастами. Эта технология является трудоемкой, имеет плохие условия труда и требует большого расхода шлифовальных кругов, так как материал труб, как правило, относится к сталям марок Ст3 или Ст5, приводящим к быстрому засаливанию кругов. В связи с этим актуальным является поиск альтернативных методов достижения требуемой точности по круглости и низкой шероховатости.

В состоянии поставки тонкостенные трубы имеют допуски, регламентируемые в пределах  $3\%$  от их диаметра. В этих же пределах регламентируется и допуск отклонения формы. Одним из методов обеспечения требуемого допуска на отклонение от круглости может служить метод ротационного обжатия трубы.

Обжатие производится обжимающими роликами 2, которые, вращаясь относительно собственной оси, перемещаются вдоль заготовки 1 с продольной подачей  $s$  (рис. 1). На рисунке (фронтальный вид) показан только один ролик 2, внедренный в поверхность трубы 1 на глубину  $h_v$ . Ось ролика установлена по отношению к оси трубы на угол самозатягивания  $\omega$ .

Деформация поверхности трубы осуществляется в области эллипсного контакта с полуосями  $z_r$  (малая полуось или полуширина контакта) и  $L_k$  (большая полуось или полудлина контакта). Снижение допуска круглости будет зависеть от выбора длины контакта  $2L_k$  между роликом 2 и обрабатываемой поверхностью трубы 1.

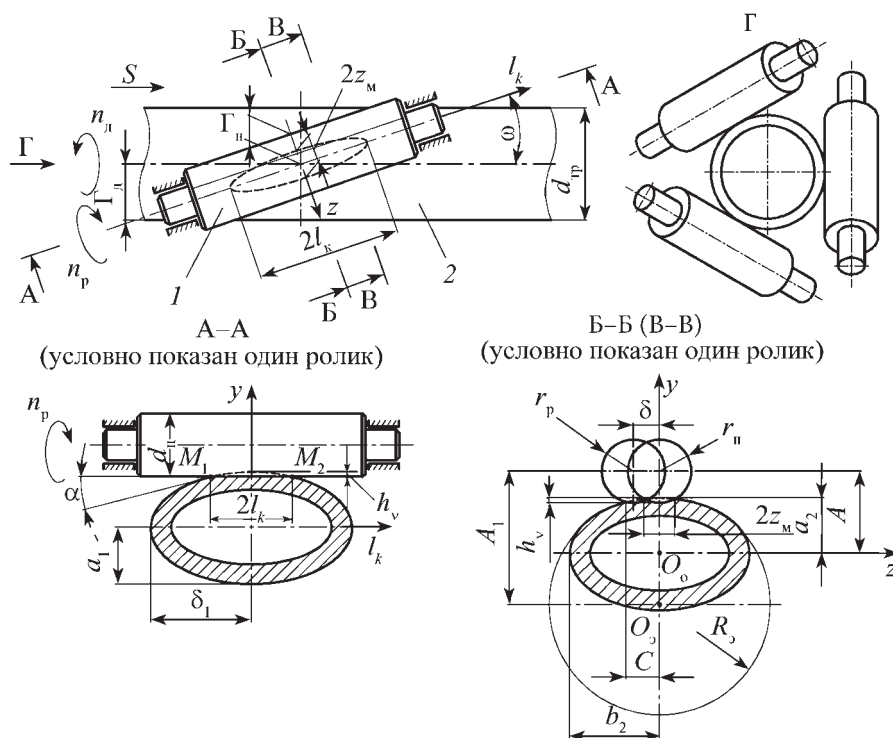


Рис. 1. Схема обработки цилиндрическим роликом:  
1 – обрабатываемая заготовка; 2 – ролик для ротационного обжатия

Форма наружной поверхности обжимающих роликов может быть выпуклой, прямолинейной и вогнутой. Первоначально не известно, какая из этих поверхностей роликов будет оптимальной и может быть установлена теоретическим или экспериментальным путем.

Задача определения прогиба стенки трубы под обжимающим роликом может быть разделена на два этапа:

- 1) определение геометрических параметров контактной зоны для роликов с различной формой поверхности;
- 2) определение прогиба трубы при контактных напряжениях, требуемых для обеспечения ротационного обжатия.

Установим основные закономерности формирования контактной зоны между поверхностями ролика и трубы.

С точки зрения технологичности изготовления рабочая поверхность обжимающего ролика должна быть выпуклой или вогнутой с образующей в виде дуги окружности, имеющей радиус  $R_p$ .

В этом случае изменение радиусов в поперечных сечениях обжимающего ролика по длине контакта будет равно

$$r_p = r_n \pm R_p \mp \sqrt{R_p^2 - l_k^2},$$

где  $r_n$  – начальный радиус ролика в средней части контакта (начальный радиус);

$R_p$  – радиус окружности, образующей форму поверхности ролика;

$l_k$  – текущая координата длины контакта.

Верхние знаки в формуле соответствуют вогнутому ролику, а нижние – выпуклому.

Определим геометрические параметры контактной зоны между роликом и трубой.

Произведем сечение обжимающего ролика и детали перпендикулярными плоскостями А–А и Б–Б (или В–В) (см. рис. 1). Плоскость А–А проходит через ось ролика и среднюю линию контакта, а плоскости Б–Б и В–В перпендикулярны оси ролика. Плоскость Б–Б проходит через середину контакта, а плоскость В–В через произвольное сечение ролика в пределах контакта.

При установке обжимающего ролика на угол самозатягивания  $\omega$  в сечении А–А (см. рис. 1) образуется эллипс с полуосями  $a_1$  и  $b_1$ , равными

$$a_1 = r_d; b_1 = r_d / \cos \omega,$$

где  $r_d$  – радиус обрабатываемой детали.

Смещение оси окружности в сечении ролика плоскостью Б–Б, перпендикулярной оси ролика на расстоянии  $l_k$  от середины контакта, определяется как

$$\delta = l_k \operatorname{tg} \omega.$$

Малая и большая полуоси эллипса, образуемого в сечении детали плоскостью Б–Б или В–В, перпендикулярной оси ролика, равны

$$a_2 = r_d; b_2 = r_d / \sin \omega.$$

Полуширина контакта в плоскости Б–Б, проходящей через середину контакта, рассчитывается по формуле

$$c = b_2 \sqrt{1 - \left( \frac{r_d - h_v}{a_2} \right)^2}.$$

Для упрощения дальнейшего решения задачи определения геометрических параметров контактной зоны целесообразно заменить в пределах контакта дугу эллипса, образуемого в сечении Б–Б, дугой эквивалентной окружности. Радиус эквивалентной окружности можно получить из выражения

$$R_3 = \frac{c^2 + h_v^2}{2h_v}.$$

При пересечении двух окружностей, одна из которых внедрена в другую на величину  $h_v$ , полуширина контакта может быть вычислена по формуле

$$z_m = \sqrt{R_3^2 - \left[ \frac{(R_3 + r_p)(R_3 - h_v)}{R_3 + r_p - h_v} \right]^2}.$$

Тогда уравнение, определяющее полуширину контакта в любом сечении в пределах зоны контакта при обработке цилиндрическим роликом, можно записать в виде

$$z_k = z_m \sqrt{1 - \left( \frac{l_k}{L_k} \right)^2},$$

где  $L_k$  – заданная полудлина контакта.

При обработке роликом с криволинейной (выпуклой или вогнутой) образующей площадь контакта будет представлять собой овал. Для определения описывающего его уравнения запишем систему уравнений пересекающихся между собой эллипса, образуемого при пересечении детали плоскостью Б–Б, с окружностью, образуемой в этом же сечении при пересечении ролика.

Уравнение эллипса, образуемого в сечении Б–Б при пересечении детали, имеет вид

$$\frac{z^2}{b_2^2} + \frac{y^2}{a_2^2} - 1 = 0. \quad (1)$$

Уравнение окружности, образуемой в сечении Б–Б при пересечении ролика, определяем как

$$(z + \delta)^2 + (y - A)^2 - r_n^2 = 0, \quad (2)$$

где  $A$  – расстояние между осями детали и обжимающего ролика;

$$A = r_d + r_n - h_v.$$

Совместное решение уравнений (1) и (2) приводит к уравнению

$$z^2 + 2z\delta + \delta^2 + a_2^2 \left( 1 - \frac{z^2}{b_2^2} \right) - 2Aa_2 \sqrt{1 - \frac{z^2}{b_2^2}} + A^2 - r_n^2 = 0.$$

Методика решения этого уравнения в явном виде известна, однако она довольно сложна, трудоемка и громоздка. Поэтому упростим данное уравнение, заменив эллипс, заданный уравнением (2), окружностью с эквивалентным радиусом  $R_3$ . Тогда вышеприведенная система уравнений будет заменена другой системой.

Уравнение окружности, заменяющей эллипс,

$$z^2 + y^2 - R_3^2 = 0. \quad (3)$$

Уравнение окружности в сечении ролика

$$(z + \delta)^2 + (y - A_1)^2 - r_n^2 = 0, \quad (4)$$

где  $A_1$  – расстояние между осями эквивалентной окружности и обжимающего ролика, равно

$$A_1 = R_3 + r_n - h_v.$$

Решение системы уравнений (3) и (4) приводит к квадратному уравнению

$$2\delta z + \delta^2 + R_3^2 - 2A_1\sqrt{R_3^2 - z^2} + A_1^2 - r_n^2 = 0.$$

Это уравнение можно записать как

$$Q_1 z^2 + Q_2 z + Q_3 = 0,$$

где

$$Q_1 = \frac{\delta^2}{A_1^2} + 1;$$

$$Q_2 = \frac{\delta D}{A_1^2};$$

$$Q_3 = \left(\frac{D}{2A_1}\right)^2 - R_3^2;$$

$$D = \delta^2 + R_3^2 + A_1^2 - r_n^2.$$

Решение этого уравнения приводит к определению изменения полуширины контакта по его длине в следующем виде:

$$z_k = \frac{1}{2Q_1} [(2Q_2)^2 - 4Q_1Q_3]^{0,5}.$$

Длина контакта при пересечении вогнутого или выпуклого ролика с эллипсом, образуемым в сечении А-А, равна

$$L_k = \frac{1}{W_1 b_1} [-W_2 W_1 b_1^2 - 2A_2^2 a_1^2 + 2A_2 a_1 (W_2 W_1 b_1^2 + A_2^2 a_1^2 + W_1^2 b_1^4)^{0,5}]^{0,5},$$

где

$$W_1 = \frac{(-a_1)^2}{b_1^2} + 1;$$

$$W_2 = A_2^2 + a_1^2 - R_p^2;$$

$A_2$  – расстояние между осью обрабатываемой детали и центром окружности, описывающей образующую обжимающего ролика.

Для обжимающего ролика с выпуклой образующей  $A_2 = R_p + r_d - h_v$ , а для обжимающего ролика с вогнутой образующей  $A_2 = R_p - r_d + h_v$ .

При внедрении цилиндрического ролика в поверхность детали длина контакта будет вычисляться следующим образом:

$$L_k = b_1 \sqrt{1 - \left(\frac{r_d - h_v}{a_1}\right)^2}.$$

На рис. 2 представлены графики изменения полуширины контакта по его текущей длине для вогнутого, выпуклого и цилиндрического роликов. Как видно из графиков, ролик с вогнутой образующей имеет

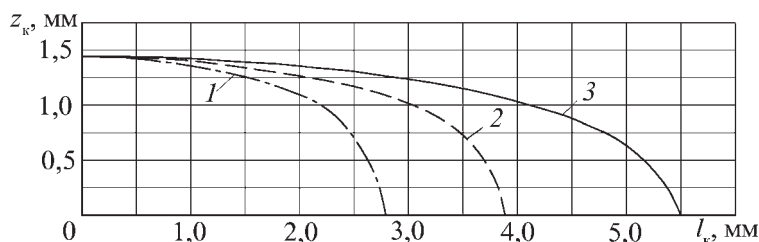


Рис. 2. Изменение полуширины контакта по его текущей длине для ролика с вогнутой (3) и выпуклой образующими (1) и цилиндрического ролика (2) ( $r_d = 10,5$  мм;  $r_n = 10$  мм;  $R_p = 100$  мм;  $\omega = 15^\circ$ )

наибольшую длину контакта при одной и той же глубине внедрения ролика и начальном диаметре ролика  $r_n$  в средней части контакта.

Полученные зависимости для определения геометрических параметров контакта позволяют определить прогиб трубы. Для решения этой задачи будем предполагать в первом приближении, что напряжения по площади контакта распределены в соответствии с теорией Герца:

$$\sigma_1 = \sigma_m \sqrt{1 - \left(\frac{z_k}{z_m}\right)^2 - \left(\frac{l_k}{L_k}\right)^2}.$$

При этом полагаем, что максимальное напряжение  $\sigma_m$  в центре контакта превышает предел текучести в 2–3 раза [1] для создания пластического течения металла.

Усилие деформирования, действующее на один обжимной ролик, равно интегралу от напряжений по площади контакта:

$$P_y = \int_0^{L_k} \int_0^{z_k} 4\sigma_1 dz_k dl_k.$$

Для определения прогиба трубы от сосредоточенной силы существует решение [2]:

$$\Delta R_m = \frac{0,135 P_y r_d^2}{E h_{тр}^3},$$

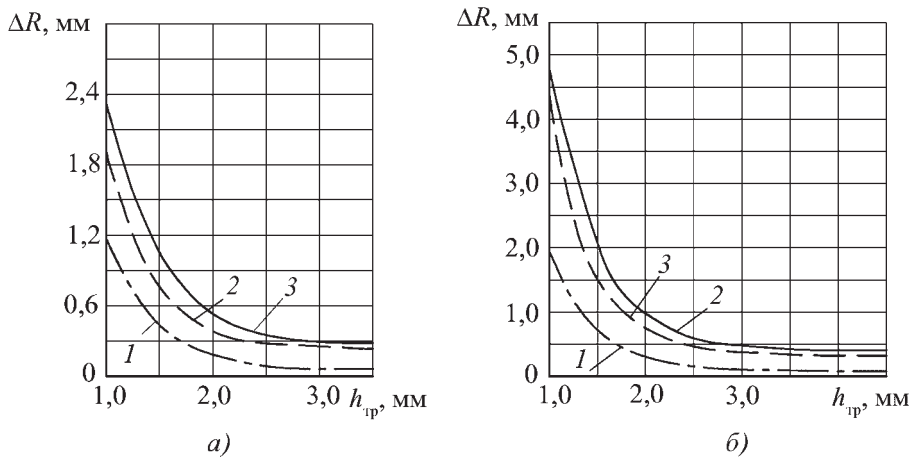
где  $P_y$  – сосредоточенная сила;

$E$  – модуль упругости;

$h_{тр}$  – толщина стенки трубы.

Прогиб стенки трубы от единичной силы  $P$ , расположенной на расстоянии  $l_k$  от рассматриваемого сечения, где происходит прогиб, может быть определен из зависимости

$$\Delta R_p = \frac{0,382 P r_d^2}{E h_{тр}^3 e^{\beta \sqrt{z_k^2 + l_k^2}}} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \beta \sqrt{z_k^2 + l_k^2}\right),$$



**Рис. 3.** Изменение величины прогиба стенки трубы в зависимости от ее толщины: а – для трубы с  $r_d = 10,5$  мм; б – для трубы с  $r_d = 16$  мм; 1, 2 – для роликов соответственно с выпуклой и вогнутой образующими; 3 – для цилиндрического ролика ( $\sigma_m = 240$  МПа;  $E = 2,1 \cdot 10^4$  Н/м<sup>2</sup>)

где  $\beta$  определяется по формуле

$$\beta = \frac{0,3125}{r_d}.$$

Прогиб стенки трубы от распределенных по площади контактных напряжений определяется через интеграл

$$\Delta R(h_{пр}) = \int_0^{L_k} \int_0^{z_k} \frac{1,527 \sigma_1 r_d^2}{E h_{пр}^3 e^{\beta \sqrt{z_k^2 + l_k^2}}} \cos \left( \frac{\pi}{4} - \beta \sqrt{z_k^2 + l_k^2} \right) dz_k dl_k.$$

На основе полученных выражений для полуширины и длины контакта построены графические зависимости прогиба стенки трубы под обжимающим роликом (рис. 3).

Анализ этих графиков показывает, что для одной и той же глубины внедрения ролика в поверхность трубы и при одном и том же начальном радиусе ролика прогиб стенки трубы зависит от формы рабочей поверхности ролика. Наибольший прогиб трубы соответствует вогнутому ролику, что объясняется большим усилием деформирования за счет большей площади контакта.

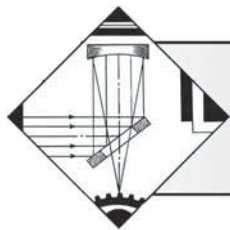
На полученных графиках величина деформации стенки трубы для толщины более 2 мм носит один порядок с половиной допуска отклонения формы (для трубы диаметром 21 мм регламентируемый допуск 0,63 мм). Следовательно,

можно сделать вывод о возможности обеспечить требуемый минимальный допуск на отклонение от круглости способом ротационного обжатия при силовом воздействии, соответствующем обработке поверхностным пластическим деформированием.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Исследование взаимосвязи усилия с деформацией образцов при внедрении конического ролика в цилиндрические детали / Н.И. Никифоров // Известия ВолгГТУ. Серия "Прогрессивные технологии в машиностроении". 2006. № 4 (19). С. 41–44.**
2. **Отений Я.Н.** Технологическое обеспечение качества деталей машин поверхностным пластическим деформированием. Волгоград: ВолгГТУ, 2005. 224 с.





УДК 621.793.182:621.893

А.И. Беликов<sup>1</sup>, С.Е. Белов<sup>2</sup>, М.Н. Боровков<sup>2</sup>, И.А. Иляхинский<sup>2</sup>,  
С.А. Долгов<sup>2</sup>, В.Н. Калинин<sup>1</sup>, Н.С. Седых<sup>1</sup>, М.А. Шарапов<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, <sup>2</sup>ОАО "ОКБМ Африкантов", г. Нижний Новгород)  
E-mail: belikov@bmstu.ru

## Исследование трибологических характеристик тонкопленочных антифрикционных упрочняющих композитных покрытий при сухом трении в среде гелия

*Приведены исследования трибологических характеристик тонкопленочных композитных покрытий на основе TiCN и WS<sub>2</sub> в условиях сухого трения в среде гелия.*

**Ключевые слова:** антифрикционные покрытия, газовая турбина, модульный гелиевый реактор, резервный подшипник, ионная обработка, магнетронное осаждение.

*Thin film composition based on TiCN and WS<sub>2</sub> tribological characteristics in helium conditions dry friction is introduced.*

**Keywords:** solid lubricant coatings, gas turbine, modular helium reactor, catcher bearing, ion processing, magnetron sputtering.

### Введение

В настоящее время перспективным направлением развития ядерной энергетики является создание высокоэффективных ядерных реакторов нового поколения, обладающих более высоким коэффициентом полезного действия и повышенным уровнем безопасности. В системе охлаждения этих реакторов используется гелий.

Энергоблок с высокотемпературными гелиевыми реакторами (рис. 1, см. с. 2 обложки) для производства электроэнергии – модульными гелиевыми реакторами с газовой турбиной (ГТ-МГР) – включает в свой состав турбомашину (ТМ), предназначенную для преобразования тепловой энергии теплоносителя в электроэнергию при работе по прямому газотурбинному циклу и обеспечения циркуляции гелия в первом контуре [1].

Работоспособность ТМ для реакторной установки ГТ-МГР во многом определяется надежностью системы электромагнитного подвеса вертикального гибкого ротора общей массой 67,7 т, длиной 25 метров. Система электромагнитного подвеса ротора ТМ состоит из осевых и радиальных электромагнитных подшипников (ЭМП), системы управления ЭМП и резервных подшипников (РП).

В то же время надежность работы системы ЭМП при эксплуатации зависит от внешнего источника питания и системы управления, поэтому всегда существует вероятность потери питания ЭМП, что может привести к полному прекращению их функционирования. Таким образом, возникает необходимость в использовании РП, которые обеспечивают безаварийную работу ТМ на выбеге, работая в течение короткого времени. Кроме того, РП используются при:

- плановом отключении ЭМП остановленного ротора ТМ;
- динамических нагрузках, превышающих грузоподъемность ЭМП.

В качестве РП ТМ ГТ-МГР используют подшипники скольжения [2, 3]. Общие трибологические проблемы создания РП связаны с наличием сухого трения в гелиевой среде и существующими ограничениями на использование смазочных материалов, которые могли бы загрязнить гелиевый теплоноситель первого контура установки ГТ-МГР, а также большими (до 280 м/с) скоростями скольжения в зоне контакта. Для решения этой задачи в ОАО "ОКБМ Африкантов" была разработана поэтапная программа исследований материалов пар трения [4, 5]:

– этап 1 – предварительные испытания материалов пар трения на пониженных скоростях скольжения и штатных удельных нагрузках;

– этап 2 – испытания макетов РП с материалами пар трения, выбранными в результате испытаний на этапе 1, при штатных скоростях скольжения и штатных удельных нагрузках;

– этап 3 – испытания материалов пар трения в составе опытных образцов РП при штатных условиях эксплуатации.

Для реализации этапа 1 испытаний была осуществлена работа по исследованию трибологических характеристик различных сочетаний материалов в паре трения скольжения. Часть полученных результатов, а именно исследование трибологических характеристик тонкопленочных антифрикционных упрочняющих композитных покрытий при сухом трении в среде гелия, приводится в данной статье.

### Экспериментальная часть

**Выбор материалов и композитной структуры покрытия.** В качестве основных требований, которые предъявляются к трибологическим свойствам материалов пар трения РП скольжения ТМ ГТ-ГМР, можно отметить следующие [4, 5]:

1. Сохранение функциональных свойств на скоростях скольжения до 280 м/с при контактных давлениях до 25 МПа и температурах до 700 °С в условиях инертной газовой среды (гелий реакторной чистоты). Стойкость к ударным нагрузкам.

2. Обеспечение стабильных трибологических характеристик пары трения на уровне: динамический коэффициент трения не более 0,05; суммарная линейная интенсивность изнашивания материалов пары трения не более  $10^{-8}$ .

Среди перспективных антифрикционных материалов, обеспечивающих высокие трибологические характеристики в условиях инертных сред, можно выделить такие твердосмазочные материалы, как дисульфиды тугоплавких металлов ( $WS_2$ ,  $MoS_2$ ), имеющие слоистую структуру с низким усилием сдвига по атомным плоскостям серы. Наиболее ярко высокие трибологические характеристики этих материалов проявляются в том случае, когда покрытия формируются в вакууме методами *ионно-плазменного нанесения* (ИПН) [6, 7].

Такая технология обеспечивает чистоту и оптимальный стехиометрический состав покрытия, высокие адгезионные связи с подложкой. Кроме того, покрытия, формируемые методом ИПН в сравнении с покрытиями на основе дисульфида молибдена, наносимыми другими методами, обладают на порядок

меньшей интенсивностью изнашивания (линейный износ на уровне  $10^{-9}...10^{-10}$ ).

Основными недостатками рассматриваемых покрытий являются подверженность абразивному изнашиванию и малая толщина, составляющая, как правило, 1...3 мкм и не обеспечивающая длительный срок службы пары трения. В качестве мер, способствующих повышению долговечности покрытий ИПН  $MoS_2$ , можно отметить способ формирования регулярного искусственного микрорельефа под покрытие (работы, проводимые в ИМаш им. А.А. Благонравова РАН в 1990-е годы) [9].

Развитие техники и технологий вакуумного осаждения покрытий способствует разработке современных покрытий различной композитной структуры. Так, применение дисульфидов молибдена и вольфрама в составе различных композиций, включающих износостойкие тонкопленочные покрытия, способствует повышению износостойкости традиционных слоистых твердосмазочных покрытий.

На основании имеющихся данных и результатов исследования разных материалов и композитных структур [8, 9], на первом этапе испытаний, было предложено использовать следующие два типа *антифрикционных упрочняющих композитных покрытий* (АУКП) на основе различных композитных структур гетеротрибологических материалов (т.е. материалов, обладающих либо высокими антифрикционными свойствами, но низкой износостойкостью, либо, наоборот, имеющих высокую износостойкость при низких антифрикционных свойствах):

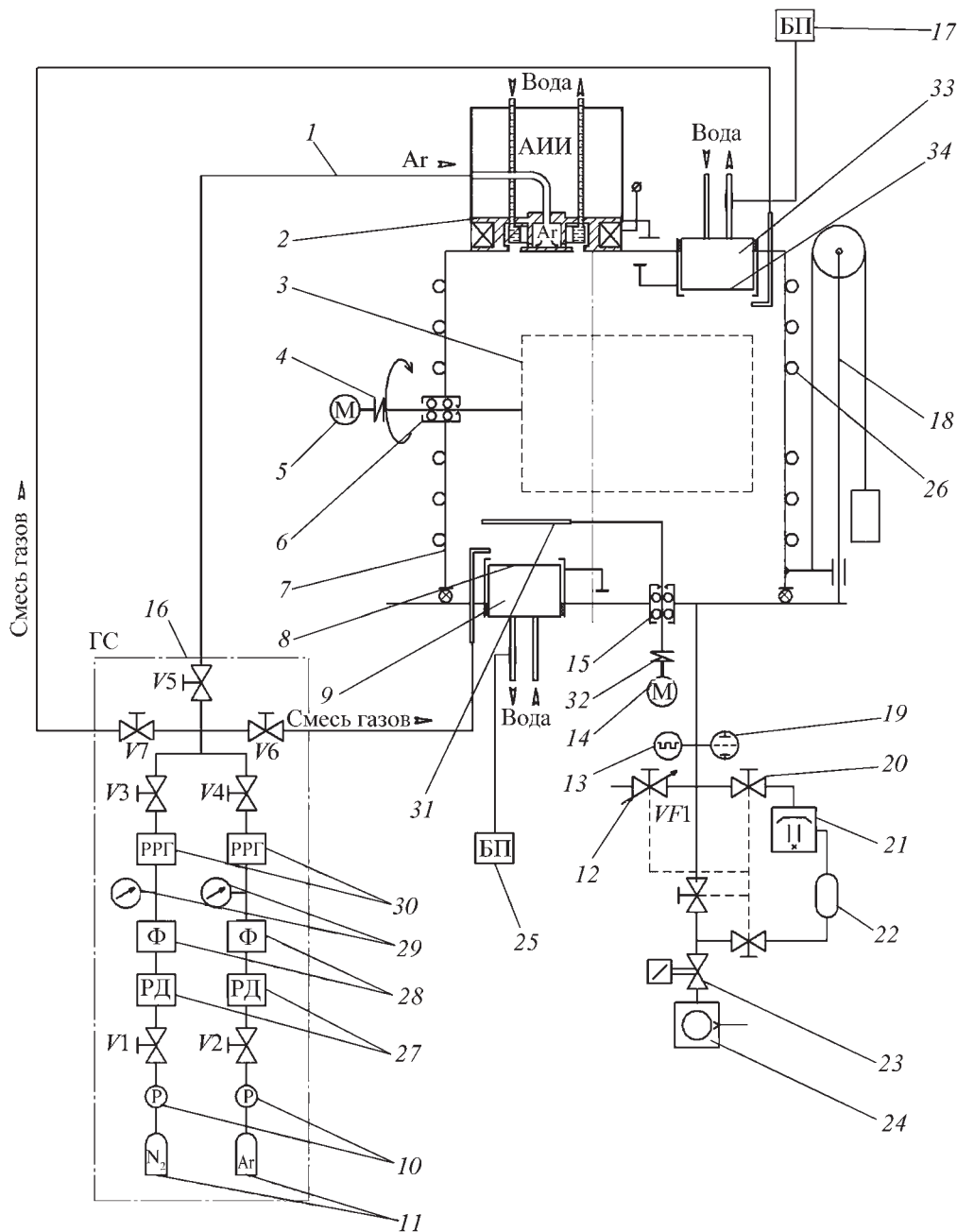
1. *Четырехслойное покрытие*, сочетающее слои тонких пленок  $TiCN$  и  $WS_2$ .

2. *Покрытие на основе трехмерных планарных топологических структур*, объединяющее преимущества регулярного микрорельефа, дискретных и комбинированных покрытий. Основу композиции также составляли тонкие пленки  $TiCN$  и  $WS_2$ .

**Формирование покрытий на опытных образцах.** Работы по нанесению АУКП выполняли в лаборатории кафедры "Электронные технологии в машиностроении" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Для этих целей использовали технологическую систему на основе модернизированной вакуумной установки "Balzers-350G", основу которой составляют *автономный источник ионов* (АИИ) с холодным катодом типа "Радикал" 2 и два магнетрона на постоянном токе 9 и 33 (рис. 2).

Опытные образцы размещали на внутрикамерной оснастке 3, соединенной с электроприводом 5, посредством вакуумного ввода вращения 6, установленного на фланце рабочей камеры 7.

Газовая система установки реализована на регуляторах расхода газов РРГ-9 30 и обеспечивает формирование заданной смеси газов на основе аргона и



**Рис. 2. Схема установки для вакуумного нанесения тонкопленочных АУКП:**

1 – газовая магистраль; 2 – АИИ; 3 – оснастка для размещения образцов; 4, 32 – муфты; 5, 14 – электродвигатели; 6, 15 – ввод вращения в вакуум; 7 – камера; 8, 34 – распыляемые мишени; 9, 33 – магнетроны; 10 – газовый редуктор; 11 – баллон с газом; 12 – клапан-накататель; 13 – термопарный датчик давления; 16 – клапан (V1–V7) газовой системы ГС; 17, 25 – блоки питания БП магнетрона; 18 – механизм подъема камеры; 19 – ионизационный датчик давления; 20 – блок клапанов; 21 – диффузионный насос; 22 – газобалластный объем; 23 – электромагнитный клапан; 24 – механический насос; 26 – магистраль охлаждения камеры; 27 – регулятор давления РД газа; 28 – фильтр Ф; 29 – манометр; 30 – регулятор расхода газа РРГ; 31 – заслонка

азота. Процентное соотношение и величина потока напускаемых газов задаются управляющей программой с компьютера типа IBM-PC, к которому через платы цифро-аналоговых (ЦАП) и аналого-цифровых

(АЦП) преобразователей подключены регуляторы расхода газов. Вакуумная система установки обеспечивает откачку камеры до остаточного давления  $1,3 \cdot 10^{-3}$  Па.

Таблица

Режимы нанесения покрытий

Покрытие	Рабочее давление, Па	Напряжение, В	Сила тока, А	Газовая среда
TiCN	0,66	480	0,8	Ar+N <sub>2</sub>
WS <sub>2</sub>	0,13	660	0,4	Ar

Технология формирования покрытий включала предварительную очистку поверхности на базе жидкостных методов, обработку образцов перед нанесением покрытия потоком ионов АИИ на следующих режимах: рабочее давление  $(2,6...4) \cdot 10^{-2}$  Па; ускоряющее напряжение 2...2,3 кВ; плотность ионного потока 0,2 мА/см<sup>2</sup>.

Для очистки и активации поверхности нанесение слоев покрытия методом магнетронного распыления мишеней соответствующих материалов (TiC и WS<sub>2</sub>) осуществляли на режимах, которые приведены в таблице.

При формировании покрытия типа 2 в технологическом процессе использовали операцию ионного травления регулярного микрорельефа на поверхности изделия через теньевую металлическую маску. Суммарная толщина полученных покрытий составляла ориентировочно 1,5...2 мкм.

**Трибологические испытания.** Испытания покрытий осуществляли на трибометре TR20 M40, внешний вид которого представлен на рис. 3. Трибометр соответствует стандарту ASTM G99 и предназначен для исследования материалов в узле трения по схеме штифт–диск в газовой среде при температурах до 400 °С, давлении газа до 0,2 МПа, осевой нагрузке на штифт до 200 Н, линейных скоростях скольжения 0,5...10 м/с.

**Методика испытаний.** Объектом испытаний являлись материалы контактирующих пар в узле трения штифт–диск (рис. 4). В качестве образцов под тонкопленочные АУКП использовали диски из стали 38ХН3МФА с наружным диаметром 100 мм. Исходный параметр шероховатости поверхностей дисков составлял порядка  $Ra = 0,4$  мкм. Ответным элементом пары трения являлся образец-штифт, который изготавливали из следующих материалов:

1. Металлокерамика на основе:
  - Fe–Ni–MoS<sub>2</sub>–графит;
  - Fe–Cu–MoS<sub>2</sub>–графит;
  - Ni–графит;
  - Cu–WS<sub>2</sub>.



Рис. 3. Трибометр TR20 M40

2. Композиционный материал на основе углерода.
3. Железографит с содержанием Cu.
4. Железографит с содержанием MoS<sub>2</sub>.

Диск закрепляли на вращающемся столике, затем в специальном зажиме, обеспечивающем параллельность контактирующих поверхностей, устанавливали неподвижный образец-штифт, представляющий собой цилиндр с диаметром торцевой поверхности (участвующей в контакте) 12 мм.

После установки образцов в узел трения стенда осуществляли опускание колпака рабочей камеры и ее герметизацию, с помощью прикладного программного обеспечения задавали требуемые параметры испытаний.

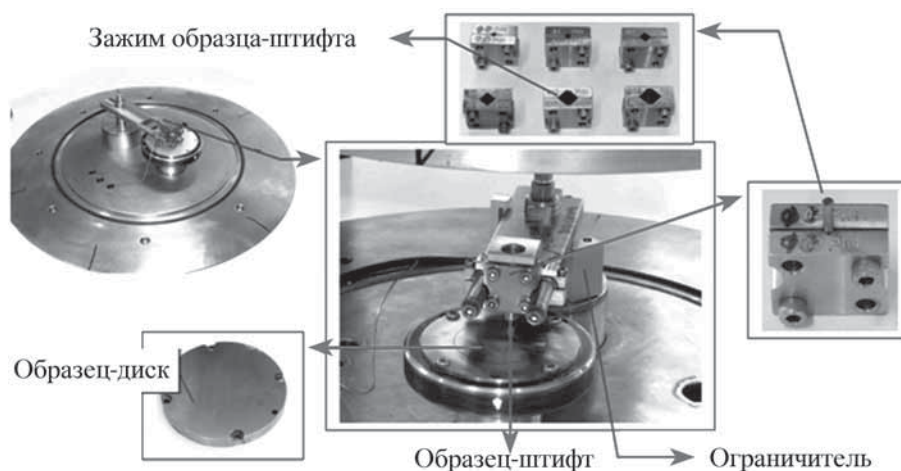


Рис. 4. Узел трения штифт–диск при испытаниях

Для обеспечения представительности испытаний пар трения для разрабатываемых РП скольжения ТМ ГТ-ГМР необходимо выдерживать соответствие параметров испытуемой и штатной сред. Поэтому все испытания проводили в среде гелия при температуре  $(100 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$  и давлении  $(0,1 \pm 0,005) \text{ МПа}$ .

После откачки воздуха из рабочей камеры трибометра осуществляли напуск гелия марки "Б" до давления 0,1 МПа, нагрев рабочей камеры и при достижении температуры  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  реализовывали программу трибологических испытаний пары трения на заданных параметрах. В соответствии с программой испытаний были предусмотрены два пуска продолжительностью по 600 с, перерыв между пусками 300 с. Пуск и останов узла трения проводили под нагрузкой. По завершении второго пуска была предусмотрена ревизия образцов. Испытания пары трения одного комплекта материалов проводили два раза. Для второго испытания использовали новый комплект образцов.

В процессе испытаний выполняли контроль и регистрацию с помощью программного обеспечения трибометра следующих параметров: времени испытаний, осевой нагрузки, силы трения, температуры гелия в рабочей камере, температуры образца-штифта, величины износа, температуры нагревателя, давления гелия в рабочей камере и частоты вращения диска.

По окончании испытаний осуществляли сброс рабочего давления, расхолаживание рабочей камеры и ее открытие для проведения ревизии образцов и установки следующего комплекта пары трения. Во время ревизии выполняли визуальный осмотр образцов, взвешивание неподвижного образца-штифта, определение весового и местного линейного износа, снятие профилограммы поверхности диска, а также фотографирование образцов.

### Результаты исследований

Полученные в ходе испытаний на трибометре данные по динамике изменения коэффициента трения образцов в каждой серии пусков в виде графических зависимостей сводили в единое результирующее окно программы (рис. 5 см. с. 2 обложки), что обеспечивало визуальное сопоставление полученных данных.

Для некоторых образцов дисков с покрытием в паре трения наблюдались низкие значения коэффициента трения в течение некоторого непродолжительного интервала времени и затем его резкое увеличение на порядок (см. рис. 5 с. 2 обложки, кривые Plot 2, Plot 5). Это, по-видимому, связано с недостаточно хорошим качеством некоторых полученных покрытий, сла-

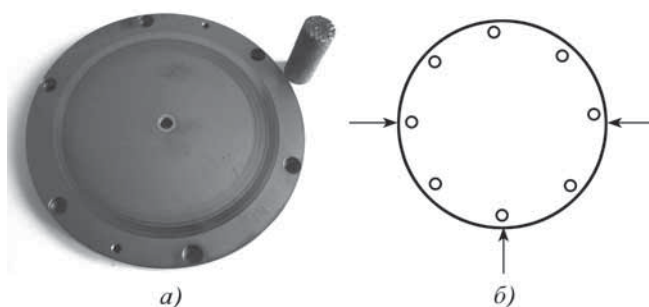


Рис. 6. Образцы после испытаний на трибометре (а) и схема расположения на диске направлений снятия профилограмм дорожек износа (б)

быми адгезионными связями между покрытием и подложкой и, как следствие, преждевременным разрушением покрытия. Однако основная часть образцов продемонстрировала высокие антифрикционные характеристики и по совокупности проведенных исследований позволила выявить определенные закономерности.

Внешний вид вращающегося образца-диска после проведенных испытаний на трибометре представлен на рис. 6. Для оценки износа поверхности осуществляли снятие профилограмм с поперечного сечения образовавшейся дорожки трения в двух взаимно перпендикулярных направлениях (см. рис. 6) с помощью профилографа-профилометра модели New Form Talysurf фирмы Taylor & Hobson. Профилометрирование проводили с гарантированным перекрытием отрезком измерения ширины дорожки трения, размер которой в соответствии с диаметром контртела составлял 12 мм.

На рис. 7 и 8 приведены профилограммы поверхности дорожек износа для дисков с покрытием соответственно типа 1 и типа 2, которые демонстрировали наилучшие трибологические характеристики на протяжении двух пусков. Как видно из приведенных результатов, в случае многослойного покрытия износ

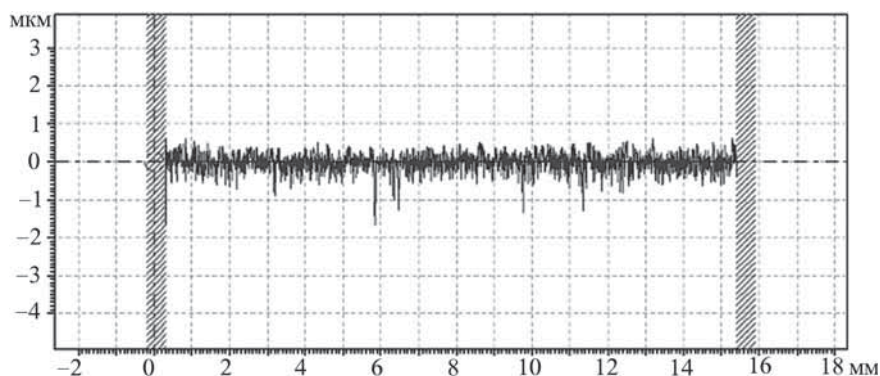


Рис. 7. Профилограмма дорожки износа покрытия типа 1

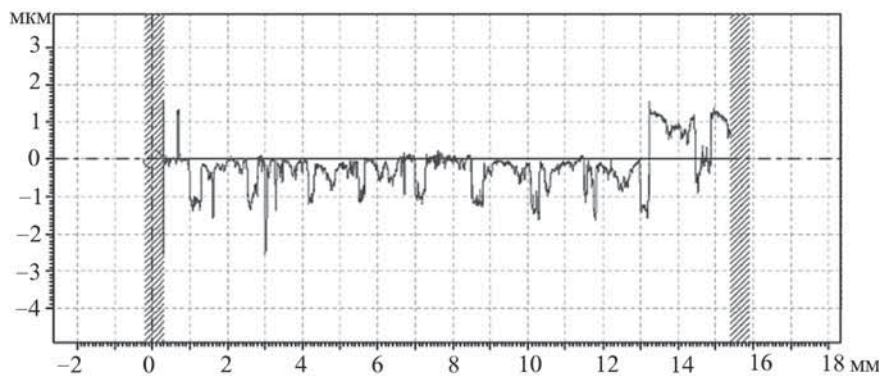


Рис. 8. Профилограмма дорожки износа покрытия типа 2

практически сложно оценить, лунка износа явно не выделяется, профиль, скорее, отражает исходную шероховатость поверхности, отдельные царапины имеют глубину до 0,5...1,5 мкм. Коэффициент трения в данном случае демонстрировал высокую стабильность на протяжении испытаний и имел значение на уровне 0,02.

Для случая покрытия с регулярным микрорельефом также наблюдается несущественный износ, четко видна структура углублений микрорельефа, причем большая часть углублений остается практически незаполненной частицами износа покрытия, значение максимального износа участков опорной поверхности композитной структуры можно оценить величиной не более 0,1 мкм, что свидетельствует о высокой износостойкости и ресурсе такого варианта покрытия. Коэффициент трения этого варианта покрытия находился на уровне 0,03 и также имел высокую стабильность.

### Заключение

Представленные варианты антифрикционных упрочняющих композитных покрытий в большинстве исследуемых пар трения обладают высокими антифрикционными характеристиками – стабильным коэффициентом трения на уровне 0,02...0,04, а в некоторых случаях были достигнуты значения порядка 0,01. Рассматриваемые варианты композитной структуры подобных покрытий обладают высоким потенциалом применительно к износостойкости. Так, в испытаниях некоторых пар трения были достигнуты значения линейной интенсивности изнашивания покрытий  $10^{-11}$  и менее.

Программа испытаний не предусматривала ресурсные испытания покрытий, однако, основываясь на полученных в этой работе и ранее результатах, можно отметить, что покрытия типа 2 за счет эффектов дискретной планарной структуры и релаксационных эффектов регулярного микрорельефа могут обеспечивать в 2–3 и более раз большую износостойкость в сравнении с многослойными покрытиями типа 1. Однако технология нанесения покрытий типа 2 за

счет применения операций размерной обработки является более затратной и трудоемкой.

Перспективными для применения в качестве материалов контртела к представленным здесь вариантам АУКП можно считать: металлокерамики Fe–Ni–MoS<sub>2</sub>–графит и Fe–Cu–MoS<sub>2</sub>–графит, композиционный материал на основе углерода, железографит с содержанием Cu, железографит с содержанием MoS<sub>2</sub>. Покрытия в парах трения с металлокерамикой Cu–WS<sub>2</sub>, напротив, имели существенно больший износ и высокий коэффициент трения, по всей видимости, вследствие сильного адгезионного взаимодействия между материалами пары.

Результаты, полученные при выполнении 1-го этапа программы исследований, позволили рекомендовать тонкопленочные антифрикционные упрочняющие покрытия для дальнейших исследований на 2-м этапе.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костин В.И., Кодочигов Н.Г. и др. Развитие проекта блока преобразования энергии ГТ-МГР // Атомная энергия. 2007. Т. 102. Вып. 1. С. 57–63.
2. Белов С.Е., Боровков М.Н. и др. Подходы к проектированию страховочных подшипников для турбомашин газозохлаждаемых реакторов // Сб. докл. V науч.-техн. конф. "Молодежь в науке". Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. С. 521.
3. Боровков М.Н., Белов С.Е., Новинский Э.Г. Разработка страховочных подшипников вертикальной турбомшины установки ГТ-МГР // Тр. Нижегородского гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева. 2010. № 2 (81). С. 134.
4. Кодочигов Н.Г., Белов С.Е. и др. Экспериментальные исследования материалов пар трения для резервных подшипников турбомшины модульного гелиевого реактора с газовой турбиной (ГТ-МГР) // Вопросы материаловедения. 2006. № 2 (46). С. 199.
5. Kodochigov N.G., Belov S.E. et al. Tribological tests of friction pair materials for the GT-MHR turbomachine catcher bearings // IJTC 2008.
6. Панфилов Ю.В., Беликов А.И. Антифрикционные тонкопленочные покрытия на основе дисульфида молибдена // Справочник. Инженерный журнал. 2003. № 3. С. 9–14.
7. Панфилов Ю.В., Беликов А.И. Тонкопленочные антифрикционные покрытия на основе MoS<sub>2</sub> // Электровакуумная техника и технология / Тр. постоянно действующего науч.-техн. семинара. 2003. Т. 2. С. 72–79.
8. Беликов А.И., Шарапов М.А., Хабинская Е.И. Исследование механических и трибологических свойств тонкопленочных структур на основе слоев MoN, TiCN и MoS<sub>2</sub> // Высокие технологии в промышленности России: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. 2008. С. 474–477.
9. Беликов А.И., Седых Н.С. Вакуумные технологии формирования дискретных упрочняющих покрытий на основе регулярного микрорельефа // Высокие технологии в промышленности России: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. 2007. С. 300–303.

УДК 534.222.2+621.793+620.1

А.А. Штерцер, С.Б. Злобин, В.Ю. Ульяницкий  
 (Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск)  
 E-mail: asterzer@mail.ru

## Термоциклические свойства градиентных покрытий керамика—металл, полученных детонационным напылением\*

Проводили нанесение композиционных, слоистых и градиентных покрытий с использованием оборудования и технологии последнего поколения — детонационного напыления с компьютерным управлением (CCDS — Computer Controlled Detonation Spraying). Оборудование позволяет использовать два порошковых дозатора для организации попеременных выстрелов двумя различными порошковыми компонентами, причем соотношение между числом выстрелов той или иной компонентой меняется во времени по заданной программе. Применяя технологию CCDS, можно относительно просто получать самые разнообразные композиционные покрытия, в том числе системы керамика—металл. Приведены примеры покрытий, получаемых методом CCDS, и исследована термоциклическая стойкость градиентных слоев Ti—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Ключевые слова:** детонационное напыление, компьютерное управление, градиентное покрытие, термоциклические свойства.

Composite, laminated and gradient coatings were deposited using Computer Controlled Detonation Spraying (CCDS) based on the new generation of equipment and technology. CCDS equipment is supplied with two powder feeders helping to organize alternating shots with two different powders; at that proportion between the shots with one and another powder is changed in time according to the given program. CCDS helps to deposit very different composite coatings including ceramics — metal systems. Examples of coatings made by CCDS technique are given, and thermocyclic properties of gradient Ti—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layers were investigated.

**Keywords:** detonation spraying, computer control, gradient coating, thermocyclic properties.

### Введение

Анализ научной литературы показывает, что в настоящее время ведутся активные исследования по получению керамических термобарьерных покрытий с применением газотермических способов. Характерно, что чаще всего используют плазменное напыление порошков [1–4].

С применением специальных плазменных установок путем осаждения из паров получают термобарьерные покрытия со столбчатой (columnar) структурой [5]. При толщине покрытия в сотни микрон поперечный размер столбчатых элементов составляет около 40 мкм. Такая структура, благодаря возможности столбчатых элементов смещаться относительно друг друга при нагреве и охлаждении, обеспечивает повышенную термоциклическую стойкость покрытия. Недостатком является высокая стоимость данной технологии.

Для более широкого распространения термобарьерных покрытий необходимы более дешевые способы их получения. Альтернативной технологией является нанесение градиентных покрытий с постепенным пе-

реходом от металлической подложки к керамическому слою с применением компьютеризированного детонационного комплекса, разработанного в ИГиЛ СО РАН в последние годы. Комплекс вместе с методикой его обслуживания и работы на нем составляет технологию детонационного напыления с компьютерным управлением CCDS (Computer Controlled Detonation Spraying).

Ствол комплекса может быть оснащен двумя дозаторами (рис. 1), что позволяет относительно просто напылять композиционные, многослойные и гради-

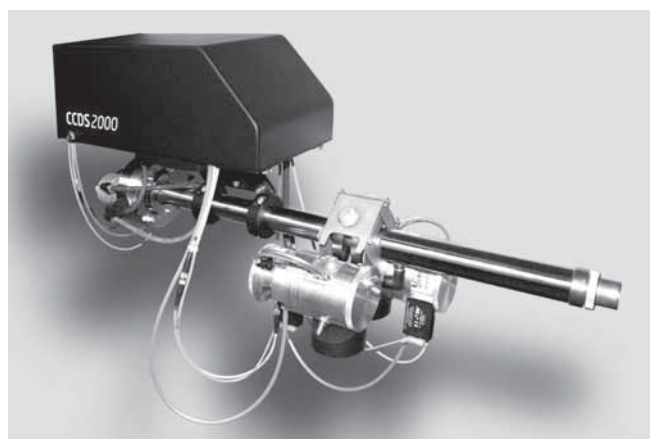


Рис. 1. Ствол комплекса CCDS с двумя дозаторами

\* Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН (проект 23.17), интеграционных проектов СО РАН № 82 и 108, и научной школы НШ-1886.2008.1.

ентные покрытия. Исчерпывающее описание процессов детонации и детонационного напыления, реализуемых в технологии CCDS, дано в [6].

Микроструктура и механические свойства получаемых по этой технологии градиентных покрытий титан–оксид алюминия описаны ранее в [7, 8]. В данной статье проиллюстрированы возможности CCDS в создании композиционных слоистых структур и приведены результаты термоциклических испытаний градиентных покрытий Ti–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### Нанесение композиционных покрытий

Детонационное напыление в отличие от других газотермических технологий является импульсным циклическим процессом, в котором покрытие получают последовательностью выстрелов, в каждом из которых в стволе детонационной установки разгоняется заданная порция порошка. Характерной особенностью технологии CCDS является возможность по заданной программе менять параметры выстрела (величина заряда детонирующей газовой смеси и состав смеси) и подавать в ствол порошок попеременно из двух дозаторов.

Таким образом, отработав отдельно для каждого порошка оптимальный режим напыления, можно занести параметры этого режима в компьютер при задании программы для напыления композиционного покрытия. В процессе напыления происходит чередование выстрелов порошком из дозаторов и для каждого порошка используются оптимальный для него состав взрывчатой смеси и величина заряда.

На рис. 2, 3 (см. с. 2 обложки) показаны микроструктуры композиционных покрытий, в которых оксид алюминия сочетается с твердым сплавом WC–Co–Cr (86–10–4 % мас.) и медью; на рис. 4 (см. с. 2 обложки) микроструктура слоистого покрытия медь–титан; на рис. 5, 6 (см. с. 3 обложки) – микроструктуры градиентных покрытий соответственно медь–титан, медь–твердый сплав и титан–оксид алюминия (рис. 7).

Детонационные покрытия наносят послойно. Если наносить градиентное покрытие по классической технологии с одним дозатором, то для каждого слоя нужно готовить порошковую смесь отдельно, поскольку пропорция между компонентами меняется от слоя к слою. Это значительно повышает трудоемкость и время напыления. Кроме того, существует проблема выбора режима напыления, поскольку температура плавления и другие теплофизические параметры компонентов порошковой смеси могут сильно различаться.

Приведенные выше примеры показывают, что технология CCDS позволяет относительно просто ре-

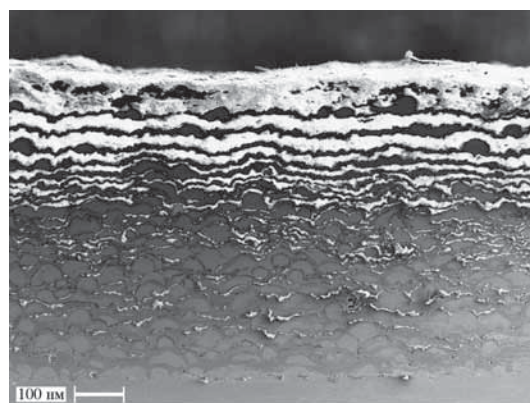


Рис. 7. Микроструктура градиентного покрытия с постепенным переходом от титана (внизу) к оксиду алюминия (вверху)

шить эту проблему и наносить самые различные композиционные, слоистые и градиентные покрытия, в которых сочетаются материалы со значительно различающимися физическими свойствами.

Поскольку градиентные покрытия титан–оксид алюминия представляют интерес как термобарьерные, были подготовлены образцы для испытания на термоциклическую прочность. Использовали методику напыления, описанную в [7], где покрытия наносили на титановые подложки.

В данном случае на плоские стальные (Ст3) подложки толщиной 2 мм наносили градиентные покрытия, состоящие из 4, 9 и 16 слоев (варианты 1, 2 и 3 соответственно). Толщина всех покрытий была одинаковой (500 мкм). Кроме того, для сравнения результатов испытаний наносили покрытие из чистого оксида алюминия. Площадь покрытий 20×50 мм.

Сочетания выстрелов между компонентами в слоях приведены в таблице. Например, в варианте 1 в первом слое делалось 16 выстрелов титаном и 4 выстрела оксидом алюминия, во втором слое на 12 выстрелов титаном приходится 8 выстрелов оксидом алюминия и т.д. В варианте 3: в первом слое 9 выстрелов Ti и 1 выстрел Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; во втором слое 4 выстрела Ti и 1 выстрел Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; в третьем слое 4 выстрела Ti и 1 выстрел Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и т.д.

В экспериментах использовали порошки оксида алюминия и титана (производитель TLS Technik GmbH) с размером частиц 40...60 мкм. Выстрелы титаном выполняли с использованием газовой смеси кислород/ацетилен в соотношении 1,05/1 с заполнением ствола 30 %. Оксид алюминия напыляли смесью кислород/ацетилен в пропорции 2,5/1 с заполнением ствола 60 %. Дистанция напыления 200 мм.

**Термоциклические испытания покрытий.** Испытания на термоциклическую стойкость представляют собой достаточно сложный вид тестирования, поскольку зачастую трудно в лабораторных условиях создать ре-



Послойное сочетание материалов в покрытиях

Материал	Число выстрелов															
<i>Вариант 1</i>																
Ti	16	12	8	4												
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4	8	12	16												
<i>Вариант 2</i>																
Ti	9	8	7	6	5	4	3	2	1							
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	2	3	4	5	6	7	8	9							
<i>Вариант 3</i>																
Ti	9	4	4	3	4	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	1	1	1	2	2	2	3	2	3	3	4	3	4	4	9

альную ситуацию, в которой эксплуатируется покрытие. Детали, на которые наносят термобарьерные покрытия, как правило, работают в условиях сильных перепадов температур, когда их поверхность находится в контакте с горячими газами, а внутренний объем не должен сильно перегреваться. Учитывая это, был выбран метод, в котором плоский образец толщиной 2,5 мм (покрытие 0,5 мм) помещался над пламенем пропан-бутановой горелки (покрытием в сторону пламени) и производился его нагрев.

Испытываемые образцы показаны на рис. 8 (см. с. 3 обложки). Температура пламени горелки "GEFEST" около 1300 °С, во время нагрева на тыльной (стальной) поверхности образца измеряли температуру с помощью инфракрасного термометра СЕМ DT-8861. Образцы нагревали до температуры 500 °С (на тыльной стороне) и охлаждали следующим образом: первые 50 циклов обдували воздухом, затем для ускорения испытаний опускали в воду. После каждых 20 циклов покрытие рассматривали в микроскоп "Motic" на предмет выявления появившихся микротрещин.

Для сравнения испытаниям подвергали также покрытие из чистого оксида алюминия. После 60–80 циклов испытаний на образце с покрытием из оксида алюминия появился первый скол (рис. 9, см. с. 3 обложки). Второй скол на противоположном конце образца – после 80–100 циклов, а третий скол (на месте первого) – после 100–120 циклов (рис. 10, см. с. 3 обложки).

После 120 циклов испытания на образце с покрытием из чистого оксида алюминия были прекращены, а на образцах с градиентными покрытиями продолжены. Характерно, что уже после 20 циклов нагрева и охлаждения в воде на поверхности всех покрытий появляется характерная сетка микротрещин (см. рис. 10 с. 3 обложки). После 120 циклов на нанесенных во

всех трех вариантах градиентных покрытиях сколов, т.е. отслоений покрытия на всю глубину до подложки не наблюдалось.

После 200 циклов стали наблюдаться тонкие чешуйчатые отслоения с поверхности (рис. 11, см. с. 3 обложки) и дальнейшие испытания были прекращены.

Таким образом, если считать появление отслоений началом разрушения градиентного покрытия, то можно заключить, что его термоциклическая стойкость более чем в 2 раза превышает стойкость покрытия из чистой керамики.

При помещении образца в пламя газовой горелки скорость его нагрева гораздо меньше, чем скорость охлаждения при помещении в воду, так как теплопередача на контактной поверхности газ–твердое тело гораздо ниже, чем на контакте вода–твердое тело. Поэтому при окунании нагретого образца в воду в покрытии возникают и более высокие напряжения. Проведем их оценку.

Пусть температура опускаемого в воду образца равна  $T_1$ , а температура воды  $T_2$ . Тогда, решая для оценки одномерную задачу теплопроводности, найдем, что на поверхности контакта, т.е. на поверхности покрытия, устанавливается температура

$$T_0 = (k_1 T_1 + k_2 T_2) / (k_1 + k_2),$$

где  $k = (\lambda c_p \rho)^{1/2}$ ;

$\lambda$ ,  $c_p$ ,  $\rho$  – соответственно теплопроводность, теплоемкость и плотность материала;

индексы 1 и 2 относятся к материалу покрытия и воде соответственно [9].

Для воды  $\lambda = 0,65$  Вт/(м·К),  $c_p = 4200$  Дж/(кг·К),  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>; для оксида алюминия  $\lambda = 25$  Вт/(м·К),  $c_p = 880$  Дж/(кг·К),  $\rho = 4000$  кг/м<sup>3</sup>.

Если считать температуру опускаемого в воду образца  $T_1$  равной 500 °С (на самом деле у покрытия она даже выше, чем на тыльной поверхности), а темпера-

туру воды  $T_2 = 20$  °С, то на поверхности контакта первоначально устанавливается температура  $T_0 = 428$  °С.

Таким образом, резкий перепад температуры между поверхностью образца и его внутренними слоями составляет 72 °С.

Термическое напряжение при тепловом ударе (или резком охлаждении) можно оценить по формуле

$$\sigma \approx \alpha \Delta T E,$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала;

$\Delta T$  – перепад температуры (72 °С);

$E$  – модуль Юнга.

Для оксида алюминия  $\alpha = 8,1 \cdot 10^{-6}$  °С и  $E = 300$  ГПа, отсюда получаем  $\sigma \approx 175$  МПа.

Проведенные измерения когезии (прочности на разрыв) детонационных покрытий по методике, описанной в [10], показывают, что у оксида алюминия этот параметр не отличается высоким значением. Если у твердосплавных покрытий WC/Co – 88/12 когезия составляет около 530 МПа, у самофлюсующегося сплава NiCr17Si4B4 достигает и даже может превышать 700 МПа, то у  $Al_2O_3$  когезия имеет значение порядка 30...40 МПа. Для сравнения укажем, что у спеченной керамики  $Al_2O_3$  96 % чистоты твердостью 11 ГПа прочность на сжатие составляет 2100 МПа, а изгибная прочность 345 МПа [11].

Приведенная оценка напряжений весьма приближительная, но она показывает, что уровень циклических термических напряжений в покрытии настолько высок, что приводит к быстрому появлению сетки микротрещин и далее к отколу керамического покрытия.

Обратим внимание на важный с практической точки зрения момент, касающийся термобарьерных покрытий на ответственных деталях, работающих в условиях высокотемпературной окружающей среды. Разрушение керамического покрытия происходит сразу на всю глубину, и оно начинает частями откалываться от подложки. Во время эксплуатации детали появляется риск ее выхода из строя и возникновение аварийной ситуации.

Разрушение же градиентного покрытия начинается с чешуйчатого отслоения наружного слоя, и катастрофического откола частей покрытия от подложки сразу не происходит. Отслоения можно обнаружить при профилактическом осмотре и вовремя заменить ответственную деталь.

### Заключение

Показаны возможности технологии детонационного напыления с компьютерным управлением CCDS в получении композиционных, слоистых и градиентных покрытий из твердосплавных, керамических и металлических порошков.

Проведены термоциклические испытания градиентных покрытий Ti– $Al_2O_3$  путем нагрева на газовой горелке и охлаждения в воду. После 20 циклов нагрева и охлаждения в воду на поверхности всех покрытий появляется характерная сетка микротрещин. Показано, что термоциклическая стойкость градиентного покрытия более чем в 2 раза превышает стойкость чисто керамического покрытия. Так, на покрытии  $Al_2O_3$  скол кусочка покрытия появился после 80 циклов охлаждения в воду. При испытании градиентных покрытий сколов не было замечено и после 200 циклов. Это означает, что даже при наличии микротрещин не происходит катастрофического разрушения градиентного покрытия в виде отслоения от подложки, как это происходит на керамическом покрытии.

Детонационные градиентные покрытия металл–керамика являются перспективными в качестве термобарьерных слоев на деталях, работающих в условиях высокотемпературной окружающей среды.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Qinghe Yu, Abdul Rauf, Chungen Zhou. Microstructure and thermal properties of nanostructured 4 wt.% $Al_2O_3$ –YSZ coatings produced by atmospheric plasma spraying // Journal of Thermal Spray Technology. 2010. Vol. 19 (6). P. 1294–1300.
2. Xie X.Y., Guo H.B., Gong S.K. Mechanical properties of  $LaTi_2Al_9O_{19}$  and thermal cycling behaviors of plasma-sprayed  $LaTi_2Al_9O_{19}$ /YSZ thermal barrier coatings // Journal of Thermal Spray Technology. 2010. Vol. 19 (6). P. 1179–1185.
3. Jing Wu, Hong-bo Guo, Le Zhou et al. Microstructure and thermal properties of plasma sprayed thermal barrier coatings from nanostructured YSZ // Journal of Thermal Spray Technology. 2010. Vol. 19 (6). P. 1186–1194.
4. Liang B., Zhang G. et al. Structure and tribological performance of nanostructured  $ZrO_2$ –3 mol%  $Y_2O_3$  coatings deposited by air plasma spraying // Journal of Thermal Spray Technology. 2010. Vol. 19 (6). P. 1163–1170.
5. K. von Niessen, Gindrat M. Vapor phase deposition using a plasma spray process // Proceed. Intern. Thermal Spray Conf. 2010 (ITSC-2010) – Thermal Spray: Global Solution for Future Applications. Duesseldorf, 2010. P. 234–242.
6. Ulianitsky V., Shtertser A. et al. Computer Controlled Detonation Spraying: from process fundamentals towards advanced applications // Journal of Thermal Spray Technology. 2011. Vol. 20 (4). P. 791–801.
7. Штерцер А.А., Ульяницкий В.Ю., Злобин С.Б. Применение детонационного напыления для формирования градиентных покрытий керамика–металл // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 11. С. 30–35.
8. Shtertser A., Ulianitskii V. et al. Gradient coatings deposited by detonation spraying // Proceed. of the 24-th Intern. Conf. on Surface Modification Technologies. Valardocs, 2011. P. 67–75.
9. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики: учебник. М.: Изд-во МГУ, 2004. 798 с.
10. Злобин С.Б., Ульяницкий В.Ю., Штерцер А.А. Детонационное напыление и исследование свойств покрытий из сплавов на никелевой основе и чугуна // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 11. С. 36–41.
11. Accuratus Corporation: Ceramic materials and ceramic components. [http0://accuratus.co](http://accuratus.co).

УДК 539.213.612.17.533

В.А. Шулов<sup>1</sup>, Д.А. Теряев<sup>1</sup>, Ю.А. Перлович<sup>2</sup>, М.Г. Исаенкова<sup>2</sup>, В.А. Фесенко<sup>2</sup>,  
О.А. Быценко<sup>1</sup>, В.И. Энгелько<sup>3</sup>, К.И. Ткаченко<sup>3</sup><sup>1</sup>Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет),<sup>2</sup>Московский инженерно-физический институт  
(национальный исследовательский ядерный университет),<sup>3</sup>НИИ электро-физической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, г. Санкт-Петербург

E-mail: shulovva@mail.ru

## Текстуробразование в поверхностных слоях мишеней из сплава ВТ9 при их облучении сильноточными импульсными электронными пучками\*

Проанализированы экспериментальные данные о влиянии предварительной механической обработки на физико-химическое состояние поверхностных слоев, облученных импульсными электронными пучками лопаток ГТД из жаропрочного  $\alpha+\beta$ -титанового сплава ВТ9. Установлено, что степень предварительного пластического деформирования оказывает определяющее влияние на толщину перекристаллизованного слоя, формируемого при облучении мишеней сильноточными импульсными электронными пучками.

**Ключевые слова:** сильноточный импульсный электронный пучок, титановые сплавы, поверхностный слой, текстура.

The present paper reviews the X-ray experimental results dedicated to the texture formation into surface layer of gas turbine engine blades from ВТ9 refractory  $\alpha+\beta$ -titanium alloy as a result of irradiation with intense pulsed electron beams.

**Keywords:** intense pulsed electron beam, titanium alloys, surface layer, texture.

### Введение

В работе [1] изучалось влияние режимов электронно-лучевой и финишной термической или термомеханической обработок на эксплуатационные свойства лопаток из  $\alpha+\beta$ -титановых сплавов ВТ6 и ВТ9, в результате чего было установлено, что, используя облучение сильноточными импульсными электронными пучками (СИЭП) в ускорителе "Геза-1" [2] при энергии электронов 115...120 кэВ, плотности энергии 18...20 Дж/см<sup>2</sup> и числе импульсов более 2, удается повысить следующие характеристики лопаток: предел выносливости – от 10 до 40 %; эрозионную стойкость – более чем в 2 раза; жаростойкость – более чем в 3 раза; сопротивление горячей солевой коррозии – более чем в 4 раза [1].

В публикации [3] рассматривался вопрос о причинах различного поведения обработанных СИЭП лопаток из сплавов ВТ6 и ВТ9 при проведении усталостных испытаний (облученные при адекватных условиях лопатки из сплава ВТ6 характеризовались повышением предела выносливости  $\sigma_{-1}$  на 20 % непосредственно после обработки СИЭП и на 40 % после финишной термообработки при 520...560 °С в вакууме  $1,33 \cdot 10^{-4}$  Па в течение 2 ч, а лопатки из сплава

ВТ9 – резким снижением  $\sigma_{-1}$  на 80 % после облучения и только в результате финишной термомеханической обработки при 520...560 °С и нагрузке 160...180 МПа удавалось повысить предел усталости на 20 %).

Методом оптической металлографии (рис. 1) и просвечивающей электронной микроскопии было показано, что облучение СИЭП в режиме плавления приводит к формированию в поверхностном слое толщиной 20...25 мкм тонкодисперсной пластинчатой (игольчатой) микроструктуры. При этом в отличие от лопаток из сплава ВТ6 в модифицированном поверхностном слое лопаток из сплава ВТ9 отмечено

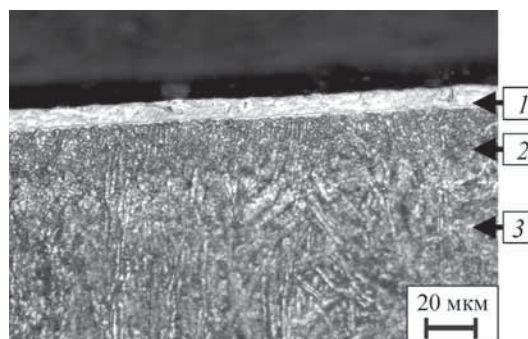


Рис. 1. Микроструктура поверхностного слоя лопаток из сплава ВТ9, подвергнутых обработке СИЭП пятью импульсами при энергии электронов 120 кэВ, длительности импульса 30 мкс и плотности энергии в пучке 18...20 Дж/см<sup>2</sup>

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-08-00672-а, Министерства образования и науки РФ и ММП им. В.В. Чернышева).

присутствие глобулярных выделений размером 10...100 нм с повышенной концентрацией алюминия или молибдена. Последнее может привести к снижению предела выносливости. Еще одной причиной этого может быть текстуробразование в поверхностном слое при облучении СИЭП.

**Цель работы** – исследование текстуры, формируемой в перекристаллизованном материале поверхностного слоя деталей из сплава ВТ9 при их облучении СИЭП в режиме плавления.

### Методика проведения исследования

В качестве объектов исследования использовали образцы диаметром 24 мм и толщиной 5 мм из сплава ВТ9 [3], изготовленные по серийной технологии производства лопаток компрессора ГТД РД33, применяемым на ММП им. В.В. Чернышева. Состояние материала в поверхностных слоях лопаток исследовали методами: рентгеноструктурного анализа, просвечивающей электронной микроскопии и оптической металлографии.

Обработка мишеней СИЭП [2] была реализована в ускорителе "Гега-1" в режиме плавления: энергия электронов 120 кэВ; длительность импульса 30 мкс; плотность энергии в пучке 18...20 Дж/см<sup>2</sup>; площадь поперечного сечения пучка 80 см<sup>2</sup>; неоднородность плотности по сечению пучка менее 10 %.

### Результаты исследований и их обсуждение

Некоторые из полученных результатов представлены на рис. 2–6.

Рентгеновское исследование образцов заключалось в изучении кристаллографической текстуры по методу прямых полюсных фигур [4]. Текстура позволяет восстановить предысторию исследуемых образцов, повторяя симметрию использованной деформационной схемы. У каждого типа кристаллической решетки в зависимости от действующих в ней механизмов деформации существуют ориентации зерен, устойчивые по отношению к сжатию, растяжению и их комбинации, и именно эти ориентации отвечают основным компонентам текстуры изделий.

В рассматриваемом случае модификации пучком электронов кристаллизация расплавленного слоя будет протекать с образованием разных текстур в тех случаях, когда она проходит независимо от подложки или с повторением ориентации ее зерен. При этом текстура слоя, претерпевшего нагрев до температур β-области с последующей закалкой, будет обнаруживать большее или меньшее рассеяние в сравнении с исходной текстурой в зависимости от того, будут ли реализовываться все варианты ориентационного соотношения

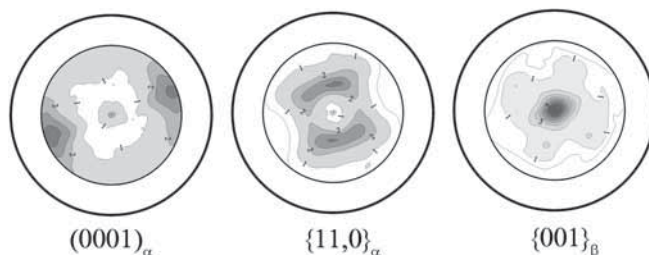


Рис. 2. Прямые полюсные фигуры (0001) и {11,0} α-фазы и {001} β-фазы необлученного образца из сплава ВТ9

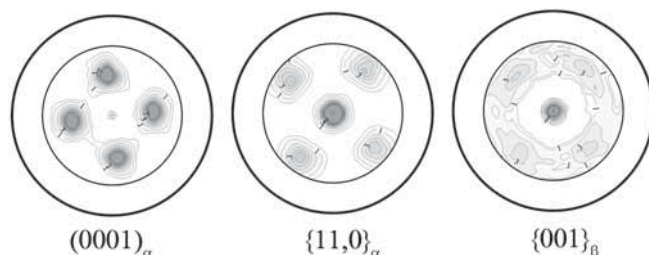


Рис. 3. Прямые полюсные фигуры (0001) и {11,0} α-фазы и {001} β-фазы, зарегистрированные с поверхности образца из сплава ВТ9 после облучения СИЭП при 18...20 Дж/см<sup>2</sup> четырьмя импульсами

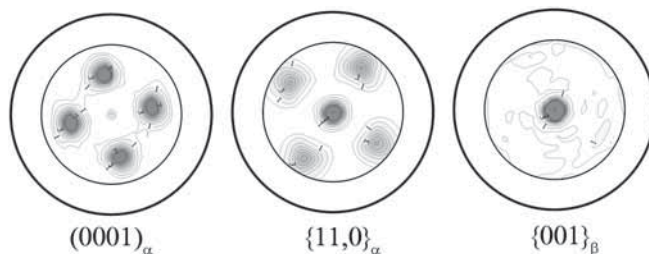


Рис. 4. Прямые полюсные фигуры (0001) и {11,0} α-фазы и {001} β-фазы, зарегистрированные на глубине 10 мкм от поверхности образца из сплава ВТ9 после облучения СИЭП при 18...20 Дж/см<sup>2</sup> четырьмя импульсами

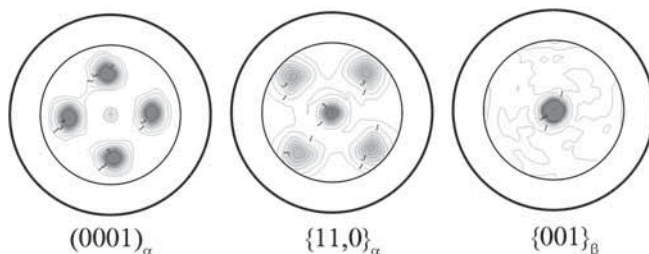


Рис. 5. Прямые полюсные фигуры (0001) и {11,0} α-фазы и {001} β-фазы, зарегистрированные на глубине 20 мкм от поверхности образца из сплава ВТ9 после облучения СИЭП при 18...20 Дж/см<sup>2</sup> четырьмя импульсами

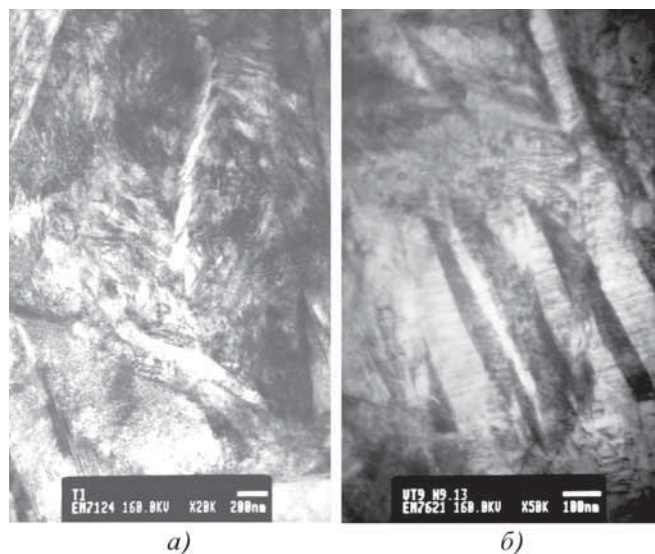


Рис. 6. Микроструктура в поверхностном слое образцов из сплава ВТ9 на глубинах 6 (а) и 15 (б) мкм после облучения СИЭП при 18...20 Дж/см<sup>2</sup>

между  $\beta$ - и  $\alpha$ -фазами при  $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ -превращениях, ведущих к размножению исходных ориентаций. Отклонение наблюдаемых текстур от прогнозируемых указывает на существование эффектов, не учитываемых при априорном анализе ситуации.

В отношении текстуры исходных прутков остается вопрос, касающийся преобладания в текстуре растяжения остаточной  $\beta$ -фазы компоненты  $\langle 001 \rangle$ , наблюдаемой на полюсных фигурах необлученных образцов, а также на обратной стороне облученных образцов. В связи с этим можно сослаться на появление оси  $\langle 001 \rangle$  в качестве направления растяжения или прокатки в некоторых сплавах с ОЦК-решеткой, особенно при повышенных температурах деформации.

Сопряженное с облучением сжатие объясняет формирование в образцах текстуры, резко отличающейся от исходной. В  $\beta$ -фазе вдоль нормали к оси таблетки, совпадавшей в исходном прутке с направлением растяжения, под облучением устанавливаются оси  $\langle 001 \rangle_{\beta}$  и  $\langle 111 \rangle_{\beta}$ , устойчивые в ОЦК-решетке по отношению к деформации сжатием. Соответственно, в текстурах сжатия для сплавов с ОЦК-решеткой главными являются компоненты, в зернах которых перпендикулярно оси сжатия располагаются плоскости  $\{001\}$  и  $\{111\}$ .

После  $\beta \rightarrow \alpha$  фазового превращения при соблюдении указанного выше ориентационного соотношения в зернах образовавшейся  $\alpha$ -фазы альтернативно реализуются две возможности: базисные плоскости  $\{0001\}$  отстоят от плоскости поверхности на  $45^\circ$  (и на  $90^\circ$ ), плоскости  $\{11.0\}$  параллельны плоскости по-

верхности или отстоят от нее на  $60^\circ$ . (Эти ориентировки устанавливаются при анализе построенных полюсных фигур с помощью стандартных стереографических проекций.)

Однако если текстура растяжения исходного прутка в первом приближении была аксиальной, формирующаяся вместо нее текстура сжатия таковой не является, что особенно резко выражено у образцов из сплава ВТ9. По-видимому, это связано с особенностями переориентации зерен в условиях осевой деформации. Чтобы из аксиальной текстуры растяжения сформировалась аксиальная текстура сжатия, все зерна должны деформироваться и переориентироваться взаимно независимо.

Между тем первоначальная активизация скольжения лишь в каких-то зернах придает начавшейся деформации асимметричный характер и превращает ее из аксиальной в двухосную. В результате переориентации зерен, начавших деформироваться позднее первых, каким-то образом адаптируется к их переориентации, так что вместо кольца на полюсных фигурах  $\{011\}_{\beta}$  или производной  $\{0001\}_{\alpha}$  получаем четыре изолированных максимума, соответствующих единственной ориентировке  $\beta$ -зерен, симметричной относительно нормали к поверхности таблетки и устойчивой по отношению к сжатию вдоль этой нормали. Эти данные хорошо согласуются с результатами исследования облученных мишеней из сплава ВТ9 методом просвечивающей электронной микроскопии (см. рис. 6).

### Заключение

Методами рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии показано, что облучение СИЭП в режиме плавления приводит к формированию в поверхностном слое толщиной 20...25 мкм текстуры сжатия и тонкодисперсной пластинчатой (игольчатой) микроструктуры (см. рис. 6). Все это может привести к резкому падению усталостной прочности при испытаниях на изгиб.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пайкин А.Г., Львов А.Ф., Шулов В.А. и др. Использование сильнооточных импульсных электронных пучков для модификации свойств лопаток ГТД // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2003. № 3. С. 41–49.
2. Engelko V., Yatsenko B. et al. GESA-1 and GESA-2 accelerators of intense pulsed electron beams // Vacuum. 2001. Vol. 62. P. 211–214.
3. Шулов В.А., Пайкин А.Г., Быченко О.А. и др. Разработка технологического процесса электронно-лучевого ремонта и восстановления свойств лопаток турбины ГТД из сплава ЖС26НК с жаростойким покрытием N:CrAlY // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 3. С. 34–38.
4. Perlovich Yu., Bunge H.J., Isaenkova M. Inhomogeneous distribution of residual deformation effects in textured BCC metals // Textures and Microstructures. 1997. Vol. 29. P. 241–266.

УДК 621.373.826:621.78.001.57+621.9

С.И. Ярьско (Самарский филиал Учреждения Российской академии наук  
Физического института им. П.Н. Лебедева РАН),  
Д.С. Горяинов (Самарский государственный технический университет)  
E-mail: scisec@fian.smr.ru

## Формирование температурного поля в режущем клине инструмента при импульсной упрочняющей лазерной обработке

Решена задача о нагреве режущего клина инструмента импульсным лазерным излучением. Разработанная модель учитывает влияние геометрических параметров инструмента, пространственных и временных характеристик лазерного излучения на формирование температурного поля в зоне лазерной обработки. Определены режимы упрочняющей лазерной обработки, обеспечивающие наилучшие параметры зоны лазерного воздействия. Разработаны методики выбора технологических параметров процесса упрочнения режущего инструмента.

**Ключевые слова:** температурное поле, режущий инструмент, лазерное упрочнение, моделирование, метод конечных элементов.

A problem about heating of a cutting wedge of the tool by pulse laser radiation was solved by method of finite elements in three-dimensional statement numerically. The developed model considers influence of geometrical parameters of the cutting tool and the space and time characteristics of laser radiation on shaping temperature field in a zone of laser treatment. The regimes of hardening laser treatment providing the best parameters of a zone of laser affecting have been defined as a result of numerical experiments. Procedures of choice of technological parameters of hardening of a cutting tool have been developed.

**Keywords:** temperature field, cutting tool, laser hardening, modelling, method of finite elements.

### Введение

При организации технологического процесса лазерного упрочнения *режущего инструмента* (РИ) одним из наиболее важных моментов является обеспечение требуемого уровня плотности энергии *лазерного излучения* (ЛИ) в зависимости от геометрических характеристик инструмента и свойств инструментальных материалов (при прочих равных условиях, например шероховатости поверхности в зоне *лазерной обработки* (ЛО)). Для обеспечения требуемых характеристик *зоны лазерного воздействия* (ЗЛВ) существенное значение имеет распределение температурного поля в режущем клине инструмента, которое определяется расположением теплового источника на его поверхности.

Как правило, в практике импульсной лазерной термообработки РИ преобладает экспериментальный метод выбора режима упрочнения, позволяющий с точностью, необходимой на практике, выполнить процесс ЛО конкретного типа инструмента. Распространение выбранного режима на другие материалы и типоразмеры РИ в большинстве случаев невозможно.

Использование расчетного метода для определения режимов упрочняющей ЛО обусловлено необходимостью встраивания технологии лазерного упрочнения в процесс изготовления инструмента и его автоматизацией, разработкой обобщающих методик определения технологических параметров процесса

лазерного упрочнения РИ различного назначения и типоразмеров.

Условия упрочняющей ЛО достаточно разнообразны, и при определении параметров температурного поля необходимо учитывать много факторов: геометрию обрабатываемого изделия, характер теплового источника, эквивалентного действию ЛИ, пространственное и временное распределение плотности мощности источника нагрева и т.д.

В настоящее время получен ряд простых аналитических зависимостей, которые с достаточной для практического применения точностью позволяют рассчитать режимы ЛО, необходимые для проектирования технологических процессов лазерного упрочнения [1–5]. Однако данные частные аналитические выражения, устанавливающие связь между параметрами ЗЛВ и режимами ЛО, не отражают специфических аспектов, касающихся ЛО РИ, а именно особенностей геометрии инструмента в зависимости от их вида и назначения и их влияния на формирование температурного поля в ЗЛВ, не предоставляют возможности определить энергетические характеристики ЛИ в зависимости от расположения лазерного источника на упрочняемой поверхности РИ относительно его режущих кромок. В этом случае достаточно полное исследование может быть проведено в результате детальных численных расчетов.

**Цель работы** – исследование закономерностей формирования температурного поля при упрочнении

РИ импульсным лазерным излучением с учетом геометрических параметров инструмента, пространственных, временных и энергетических характеристик ЛИ.

### Методика расчетов

Задачу о нагреве режущего клина инструмента при упрочняющей импульсной ЛО решали в трехмерной постановке методом *конечных элементов* (КЭ) в программе ANSYS Workbench. Тип анализа – переходный тепловой (Transient Thermal) с автоматическим выбором числа подшагов. Моделировали нагрев режущего клина инструмента (угол заострения  $\beta$ ) лазерным импульсом треугольной формы длительностью 10 мс с равномерным распределением плотности энергии ЛИ по сечению лазерного пятна (рис. 1).

Задачу решали в три шага: на первом – рассматривали стадию нагрева с линейным возрастанием тепловой нагрузки до ее максимального значения; на втором – приложенная нагрузка уменьшалась от максимума до нуля; на третьем – моделировали стадию остывания. Суммарное время первых двух шагов составило 0,01 с, при этом время каждого из них – 0,005 с. Время остывания 1 с. Свойства материала соответствовали стали P18 и приведены в [6, 7].

Для проведения расчетов была построена параметрическая электронная модель режущего клина. Область лазерного воздействия на передней поверхности режущего клина инструмента моделировали в виде двух вложенных друг в друга квадратных участков: центрального и периферийного, что реально наблюдалось в экспериментах по упрочняющей ЛО сталей и сплавов с использованием фокусирующего призмного раstra (рис. 2) [8, 9]. В модели размер центральной зоны был принят равным 3×3 мм, общий размер пятна ЛО – 4×4 мм.

В каждой из выделенных зон распределение плотности энергии принимали равномерным. Указанные зоны пятна ЛО были разбиты на регулярную сетку со

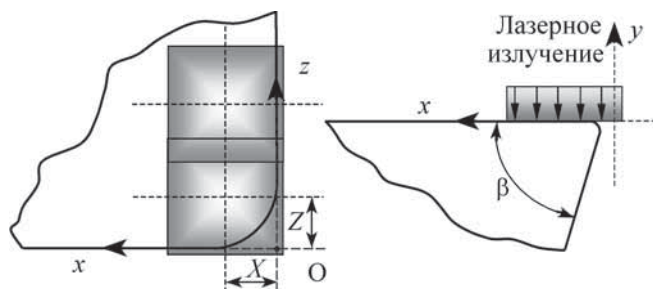


Рис. 1. Схема нагрева режущего клина инструмента сосредоточенным поверхностным тепловым источником с равномерным распределением плотности мощности по сечению пучка

сгущением к поверхности таким образом, что у поверхности размер КЭ в направлении вглубь составил ~ 5 мкм. Это позволило с достаточной точностью моделировать исследуемый быстропротекающий процесс. С этой же целью сетка была сгущена у главной и вспомогательной режущих кромок инструмента (соответственно вдоль осей  $z$  и  $x$  (см. рис. 1)).

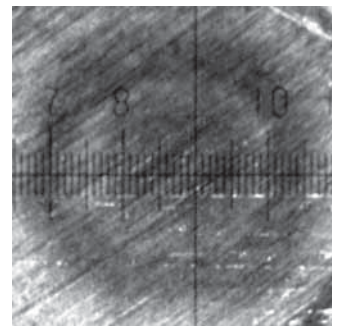


Рис. 2. Внешний вид поверхности ЗЛВ на стали P18

Приложение тепловой нагрузки было реализовано с помощью подведения теплового потока Heat Flux, причем в периферийную зону величиной вдвое меньше, чем в центральную. Начальная температура тела и окружающей среды принята равной 22 °С. Конвекцию и теплопередачу излучением не учитывали.

На первом этапе решения задачи выполняли расчет температурного поля на поверхности и по глубине ЗЛВ при облучении импульсным ЛИ без учета влияния краевых эффектов на режущих кромках. Центр зоны ЛО располагался на поверхности в точке с координатами  $X = 7,0$  мм;  $Z = 7,0$  мм. В этом случае расстояние от края зоны ЛО до режущих кромок существенно больше, чем характерный размер области распространения температурного поля при лазерном нагреве  $\sqrt{a\tau_p} \approx 0,024$  см, где  $a$  – температуропроводность (для стали P18  $a = 0,057$  см<sup>2</sup>/с);  $\tau_p = 10$  мс – длительность импульса, поэтому справедливо приближение одномерной модели нагрева полубесконечного тела и полученные результаты могут быть сопоставлены значениям, полученным аналитически для аналогичных условий ЛО.

Определение плотности энергии ЛИ и параметров ЗЛВ проводили при условии, что температура на поверхности ЗЛВ не должна превышать температуру плавления, определенную в расчетах для стали P18 как 1250 °С. Указанное значение температуры достигается при плотности энергии 2,28 Дж/мм<sup>2</sup> в момент времени  $t = 6,7$  мс после начала действия импульса ЛИ. С учетом того, что температура конца аустенитного превращения смещается в область высоких температур для данных условий ЛО на величину ~ 110 °С, можно оценить температуру дна зоны закалки, которая равна 930 °С. Это приводит к значению глубины ЗЛВ, равному 67 мкм (рис. 3), что хорошо совпадает со значением, полученным аналитически в приближении одномерной модели нагрева полубесконечного тела и равным 56 мкм. Анализ показывает, что тем-

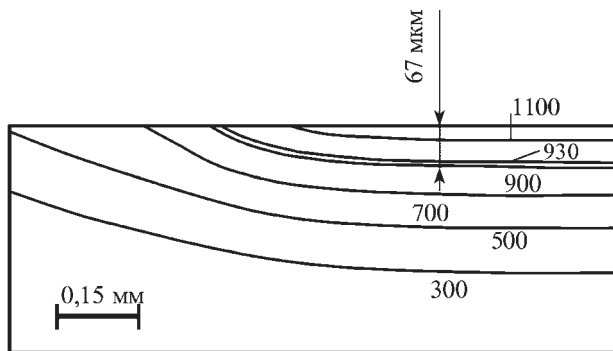


Рис. 3. Распределение температуры, °С, по глубине ЗЛВ

пература  $T = 930\text{ °C}$  достигается к моменту времени  $t = 7,7\text{ мс}$  после начала действия импульса на глубине  $h = 67\text{ мкм}$ , а к моменту окончания действия импульса  $t = 10\text{ мс}$  на глубине  $h = 200\text{ мкм}$  температура  $T = 547\text{ °C}$ .

Таким образом, результаты, полученные методом КЭ, обеспечивают удовлетворительное совпадение с данными аналитических расчетов, полученных при лазерном нагреве полубесконечного тела поверхностным тепловым источником. Это дает основание использовать метод КЭ для исследования закономерностей формирования температурного поля при импульсном лазерном нагреве режущего клина инструмента и последующей разработки методик определения технологических параметров процесса лазерного упрочнения РИ различного назначения и номенклатуры.

Результаты дальнейшего предварительного моделирования нагрева клина, имеющего острый угол при вершине и угол при вершине с радиусом закругления  $R$ , показали, что наличие радиуса заточки приводит к более равномерному распределению температурного поля по сечению режущего клина и минимизирует перегрев главной режущей кромки при лазерном нагреве. Поэтому, учитывая существенную разницу в распределении температуры и вытекающих отсюда рекомендациях по технологии упрочнения, последующие расчеты проводили для режущего клина с радиусом заточки  $R = 0,1\text{ мм}$ .

### Результаты расчетов и их обсуждение

Для выбора технологических параметров процесса лазерного упрочнения РИ (положения центра пятна ЛО на упрочняемой поверхности и коэффициента перекрытия пятен ЛО), плотности энергии ЛИ и параметров ЗЛВ (ее глубины и протяженности) была проведена серия численных экспериментов, в которых исследовали распределение температуры в конкретных точках поверхности режущего клина. При лазер-

ном нагреве плотность энергии ЛИ выбирали таким образом, чтобы на поверхности ЗЛВ не достигалась температура, равная температуре плавления для данной марки стали, и при этом обеспечивалось упрочнение с максимальной глубиной ЗЛВ. Эксперименты проводили для различных углов заострения режущего клина при изменении положения центра пятна ЛО относительно главной режущей кромки.

На рис. 4 и 5 (см. с. 4 обложки) представлены распределения температуры на передней поверхности режущего клина инструмента и по глубине ЗЛВ соответственно при различных положениях центра пятна ЛО относительно главной режущей кромки.

Установлено, что ширина зоны упрочнения  $\Delta X$  у главной режущей кромки, равная ширине облучаемого участка, где температура превышает  $930\text{ °C}$ , существенным образом зависит от расположения центра пятна относительно кромки. При удалении центра пятна от кромки на расстояние  $1,65...1,70\text{ мм}$  ( $\beta = 60^\circ$ )  $\Delta X = 3,1...3,15\text{ мм}$  (рис. 6) и глубина ЗЛВ, равная  $63...67\text{ мкм}$ , достигается при плотности энергии ЛИ  $\varepsilon \approx 2,23...2,28\text{ Дж/мм}^2$ . Глубина упрочнения по задней поверхности (определяется как глубина залегания изотермы  $930\text{ °C}$  на задней поверхности клина) постепенно уменьшается от  $100$  до  $35\text{ мкм}$  с удалением центра пятна ЛО от главной режущей кромки (рис. 7, в–д).

Параллельное перемещение центра пятна ЛО вдоль главной режущей кромки обеспечивает ее упрочнение на всем протяжении. В этом случае однорядная моноимпульсная ЛО обеспечивает параметры ЗЛВ, необходимые для эффективного упрочнения РИ. Так, при размещении пятен ЛО с коэффициентом перекрытия  $K = 0,7$  ( $K = S/d$ , где  $S$  – шаг обработки, т.е. расстояние между соседними центрами пятен ЛО;  $d$  – линейный размер пятна ЛО в направлении обработки) коэффициент равномерности ЗЛВ, опре-

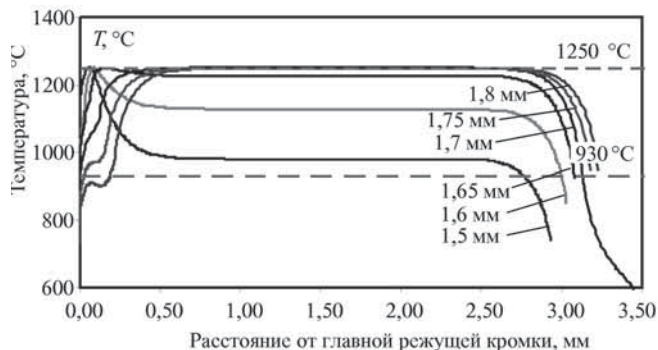


Рис. 6. Распределение температуры на поверхности ЗЛВ в момент достижения своего максимального значения ( $t = 6,7\text{ мс}$ ) при различных расстояниях центра пятна ЛО от главной режущей кромки ( $\beta = 60^\circ$ )



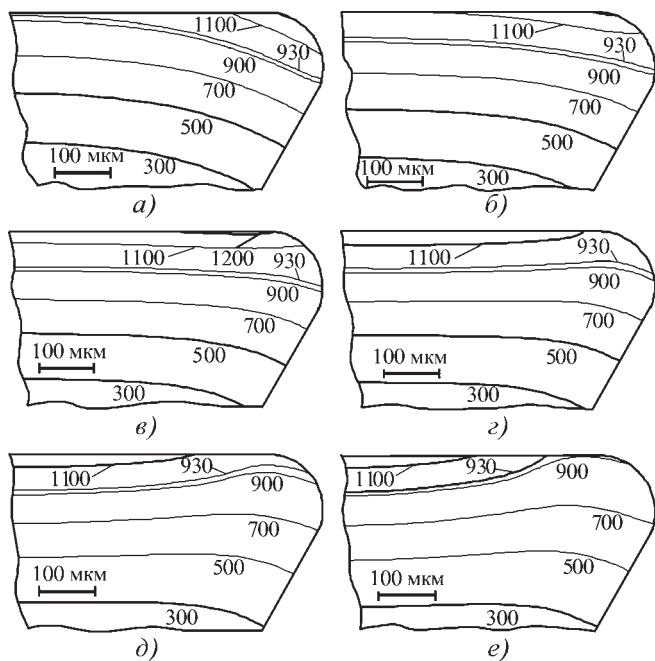


Рис. 7. Распределение температуры, °С, по сечению режущего клина инструмента ( $\beta = 60^\circ$ ) в зависимости от удаления центра пятна ЛО от главной режущей кромки в момент достижения максимальной глубины ЗЛВ ( $t = 7,7$  мс) при  $X$ , мм: а – 1,5; б – 1,6; в – 1,65; г – 1,7; д – 1,75; е – 1,8

деляемый как отношение минимальной глубины ЗЛВ к максимальной, равен 0,61. Однако при  $K = 0,75$  и больше глубина ЗЛВ в зоне перекрытия резко уменьшается и составляет не более 4 мкм, что не позволяет рекомендовать данную схему обработки для упрочнения РИ.

Анализ результатов расчетов показывает, что увеличение коэффициента перекрытия, обеспечивающего рост производительности процесса упрочнения, может быть достигнуто за счет повышения степени равномерности распределения интенсивности ЛИ по сечению пучка.

С увеличением расстояния центра пятна ЛО от главной режущей кромки  $X$  постепенно уменьшается глубина зоны упрочнения по задней поверхности от 120 мкм при  $X = 1,5$  мм до 35 мкм при  $X = 1,75$  мм (рис. 7, а, д). В указанных случаях плотность энергии ЛИ изменяется от 1,78 до 2,28 Дж/мм<sup>2</sup>. В этом случае, как и раньше, температура ни на режущей кромке, ни на поверхности ЗЛВ не превышает температуры плавления материала. При ЛО, когда центр пятна располагается от главной режущей кромки на расстоянии более чем 1,8 мм, эффекта упрочнения кромки не достигается, появляется неупрочненная зона шириной ~ 0,20 мм (см. рис. 6, 7, е). Наличие неупрочненной зоны на вершине режущего клина установлено и при  $X = 1,75$  мм (см. рис. 7, д), поэтому данное распо-

ложение центра пятна ЛО также не рекомендуется использовать при упрочнении РИ.

С приближением центра пятна ЛО к главной режущей кромке на расстояние менее 1,65 мм глубина ЗЛВ уменьшается до ~ 10...40 мкм при  $\epsilon \approx 1,78...2,05$  Дж/мм<sup>2</sup>. В этом случае для перекрытия зоны контакта стружки с резцом на передней поверхности РИ зоной упрочнения глубиной не менее 60...65 мкм необходимо проводить двухрядную моноимпульсную ЛО вдоль главной режущей кромки путем последовательного наложения пятен обработки с коэффициентом перекрытия  $K = 0,6...0,7$ . Максимальное значение глубины ЗЛВ, равное 67 мкм, наблюдается при расположении центра пятна ЛО на удалении от главной режущей кромки не менее чем 1,7 мм.

Расчеты, выполненные для РИ с углом заострения  $\beta = 60^\circ$ , показывают, что увеличение ширины зоны упрочнения с сохранением высоких значений глубины ЗЛВ может быть достигнуто при использовании двухрядной ЛО. В этом случае ЛО следует начинать, постепенно приближаясь к главной режущей кромке, располагая центр пятна зоны ЛО первого импульса на расстоянии от нее, равном 4,0...4,4 мм, при  $\epsilon \approx 2,28$  Дж/мм<sup>2</sup>.

Согласно расчету, ЛО вторым импульсом целесообразно реализовать с коэффициентом перекрытия  $K = 0,6...0,7$  при  $\epsilon \approx 2,22$  Дж/мм<sup>2</sup>. В этом случае при расположении центра зоны ЛО на расстоянии  $X = 1,65$  мм от главной режущей кромки достигаются наилучшие характеристики ЗЛВ: глубина 67...70 мкм, глубина упрочнения по задней поверхности 96 мкм,  $\Delta X = 5,5...5,9$  мм. При  $K = 0,6$  коэффициент равномерности ЗЛВ равен 0,89...0,93, при  $K = 0,7...0,6$  и уменьшается до нуля при  $K = 0,8$ .

Руководствуясь полученными данными, можно рекомендовать для увеличения ширины зоны упрочнения двухрядную ЛО при расположении центра пятна зоны ЛО второго импульса облучения на расстоянии от главной режущей кромки не менее 1,65...1,7 мм.

Изучение распределения температуры по глубине ЗЛВ в зоне, прилегающей к вершине режущего клина (см. рис. 7), позволяет проследить динамику изменения поля температур в зависимости от местоположения центра пятна ЛО относительно главной режущей кромки. Анализ показывает, что наибольшая равномерность глубины ЗЛВ при наивысших ее показателях обеспечивается для рассмотренных условий ЛО при расположении центра пятна ЛО на расстоянии от главной режущей кромки, равном 1,65...1,7 мм (см. рис. 7, в, г). Соответственно, при этом глубина ЗЛВ 63 и 67 мкм, плотность энергии ЛИ 2,23 и 2,28 Дж/мм<sup>2</sup>,

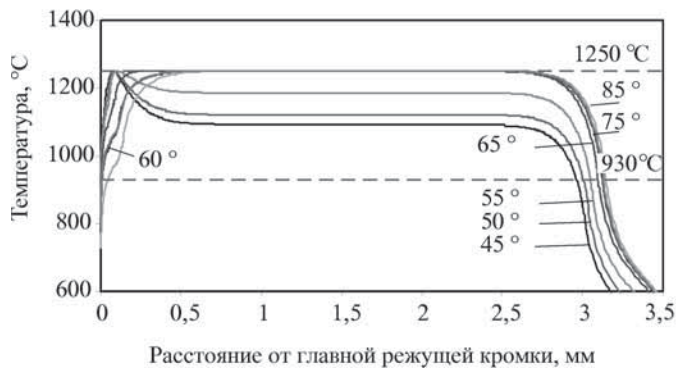


Рис. 8. Распределение температуры на поверхности ЗЛВ в момент достижения своего максимального значения ( $t = 6,7$  мс) при различных углах заострения режущего клина (удаление центра пятна ЛО от главной режущей кромки  $X = 1,65$  мм)

глубина ЗЛВ по задней поверхности в вершине клина 100 и 77 мкм, ширина упрочненной зоны  $\Delta X = 3,10...3,15$  мм.

Аналогичный численный анализ модели нагрева режущего клина инструмента при моноимпульсном воздействии был выполнен для значений углов заострения клина, изменяющихся от 45 до 85° (рис. 8, 9).

При фиксированном положении центра пятна ЛО относительно главной режущей кромки (например,  $X = 1,65$  мм) уменьшение угла клина до 45...55° приводит к уменьшению глубины зоны упрочнения до 35...55 мкм ( $\epsilon \approx 1,98...2,16$  Дж/мм<sup>2</sup>), при этом глубина ЗЛВ по задней поверхности остается достаточно большой – 110...120 мкм (см. рис. 9). Ширина упрочненной зоны у главной режущей кромки  $\Delta X = 2,95...3,05$  мм практически не изменяется (см. рис. 8) при изменении угла заострения в названном диапазоне значений. Это позволяет рекомендовать для типов инструмента с указанными углами заострения приведенные выше режимы упрочнения. При необходимости увеличения общей глубины ЗЛВ и глубины упрочнения по задней поверхности необходимо использовать двукратную ЛО.

В результате проведенных расчетов на примере РИ с углом клина  $\beta = 45^\circ$  установлено, что двукратная ЛО должна проводиться с небольшим смещением центров расположения пятен, равным 0,2...0,25 мм ( $K = 0,05...0,0625$ ), располагая первый импульс на расстоянии от главной режущей кромки на расстоянии  $X = 1,7...1,75$  мм.

Расчеты показывают, что выполненная таким образом двукратная ЛО приводит к увеличению глубины упрочнения по задней поверхности в сравнении с моноимпульсным воздействием на ~ 20 %. Увеличение общей глубины ЗЛВ составляет ~ 47 % и обеспе-

чивается при  $\epsilon \approx 2,14$  и 1,64 Дж/мм<sup>2</sup> для первого и второго импульсов соответственно.

Увеличение  $\beta$  до 65...75° существенно не изменяет параметры ЗЛВ ( $\epsilon \approx 2,28$  Дж/мм<sup>2</sup>, глубина 67 мкм,  $\Delta X \approx 3,1...3,15$  мм) и оказывается целесообразна моноимпульсная однократная ЛО. Рассматриваемое положение центра пятна ЛО ( $X = 1,65$  мм) оказывается не целесообразным при упрочнении РИ с углом заострения  $\beta = 85^\circ$  из-за того, что в этом случае не обеспечивается упрочнение вершины режущего лезвия. Ширина не упрочненной зоны составляет ~ 50 мкм (см. рис. 9, ж).

Полученные данные позволяют определить режимы ЛО, при которых достигаются наилучшие параметры ЗЛВ при упрочнении РИ лазерным излучением с принятыми при расчете пространственными и временными характеристиками.

Численный анализ моделей позволил разработать методики выбора технологических параметров про-

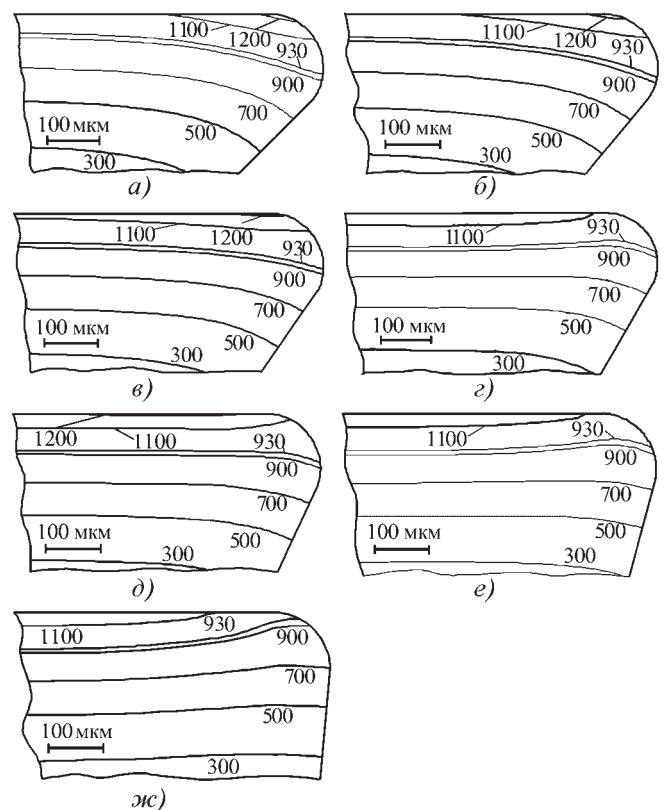


Рис. 9. Распределение температуры, °C, по сечению режущего клина инструмента в зависимости от угла режущего клина в момент достижения максимальной глубины ЗЛВ ( $t = 7,7$  мс) (удаление центра пятна ЛО от главной режущей кромки  $x = 1,65$  мм) при  $\beta^\circ$ :

а – 45; б – 50; в – 55; г – 60; д – 65; е – 75; ж – 85

цесса лазерного упрочнения РИ и рекомендации по организации процесса упрочняющей ЛО инструмента:

- при углах заострения режущей кромки  $\beta = 45...55^\circ$  однорядная двукратная импульсная упрочняющая ЛО инструмента при расположении центра пятна ЛО на расстоянии 1,65 мм от главной режущей кромки обеспечивает наилучшие характеристики ЗЛВ (глубину, ширину, равномерность глубины);

- при углах заострения режущей кромки  $\beta = 60...85^\circ$  лучшие характеристики ЗЛВ достигаются при однорядной моноимпульсной упрочняющей ЛО инструмента.

Особый интерес и определенные сложности при упрочнении РИ любого типа вызывает ЛО вершины режущего клина. Типичное распределение поля температур в вершине режущего клина инструмента ( $\beta = 60^\circ$ ) приведено на рис. 10 (см. с. 4 обложки). При расположении центра пятна в точке с координатами  $X = 1,5$  мм и  $Z = 1,5$  мм ЛО с плотностью энергии  $\varepsilon \approx 1,72$  Дж/мм<sup>2</sup> не приводит к оплавлению режущих кромок. Максимальная глубина ЗЛВ, равная 112 мкм, достигается на задней поверхности инструмента при ширине зоны упрочнения на передней поверхности 540 мкм и уменьшается до 50 мкм на расстоянии 230 мкм от главной режущей кромки. Для обеспечения протяженной зоны упрочнения вдоль задней режущей грани следует проводить упрочнение с коэффициентом перекрытия  $K = 0,6...0,7$ .

Существенную роль при назначении режимов упрочняющей ЛО играют не только геометрические параметры РИ, но и теплофизические характеристики упрочняемого материала. Известно [10], что температура на поверхности ЗЛВ  $\sim 1/\sqrt{\lambda}$ , поэтому уменьшение коэффициента теплопроводности обрабатываемого материала, например с  $\lambda = 27,2$  Вт/м-град для стали Р18 до  $\lambda = 25,0$  Вт/м-град для стали Р9М4К8, приводит к необходимости уменьшения плотности энергии ЛИ на  $\sim 8\%$  для обеспечения температуры закалки на поверхности ЗЛВ обрабатываемой стали.

Таким образом, все полученные результаты численного расчета (при прочих равных условиях) могут быть распространены для нового инструментального материала при соответствующем уровне плотности энергии ЛИ.

Разработанные методики выбора технологических параметров процесса лазерного упрочнения РИ и найденные расчетным путем оптимальные режимы упрочняющей ЛО позволяют для различных типов инструмента, изготовленного из быстрорежущих сталей, рекомендовать соответствующие режимы упрочняющей ЛО.

Известно, что при обработке углеродистых и легированных сталей (независимо от их прочностных ха-

рактеристик) угол заострения резцов из быстрорежущей стали составляет  $62...72^\circ$  [11, 12]. В этом случае моноимпульсная однорядная ЛО с плотностью энергии  $\varepsilon \approx 2,28$  Дж/мм<sup>2</sup> при расположении центра пятна на расстоянии от главной режущей кромки 1,7 мм обеспечивает глубину и ширину ЗЛВ соответственно 67 мкм и 3,1 мм.

При обработке алюминия, меди и их сплавов угол заострения резцов уменьшается до  $40...50^\circ$ , поэтому более предпочтительной является двукратная упрочняющая ЛО с более низкими значениями плотности энергии  $\varepsilon \approx 2,14$  и  $1,64$  Дж/мм<sup>2</sup> для первого и второго импульсов соответственно при расположении центра пятна ЛО на удалении от главной режущей кромки 1,5 мм, что обеспечивает общую глубину ЗЛВ на уровне  $\sim 50$  мкм.

Для большинства типов метчиков независимо от обрабатываемого материала угол заострения находится в пределах  $65...85^\circ$  [12]. Поэтому для этих инструментов наилучшие характеристики ЗЛВ достигаются при моноимпульсной ЛО при положении центра пятна обработки на расстоянии 1,65 мм от главной режущей кромки. Только для инструмента, используемого при нарезании резьбы в деталях из высокопрочных чугунов, упрочнение следует проводить, располагая центр пятна ЛО ближе к кромке ( $X = 1,5$  мм). А при упрочнении метчиков для обработки меди лучшие характеристики ЗЛВ достигаются при двукратной импульсной упрочняющей ЛО.

Анализ геометрических характеристик сверл различного назначения и номенклатуры показывает, что для них в качестве основного режима упрочнения следует рекомендовать двукратную импульсную упрочняющую ЛО, причем для сверл большего диаметра, имеющих меньший задний угол на периферии [11], удаление центра пятна ЛО от режущей кромки должно быть меньше, чем для мелкогабаритных сверл.

Моноимпульсная однорядная ЛО является наиболее предпочтительной при упрочнении разверток различного применения и широкого спектра фрез (концевых, торцевых, цилиндрических, фасонных и др.). Исключение составляют фрезы, применяемые при обработке легких сплавов. В этом случае должен быть реализован вариант двукратного импульсного упрочнения по передней поверхности. Аналогичные рекомендации применимы и для зенкеров различного назначения.

### Выводы

Разработана параметрическая электронная модель расчета температурного поля в режущем клине инструмента при упрочняющей импульсной ЛО, учитывающая влияние геометрических параметров инструмента, пространственных и временных характеристик ЛИ.

Численно методом КЭ в трехмерной постановке решена задача о нагреве режущего клина инструмента.

Установлены закономерности формирования температурного поля при упрочнении РИ импульсным лазерным излучением. Определены режимы упрочняющей ЛО, обеспечивающие наилучшие параметры ЗЛВ.

Разработаны методики выбора технологических параметров процесса импульсного лазерного упрочнения РИ и рекомендации по применению ЛО для упрочнения инструмента различного вида и назначения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дьюли У. Лазерная технология и анализ материалов / пер. с англ. Е.А. Верного, В.Н. Сошного. М.: Мир, 1986. 504 с.
2. Коваленко В.С., Головкин Л.Ф., Черненко В.С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. Киев: Техника, 1990. 192 с.
3. Крапошин В.С. Инженерные соотношения для глубины поверхностного нагрева металла высококонцентрированными источниками энергии // Металловедение и термическая обработка металлов. 1999. № 7. С. 31–36.

4. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник / Н.Н. Рыкалин и др. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.

5. Моделирование тепловых процессов при лазерном импульсном воздействии на металлы / А.А. Углов и др. М.: Наука, 1991. 289 с.

6. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.

7. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин и др.; под общ. ред. В.Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.

8. Термообработка вырубных штампов импульсным лазерным излучением / Л.В. Баженова и др. // Технология и организация производства. 1987. № 2. С. 45–47.

9. Ярьсько С.И. Повышение эксплуатационных характеристик твердосплавного инструмента при лазерной обработке // Физика и химия обрабатываемых материалов. 2003. № 5. С. 18–22.

10. Лазерная техника и технология: в 7 кн. Кн. 6. Основы лазерного термоупрочнения сплавов: учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов; под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Высшая школа, 1988. 159 с.

11. Иноземцев Г.Г. Проектирование металлорежущих инструментов. М.: Машиностроение, 1984. 272 с.

12. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев и др.; под общ. ред. И.А. Ординарцева. Л.: Машиностроение, 1987. 846 с.

## Уважаемые читатели!

Продолжается подписка

на научно-технический и производственный журнал

### "УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ"

Подписные индексы по каталогам:

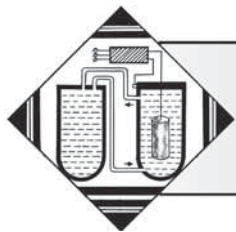
"Роспечать" – **85159**, "Пресса России" – **39269**, "Почта России" – **60252**.

Подписку на журнал можно оформить с любого номера в любом отделении связи или непосредственно в издательстве по адресу:

**Россия, 107076, Москва, Стромьинский пер., д. 4,  
ООО "Издательство Машиностроение"**

Тел.: (499) 269-66-00 (отдел реализации), (499) 268-40-77 (редакция);

e-mail: [realiz@mashin.ru](mailto:realiz@mashin.ru), [utp@mashin.ru](mailto:utp@mashin.ru)



УДК 621.83

В.Н. Гадалов<sup>1</sup>, Д.Н. Романенко<sup>1</sup>, Е.А. Маркелов<sup>1</sup>, Б.Н. Квашиин<sup>2</sup>, А.Г. Романенко<sup>3</sup>  
(<sup>1</sup>Юго-Западный государственный университет, г. Курск,  
<sup>2</sup>Воронежская государственная технологическая академия,  
<sup>3</sup>Курская государственная сельскохозяйственная академия им. профессора И.И. Иванова)  
E-mail: gadalov-vn@yandex.ru

## Перспективы использования коррозионно-стойкой стали 40X13\*

*Выявлено, что в машинах для измельчения мяса возможно использовать режущие элементы (ножи и противорезающие решетки) из коррозионно-стойкой стали 40X13 после нитроцементации в высокоактивном карбюризаторе. Установлено, что диффузионные слои на поверхностях этих деталей, насыщенные большим количеством карбонитридов, обеспечивают им высокую режущую способность, самозатачиваемость и износостойкость.*

**Ключевые слова:** коррозионно-стойкая сталь, нитроцементация, износостойкость, трение, нож.

*In cars for meat crushing probably to use cutting elements (knives and cutting lattices) from stainless steel 40X13 after nitro cementation in highly active carburizer is investigated. Diffusive layers on surfaces of these details, sated with a considerable quantity carbonitrides, provide with it high cutting ability, oneself taper and wear resistance is stated.*

**Keywords:** stainless steel, nitro cementation, wear resistance, friction, knife.

В машинах для измельчения мяса (волчках, мясорубках и др.), используемых при изготовлении фарша на перерабатывающих предприятиях и в быту, резание происходит в процессе скольжения лезвия по противорезающей пластинке-решетке. При этом каждый элемент контактирующих поверхностей испытывает знакопеременное деформирование, многократное повторение которого приводит к физико-химическим изменениям в поверхностных слоях материалов и их разупрочнению.

В этих слоях накапливаются повреждения и дефекты, приводящие к отделению частиц износа. В мясоизмельчительных машинах эти процессы интенсифицируются химически активной средой и наличием абразивных частиц в измельченной массе.

Интенсивность изнашивания зависит от вида взаимодействия контактирующих микронеровностей на поверхности трущихся тел. Для множественного контакта интенсивность изнашивания может быть оценена следующим уравнением [1]:

$$J = K_1 \alpha \sqrt{\frac{h}{r} \frac{p_a}{p_r} \frac{1}{n}}, \quad (1)$$

\* Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 гг.

где  $K_1$  – множитель, определяемый геометрической конфигурацией и расположением по высоте единичных неровностей на контактирующих поверхностях;

$\alpha$  – коэффициент перекрытия неровностей;

$h$  – глубина внедрения неровностей;

$r$  – приведенный радиус неровностей;

$p_a$  – нормальное давление;

$p_r$  – фактическое давление на выступе неровности;

$n$  – число циклов, приводящих к разрушению деформированного объема.

В приведенном уравнении подкоренное выражение  $h/r$  определяет глубину внедрения неровностей и контртела в изнашиваемую поверхность и вид контакта.

При значении  $h/r < 10^{-2}$  имеет место упругое контактирование, при больших значениях – пластическое, а при значениях  $h/r > 0,5$  внешнее трение становится вообще невозможным. Соотношение  $p_a/p_r$  зависит от чистоты обработки трущихся поверхностей, чем меньше эта величина (выше качество обработки), тем меньше интенсивность изнашивания. Выражение  $1/n$  характеризует способность материала сопротивляться разрушению при многократных силовых воздействиях. Его величина зависит от усталостных характеристик материала и уровня действующих напряжений. Чем она меньше, тем выше износостойкость.

Таблица

Стали, используемые для изготовления ножей и противорежущих решеток мясоизмельчителей

Марка стали	Содержание карбидной фазы, % об.	Тип карбидов	Твердость HRC	Относительная износостойкость
У10А	10	Me <sub>3</sub> C	63,5	0,7
ХВГ	11		61,5	0,6
Х12М	16...17	Me <sub>23</sub> C <sub>7</sub>	60	1,0
Х12Ф1	14			0,9
Х12Ф4М	23...25	Me <sub>23</sub> C <sub>7</sub> ; MeC	60,5	1,3
Х6Ф4М	16...18		61,5	2,4

По классификации Б.И. Костецкого [2], ведущими видами изнашивания, которые могут проявляться при трении стальных деталей, являются: схватывание, окислительное, абразивное и осповидное изнашивание. Тот или иной вид изнашивания, а также его интенсивность зависят от ряда факторов, определяемых внешними условиями работы деталей и характеристиками их материалов.

Удельная нагрузка на трущиеся поверхности влияет на интенсивность их изнашивания практически прямо пропорционально. Температурно-скоростной фактор также оказывает заметное влияние на интенсивность изнашивания, поскольку от скорости скольжения контактирующих поверхностей зависит температура в зоне трения. Повышение этой температуры приводит к ухудшению фрикционных характеристик металла и даже к изменению структуры и снижению прочности.

Прочностные свойства материала (предел текучести и др.) оказывают на износостойкость решающее влияние. Повышение прочности и твердости практически во всех случаях увеличивают износостойкость. При этом наибольший эффект от упрочнения металлических материалов достигается, если в структуре имеется большое количество тонкодисперсных включений (карбидов, нитридов, боридов и др.)

Шероховатость трущихся поверхностей (качество обработки) в значительной степени влияет на износ. На высоких выступах контактирующих поверхностей сосредотачиваются большие локальные нагрузки и возникают высокие температуры, снижающие прочность тонких поверхностных слоев.

На интенсивность изнашивания контактирующих материалов влияет коэффициент трения: чем он меньше, тем меньше интенсивность изнашивания. Уменьшению коэффициента трения способствует наличие в структуре тонкодисперсных включений твердых фаз.

Рабочие элементы измельчителей в процессе эксплуатации подвергаются переменным и динамическим нагрузкам, износу и коррозионному воздействию. При измельчении мягкого сырья динамические нагрузки относительно невелики и лимитирующими факторами при выборе материала являются износ- и коррозионная стойкость.

При переработке твердого сырья (хрящей, костей и т.п.) динамические нагрузки на лезвие возрастают, увеличивается также абразивное воздействие на их материал. При этом к материалам измельчающих устройств предъявляются повышенные требования по твердости и ударной вязкости.

В отечественных мясоизмельчительных установках режущие элементы (ножи и решетки) изготавливают обычно из углеродистых и легированных инструментальных сталей, основные марки которых представлены в таблице.

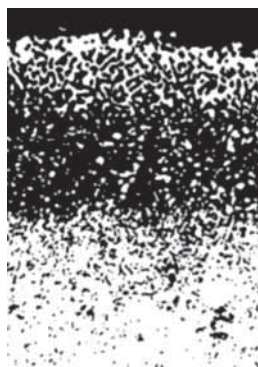
Режущие элементы из названных сталей подвергаются объемной или поверхностной закалке по соответствующим режимам и имеют весьма высокую твердость (HRC > 60). Разные значения износостойкости объясняются различием фазового состава: чем больше в структуре стали карбидов и выше их дисперсность, тем более износостойкой она является.

Несмотря на высокую твердость и связанные с ней хорошие режущие свойства, названные стали обладают недостаточной коррозионной стойкостью. Это является их существенным недостатком, так как перерабатываемое мясное сырье является химически агрессивной средой, особенно если при его приготовлении используют разного рода рассолы и маринады.

В связи с этим для рабочих органов с повышенной коррозионной стойкостью было бы целесообразно использовать высокохромистые инструментальные стали типа Х14М, 9Х18, Х18МФ и т.п. Однако высокая коррозионная стойкость этих сталей проявляется при пониженном содержании углерода. Поэтому твердость и износостойкость этих сталей заметно ниже, чем у ранее названных марок сталей, хотя стоимость их значительно выше.

Представляет интерес использование для ножей и противорежущих решеток мясоизмельчительных машин относительно дешевой коррозионно-стойкой стали 40Х13. После закалки с 1050 °С в масле и отпуска при 200...280 °С микроструктура ее состоит из отпущенного хромистого мартенсита с небольшим количеством карбидов типа CrC<sub>3</sub>. Сталь с такой структурой относится к мартенситному классу и хорошо

Рис. 1. Микроструктура нитроцементованного слоя стали 40X13 (880 °С, 3 ч) (×350)



сопротивляется коррозии. Однако твердость стали 40X13 после традиционной упрочняющей обработки, достигающая 48...56 HRC, недостаточно высока для обеспечения хороших режущих свойств инструмента.

Известно [3, 4], что радикальным образом повысить износостойкость стальных изделий можно путем насыщения их поверхностей азотом и углеродом из высокоактивных карбюризаторов с образованием в диффузионных слоях большого количества высокодисперсных карбидов и карбонитридов. При этом, если обеспечить одностороннее насыщение режущих лезвий, можно получить эффект самозатачивания в процессе работы [1].

Для нитроцементации хромистых коррозионно-стойких сталей можно использовать пастообразный карбюризатор на основе аморфного углерода (сажи) с азотосодержащими добавками, который позволяет увеличить скорость насыщения изделий углеродом и азотом в 1,5–2 раза и обеспечить высокую экологическую чистоту процесса. Состав карбюризатора следующий (% мас.): сажа газовая – 60; железосинеродистый калий (желтая кровяная соль) – 20; карбамид (мочевина) – 10; углекислый натрий (сода) – 10. В качестве пастообразующей жидкости можно использовать любой органический клей (КМЦ, ПВА и т.п.).

Тщательно перемешанные в сухом состоянии компоненты карбюризатора разводят клеем, наносят на упрочняющую поверхность (переднюю поверхность ножа) и высушивают. После этого изделие с сухой нитроцементующей обмазкой упаковывают в контейнеры с углесодержащим наполнителем (древесным углем, золой, чугушной стружкой и др.) или помещают в цементационную печь с герметичной ретортой (типа "Ц") и выдерживают при температуре 880...900 °С в течение 3...6 ч в зависимости от требуемой глубины диффузионного слоя.

В процессе выдержки в реторту печи подают в небольших количествах жидкий карбюризатор (синтин, керосин или др.) для вытеснения воздуха. Закалку после нитроцементации проводят с температуры

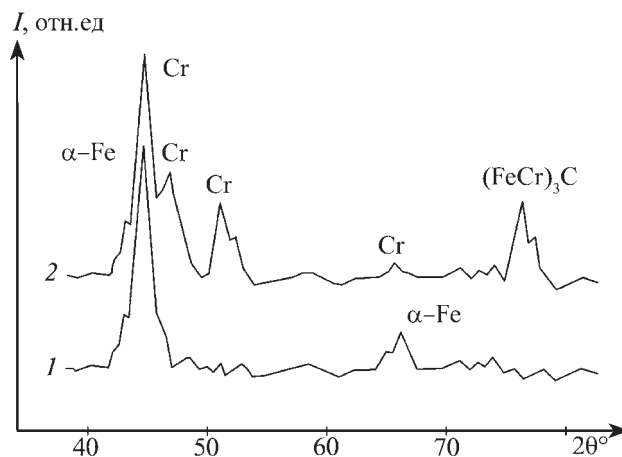


Рис. 2. Фрагменты рентгенограмм исходной (1) и нитроцементованной (2) стали 40X13

880...900 °С в масле, отпуск – при 180...200 °С в течение 2 ч.

В результате такой обработки на поверхности нитроцементованной коррозионно-стойкой стали образуется диффузионный слой толщиной  $\approx 0,05$  мм с содержанием 80...90 % карбидной фазы (рис. 1). Рентгеноструктурный анализ показывает, что основным типом карбидной фазы в нитроцементованном слое является легированный цементит  $(Fe,Cr)_3C$  (рис. 2).

Поверхностные слои нитроцементованной и закаленной стали 40X13, состоящие в основном из карбидов, имеют высокую твердость, которая по мере удаления от поверхности плавно снижается (рис. 3).

Таким образом, карбидные слои имеют повышенную коррозионную стойкость, что имеет важное значение для деталей перерабатывающего оборудования, и высокую износостойкость, которая в 4–5 раз пре-

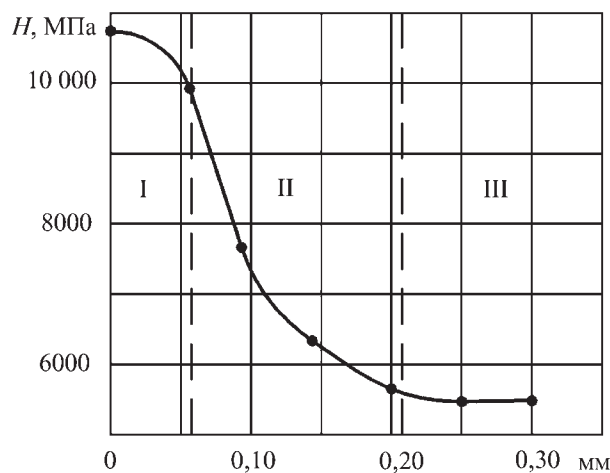


Рис. 3. Распределение микротвердости по сечению нитроцементованного слоя стали 40X13:

I – карбидный слой; II – переходная зона; III – сердцевина

вышает износостойкость стали Х12М, наиболее часто используемой в настоящее время для изготовления мясоизмельчительных ножей.

Для ножей и противорежущих сеток машин для измельчения мяса (мясорубок, волчков и др.) с успехом можно использовать коррозионно-стойкую сталь массового производства 40Х13, которая на 30...40 % дешевле инструментальных хромомолибденовых и хромованадиевых сталей, используемых для этих целей в настоящее время. Одностороннее упрочнение ножей нитроцементацией с образованием карбидосодержащих слоев на поверхности обеспечивает высокую износостойкость и их самозатачивание за счет различия в твердости поверхности лезвия и сердцевины, что обеспечивает им постоянное сохранение остроты режущей кромки в процессе работы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ящерицын П.И., Еременко И.Л., Фельцштейн Е.З. Теория резания, физические и тепловые процессы в технологических системах: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1990. 512 с.
2. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001.
3. Колмыков В.И. Эффективность упрочнения стали карбидами при химико-термической обработке // Технологии и оборудование для новых прогрессивных методов химико-термической обработки деталей тракторов и сельскохозяйственных машин. Волгоград: НТО Машпром, 1988. С. 61–64.
4. Айрапетян Н.А. Повышение износостойкости конструкционных сталей с помощью низкотемпературного насыщения углеродом и азотом // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 5. С. 16–18.

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

Журнал "Упрочняющие технологии и покрытия" читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

**Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:**

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

Наш журнал распространяется только по подписке – это является надежной гарантией того, что Ваше рекламное объявление прочитают именно специалисты, т.е. оно попадет точно в цель.

**Обращайтесь в отдел продаж, маркетинга и рекламы**

**ООО "Издательство Машиностроение": 107076, г. Москва, Стромьинский пер., д. 4**

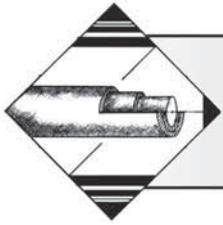
**Тел.: (499) 269-66-00, 269-52-98**

**Факс (499) 269-48-97**

**E-mail: [marketing@mashin.ru](mailto:marketing@mashin.ru)**

**[www.mashin.ru](http://www.mashin.ru)**





УДК 621.9.047

Д.М. Небольсин<sup>1</sup>, Г.А. Сухочев<sup>2</sup>, С.Н. Коденцев<sup>3</sup>, Е.Г. Смольяникова<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>ООО НПО "Нефтегаздеталь", г. Воронеж,  
<sup>2</sup>Воронежский государственный технический университет,  
<sup>3</sup>ОАО "Конструкторское бюро химавтоматики", г. Воронеж)  
E-mail: suhotchev@mail.ru

## Технологические параметры комбинированной струйно-динамической обработки внутренних поверхностей

*Исследованы технологические параметры комбинированной струйно-динамической обработки микрошариками внутренних поверхностей длинномерных деталей. Проведена оценка влияния механической и электрической составляющих на показатели качества поверхностного слоя материалов, показана эффективность комбинированного процесса выравнивания микрогеометрии поверхности обработкой гранулированной токопроводящей средой для труднодоступных элементов деталей.*

**Ключевые слова:** комбинированная обработка, газовая и жидкостная среда, микрогранулы, микровыступы, токопроводящая среда, упрочнение.

*The article is devoted to the exploration of the technological parameters of combination of Jet-dynamic processing micro-balls of internal surfaces of long details. In assessing the impact of mechanical and electrical components on the performance of the quality of surface layer of materials shows the efficiency of the cogeneration process alignment geometry of surface processing granulated conductive environment for hard-to-reach items.*

**Keywords:** combined processing, gas and liquid environment, microgranulates, microprotrusions, conductive environment, hardening.

Объектами исследований определены внутренние прерывистые поверхности нефтегазового подземного оборудования, в том числе большой протяженности. Анализ существующих методов комбинированной обработки внутренних поверхностей показал, что для достижения высокого качества поверхностного слоя внутренних поверхностей длинномерных деталей [1] наиболее перспективна технология комбинированной обработки с использованием токопроводящих микрогранул и газожидкостной рабочей среды.

Предлагаемый метод был разработан на основании следующих положений:

– энергии сжатого воздуха, обеспеченной эжекцией, достаточно для создания сферическими микрогранулами  $\varnothing 50...200$  мкм заданного качества поверхностного слоя на всех участках внутренней поверхности с обеспечением требуемой стабильности показателей процесса;

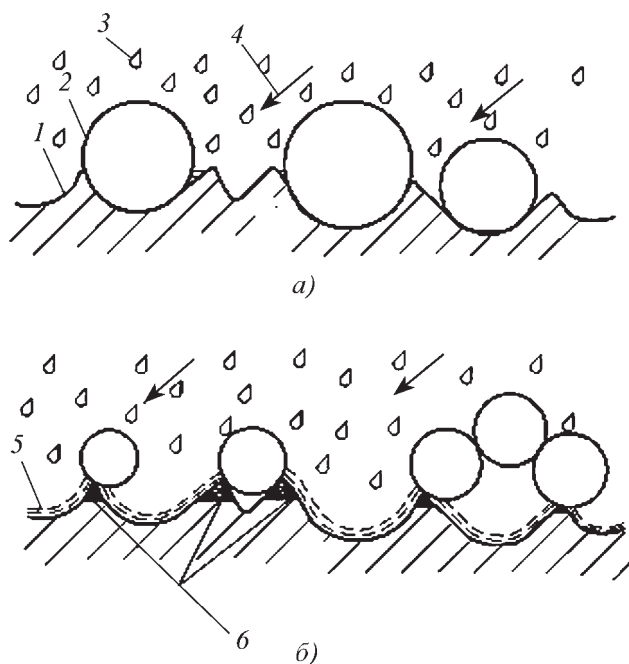
– анодное растворение выступов микронеровностей может быть осуществлено за счет воздействия кратковременных электрических полей в период контакта токопроводящих микрогранул (микрошариков) с микровыступами поверхности;

– перемещение с заданными параметрами рабочей смеси из микрогранул и жидкости в распыленном состоянии не снижает кинетической энергии микрошариков, достаточной для получения заданной степени наклепа;

– состав рабочей смеси из токопроводящих гранул и газожидкостной среды из технической воды обеспечивает осуществление анодных процессов с интенсивностью, достаточной для удаления вершин неровностей от предшествующих операций, и выравнивание степени наклепа;

– за счет изменения силы тока и концентрации газожидкостной среды можно управлять процессом формирования поверхностного слоя с требуемыми показателями качества.

Предложенный способ комбинированной обработки внутренних поверхностей деталей токопроводящими микрогранулами с наложением низковольтного электрического поля в условиях использования газожидкостной слабопроводящей среды позволяет организовать в протяженном отверстии поток, постоянно и равномерно (не менее 95 % сплошности по-



**Рис. 1. Схема (а) и основные этапы (б) реализации процесса:**  
 1 – деталь; 2 – микрошарики; 3 – токопроводящая газо-жидкостная среда; 4 – направление движения микрошариков; 5 – жидкостная пленка; 6 – микровыступы

крытия) воздействующий поэтапно на все участки прерывистой поверхности, создавая равномерный наклеп, выравнивая и снижая технологически наследованную шероховатость за счет интенсивного анодного растворения сдеформированных и уплотненных микрогранулами вершин микровыступов. Последнее позволяет обеспечить стабильность силовых и электрохимических параметров комбинированного воздействия микрогранул на всей длине проточной части деталей. На рис. 1 показаны основные стадии предложенного способа комбинированной обработки.

Получение равномерной степени наклепа и устранения микротрещин по всей обрабатываемой поверхности достигается тем, что обработка поверхностей по предлагаемому способу заключается в подаче на обрабатываемые поверхности сжатым воздухом потока микрошариков в два последовательных этапа, а процесс обработки проводят в газожидкостной слабопроводящей среде с наложением низковольтного электрического поля. Отверстия отличаются нестабильностью исходного макрорельефа поверхности. Микротрещины в поверхностном слое могут выходить на поверхность или оставаться замкнутыми в материале подповерхностного слоя и выходить на поверхность в процессе эксплуатации изделия под действием знакопеременных нагрузок из-за пульсаций давления рабочего тела.

Внутренние рабочие поверхности, особенно длинномерных деталей, имеют в большинстве случаев различные пазы и полости, недопустимые уступы, трещины и погрешности формы, выходящие зачастую за допуски на номинальные размеры, что в случаях гидродинамического, абразивного трения, знакопеременных нагрузок в водородосодержащих средах резко снижают работоспособность дорогостоящего в изготовлении и эксплуатации оборудования.

Формирование благоприятного для различного рода эксплуатационных свойств поверхностного слоя проходит в несколько этапов. Во-первых, на исходную дефектную поверхность 1 (см. рис. 1, а) с направлением к ней 4 под углом  $\beta$  не более  $60^\circ$  подают микрошарики 2 более крупной фракции (150...200 мкм), которые за счет деформационного сдвига перераспределяют выступы и впадины и залечивают микродефекты. Наличие жидкостной токопроводящей среды 3 образует постоянно обновляющуюся пленку жидкости и препятствует перегреву мест соударений гранул с поверхностью и образованию остаточных растягивающих напряжений, а также ускоряет процесс за счет явления анодного растворения материала. Затем подают более мелкую фракцию микрошариков 2 (50...80 мкм), которая окончательно выравнивает микроповерхность (см. рис. 1, б).

Выравнивание микрогеометрии зависит от скорости анодного растворения в месте микровыступов б, которая в момент контакта шарика с деталью через жидкостную токопроводящую пленку 5 резко увеличивается из-за повышения удельной проводимости в месте соударения, и тогда время обработки составляет около 15 с на участок эффективного пятна распыла.

Нефтегазовое оборудование имеет внушительные габариты. В связи с этим настройка процесса происходит при проверке и корректировке предварительно рассчитанных режимов на имитаторе внутренней прерывистой поверхности (рис. 2). На основе разработанного способа обоснован механизм обработки, в котором комбинированное воздействие является обобщенным управляемым процессом формирования высоких стабильных показателей качества поверхностного слоя.

Механизм комбинированного воздействия представляет собой совокупность двух процессов, происходящих одновременно: механического воздействия гранул на внутреннюю прерывистую поверхность и анодного растворения при низких напряжениях, исключающих короткие замыкания между гранулами и обрабатываемым материалом. Анодный процесс растворения микронеровностей происходит под действием силы тока в слабопроводящей жидкой пленке технической воды, подаваемой в зону обработки в

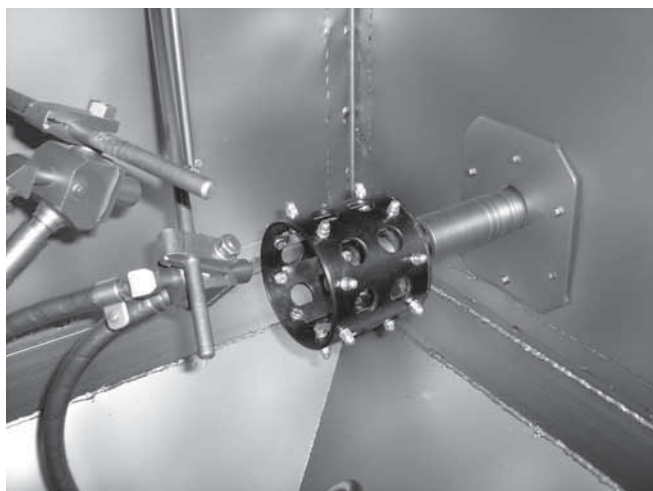


Рис. 2. Имитатор с плоскими образцами в камере струйно-динамической установки

распыленном до капельной фракции виде одновременно с микрогранулами.

Оксидные пленки на микрогранулах и заготовке утончаются и разрушаются, при этом достигается плотность тока, необходимая для анодного растворения поверхностного слоя материала заготовки. Разреженная капельная фракция жидкостной составляющей практически не мешает микрогранулам получать от напора сжатого воздуха кинетическую энергию, достаточную для деформирования и осадки микровыступов, и подается в зону обработки отдельно от микрогранул.

Для того чтобы единичного контакта (или серии контактов) было достаточно для выравнивания микрогеометрии за счет механического воздействия и анодного растворения, осуществляется управление энергией соударений. Так как микрогранулы подают в зону обработки струйным методом, то и параметры процесса изменяют регулированием кинетической энергии потока, варьируя расход и давление сжатого воздуха. Конкретную концентрацию капельной фракции устанавливают экспериментально на настроенном имитаторе исходя из обеспечения постоянной жидкостной пленки.

При моделировании процесса принимаются исходные данные: физико-механические свойства материала микрогранул и детали; радиус кривизны (диаметр) обрабатываемого отверстия; исходная и требуемая величины наклепа поверхностного слоя и высота микронеровностей. Граничными условиями являются: предельно достижимые значения наклепа или высоты неровностей после обработки в условиях экранирования среды; предельные значения давления в потоке обрабатываемой среды, определяемые расходом сжатого воздуха и концентрацией микрогранул. Основным по-

казателем импульсного механического воздействия на поверхность является скорость ее деформации.

Таким образом, параметром регулирования является расход обрабатываемой среды и, следовательно, скорость деформирования микровыступов обрабатываемой поверхности. Вопрос остается в достоверном определении скорости деформирования поверхности от микрошарика в данных условиях. Для этого надо представлять комплексное движение потока на срезе сопла и его кинетическую энергию. При твердых сферических частицах радиусом описанной окружности  $R$ , падающих на поверхность детали со средней скоростью  $v_{cp}$ , средняя скорость ее деформации составляет  $v/R$ .

Учитывая при определении скорости смеси микрошариков, воздуха или жидкости известные законы гидродинамики, среднюю скорость истечения потока гранул с газожидкостной средой  $v_{cp}$  через сопла под давлением можно представить в следующем виде:

$$v_{cp} = k_{ж} k_{мкш} Q / F_c \times 3600,$$

где  $k_{ж}$  – коэффициент, учитывающий влияние подмешиваемой в поток на выходе из сопла жидкости ( $k_{ж} = 0,95...0,97$ );

$k_{мкш}$  – коэффициент, экспериментально учитывающий влияние равномерности расхода склонных к слипанию микрошариков через дозатор установки [2] ( $k_{мкш} = 0,7...0,85$ ) на скорость потока обрабатываемой среды;

$Q$  – расход сжатого воздуха, м<sup>3</sup>/ч;

$F_c$  – площадь поперечного сечения отверстия сопла, м<sup>2</sup>.

Из более ранних исследований известно [1], что при этом шарик должен достичь необходимой кинетической энергии  $K$  не менее как для обеспечения деформации порядка  $8 \cdot 10^4$  мм/с.

Проследим движение сферической частицы, падающей на поверхность по нормали. При этом уравнение движения микрошарика в процессе контактирования будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{4\pi}{3} \rho R^3 \frac{dv}{dt} = -\pi R_a^2 \bar{P},$$

где  $\rho$  – плотность материала детали;

$R$  – радиус частицы;

$R_a$  – радиус вмятины;

$\bar{P}$  – средняя нагрузка в зоне контакта.

Необходимая пластичность наступает при значениях  $\bar{P} = 3\sigma_T$ .

Среднее давление  $p$ , оказывающее сопротивление движению, при соотношении  $E/\sigma_T R \leq 36$  обеспечивает получение вмятины размером  $0,004R$  для сталей, где отношение модуля текучести к модулю упругости

$\sigma_T/E = 0,0024$ , что установлено экспериментально. После интегрирования с учетом того, что  $\bar{P} = 3\sigma_T$ , получаем коэффициент  $\Omega$ , учитывающий степень предварительной деформации поверхности  $\bar{Z}_{np}$ :

$$1/\Omega = \left\{ \left( 0,2 + \frac{2}{9} \ln E / \sigma_T \right) + \frac{1}{9} \left[ \ln(2\bar{Z}_{np} / R - \frac{4\bar{Z}_{np}}{R}) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Это уравнение описывает начальную стадию деформирования, как только величина давления возрастает до  $3\sigma_T$ , для дальнейших расчетов следует пользоваться эмпирическими зависимостями для более многогранных условий при обработке труднообрабатываемых материалов.

У микрошарика размером 80...200 мкм существуют ограничения по массе, к тому же ему необходимо присутствие жидкости от перегрева поверхности и удаления продуктов обработки. Уравнение баланса кинетической энергии  $K_{мкш}$  микрошарика с учетом экспериментальных исследований будет иметь следующий вид:

$$K_{мкш} = mv_{cp}^2 / 2 - aF_{св} - aF_{тр.п} - \delta mg,$$

где  $m$  – масса шарика;

$a$  – ускорение микрошарика в потоке;

$F_{св}$  – сила сопротивления воздуха среды;

$F_{тр.п}$  – сила трения в потоке;

$\delta$  – вертикальное отклонение потока под действием силы тяжести;

$g$  – ускорение свободного падения.

В итоге скорость микрошарика при встрече с поверхностью составляла только 10...12 м/с от требуемых 80...100 м/с, не удалось разрушить образовавшуюся на поверхности оксидную пленку и продолжить процесс деформирования. Введение в поток микрошариков вместо воды газожидкостной среды и тока низкого напряжения [3] позволило скорость шариков повысить при контакте сразу до 30...40 м/с по нескольким причинам:

– снизилось до 20 % сопротивление окружающей среды (воздуха) и на 14 % трение в потоке из-за уменьшения его плотности;

– газовая среда, обладающая определенной несущей способностью в потоке капельной фракции (практически в виде тумана), оказала свое влияние.

В результате микрошарик стал пробивать оксидную пленку, которая частично стала разрушаться анодным низковольтным растворением. То есть на первом этапе отрицательно заряженные гранулы более крупной фракции (см. рис. 1, а) воздействуют на микровыступы, удаляя их за счет механического съема. При этом создается наклеп в вершинах неровно-

стей, что усиливает эффект избирательного анодного растворения и микроповерхность выравнивается после второго этапа воздействия микрошариков (см. рис. 1, б).

Если принять в качестве исходной информации высоту микронеровностей до обработки, а граничными условиями – время действия анодного растворения при постоянной механической депассивации поверхности, то процесс съема неровностей с учетом известных выражений за единичный импульс контакта микрошариков в эффективном пятне распыла имеет вид

$$(\Delta_1 + \Delta_2) = \Delta_0 - K_{гж} (\chi/\gamma) k_i j_{cp} t_k,$$

где  $\Delta_1, \Delta_2$  – микровыступы соответственно после первого и второго этапов обработки;

$\Delta_0$  – исходная величина микровыступов;

$K_{гж}$  – концентрация жидкостной составляющей газожидкостной токопроводящей среды (по данным экспериментов 10...20 %);

$\chi$  – электрохимический эквивалент материала заготовки;

$\gamma$  – удельная плотность материала заготовки;

$k_i$  – коэффициент выхода по току;

$j_{cp}$  – средняя за импульс плотность тока;

$t_k$  – длительность токопроводящего контакта при соударении.

Известно, что сила тока  $J$  в разряде может достигать 100 А, площадь контактного действия  $F$  на первом этапе составляет всего 0,05...0,1 мм<sup>2</sup>, а диаметр пятна распыла – 30 мкм. Тогда средняя плотность тока составляет  $J_{cp} = 0,3J/F$ . Здесь 20...30 % – плотность микрошариков в потоке. Длительность токопроводящего контакта рассчитывается по зависимости

$$t_k = K_{гж} r_{заг} \sqrt{\frac{\chi}{\mu f}}, \quad (1)$$

где  $r_{заг}$  – радиус зоны обработки в заготовке (до 15 мкм);

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

$f$  – частота следования соударений.

На втором этапе площадь контакта гранулы составляет всего 0,02...0,05 мм<sup>2</sup>. Расчет времени контакта по формуле (1) позволяет получить ориентировочные результаты, а экспериментально полученные значения равны  $t_k = 0,3...0,6$  мкс.

Скорость съема вершин микронеровностей зависит от анодного растворения при наклепе, которая может быть откорректирована полученными экспериментально коэффициентом, учитывающим анодное растворение  $K_{ап} = 1,05...1,15$  (рис. 3), и коэф-

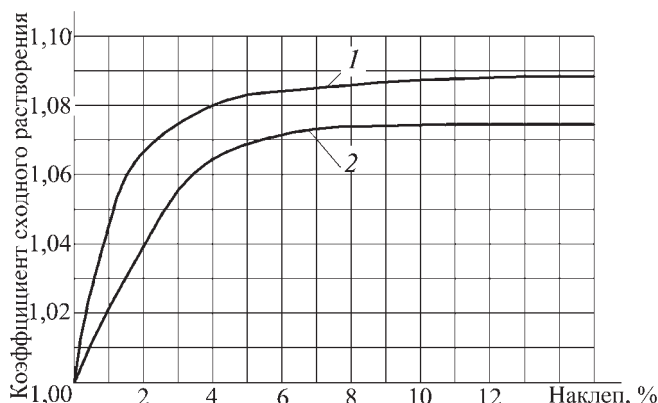


Рис. 3. Зависимости ускорения анодного растворения в момент соударения микрошарика с поверхностью детали из конструкционной (1) и легированной (2) стали от степени наклепа

коэффициентом механического удаления неровностей  $K_{м.у} = 1,1$ .

С учетом этого время выравнивания микрогеометрии в месте соударения составит

$$t_{в} \leq t_{к} N = \frac{K_{гж} \delta_{пл} (\Delta_0 - \Delta_1 - \Delta_2)}{\frac{\chi}{\gamma} k_i U K_{а.р} K_{м.у}},$$

где  $N$  – число соударений до полного насыщения поверхностного слоя пластическим деформированием в элементной зоне контакта (по экспериментальным данным  $N = 12$ );

$\delta_{пл}$  – толщина оксидной пленки в зоне контакта;  
 $U$  – напряжение анодного растворения (4...6 В).

Длительность обработки  $t_{уч}$  участка одного распыла с учетом значений  $F$  составит

$$t_{уч} = t_{к} \pi R^2 / F = \frac{K_{гж} \pi R^2 \delta_{пл} (\Delta_0 - \Delta_1 - \Delta_2)}{F \frac{\chi}{\gamma} k_i U K_{а.р} K_{м.у}} N. \quad (2)$$

На этом этапе контакта при соударении шарика с заготовкой известно, что когда разрушается оксидная пленка и идет небольшое анодное растворение, то дальнейшее выравнивание микропрофиля поверхности микрошариками происходит в основном за счет динамического давления  $\bar{P}$  микрошарика на поверхность, определяемого по формуле

$$\bar{P} = (3\sigma_{т} + \sigma^{+} + \sigma_{хр.пл}) \cos\beta,$$

где  $\sigma_{т}$  – предел текучести материала;

$\sigma^{+}$  – растягивающие напряжения от предыдущих этапов обработки (70...120 МПа);

$\sigma_{хр.пл}$  – напряжение хрупкого механического разрушения оксидных пленок после воздействия на них анодного растворения (до 40...50 % от  $\bar{P}$ );

$\beta$  – угол соударения шарика с поверхностью.

Съем материала за 1 имп. тока (в промежутке между соударениями) на последнем этапе незначителен и составляет доли микрометра. Анодное воздействие в данном случае должно только удалять продукты деформационного воздействия и корректироваться напряжением  $U_0$  в пределах 2...5 В.

Расчет технологических режимов комбинированной обработки проводили в следующем порядке:

1. Выбор диаметра микрошариков, мм:

$$d_{ш} = 2R_{в.пр} = R_a^2 / h_y,$$

где  $R_{в.пр}$  – вписанный в лунку и приведенный к среднему диаметру радиус отпечатка;

$R_a$  – радиус отпечатка в горизонтальной плоскости;

$h_y$  – глубина отпечатка.

Полученный результат после обработки на имитаторе и сравнения с аналитическими расчетами округляют до стандартного значения. Если расчетное значение превышает размеры шариков, разделенных на фракции в вибрационном сите, то их величину берут с учетом имеющихся типоразмеров шариков.

2. Из технической документации на деталь устанавливают требования по степени наклепа и шероховатости отверстия. Если шероховатость заготовки отвечает требованиям чертежа, то расчет режимов ведут по заданному наклепу.

3. Если требуется снизить параметр шероховатости от  $\Delta_2$  до  $Rz_{min}$ , то припуск  $Z$  составит разницу значений  $\Delta_2$  до  $Rz_{min}$  и минимальное время обработки элементного участка рассматривают по формулам (1) и (2).

4. Общее время обработки рассчитываем как

$$t_{общ} = \pi Dn / d,$$

где  $D$  – диаметр отверстия, мм;

$n$  – число оборотов детали, об/мин<sup>-1</sup>;

$d$  – эффективное ядро распыла микрошариков, зависящее от параметров эжекции (определяется экспериментально на имитаторе).

При этом

$$n = \pi D / t_{уч} d N_{уч},$$

где  $N_{уч}$  – число пятен эффективного распыла  $d$ , укладываемых в диаметр обработки  $D$ .

Давление сжатого воздуха, обеспечивающего эффективный распыл микрошариков, экспериментально определено в пределах 0,2...0,4 МПа.

Результаты испытаний показали значительное увеличение долговечности рабочих поверхностей длинномерных деталей. Предложенный метод имеет большие перспективы не только для нефтегазового оборудования, но также и для деталей пневматики и гидрооборудования различного назначения, имеющих глубокие отверстия большого диаметра, в том числе с покрытиями [4, 5].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сухочев Г.А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях. М.: Машиностроение, 2004. 287 с.
2. Пат. РФ на изобретение 2008183, МКИ<sup>3</sup> С 15 В 24 С 5/06. Установка для струйно-динамической отделочно-упрочняющей обработки деталей / А.В. Левченко, Г.А. Сухочев // Открытия. Изобретения. 1994. № 4.

3. Небольсин Д.М., Сухочев Г.А., Коденцев С.Н. Исследование режимов комбинированной обработки внутренних поверхностей // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. 2011. Т. 7. № 4. С. 44–47.

4. Технологии производительного формирования комбинированными методами поверхностей полостей и каналов под нанесение защитных покрытий / Г.А. Сухочев, Е.Г. Смольяникова, С.Н. Коденцев, Д.М. Небольсин // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 11. С. 49–54.

5. Технологическое обеспечение качества нанесения защитных покрытий комбинированной обработкой / Г.А. Сухочев, О.Н. Кириллов, А.М. Кадырметов, Д.М. Небольсин, Е.Г. Смольяникова // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 8. С. 39–44.



## УВАЖАЕМЫЕ ПОДПИСЧИКИ!

### Научно-техническое издательство "МАШИНОСТРОЕНИЕ"

выпустило в свет полную подписку на журналы за 2007–2010 годы в электронном виде.

Стоимость одного номера составляет 100 рублей.

Полная подписка за 2007 г. выложена в открытом доступе

на нашем сайте [www.mashin.ru](http://www.mashin.ru) бесплатно.

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромьинский пер., 4.  
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение".

E-mail: [utp@mashin.ru](mailto:utp@mashin.ru).

Web-site: [www.mashin.ru](http://www.mashin.ru).

Телефоны редакции журнала: (499) 268-40-77, 269-54-96; факс: (499) 268-85-26, 269-48-97.

Дизайнер *Подживотов К.Ю.* Технический редактор *Жиркина С.А.*

Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*

Сдано в набор 03.05.12 г. Подписано в печать 27.06.12 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 6,54. Свободная цена.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство "Машиностроение".

Отпечатано в ООО "Белый ветер", 115407, г. Москва, Нагатинская наб., д. 54, пом. 4.



Министерство образования и науки России  
Российская академия наук  
Российский фонд фундаментальных исследований  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова  
Московский Государственный университет приборостроения и информатики  
Центральный аэрогидродинамический институт ЦАГИ  
ФГУП "НПЦ газотурбостроения "Салют"  
Международный Союз Научных и Инженерных Общественных Объединений  
Ассоциация инженеров-машиностроителей РФ  
Ассоциации инженеров – трибологов РФ  
при информационной поддержке журналов:  
"Трение и смазка в машинах и механизмах",  
"Справочник . Инженерный журнал",  
"Наукоемкие технологии в машиностроении",  
"Наноинженерия"

*проводят Международную научную конференцию*

## **ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

*13–15 ноября 2012 г, Москва, ИМАШ РАН*

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в работе 2-й Международной научной конференции "**Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении**", которая состоится в Институте машиноведения им. А.А.Благонравова РАН по адресу: Москва, ул. Бардина 4, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук.

### **Основные направления работы Конференции:**

- ✓ Технологическое обеспечение качества и долговечности деталей машин.
- ✓ Прочность и конструкционные материалы.
- ✓ Фундаментальные исследования в технологии машиностроения.
- ✓ Трибология, покрытия, нанотрибология, нанопокрытия, нанотехнология.
- ✓ Автоматизация технологических процессов и робототехника.

Приглашаем принять участие в работе Конференции в качестве докладчика, слушателя или спонсора. Предусматривается представление материала в качестве пленарного, секционного и стендового докладов. Решение о включении доклада в программу Конференции принимает Оргкомитет.

Текст доклада *должен быть представлен в электронном виде до 30 июля 2012 г., после получения информации о включении вашего доклада в Программу конференции.* К тексту в обязательном порядке должна быть приложена электронная копия акта экспертизы;

Информация о Конференции помещена на сайте ИМАШ РАН [www.imash.ru](http://www.imash.ru)

E-mail: [fritme@imash.ru](mailto:fritme@imash.ru) или [fritme@yandex.ru](mailto:fritme@yandex.ru)

Телефоны для справок: 84991353177, 84992694588,

Факс: 84991353177, 84992694588



ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

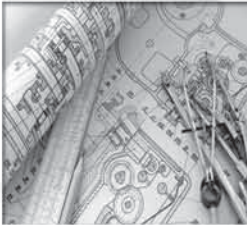


## ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

Учебное пособие в 4 кн. Под ред. Д.В. Чернилевского

2012 г. Формат 60x88 1/16 ISBN 978-5-94275-602-4

Цена за комплект из 4 книг 1000 р.



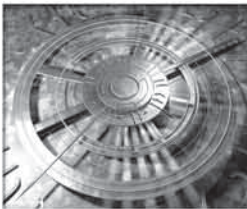
### Кн. 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА. Н.В. Ладогубец, Э.В. Лузик

Содержит основные положения, формулы и законы, используемые при изучении курса "Теоретическая механика", включая динамику материальной точки и динамику материальной системы и твердого тела. Даны алгоритмы решения задач, вопросы для самоконтроля и тестовые задания.



### Кн. 2. СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ. В.В. Астанин

Изложены основные вопросы расчетов на прочность элементов машин и сооружений. Приведены примеры решения типовых задач на растяжение и сжатие, сдвиг, кручение, изгиб, сложное сопротивление, повторно-переменные и динамические нагрузки.



### Кн. 3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН. Я.Т. Киницкий

Изложены основные понятия и определения курса, структура и классификация механизмов и машин, общие методы кинематического и динамического исследования механизмов, приведены некоторые сведения из теории регулирования движения машин и уравнивания механизмов.



### Кн. 4. ДЕТАЛИ МАШИН И ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. Д.В. Чернилевский

Изложены основные сведения о технологических функциях механизмов, их кинематических и силовых возможностях, достоинствах и недостатках, позволяющих технологу производственных процессов провести анализ и синтез при принятии решения в процессе разработки технического задания на совершенствование существующих конструкций машин или вновь проектируемых машинных комплексов.

Для студентов высших технических учебных заведений, изучающих курсы "Сопротивление материалов" и "Техническая и прикладная механика".

**Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:**

по почте: 107076, г. Москва, Стромшинский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru  
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте WWW.MASHIN.RU