

# УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 13  
2017  
№ 11 (155)  
ноябрь

Издается с января 2005 г.

**Главный редактор**  
д.т.н., проф.  
Ю.В. ПАНФИЛОВ

**Председатель редакционного совета**

д.т.н., проф., заслуженный  
деятель науки и техники РФ  
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

**Заместитель главного редактора**

д.ф.-м.н., проф.  
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

**Заместители председателя редакционного совета:**

д.т.н., проф.  
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН  
д.т.н., проф.  
А.В. КИРИЧЕК  
д.т.н., проф.  
О.В. ЧУДИНА

**Редакционный совет:**

Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.  
А.П. БАБИЧЕВ, д.т.н., проф.  
В.П. БАЛКОВ, к.т.н.  
В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.  
А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.  
А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.  
С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.  
В.Е. ГРОМОВ, д.ф.-м.н., проф.  
В.А. ЗЕМСКОВ, к.т.н.  
С.А. КЛИМЕНКО, д.т.н., проф.  
Ю.Р. КОПЫЛОВ, д.т.н., проф.  
Н.К. КРИОНИ, д.т.н., проф.  
В.П. КУЗНЕЦОВ, д.т.н., проф.  
В.А. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., проф.  
В.В. ЛЮБИМОВ, д.т.н., проф.  
Е.Д. МАКАРЕНКО  
Б.Я. МОКРИЦКИЙ, д.т.н., проф.  
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д.т.н., проф.  
Х.М. РАХИМЯНОВ, д.т.н., проф.  
Б.П. САУШКИН, д.т.н., проф.  
В.П. СМОЛЕНЦЕВ, д.т.н., проф.  
А.М. СМЫСЛОВ, д.т.н., проф.  
Г.А. СУХОЧЕВ, д.т.н., проф.  
В.П. ТАБАКОВ, д.т.н., проф.  
В.А. ШУЛОВ, д.ф.-м.н., проф.  
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

**Редакция:**  
И.Н. МЫМИНА  
Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" 39269) или в издательстве.  
Тел.: (499) 269-52-98,  
268-47-19.  
Факс: (499) 269-48-97.  
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре.  
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63956 от 09.12.2015 г.

## СОДЕРЖАНИЕ



### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

- Беликов А.И., Богданец Д.С., Васильев С.Г., Калинин В.Н., Шарпков М.А.** Исследование влияния антифрикционных упрочняющих покрытий на энергоэффективность обработки при сверлении стали ..... 483
- Кокорева О.Г.** Исследование параметров качества поверхностного слоя тяжело нагруженных деталей машин, упрочненных методами поверхностно-пластического деформирования ..... 487



### МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

- Зайдес С.А., Нго Као Кыонг.** Влияние поверхностного пластического деформирования в стесненных условиях на качество упрочненного слоя ..... 491
- Щедрин А.В., Кострюков А.А.** Применение триботехнологий на основе самоорганизации для системного совершенствования процессов холодного пластического деформирования ..... 495



### ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

- Белоцерковский М.А.** Совершенствование оборудования и технологий высокоскоростной электродуговой металлизации ..... 500
- Гадалов В.Н., Коломенский А.Б., Ворначева И.В., Филатов Е.А., Макарова И.А.** Исследование фазового состава, структуры и свойств композита быстрорежущая сталь с магнетронным покрытием ..... 506



### ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

- Степанов М.С., Домбровский Ю.М., Давидян Л.В.** Теплофизический анализ и кинетика микродугового нагрева стали ..... 511



### ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

- Санамян Г.В., Бойко Н.И., Лебедев В.А.** Оценка силовых и стойкостных показателей термофрезерования наплавленного металла ..... 517



### УПРОЧНЯЮЩИЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ

- Панфилов Ю.В.** Наноструктурированные тонкопленочные покрытия с различными упрочняющими эффектами ..... 523

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, в базу данных Chemical Abstracts, в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science

# STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

Vol. 13  
2017  
№ 11 (155)  
November

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. BEZYAZYCHNYI

**Editorial Assistant**

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  
A.I. BOLDYREV  
S.N. GRIGORIEV  
V.E. GROMOV  
V.A. ZEMSKOV  
S.A. KLIMENKO  
Yu.R. KOPYLOV  
N.K. KRIONI  
V.P. KUZNETSOV  
V.A. LEBEDEV  
V.V. LYUBIMOV  
E.D. MAKARENKO  
B.Ya. MOKRITSKIY  
F.I. PANTELEENKO  
H.M. RAHIMYANOV  
B.P. SAUSHKIN  
V.P. SMOLENTSEV  
A.M. SMYSLOV  
G.A. SUHOCHEV  
V.P. TABAKOV  
V.A. SHULOV  
M.L. KHEIFETS

**Edition:**

I.N. MYMRINA  
T.V. PARAYSKAYA

## CONTENTS



### GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

- Belikov A.I., Bogdanets D.S., Vasiliev S.G., Kalinin V.N., Sharapkov M.A.** Hardened antifrictional coatings influence on energy saving during steel drilling investigation ..... 483  
**Kokoreva O.G.** Investigation of quality parameters of the surface layer of heavy-loaded machine parts reinforced by methods of surface-plastic deformation ..... 487



### MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

- Zaides S.A., Ngo Cao Cuong.** Influence of surface plastic deformation in cramped conditions on surface layer quality ..... 491  
**Schegrin A.V., Kostryukov A.A.** Application of tribotechnology on the basis of self-organization for the systematic improvement of the processes of cold plastic deformation ..... 495



### PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

- Belotserkovsky M.A.** Improvement of equipment and technology of high-speed electric arc metallization ..... 500  
**Gadalov V.N., Kolomensky A.B., Vornacheva I.V., Filatov E.A., Makarova I.A.** Investigation of the phase composition, structure and properties of the composite high-speed steel with magnetron coating ..... 506



### CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

- Stepanov M.S., Dombrovskiy Yu.M., Davidyan L.V.** Thermophysical analysis and kinetics of microarc heating of steel ..... 511



### PROCESSING BY COMBINED METHODS

- Sanamyan G.V., Boyko N.I., Lebedev V.A.** Evaluation of strength and stability parameters of weld metal thermomilling ..... 517



### STRENGTHENING NANOTECHNOLOGY

- Panfilov Yu.V.** Nanostructured thin film coatings with different strengthening effects ..... 523

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue "Pressa Rossii" 39269) or in publishing office.  
Ph.: (499) 269-52-98, 268-47-19.  
Fax: (499) 269-48-97  
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Journal is registered by Roskomnadzor. The certificate of registration ПИ № ФС 77-63956. 09.12.2015

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, Chemical Abstracts database, Russian Science Citation Index on Web of Science platform



УДК 621.793.182:621.7-4 + 621.893

**А.И. Беликов, Д.С. Богданец, С.Г. Васильев, В.Н. Калинин, М.А. Шарапов**  
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)  
E-mail: belikov@bmstu.ru

### Исследование влияния антифрикционных упрочняющих покрытий на энергоэффективность обработки при сверлении стали

*Статья посвящена исследованию влияния упрочняющих покрытий различного состава и структуры на режимы сверления стали. Представлены результаты измерения силы резания и момента сопротивления резанию для сверл без покрытий и с покрытиями, нанесенными методом магнетронного распыления. Оценен эффект от применения покрытий с дисульфидом молибдена.*

**Ключевые слова:** антифрикционные покрытия, упрочняющие покрытия, сверла с покрытием, композитные покрытия, магнетронное распыление, силовые параметры резания, энергоэффективность.

*Different components and structure of hardened antifrictional coatings on drilling steel parameters influence research results are presented. Cutting force and moment measurements on basic drills and coated by magnetron sputtered films drills are compared. Molybdenum disulfide in composite coating applying for energy saving drilling is estimated.*

**Keywords:** antifrictional coatings, hardened coatings, covered drills, composite coatings, magnetron sputtering, cutting forces parameters, energy saving.

#### Введение

Развитие технологий упрочнения режущего инструмента с использованием методов вакуумного нанесения тонкопленочных покрытий традиционно связано с рядом преимуществ от применения инструмента с упрочняющими и износостойкими покрытиями:

снижением затрат на инструмент за счет увеличения стойкости режущего инструмента при обработке, особенно сложнопрофилированного, отличающегося высокой ценой;

снижением срока окупаемости дорогостоящего оборудования за счет интенсификации режимов обработки при использовании инструмента с покрытиями;

повышением качества обработки за счет изменения условий резания и характера протекания процессов взаимодействия обрабатываемого материала и инструмента;

возможностью механической обработки труднообрабатываемых материалов с повышенной твердостью;

реализацией процессов металлообработки без использования смазывающе-охлаждающих жидкостей.

К этому перечню следует добавить такой важный в настоящее время показатель, как энергоэффективность процесса механической обработки, определяющий удельные затраты энергии на его реализацию.

**Цель работы** — оценка влияния состава упрочняющих износостойких покрытий, в том числе с использованием антифрикционных твердосмазочных материалов в их структуре, на изменение величины сил резания в процессе сверления сквозных отверстий в стали.

#### Экспериментальная часть

В серии проводимых экспериментальных исследований использовали тонкопленочные покрытия следующего химического состава: TiCN, TiCN/MoS<sub>2</sub>, TiBN, TiBN/MoS<sub>2</sub>, HfZrN, HfZrN/MoS<sub>2</sub>, Ti—Al—MoS<sub>2</sub>. Помимо покрытий различного химического состава в экспериментальной серии

использовали покрытия с различной композитной структурой, с добавлением твердосмазочной компоненты. Принципиальным отличием покрытия являлась его структура. Использовали три варианта структуры:

1. Однослойные многокомпонентные износостойкие покрытия с различными химическими составами (TiCN, TiBN, HfZrN).

2. Двухслойные покрытия, в которых на базовый слой — износостойкое покрытие (см. п. 1), нанесен слой твердосмазочного материала — дисульфида молибдена (TiCN/MoS<sub>2</sub>, TiBN/MoS<sub>2</sub>, HfZrN/MoS<sub>2</sub>).

3. 3D-композитное самосмазывающееся покрытие на основе Ti—Al—MoS<sub>2</sub>.

Покрытия 1-го и 2-го типов наносили методом магнетронного распыления соответствующих мишеней (TiC, TiB, HfZr) в среде аргона и азота, слой дисульфида молибдена формировали распылением прессованной мишени MoS<sub>2</sub> в среде аргона [1]. Покрытия 3-го типа наносили распылением единой прессованной мишени [2] состава Ti + Al + MoS<sub>2</sub> в среде аргона. Для реализации вакуумной технологии использовали модернизированную вакуумную технологическую установку кафедры "Электронные технологии в машиностроении" МГТУ им. Н.Э. Баумана, оснащенную сбалансированными магнетронными распылительными системами под планарные мишени диаметром 78 мм. Остаточное давление в камере составляло 10<sup>-3</sup> Па, нанесение покрытий осуществляли при давлении газов порядка 10<sup>-1</sup> Па.

В качестве образцов режущего инструмента использовали сверла из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 9,6 мм, которые размещали в специальной технологической оснастке под углом примерно 45° к оси магнетрона. В процессе нанесения покрытий осуществлялось вращение каждого сверла вокруг собственной оси.

Технологический процесс состоял из предварительной жидкостной очистки и обезжиривания поверхности инструмента в ультразвуковой ванне, ионной очистки в технологической камере вакуумной установки с использованием автономного источника ионов и последующего нанесения покрытий.

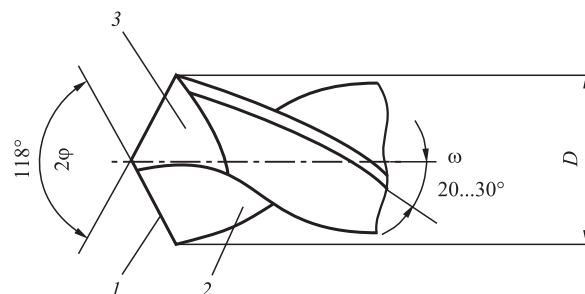
В основном покрытия формировали с использованием режимов магнетронного нанесения на постоянном токе, за исключением покрытий 3-го типа, одно из которых было нанесено в режиме постоянного тока (DC), а второе — с использованием импульсного режима (LF).

**Подготовка объектов исследований.** Для оценки степени влияния упрочняющих покрытий различного состава и структуры на силовые характеристики процесса резания была выполнена серия экспериментальных исследований с использова-

нием в качестве режущего инструмента сверл из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 9,6 мм. Измерения основных параметров резания — силы резания *P* и момента сопротивления резанию *M* осуществляли на базе компьютеризированной измерительной системы, используя датчик измерения силовых параметров модели УДМ 160 [3] кафедры "Инструментальные технологии" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

На первом этапе эксперимента проводили входной контроль, измерение угла при вершине сверла 2φ и длин двух главных режущих кромок *L1* и *L2*. Измерения выполняли на универсальном измерительном микроскопе модели УИМ 21. Результаты измерений геометрических параметров (рис. 1) для партии сверл приведены в табл. 1.

Результаты измерения исходной геометрии партии сверл выявили существенный разброс их основных параметров, что делало затруднительным последующие сопоставления и интерпрета-



**Рис. 1. Элементы спирального сверла:**  
1 — режущая кромка; 2 — передняя поверхность; 3 — задняя поверхность; *D* — диаметр сверла

Таблица 1

**Результаты измерения угла при вершине сверла 2φ, длин двух главных режущих кромок *L1* и *L2*, диаметра сверла *D***

Номер сверла	<i>D</i> , мм	<i>L1</i> , мм	<i>L2</i> , мм	<i>L1</i> - <i>L2</i> , мм	2φ, °
1	9,558	4,683	4,395	0,288	118,4
2	9,591	4,498	4,434	0,064	119,9
3	9,56	4,712	4,614	0,098	118,6
4	9,565	3,899	4,008	0,109	121,9
5	9,58	4,546	4,544	0,002	121,9
6	9,562	4,54	4,591	0,051	116,8
7	9,62	4,411	4,685	0,274	118,3
8	9,558	4,208	4,668	0,46	119,6
9	9,569	4,379	4,578	0,199	120,3
10	9,578	4,635	4,282	0,353	121,3
11	9,582	4,515	4,434	0,081	120,7
12	9,569	4,652	4,503	0,149	118,9
13	9,607	4,293	4,541	0,248	118,8

цию эффектов от применения на сверлах упрочняющих покрытий. Поэтому для формирования базы значений исходных силовых параметров резания было осуществлено контрольное сверление заготовок сверлами без покрытий и определены момент и сила резания для каждого сверла.

Силовые параметры процесса резания при сверлении измеряли при формировании сквозных отверстий в заготовках из стали 20 диаметром 40 мм и толщиной 15 мм. Заготовки закрепляли в трехлачковом патроне динамометра УДМ 160, установленном на столе сверлильного станка и подключенного к измерительной станции. Режимы сверления: подача  $S_0 = 0,14$  мм/об, частота вращения инструмента  $n = 355$  мин<sup>-1</sup>.

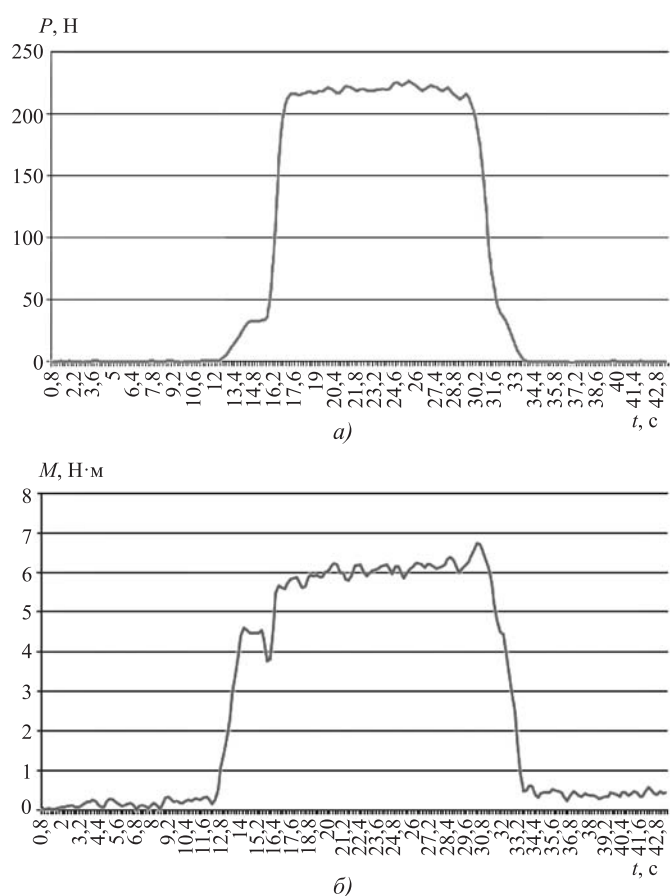


Рис. 2. Графики силы резания  $P(t)$  (а) и момента сопротивления резанию  $M(t)$  (б) для сверла № 3

Результаты измерений выводились в виде зависимости силы резания  $P$  и момента сопротивления резанию  $M$  от времени  $t$ , фиксируемого в процессе подачи инструмента к заготовке. Характерный вид графиков для сверла № 3 представлен на рис. 2.

Сводные результаты измерений в виде усредненных значений силы резания и момента сопротивления резанию для всей партии исходных сверл представлены в табл. 2. На основании полученных результатов входного контроля и измерений силовых параметров резания для последующего использования в экспериментах с упрочняющими покрытиями отобрали сверла № 2, 3, 5, 8, 9, 10, 12, 13 (соответствующие строки и столбцы выделены в табл. 1 и 2).

**Стендовые испытания сверл с покрытиями.** Для определения влияния составов и композитных структур упрочняющих покрытий на силовые параметры резания при сверлении было нанесено 8 покрытий методом магнетронного распыления с использованием различных мишеней. По примерным оценкам, суммарная толщина каждого покрытия (однослойного или двухслойного), сформированного на поверхностях сверла, не превышала 2 мкм.

Поскольку одной из задач исследования была оценка влияния на характеристики упрочняющих покрытий наличия в составе композиции твердосмазочного материала (дисульфида молибдена), то схожие по составу базового слоя покрытия наносили на сверла с близкими значениями силовых параметров резания. При этом базовые слои одинакового химического состава наносили в одном процессе, одновременно на оба сверла, одно из которых на последующем этапе покрывали слоем дисульфида молибдена. Сформированные для проведения серии экспериментальных исследований структуры покрытий на сверлах представлены в табл. 3.

Сверла с нанесенными покрытиями повторно прошли стендовые испытания на тех же режимах резания, что и до нанесения покрытий: с подачей  $S_0 = 0,14$  мм/об и частотой вращения  $n = 355$  мин<sup>-1</sup>. Измеренные значения момента сопротивления резанию на сверлах без покрытий и с нанесенным покрытием, представленные на рис. 3, позволяют сделать вывод о влиянии состава и структуры упрочняющих покрытий на силовые параметры резания.

Таблица 2

Средние значения сил резания и моментов сопротивления резанию сверл

Параметр	Номер сверла												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$P, Н$	220	195	220	210	225	185	150	165	170	170	135	180	215
$M, Н·м$	6,1	6,5	6,2	7,5	6,5	4,5	4	5,5	6,1	6	3,8	5,2	5,8

Таблица 3

Структура покрытий на сверлах и эффект от их применения

Номер сверла	Покрытие			Снижение момента сопротивления резанию, %	Снижение силы резания, %
	Износостойкое (слой № 1)	Твердосмазочное (слой № 2)	3D-композитное		
2	—	—	Ti—Al—MoS <sub>2</sub> (DC)	0	1,54
3	—	—	Ti—Al—MoS <sub>2</sub> (LF)	19,35	13,18
12	TiBN	—	—	7,69	6,11
8	TiBN	MoS <sub>2</sub>	—	18,18	14,55
9	TiCN	—	—	9,84	7,06
10	TiCN	MoS <sub>2</sub>	—	13,33	10,59
5	HfZrN	—	—	13,85	13,78
13	HfZrN	MoS <sub>2</sub>	—	24,14	19,07

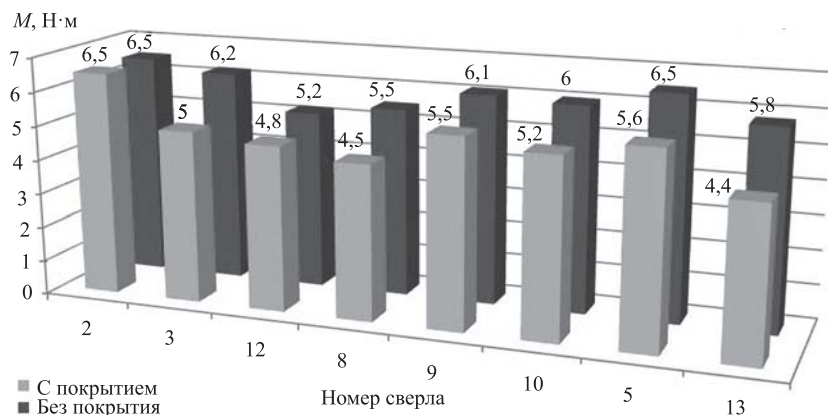


Рис. 3. Момент сопротивления резанию для сверл без покрытия и с нанесенным покрытием

Результатирующие данные по изменению момента сопротивления резанию при сверлении стали 20 в зависимости от нанесения различных упрочняющих покрытий представлены в табл. 3. Составы покрытий, оказавшие наиболее существенное влияние на снижение силовых параметров резания, выделены темным тоном.

### Заключение

Проведенные исследования свидетельствуют о потенциальных возможностях снижения энергозатрат на металлообработку в среднем на 18...24 % за счет применения на инструменте упрочняющих покрытий с содержанием дисульфида молибдена в составе композитной структуры.

В рамках проведенной работы остался нерешенным вопрос ресурсных возможностей представленных покрытий с учетом факта, что слои

покрытия дисульфид молибдена обладают относительно низкой абразивной стойкостью. Однако такие слои могут выполнять функцию притирочного слоя, способствующего повышению долговечности износостойкого покрытия. По результатам выполненной работы можно отметить следующее:

1. Наиболее значимые результаты по снижению момента сопротивления резанию при сверлении были достигнуты для покрытия, в котором в качестве износостойкого слоя использовалось покрытие HfZrN (образец № 13), что хорошо согласуется с ранее проведенными исследованиями и результатами других авторов, свидетельствующими о положительном влиянии твердого подслоя на трибологические характеристики дисульфида молибдена. Высокие результаты также достигнуты для покрытия TiBN—MoS<sub>2</sub> (образец № 8).

2. Для всех структур покрытий с содержанием дисульфида молибдена наблюдалось повышение антифрикционных характеристик износостойких покрытий.

3. Существенный интерес представляют самосмазывающиеся 3D-композитные покрытия Ti—Al—MoS<sub>2</sub>, которые были нанесены в двух вариантах без предварительной оптимизации режимов нанесения, при этом одно из покрытий (образец № 3) продемонстрировало высокие результаты, что свидетельствует о высоких потенциальных возможностях покрытий такой структуры.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование упрочняющих покрытий на основе тонких пленок, содержащих слои дисульфида молибдена / А.И. Беликов, М.А. Шарапков, Д.А. Караулов, К.П. Осирко // Наноинженерия. 2011. № 5. С. 32—35.
2. Беликов А.И., Калинин В.Н., Попова М.Г. Исследование нанокompозитных твердосмазочных покрытий, формируемых методом магнетронного распыления прессованной мишени Ti—Al—MoS<sub>2</sub> // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 9. С. 35—39.
3. Шуляк Я.И., Васильев С.Г. Модернизация установки измерения сил резания на базе динамометра УДМ-600 // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. № 01. С. 1—12. URL: [http://maplantsjournal.ru/file/839068.html?\\_\\_s=1](http://maplantsjournal.ru/file/839068.html?__s=1) (дата обращения 11.05.2017).



## Исследование параметров качества поверхностного слоя тяжело нагруженных деталей машин, упрочненных методами поверхностно-пластического деформирования

*Исследованы параметры качества поверхностного слоя тяжело нагруженных деталей машин при упрочнении методами поверхностно-пластического деформирования.*

**Ключевые слова:** *поверхностно-пластическое деформирование, напряжение, твердость, микроструктура, поверхностный слой, упрочнение, параметры качества.*

*The parameters of quality of the surface layer of the heavily loaded machine parts during hardening by the methods of surface-plastic deformation are investigated.*

**Keywords:** *surface-plastic deformation, stress, hardness, microstructure, surface layer, hardening, quality parameters.*

В результате выполненного теоретического и экспериментального комплекса исследований установлено, что резервы повышения эффективности обработки поверхностно-пластическим деформированием (ППД) зависят от способа сообщения энергии в очаг деформации. Разработан метод статико-импульсной обработки (СИО), сочетающий в себе достоинства статических и динамических способов ППД. За счет использования ударных систем с промежуточным звеном появилась возможность резко увеличить количество энергии, сообщаемой в очаг деформации в процессе СИО, что позволило в несколько раз увеличить глубину упрочненного слоя. Глубина упрочнения, достигаемая в результате СИО, составляет 6...10 мм в зависимости от марки стали.

В результате анализа возникающих связей разработана методика управления технологическими параметрами СИО и параметрами генератора импульсов, которая позволяет рассчитывать их исходя из условия обеспечения требуемых глубины, степени и равномерности упрочнения поверхностного слоя. Разработаны технологические рекомендации по направленному формированию заданных параметров качества поверхностного слоя в процессе СИО. Опытные образцы, технологическое оборудование и оснастка, генератор импульсов и технология СИО апробированы в действующем производстве.

Для определения контактных напряжений и деформаций необходимо исследование прочности деталей в местах их взаимодействия (контакта) при передаче усилий от одного элемента конструкции

другому. Рассмотрим постановку контактной задачи. Два тела из однородных изотропных материалов, ограниченные некоторыми криволинейными поверхностями, соприкасаются до деформации в одной точке. Оба тела сдавливаются силами, направленными по прямой, соединяющей центры кривизны поверхностей тел в точке касания. При этом тела деформируются, а первоначальное точечное касание переходит в соприкосновение по некоторой поверхности (поверхности контакта деформирующихся тел) [1]. Величины сжимающих сил, приложенных к телам, предполагаются такими, чтобы в зоне контакта тел имели место только упругие деформации. Будем считать, что поверхность контакта весьма мала по сравнению с общей поверхностью каждого из соприкасающихся тел, тогда контур поверхности контакта, например, для ролика представляет собой эллиптический параболоид с шириной  $2a$  и длиной  $2b$  отпечатка вдоль осей эллипса и глубиной отпечатка  $k$ .

Считая поверхности соприкасающихся тел совершенно гладкими, заключаем, что силы давления, передаваемые от одного тела к другому и расположенные по поверхности контакта, нормальны к этой поверхности. Для оценки прочности деталей в местах контакта недостаточно знания значения наибольшего давления. Полная характеристика напряженного состояния детали дается значениями двух главных напряжений в каждой точке детали или, по крайней мере, в наиболее напряженных ее точках.

Одно из основных положений классической теории деформации тел в местах контакта состоит

в том, что силы давления, передаваемые от одного тела к другому и распределенные по поверхности контакта, нормальны к этой поверхности [2]. Вместе с тем в ряде случаев инженерной практики приходится сталкиваться с наличием помимо нормальной также и касательной нагрузки и с необходимостью учета ее влияния на напряженное состояние соприкасающихся тел. Так, индентор в процессе внедрения помимо нормальной нагрузки воспринимает и касательную, связанную с относительным скольжением. Значительные сложности точечного решения при наличии одновременного действия нормальных и касательных сил заставляют почти всех исследователей этой проблемы ограничиться приближенным решением. Основное допущение приближенного решения заключается в предположении, что для нормальных напряжений сохраняется эллипсоидальный закон распределения по площадке контакта, их касательные напряжения пропорциональны нормальным [3]. Поэтому представляет интерес комплексное решение контактной задачи с учетом способа упрочнения, напряженно-деформированного состояния и микроструктурных изменений в металле.

В данной работе эта задача решается аналитически на основе контактной задачи теории упругости.

Рассмотрим особенности механического нагружения поверхности образца индентором. Пусть имеется образец с приложенной к нему нагрузкой  $P$ , под действием которой свободная поверхность образца прогнется и прямолинейный контур  $ABC$  превратится в криволинейный  $A_1B_1C_1$ . Все остальные лежащие в глубине контуры также прогнутся, но их прогибы будут меньше и на бесконечном расстоянии от поверхности станут равными нулю. На контур действуют напряжения, направленные по касательной и нормали к контуру, обозначим их соответственно  $\sigma_\tau$ ,  $\sigma_n$  [3]. Определим удлинение контура в результате его прогиба при переходе от прямолинейной к криволинейной форме  $A_1B_1C_1$ . Для этого найдем длину кривой, заключенной между точками  $A_1$  и  $C_1$ .

В случае контакта инструмента, имеющего определенный радиус скругления, с плоскостью применим задачу об эллипсоидальном распределении давлений для точек поверхности образца, лежащих внутри нагруженной области. При этом нагрузка  $P$  распределена по площади эллипса  $F = \pi ab$ , где  $a$ ,  $b$  — большая и малая его полуоси соответственно. Давление  $p$  в произвольной точке  $x_1$ ,  $y_1$  этого эллипса пропорционально ординате  $\xi$  эллипсоида, описываемого формулой

$$\left(\frac{x_1}{a}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{b}\right)^2 + \left(\frac{\xi}{c}\right)^2 = 1, \quad (1)$$

т. е. может быть выражено следующим образом:

$$p = p_0 \frac{\xi}{c} = p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x_1}{a}\right)^2 - \left(\frac{y_1}{b}\right)^2}, \quad (2)$$

где  $p_0$  — давление в центре эллипса;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — полуоси эллипсоида [4].

Из выражения (2) следует, что рассматриваемое распределение давления  $p$  по площади эллипса  $F = \pi ab$  определяется заданиями двух полуосей:  $a$  и  $b$  и не зависит от третьей полуоси  $c$ . Выбор параметра  $c$  определяет не только форму эллипсоида давлений, но и влияет на величину

$$\frac{\xi}{c} p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x_1}{a}\right)^2 - \left(\frac{y_1}{b}\right)^2}. \quad (3)$$

Нагрузка  $P$  связана с наибольшим давлением  $p_0$ :

$$P = \int_F p dF = \frac{p_0}{c} \int_F \xi dF, \quad (4)$$

где  $\int_F \xi dF = \frac{2}{3} \pi abc$  — объем полуэллипсоида [5].

Следовательно,

$$p_0 = \frac{2}{3} \frac{P}{\pi ab}. \quad (5)$$

Установлено, что при распределении давления по эллипсоидному закону наибольшее давление в 1,5 раза превышает среднее.

Определим перемещение  $W$  произвольной точки поверхности образца, расположенной внутри эллипса с полуосями  $a$  и  $b$ , по которому распределена нагрузка  $P$ . Согласно принципам независимости и сложения действия сил представим перемещение  $W$  некоторой точки поверхности образца в зависимости от нормального давления  $p$ , распределенного по площадке этой поверхности, как сумму элементарных перемещений, возникающих в результате воздействия давления на элементы этой площадки, т. е.

$$W_n = \frac{1-\nu}{2\pi\sigma_n} \int p d\rho/\rho, \quad (6)$$

где  $\rho$  — расстояние от точки, в которой определяется перемещение, до точки приложения силы [6].

Перемещение произвольной точки определяется с помощью выражения

$$W = \frac{p_0\pi(1-\nu^2) \cdot 4rE}{2a^2 - x^2 - y^2}, \quad (7)$$

где  $p_0$  — максимальное давление в центре площадки;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $r$  — радиус площадки контакта;  $x$ ,  $y$  — координаты произвольной точки;  $E$  — модуль упругости первого рода.



В точке наибольшего прогиба контура, где действует максимальное давление, перемещение также имеет максимальное значение:

$$W_0 = \frac{p_0 \pi (1 - \nu^2) r}{2E}. \quad (8)$$

Давление  $p_0$  определим, используя граничное условие рассматриваемой упругой задачи, согласно которому максимальное упрочнение происходит в точке наибольшего прогиба. Для этого запишем уравнение контура в следующем виде:

$$W = M \left( 2r - \frac{x^2}{a} \right), \quad (9)$$

где  $M = \frac{p_0 \pi (1 - \nu^2) r}{4E}$ .

При перемещении по оси  $Z$   $W_z = 0$ , начальная длина контура  $L_0 = 2a\sqrt{2}$ .

Длина прогнувшегося контура

$$\begin{aligned} L &= 2 \int_0^{a\sqrt{2}} \sqrt{1 + W_z^2} dx = \\ &= a\sqrt{2} \left[ \sqrt{1 + (2\sqrt{2}M)^2} + \left( \frac{1}{2\sqrt{2}M} \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \ln \left( 2\sqrt{2}M + M + \sqrt{1 + (2\sqrt{2}M)^2} \right) \right]. \quad (10) \end{aligned}$$

Зная длину прогнувшегося контура  $L_1$  и его начальную длину  $L$ , определим среднее удлинение:

$$\begin{aligned} \xi_{\text{п}} &= \frac{L - L_1}{L_1} = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + (2\sqrt{2}M)^2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\ln \left( 2\sqrt{2}M + M + \sqrt{1 + (2\sqrt{2}M)^2} \right)}{2\sqrt{2}M} \right] - 1. \quad (11) \end{aligned}$$

Разложим выражение в квадратных скобках в ряды и, взяв первые два их члена, так как  $2\sqrt{2}M \ll 1$ , получим

$$\begin{aligned} \xi_{\text{п}} &= \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{(2\sqrt{2}M)^2}{2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2\sqrt{2}M} \left( 2\sqrt{2}M - \frac{(2\sqrt{2}M)^3}{6} \right) \right]. \quad (12) \end{aligned}$$

Максимальное относительное удлинение контура найдем из предположения, что отношение максимальных относительных удлинений контура к средним пропорционально отношению мак-

симальных значений его прогиба к средним, т. е.  $\xi_{\text{max}} = \xi_{\text{п}} W_0 / W_{\text{п}}$ :

$$W_0 = 2 \int_0^{a\sqrt{2}} \frac{M \left( 2r - \frac{x^2}{a} \right)}{2a\sqrt{2}} dx = \frac{4Mr}{3}. \quad (13)$$

Максимальное относительное удлинение  $\xi_{\text{max}}$  с учетом значений  $W$  принимает вид

$$\xi_{\text{max}} = \frac{4}{3} \frac{M^2 (2Mr^3)}{4Ma} = \frac{2M^2 r^3}{3a}. \quad (14)$$

Подставив выражение для  $M$ , имеем

$$\xi_{\text{max}} = \frac{\sigma_p}{E} = \frac{(1 - \nu^2)^2 \pi^2 p_0^2}{8E^2}. \quad (15)$$

Из полученного уравнения найдем максимальное значение давления  $p_0$ :

$$p_0 = \frac{2\sqrt{2\sigma_p E}}{\pi(1 - \nu^2)}, \quad (16)$$

где  $\sigma_p$  — напряжение в рассматриваемой точке на расстоянии  $\rho$  от начала координат.

Среднее давление на поверхности материала [7]

$$p_{\text{ср}} = p_0 \int_0^r \frac{\sqrt{r^2 - x^2}}{r^2} dx = \frac{\sqrt{2E\sigma_p}}{2\pi(1 - \nu^2)}. \quad (17)$$

С помощью выражения (17) подсчитываем усилие упрочнения, умножая среднее давление на поверхность на площадь контакта  $S$  инструмента с металлом.

Упругопластическим металлам в предельно упругом состоянии соответствует граничное условие наступления его пластической деформации. Для прогнувшейся поверхности деформация в произвольной точке складывается из упругой и пластической составляющих. Причем упругие свойства среды не зависят от пластической деформации, другие деформации в пластической области связаны с напряжениями теми же зависимостями, что и упругие в упругой области.

Согласно третьей теории прочности к моменту наступления предельного состояния в точке тела наибольшие касательные напряжения достигают значения, соответствующего предельному упругому состоянию при растяжении. Для плоского напряженного состояния, пользуясь компонентами напряжений, имеем

$$\sqrt{(\sigma_z - \sigma_x)^2 + L_1 + (\tau_{zx})^2} = \sigma_{\tau}, \quad (18)$$

где  $\sigma_z, \sigma_x$  — нормальные напряжения по площади с рассматриваемой точкой;  $\tau_{zx}$  — касательное напряжение вдоль оси  $OZ$ .

Рассмотрим связь напряжений  $\sigma_z$ ,  $\sigma_x$ ,  $\tau_{zx}$  с прогибом поверхности под действием гибкой распределенной нагрузки на площадку контакта инструмента с металлом. Проецируя  $\sigma_z$ ,  $\sigma_x$  в произвольной точке на оси  $OX$  и  $OY$ , получаем

$$\sigma_z^2(1 - \sin 2\alpha) + \sigma_{xa}^2(1 - \sin 2\alpha) = \sigma_\tau^2, \quad (19)$$

где  $\alpha$  — угол между результирующим вектором напряжения и  $\sigma_x$ .

Определим максимальные касательные напряжения, равные напряжению текучести, через главные оси:

$$\sigma_z = 2\sigma_\tau + \sigma_x. \quad (20)$$

Выполнив преобразования в выражении (19) с учетом соотношений  $\sigma = \frac{E}{1-\nu}$  и (20), а также пренебрегая членами малого порядка, получим

$$p_0 = \frac{2\sqrt{\sigma_\tau E}}{\pi(1-\nu^2)}. \quad (21)$$

Выражение (21) определяет давление в центре контактной площадки и является начальным условием процесса статико-импульсной обработки. Зная среднее давление и площадь контакта, можно определить энергию удара на инструменте.

Таким образом, установлено, что увеличение частоты приложения усилия при СИО способствует увеличению глубины сжатого слоя, увеличивая тем самым глубину упрочнения. Установлено увеличение твердости высокомарганцевистой стали при упрочнении СИО в 2,0...2,3 раза [8]. На основе анализа результатов измерения твердости и износа образцов из стали 110Г13Л, упрочненных СИО, по глубине установлено наличие упрочненного слоя 8...9 мм. Проведена количественная оценка микроструктуры образцов, упрочненных СИО, которая показала, что происходит уменьшение размеров кристаллов с 2...3 до 4...5 баллов по шкале ГОСТ 5639—82. Анализ микроструктуры по сечению упрочненного образца показывает, что на глубине 9 мм наблюдается микроструктура неупрочненной высокомарганцевистой стали (ВМС). Это свидетельствует о наличии упрочненного слоя 8...9 мм. Исследован механизм структурных изменений, происходящих в образцах ВМС при СИО. Проведенные исследования показали, что причиной упрочнения являются дробление зерен аустенита на более мелкие блоки и двойникование зерен. Установлено, что у образцов из стали 110Г13Л, упрочненных СИО, харак-

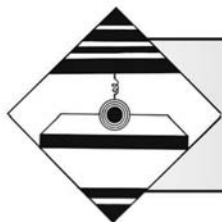
теристики прочности увеличились в 1,8...2,0 раза, показатели пластичности — на 25...30 % по сравнению с термообработанными образцами [9].

Планируется продолжение исследований в целях выявления технологических режимов, обеспечивающих предельно низкие значения шероховатости и волнистости обработанной поверхности. Немалый интерес представляет вычисление операции статико-импульсного упрочнения не только в конце, но и в начале технологического цикла обработки несущей поверхности деталей, отличающихся высокими требованиями к точности.

Задача состоит не только в исследовании разработанного способа, выявлении физических закономерностей нового вида обработки, но и в разработке рекомендаций по назначению конструктивных параметров, рациональных технологических режимов для конкретных условий и видов обработки различных деталей и их поверхностей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лазуткин А.Г., Соловьев Д.Л., Кокорева О.Г. Математический аналог контактной площадки // Научные достижения муромских ученых. Владимир: ВлГУ, 1997. С. 49—53.
2. Марконов В.М., Житенев В.В., Воробьев А.М. Расчетно-экспериментальное получение диаграммы нагрузка-деформация при ударных испытаниях // Заводская лаборатория. 1979. Т. 45. № 10. С. 44—49.
3. Михалев М.С., Балдина В.П. Влияние исходных свойств стали 110Г13Л на ее упрочнение наклепом // Литейное производство. 1974. № 6. С. 33—34.
4. Олейник Н.В. Поверхностное динамическое упрочнение деталей машин. М.: Машиностроение, 1984. 228 с.
5. Пиртон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. М.: Наука, 1985. 504 с.
6. Кокорева О.Г. Оценка энергетического состояния поверхностного слоя при статико-импульсном упрочнении тяжело нагруженных поверхностей сердечников крестовин стрелочных переводов // Межвуз. сб. науч. тр. Современные проблемы транспортного комплекса России: Магнитогорск, 2013.
7. Кокорева О.Г. Результаты производственных испытаний по упрочнению тяжело нагруженных поверхностей деталей машин методами ППД // Сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. "Наука, образование, общество: проблемы и перспективы развития", Тамбов, 2013.
8. Кокорева О.Г. Разработка модели способа обработки тяжело нагруженных поверхностей деталей машин // Наукоемкие технологии. 2014. № 2.
9. Кокорева О.Г. Исследование параметров качества поверхностного слоя при обработке статико-импульсным методом // СТИН. 2013. № 3.



## Влияние поверхностного пластического деформирования в стесненных условиях на качество упрочненного слоя

*Рассмотрено влияние условий деформирования (свободные и стесненные) на характеристики качества поверхностного слоя упрочненных деталей: шероховатость, остаточные напряжения, глубину наклепа, твердость и микротвердость. Выявлена эффективность упрочнения при деформировании в стесненных условиях нагружения по сравнению с деформированием локальным свободным нагружением.*

**Ключевые слова:** стесненное условие деформирования, пластическая волна, пластическое деформирование, упрочнение, характеристики поверхностного слоя.

*The purpose of the article is to consider the influence of the deformation conditions (free and cramped conditions) on the characteristics of the surface layer quality: roughness, residual stress, depth of hardening, hardness and micro-hardness. Determining the effective hardening during deformation in cramped conditions of loading, which compared with the free local loading.*

**Keywords:** constrained deformation, plastic wave, plastic deformation, hardening, surface layer quality.

### Введение

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) является одним из наиболее простых и эффективных методов отделочно-упрочняющей обработки деталей машин. ППД повышает усталостную прочность, контактную выносливость и износостойкость деталей и тем самым увеличивает долговечность машин [1–4]. Управление напряженным состоянием при отделочно-упрочняющей обработке поверхностным пластическим деформированием имеет большое значение для изготовления изделий повышенного качества. Например, при обработке маложестких стержневых изделий сложно получить необходимую интенсивность напряженного состояния, так как повышенное давление на деформирующий инструмент приводит к искажению геометрической формы изделия. При изготовлении тонкостенных деталей иногда требуется снизить напряженное состояние в очаге пластической деформации, чтобы в процессе формообразования исключить

перенаклеп или увеличение твердости поверхностного слоя.

Механика стесненного деформирования является новым направлением исследования отделочно-упрочняющих процессов. В работах [5, 6] приведены результаты моделирования простых геометрических форм, нагруженных шаром, которые свидетельствуют, что деформирование в стесненных условиях закрепления заготовки и (или) деформирующего инструмента влияет на интенсивность напряженного состояния в очаге деформации. Известны работы, например [7, 8], по разработке технологии правки маложестких валов и осей в стесненных условиях нагружения и работа [9] по снижению утонения при использовании формоизменяющих операций листовой штамповки.

### Постановка задачи

Пластическая волна при внедрении шара в поверхность объемного упругопластического тела

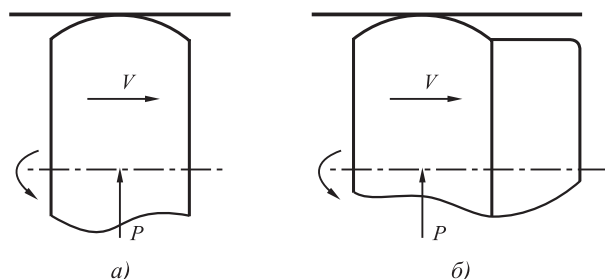


Рис. 1. Схемы нагружения при свободных (а) и стесненных (б) условиях деформирования

образуется благодаря свободной поверхности, которая позволяет воспринимать обратное внеконтактное течение металла из очага деформации [10]. Если наложить ограничение на это пластическое течение, то условия деформирования металла при внедрении шара должны измениться и оказать воздействие на изменение механических свойств упрочняемого материала.

Для устранения формирования волны при пластическом течении металла предложено использовать ролик с цилиндрическим пояском [11], расстояние от вершины и ширина которого соответствуют ширине волны и глубине внедрения инструмента. На рис. 1 представлены схемы при свободном и стесненном нагружении.

Таким образом, техническая идея заключается в том, чтобы погасить волновые течения металла вне очага пластической деформации. Это позволит уменьшить размеры пластической волны и интенсифицировать напряженное и деформированное состояния в объеме тела.

**Цель работы** — экспериментальная оценка влияния ППД в свободных и стесненных условиях нагружения на качество поверхностного упрочненного слоя деталей машин.

### Методика экспериментальных исследований

Исследования проводили на цилиндрических образцах диаметром 16 мм, изготовленных из стали 45 на токарном станке 1К62. Для локального упрочнения использовали цилиндрический ролик из стали У10А диаметром 30 мм с радиусом профиля  $r = 5$  мм. В качестве технологической смазки применяли масло И-40А.

Параметры шероховатости после упрочнения ППД измеряли с помощью профилографа-профилометра модели Form Talysurf I 1200 производства фирмы Taylor Hobson (Англия) с применением индуктивного датчика. Прибор способен измерять отклонения формы в пределах ограниченной поверхности, волнистость, направления неровностей, изъяны поверхности, а также пара-

метры шероховатости, в том числе соответствующие ГОСТ 2789—73.

С помощью твердомера модели HBRV 187,5 определили поверхностную твердость по Роквеллу стальным шариком диаметром 1,588 мм (HRB). Вдавливание проводили под действием двух последовательно приложенных нагрузок — предварительной, равной 100 Н, и окончательной (общей), равной 980 Н. Твердость определяли по разности глубин отпечатков. Глубина отпечатка под действием основной нагрузки фиксировалась индикатором, а твердость по HRB после измерения отражалась на экране твердомера.

Для определения микротвердости использовали микротвердомер марки ПМТ-3 с усилием нагружения 200 гс. При испытании измеряли диагональ отпечатка  $d$  и по соответствующим таблицам (для заданной нагрузки  $P$ ) получали микротвердость  $H_{\mu}$  (Н/мм<sup>2</sup>).

Для измерения остаточных напряжений использовали прибор Xstress 3000 G3/G3R. Режим измерения: хромовый анод;  $K_{\alpha}$ -излучение; напряжение на рентгеновской трубке — 25 кВ; ток — 5,5 мА. Использовали оба детектора — А и В, коллиматор — 5 мм (диаметр выходного пучка лучей 5 мм). Угол дифракции — 156,4°. Плоскость отражения (311). Число наклонов — 8, отклонение при наклоне (осцилляция)  $\pm 5^{\circ}$ . Время экспозиции — 5 с. Напряжения измеряли в двух направлениях:  $\varphi = 0^{\circ}$  (положение гониометра вдоль образца) и  $\varphi = 90^{\circ}$  (положение гониометра поперек образца). Нормальные напряжения определяли одним из стандартных способов обсчета пиков Peakfit, предлагаемым программным обеспечением прибора. Для автоматизированного расчета напряжений вводили следующие параметры материала: модуль Юнга — 210 ГПа; коэффициент Пуассона — 0,3.

### Результаты эксперимента

Ниже показано влияние свободных и стесненных условий обкатывания на основные характеристики качества поверхностного слоя: шероховатость, поверхностную твердость, остаточные напряжения, микроструктуру и глубину наклепа.

**Шероховатость.** На рис. 2 представлена зависимость показателей шероховатости  $Rz$  и  $Ra$  от глубины внедрения ролика  $t$  при свободных и стесненных условиях нагружения. Видно, что обработка со значениями глубины внедрения, превосходящими оптимальные ( $t = 0,22$  мм), приводит к перенаклепу и увеличению шероховатости поверхности. При деформировании в стесненных условиях получили меньшие значения параметров шероховатости по сравнению с деформированием

в условиях свободного нагружения. При обработке с оптимальной глубиной внедрения параметры шероховатости  $Rz$  и  $Ra$  снижаются в 2,4...2,8 раза в случае свободного деформирования, и в 3,4...3,8 раза при стесненных условиях нагружения.

На рис. 3 показано влияние подачи ролика  $s$  на параметры шероховатости при свободных и стесненных условиях нагружения. Уменьшение подачи приводит к местному увеличению деформации обкатываемой поверхности. Следовательно, за счет изменения подачи можно регулировать шероховатость поверхности. Минимальная шероховатость получена при  $s = 0,07$  мм/об. Дальнейшее увеличение подачи приводит к значительному возрастанию микронеровностей вследствие неравномерного перекрытия очагов пластической деформации. При оптимальном значении подачи ( $s = 0,07$  мм/об) параметры шероховатости снижаются в 3,3...3,7 раза при свободном нагружении и почти в 5 раз при стесненном.

**Поверхностная твердость.** На рис. 4 показаны зависимости поверхностной твердости от глубины внедрения и подачи ролика при свободных и стесненных условиях нагружения. Анализируя характер кривых, приведенных на рис. 4, можно отметить, что стесненные условия нагружения ролика оказывают существенное влияние на повышение поверхностной твердости. С повышением глубины внедрения при деформировании в стесненных условиях поверхностная твердость повышается в 2,4...7,4 % по сравнению с деформированием в свободных условиях. Увеличение подачи ролика приводит к уменьшению поверхностной твердости вследствие неравномерного перекрытия очага деформации, но в условиях стесненного нагружения твердость поверхностного слоя выше.

**Остаточные напряжения.** Результаты измерения остаточных напряжений рентгеновским способом приведены на рис. 5. Видно, что остаточ-

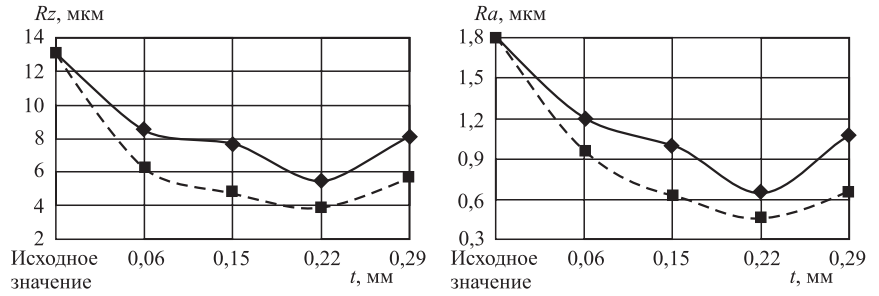


Рис. 2. Зависимости параметров шероховатости  $Rz$  и  $Ra$  от глубины внедрения ролика при свободных (—) и стесненных (----) условиях нагружения ( $s = 0,21$  мм/об;  $n = 125$  мин<sup>-1</sup>)

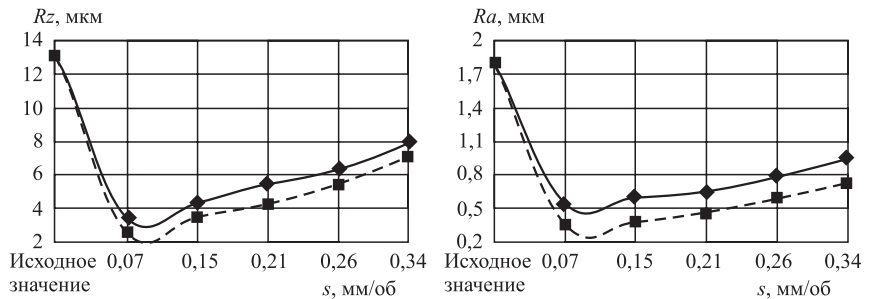


Рис. 3. Зависимости параметров шероховатости  $Rz$  и  $Ra$  от подачи ролика при свободных (—) и стесненных (----) условиях нагружения ( $t = 0,22$  мм;  $n = 125$  мин<sup>-1</sup>)

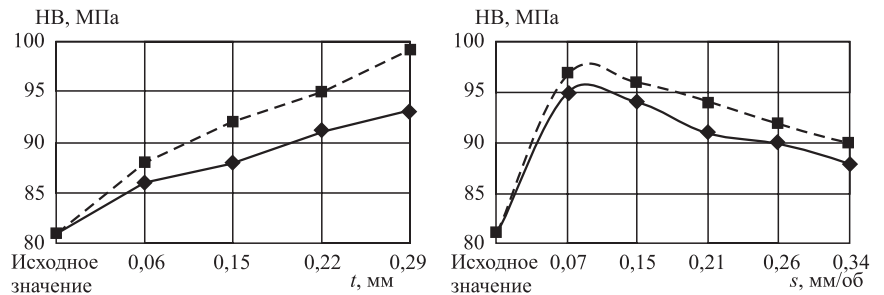


Рис. 4. Зависимости поверхностной твердости HB от глубины внедрения ( $s = 0,21$  мм/об) и подачи ( $t = 0,22$  мм) ролика при свободных (—) и стесненных (----) условиях нагружения

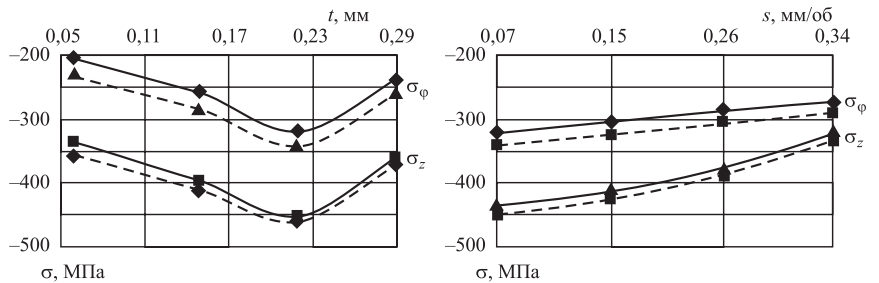
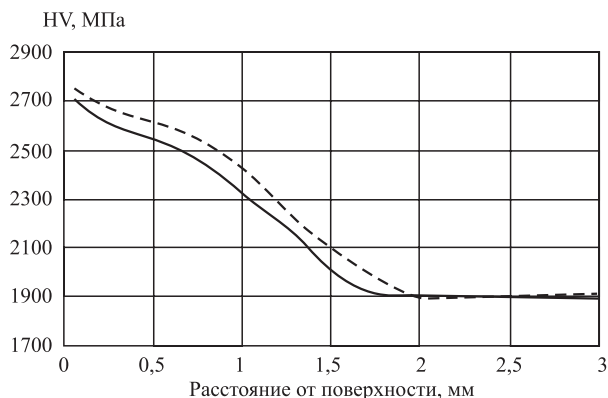


Рис. 5. Зависимости поверхностных остаточных напряжений от глубины внедрения ( $s = 0,07$  мм/об) и подачи ( $t = 0,22$  мм) ролика при свободных (—) и стесненных (----) условиях нагружения



**Рис. 6.** Распределения микротвердости по поперечному сечению образцов при свободных (—) и стесненных (- - -) условиях нагружения ( $t = 0,22$  мм;  $s = 0,07$  мм/об;  $n = 125$  мин<sup>-1</sup>)

ные осевые напряжения имеют большие значения, чем остаточные тангенциальные. Наибольшее значение остаточных напряжений оказалось у образцов с глубиной внедрения ролика  $t = 0,22$  мм. Дальнейший рост глубины внедрения ролика приводит к уменьшению остаточных напряжений из-за перенаклепа поверхности. Анализ экспериментальных данных показывает, что наиболее благоприятная напряженность образуется при обработке с подачами, рекомендуемыми для получения равномерного упрочнения (в нашем случае  $s = 0,07$  мм/об). При деформировании в стесненных условиях получены повышенные значения остаточных напряжений по сравнению с деформированием при свободных условиях нагружения.

**Микротвердость и глубина наклепа.** На рис. 6 показаны распределения микротвердости по поперечному сечению в зависимости от условий обработки. При стесненных условиях нагружения за счет изменения геометрии инструмента площадь контакта увеличивается, следовательно, происходит повышение глубины наклепа (больше в 1,3 раза). При деформировании в стесненных условиях за счет устранения пластического течения материала вокруг инструмента получены повышенные значения микротвердости.

### Выводы

Результаты экспериментальных исследований показали высокую эффективность использования стесненных условий деформирования при ППД для получения высокого качества поверхности по ряду показателей.

При деформировании в стесненных условиях параметры шероховатости снижаются в 1,3...1,5 раза; поверхностная твердость и остаточное напряжение сжатия повышаются соответственно на 2,4...7,4 и 10 %; глубина наклепа увеличивается в 1,3 раза по сравнению с деформированием в свободных условиях нагружения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 152 с.
2. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
3. Балтер М.А. Упрочнение деталей машин. М.: Машиностроение, 1978. 184 с.
4. Щедрин А.В., Козлов А.Ю., Кострюков А.А. Совершенствование охватывающего поверхностного пластического деформирования за счет регуляризации микрогеометрии поверхности обрабатываемой заготовки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 4. С. 162—168.
5. Зайдес С.А., Нго Као Кыонг. Интенсификация напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при стесненных условиях нагружения // Вестник ИрГТУ. 2015. № 7. С. 55—59.
6. Зайдес С.А., Нго Као Кыонг. Оценка напряженного состояния при стесненных условиях локального нагружения // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 10. С. 6—9.
7. Бубнов А.С., Зайдес С.А. Правка валов стесненным сжатием // Мат. 2-й Междунар. науч.-техн. конф. "Технические науки, технологии и экономика". Чита, ЧитГТУ, 2002. С. 84—91.
8. Зайдес С.А. Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. Иркутск, ИрГТУ, 2001. 312 с.
9. Ершов В.И., Глазков В.И., Каширин М.Ф. Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1990. 311 с.
10. Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
11. Пат. 2529335 РФ, МПК В 24 В 39/04. Ролик обкатной комбинированный / Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А., Махалов М.С., Остание О.А. Заявитель и патентообладатель Кузбасский государственный технологический университет им. Т.Ф. Горбчаева.; Заявл. 30.07.2013. Оpubл. 27.09.2014. Бюл. № 27.



А.В. Щедрин

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана),

А.А. Кострюков

(ОАО "Демиковский машиностроительный завод")

E-mail: kaaoz@bk.ru

## Применение триботехнологий на основе самоорганизации для системного совершенствования процессов холодного пластического деформирования

С использованием метода волочения сравнительно исследованы триботехнологии на основе самоорганизации в виде совместного применения заготовок и деформирующих инструментов с регулярной микрогеометрией поверхности, а также в виде инновационных металлолакирующих смазок и антифрикционного покрытия, реализующих фундаментальное научное открытие "эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского".

**Ключевые слова:** регулярный микрорельеф, металлолакирующая смазка, латунирование, удельная сила волочения, качество обработки.

*Using the drawing method, tribo-technologies based on self-organization in the form of joint application of blanks and deforming tools with regular surface microgeometry, as well as innovative metal-lap greases and anti-friction coating, which realize the fundamental scientific discovery "Garkunov—Kragelsky frictionless effect".*

**Keywords:** regular microrelief, metal-clad lubrication, brassnization, specific strength of drawing, quality of processing.

Как свидетельствует современная научная статистика [1—3], к основным триботехнологиям на основе самоорганизации относятся следующие методы: применение инновационных металлолакирующих смазок, реализующих фундаментальное научное открытие "эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского"; использование регулярной микрогеометрии воздействующей поверхности инструмента; латунирование поверхности трения.

Для оценки преимуществ совместного перспективного применения данных триботехнологий при холодном пластическом деформировании использовали метод волочения сплошных цилиндрических заготовок из стали марки 45 (186 НВ).

Экспериментальные образцы-заготовки пяти партий имели участок под волочение длиной 150 мм, который первоначально обрабатывали с точностью до 0,02 мм и параметром шероховатости поверхности  $Ra_3 \approx 1$  мкм с образованием иррегулярного микрорельефа (ИМР).

На образцы-заготовки третьей партии по технологии, приведенной в [1], на токарно-винторезном станке наносили антифрикционный слой латуни марки ЛС59-1АМ толщиной до 5 мкм.

На образцах-заготовках четвертой партии с помощью инструмента, описанного в работе [4], имитировали регулярный микрорельеф (РМР) поверхности в виде однозаходных винтовых канавок радиусом 1,5 мм с шагом 1 мм и глубиной около 20 мкм. Продольная профилограмма по-

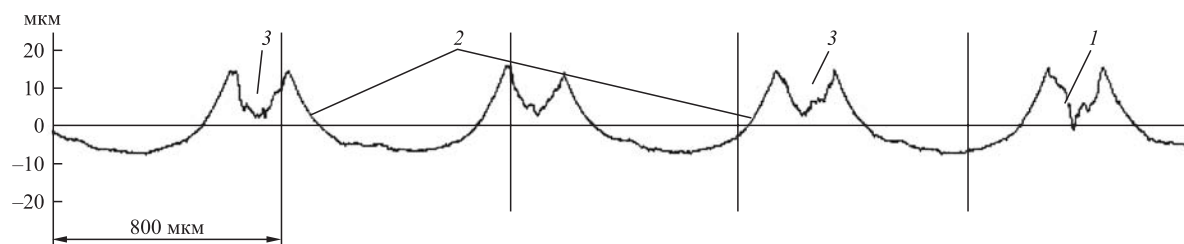
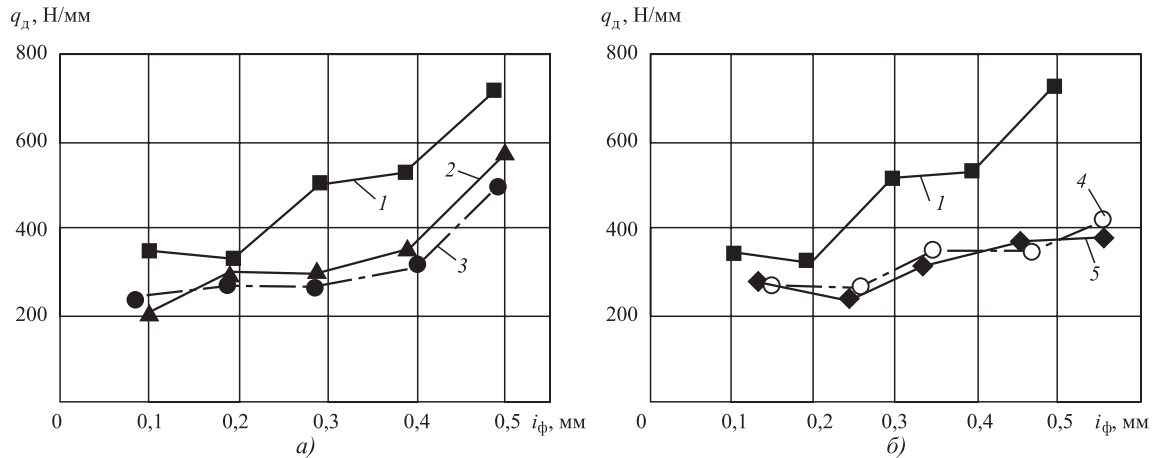


Рис. 1. Продольная профилограмма образца-заготовки с РМР поверхности





**Рис. 2. Зависимость удельной силы волочения  $q_d$  от абсолютной фактической деформации  $i_\phi$ :**

1 — образцы-заготовки и инструмент с ИМР поверхности, смазка И-40; 2 — инструмент с РМР, образцы-заготовки с ИМР поверхности, смазка И-40 + 50 % "Валены"; 3 — инструмент с РМР, образцы-заготовки с ИМР и латунированием поверхности, смазка И-40 + 50 % "Валены"; 4 — инструмент и образцы-заготовки с РМР поверхности, смазка И-40 + 50 % "Валены"; 5 — инструмент с РМР, образцы-заготовки с РМР и латунированием поверхности, смазки И-40 + 50 % "Валены"

верхности одного образца-заготовки этой партии приведена на рис. 1. В этом случае в отличие от исходного ИМР 1 образуется "маслоемкая" поверхность 2 с развитой дислокационной структурой, которая существенно ускоряет химические реакции с компонентами применяемой технологической смазки [4].

На образцах-заготовках пятой партии первоначально выполняли латунирование, а затем нанесли РМР (см. рис. 1).

Волочение выполняли на испытательной машине Р-5 с помощью приспособления, приведенного в работе [5], при скорости 0,05 м/мин. Номинальную абсолютную деформацию образцов-заготовок на диаметр  $i_n$  варьировали в диапазоне 0,1...0,6 мм через 0,1 мм. В качестве инструмента применяли деформирующую фильеру из стали марки 9ХС (58...61 HRC): диаметр рабочего канала  $20^{+0,03}$  мм; угол рабочего и обратного конусов 5°; ширина калибрующей ленточки 5 мм.

Рабочий канал фильер имел ИМР, полученный шлифованием, с высотой микровыступов 7...11 мкм [6]. На рабочем канале одной из фильер выполняли РМР в виде однозаходных винтовых канавок радиусом 1,5 мм с шагом 0,5 мм и первоначальной глубиной на участке калибрующей ленточки 10 мкм [7].

В качестве технологических смазок применяли минеральное масло марки И-40 и металлоплакирующую смазку, состоящую из масла И-40 с добавкой 50 % об. многофункциональной медьсодержащей присадки "Валена" (Пат. 2277579 РФ), реализующей фундаментальное научное откры-

тие "эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского" [7—14].

На рис. 2, а представлена общая зависимость удельной силы волочения образцов-заготовок без РМР поверхности. Ее анализ показывает, что наибольшие энергозатраты (зависимость 1) приходятся на обработку фильерой без РМР и металлоплакирующей смазки. Причем при  $i_\phi > 0,2$  мм наблюдается резкое увеличение удельной силы волочения из-за адгезионного нароста обрабатываемого материала на рабочем канале фильеры без РМР. Причиной адгезии является низкая маслоемкость микрорельефов поверхности инструмента [6] и образцов-заготовок, а также крайне малая экранная способность технологической смазки — масла И-40.

Применение металлоплакирующей смазки, латунирования и инструмента с РМР (зависимости 2, 3 на рис. 2) позволяет существенно снизить удельную силу волочения. Так, при  $i_\phi \approx 0,5$  мм для зависимости 2 снижение удельной силы волочения по сравнению с зависимостью 1 составляет 21 %, а для зависимости 3 — 31 %. Таким образом, эффект от латунирования поверхности составляет около 10 %, что весьма существенно.

Еще более существенно контактное взаимодействие изменяется при  $i_\phi > 0,4$  мм в случае применения образцов-заготовок с РМР обрабатываемой поверхности (зависимости 4, 5 на рис. 2, б). В этом случае при  $i_\phi \approx 0,5$  мм снижение удельной силы деформирования составляет 49 %. Такой результат объясняется тем, что в канавках РМР 2 и вторичных канавках 3 поверхности образцов-

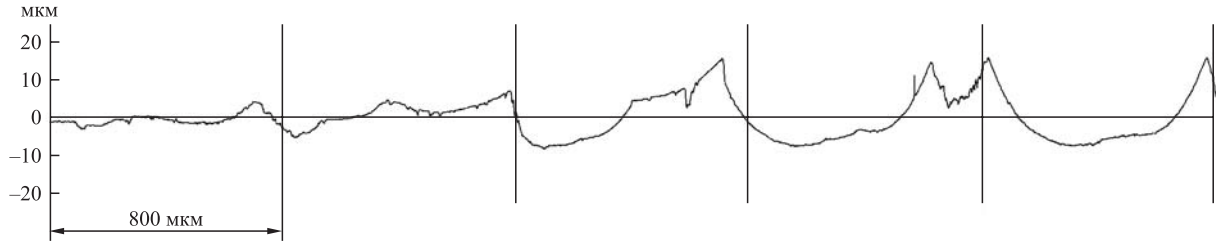


Рис. 3. Продольная профилограмма очага деформации при волочении образца-заготовки с латунированием и РМР поверхности,  $i_{\phi} = 0,56$  мм

заготовок (см. рис. 1) аккумулируется значительное количество металлоплакирующей смазки, которая выдавливается из них в процессе волочения и тем самым минимизирует трение, а также полностью нейтрализует негативные адгезионные явления. Другой причиной такой значительной эффективности является отсутствие в очаге деформации положительной волны внеконтактной деформации (рис. 3) [7, 9–11, 13–15], увеличивающей площадь контакта инструмента и заготовки и препятствующей реализации гидродинамического режима трения. Отсутствие в очаге деформации положительной волны внеконтактной деформации объясняется нарушением сплошности деформируемого слоя из-за наличия канавок РМР (см. рис. 1).

Следует отметить, что в обоих случаях применения латунирования поверхности образцов-заготовок на рабочем канале фильеры после волочения формировался слой латуни.

Косвенным доказательством энергоэффективности совместного применения триботехнологий является зависимость относительного удлинения образцов-деталей от абсолютной фактической деформации (рис. 4). Ее анализ показывает, что чем меньше удельная сила волочения, тем меньше относительное удлинение и наоборот.

Другой вывод, вытекающий из анализа зависимости, приведенной на рис. 4: при постоянном объеме материала до и после волочения минимальное относительное удлинение образцов-деталей должно привести к максимальной остаточной деформации поверхности по диаметру. Данный вывод убедительно подтверждается зависимостью средней диаметральной остаточной деформации образцов-деталей от абсолютной фактической деформации (рис. 5). Анализ этой зависимости показывает, что данный вид остаточной деформации имеет положительный знак и увеличивается по мере роста значения  $i_{\phi}$ .

Комплексную картину контактного взаимодействия дополняет зависимость от  $i_{\phi}$  коэффициента уточнения по параметру шероховатости

поверхности образцов-деталей (рис. 6) [7]. Ее анализ показывает, что совместное применение отдельных триботехнологий позволяет существенно интенсифицировать эффект Ребиндера не только на макроуровне (зависимости 4 и 5 на рис. 2),

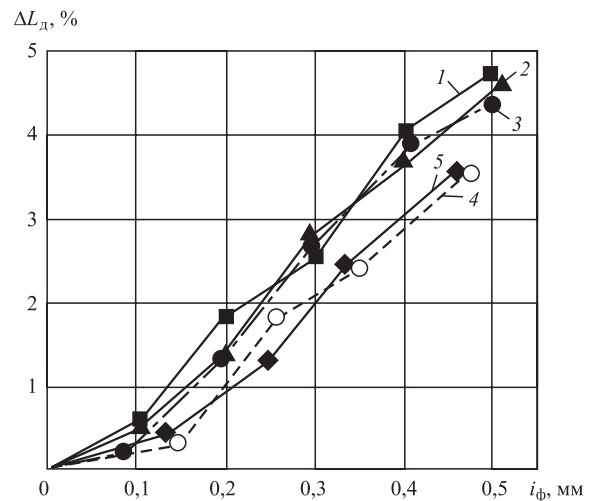


Рис. 4. Зависимость относительного удлинения образцов-деталей  $\Delta L_{д}$  от абсолютной фактической деформации (обозначения см. на рис. 2)

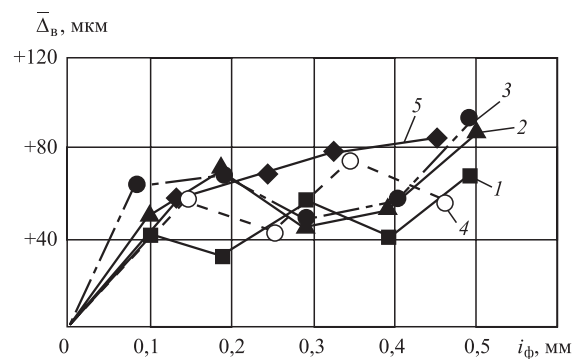


Рис. 5. Зависимость средней диаметральной остаточной деформации образцов-деталей  $\bar{\Delta}_b$  от абсолютной фактической деформации образцов-заготовок (обозначения см. на рис. 2)

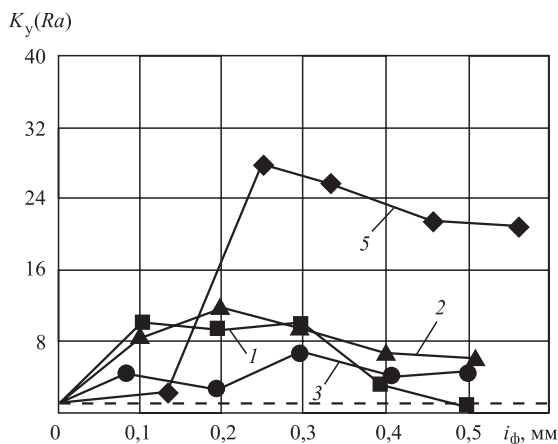


Рис. 6. Зависимость коэффициента уточнения по параметру шероховатости поверхности  $K_y$  ( $Ra$ ) образцов-деталей от абсолютной фактической деформации (обозначения см. на рис. 2)

но и на микроуровне — в пределах шероховатости поверхности (зависимость 5 на рис. 6).

Интенсивное пластифицирование поверхностного слоя (максимальное значение  $K_y$  ( $Ra$ )) объясняется большой скоростью химических реакций обрабатываемого материала с поверхностно-активными веществами металлолакирующей смазки в результате предварительного формирования РМР на образцах-заготовках, который представляет собой, как уже отмечалось, развитые дислокационные структуры [4].

Аналогичный эффект Ребиндера на макроуровне (зависимости 4 и 5 на рис. 2) заключается в существенном (до двух раз) увеличении значения  $i_\phi$  при равной удельной силе волочения по сравнению с зависимостью 1 на рис. 2.

Полученные с использованием алгоритмических процедур "искусственного технологического интеллекта" [3, 16–18] результаты позволяют системно усовершенствовать перспективные методы обработки, основанные на способе воздействия холодным пластическим деформированием [8, 11, 13, 19–23], защищенные патентами РФ на изобретения № 2063861, 2303507, 2560475, 2560477, 2593062.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность): учебник. М.: Изд-во МСХА, 2001. 606 с.
2. Трибология на основе самоорганизации / Д.Н. Гаркунов, Э.Л. Мельников, В.Г. Бабель, А.В. Щедрин и др. Германия: Lambert. 2015. 245 с.

3. Технологическая трибология на основе самоорганизации / А.В. Щедрин, А.Ю. Козлов, Н.Ю. Чихачева и др. Германия: Lambert. 2016. 85 с.

4. Повышение эффективности комбинированной охватывающей обработки / А.В. Щедрин, А.А. Кострюков, Н.Ю. Чихачева и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 5. С. 12–16.

5. Shchedrin A.V. Combined machining of parts // Russian Engineering Research. 1997. Vol. 17. No. 5. P. 63–65.

6. Исследование комбинированного волочения инструментом с регулярным микрорельефом / А.В. Щедрин и др. // Вестник машиностроения. 2008. № 4. С. 78–80.

7. Теоретические и экспериментальные исследования охватывающего поверхностного пластического деформирования в условиях применения металлолакирующих смазочных материалов / А.В. Щедрин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 2. С. 11–17.

8. Повышение качества и производительности методов комбинированной обработки инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности на основе применения металлолакирующих смазок / А.В. Щедрин, С.А. Гаврилов, В.В. Ерохин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 8. С. 21–25.

9. Гаврилов С.А., Зинин М.А. Применение эффекта безызносности при синтезе металлолакирующих смазок для экстремальных условий трения // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 2. С. 29–33.

10. Гаврилов С.А. Совершенствование процесса поверхностного пластического деформирования на основе применения металлолакирующих смазочных материалов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 10. С. 3–7.

11. Формирование очагов деформации при охватывающем поверхностном пластическом деформировании / А.В. Щедрин и др. // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 10. С. 3–7.

12. Влияние металлолакирующей присадки "Валена" на показатели комбинированной обработки / М.А. Зинин, С.А. Гаврилов, А.В. Щедрин и др. // Вестник машиностроения. 2011. № 9. С. 77–78.

13. Щедрин А.В., Козлов А.Ю. Совершенствование технологии применения металлолакирующих смазочных материалов в методах охватывающего поверхностного пластического деформирования инструментом с регулярной микрогеометрией // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 3. С. 8–12.

14. Щедрин А.В., Козлов А.Ю., Воронков В.И. Теоретико-экспериментальное исследование охватывающего поверхностного пластического деформирования в условиях противодавления металлолакирующих смазочных материалов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 10. С. 11–15.

15. Повышение эффективности методов комбинированного волочения путем регуляризации микрогеометрии

три рабочей поверхности инструмента / А.В. Щедрин и др. // *Металлург*. 2006. № 10. С. 73–75.

16. **Трибология** как фундаментальная основа системного проектирования конкурентоспособных технологических объектов / А.В. Щедрин и др. // *Ремонт, восстановление, модернизация*. 2009. № 4. С. 15–20.

17. **Ярославцев В.М.** Разработка методологии поиска новых методов обработки и ее практическая реализация // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2007. № 2. С. 56–70.

18. **Щедрин А.В., Кострюков А.А., Чихачева Н.Ю.** Искусственный технологический интеллект как идеологическая основа всеобщей системы методов обработки материалов // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2015. № 6. С. 20–26.

19. **Щедрин А.В., Гаврилов С.А., Зинин М.А.** Оптимизация рецептуры металлолакирующих смазок для

комбинированного дорнования отверстий в заготовках из нешлифуемых цветных сплавов // *Вестник машиностроения*. 2012. № 9. С. 76–79.

20. **Влияние** угла наклона воздействующих поверхностей деформирующего элемента на характеристики метода комбинированного прошивания (протягивания) отверстий / А.В. Щедрин и др. // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2015. № 3. С. 20–24.

21. **Щедрин А.В., Поляков А.О.** Влияние металлолакирующих смазочных материалов на процесс комбинированного прошивания отверстий // *Вестник машиностроения*. 2015. № 4. С. 71–75.

22. **Воронцов А.Л., Бодарева А.В.** Исследование совмещенного процесса редуцирования-дорнования // *Производство проката*. 2014. № 8. С. 41–47.

23. **Мельников Э.Л.** Холодная листовая штамповка днищ. М.: Машиностроение, 1976. 184 с.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



## МЕДЬ И МЕДНЫЕ СПЛАВЫ ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ И ЗАРУБЕЖНЫЕ МАРКИ СПРАВОЧНИК

Осинцев О.Е., Федоров В.Н.

2-е изд., перераб. и доп. 2016. 360 с.

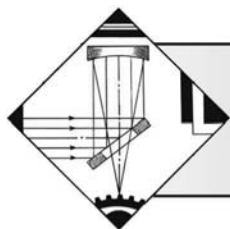
Цена 1300 руб.

В справочнике впервые систематизированы и обобщены сведения о физических, механических и технологических свойствах почти всех марок меди и сплавов на ее основе: латуней, бронз, медно-никелевых сплавов, а также специальных медных сплавов: микролегированных, дисперсно-упрочненных, с эффектом памяти и др. Показано влияние легирующих элементов и примесей на свойства сплавов. Изложены сведения о составе и структуре, особенностях термической обработки, даны двойные и многокомпонентные диаграммы состояния, определяющие фазовый состав. Приведены также сведения о свойствах зарубежных аналогов отечественных медных сплавов. 2-е издание (1-е издание 2004 г.) переработано в соответствии с новыми стандартами, а также дополнено сведениями по припоям на основе меди.

Для инженерно-технических работников машиностроительных, металлургических и металлообрабатывающих предприятий, научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций, а также для студентов, аспирантов и преподавателей высших учебных заведений и университетов.

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

по почте: 107076, г. Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2; по e-mail: realiz@mashin.ru.  
Дополнительная информация по телефону: (495) 785-60-69 и на сайте www.mashin.ru



# ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

УДК 621.793

**М.А. Белоцерковский**

(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск)

E-mail: mbelotser@gmail.com

## Совершенствование оборудования и технологий высокоскоростной электродуговой металлизации

*Рассмотрены возможные пути совершенствования процесса гиперзвуковой металлизации. Предложена новая конструкция распылительной головки и ряд способов, позволяющих расширить область применения метода.*

**Ключевые слова:** гиперзвуковая металлизация, покрытия, композиционные порошковые проволоки, состав горючей смеси.

*Possible ways to improve the process of hypersonic metallization are considered. A new design of the spray head and a number of methods that allow expanding the scope of the method are proposed.*

**Keywords:** hypersonic metallization, coatings, composite powder wires, composition of the combustible mixture.

### Введение

Выбор технологии газотермического напыления для восстановления, упрочнения или защиты рабочей поверхности зависит в первую очередь от функционального назначения детали, условий работы и длительности эксплуатации всего механизма. Сравнительная энергетическая эффективность и технические показатели различных методов

восстановления — упрочнения деталей машин и механизмов общемашиностроительного профиля (деталей из сталей, чугунов, цветных металлов и их сплавов), учитывая стоимость материалов, используемых при нанесении покрытий, можно показать, что наиболее эффективными и экономичными методами являются традиционная электродуговая металлизация (ЭДМ) и высокоскоростная (гиперзвуковая) металлизация (ГМ) [1, 2].

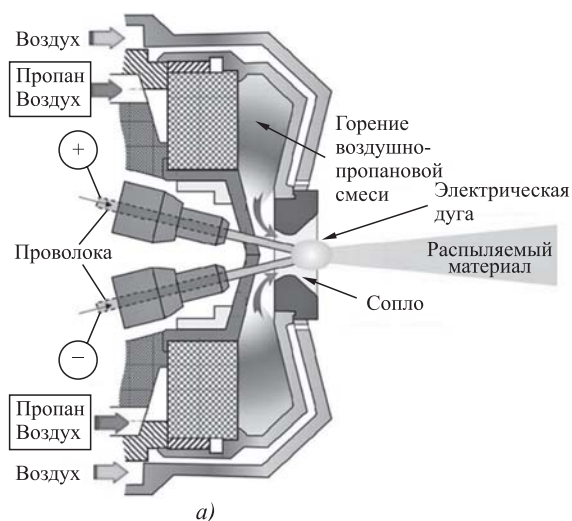


Рис. 1. Схема распылительной головки установки гиперзвуковой металлизации (а) и установка ГМ в работе (б)



В отличие от классической схемы ЭДМ при ГМ распыление жидкого металла, образующегося в результате теплового воздействия электрической дуги на торцы двух проволочных электродов, производится струей продуктов сгорания пропано-воздушной смеси (рис. 1) [3, 4]. При этом скорость струи на выходе из сопла достигает 1500 м/с при температуре 2200 К. Скоростной напор потока при ГМ составляет  $23,5 \cdot 10^4$  кг/(м·с<sup>2</sup>), что втрое больше, чем при плазменном напылении. Это позволяет частицам расплавленного металла двигаться в потоке со скоростью свыше 450 м/с и формировать покрытия, имеющие вдвое большую прочность сцепления с подложкой, чем при ЭДМ.

Кроме того, в условиях высокоскоростного напыления происходит изменение коэффициента сосредоточенности материала в струе в сторону его увеличения, поскольку угол расхождения двухфазных сверхзвуковых струй меньше, чем дозвуковых, и составляет 5...7°. Как следствие, уменьшается диаметр пятна напыления, возрастает коэффициент использования материала. Ионизация межэлектродного промежутка снижает ток дуги на 10...15 % при той же производительности, что и у ЭДМ. Разработанная малогабаритная камера сгорания пропано-воздушной смеси оригинальной конструкции (рис. 1, а) позволила создать ручной металлатор (рис. 1, б).

### Задачи исследования

С учетом особенностей метода ГМ и его отличий от технологии традиционной ЭДМ было необходимо провести исследования для решения следующих задач:

оценка влияния диаметра и материала проволоки на режимные параметры процесса;

определение возможности использования для процесса ГМ серийно выпускаемых композиционных проволок с порошковыми наполнителями;

исследование влияния состава горючей смеси, формирующей распыляющую струю, на свойства покрытий и возможность их последующего модифицирования.

### Проведение исследований и полученные результаты

Первый этап исследований был посвящен усовершенствованию конструкции известной установки гиперзвуковой металлизации типа АДМ-10 [4—7] или оборудования для высокоскоростного напыления покрытий по американскому патенту [8]. Эти устройства, реализующие схему гиперзвуковой металлизации, включают корпус, камеру микрофакельного горения с выходным отверстием в виде сопла Лавалю, установленный перпен-

дикулярно к оси камеры сгорания огнеупорный перфорированный элемент толщиной 8...14 мм с каналами диаметром 0,8...1,8 мм, узел подачи расходного материала, устройство поджига горючей смеси, топливный и воздушный жиклеры. Перфорированный элемент разделяет камеру на полость смешения и полость сжигания рабочей смеси и расположен на расстоянии 70...120 мм от среза выходного сопла.

Как показали многолетние исследования, данный вариант реализации технологии ГМ имеет весьма серьезный недостаток — плавление электродов осуществляется на фиксированном расстоянии от критического сечения сопла и при постоянном угле подачи проволочных электродов. При увеличении или уменьшении диаметра проволок, а также при замене типа распыляемых материалов (например, после стали напыляется алюминий) происходит смещение очага плавления внутрь камеры сгорания, что изменяет процесс струйного истечения распыляемого материала вплоть до его прекращения, снижается производительность, увеличиваются размеры распыленных частиц расплавленных проволок, увеличивается пористость покрытий. При расположении точки плавления на срезе сопла либо внутри камеры сгорания распыляющий газ не успевает эвакуировать весь плавящийся металл, происходят короткие замыкания электрической дуги, разбрызгивание металла, налипание частиц на сопло, нарушается стабильность процесса распыления. При слишком большом расстоянии теряется мощность распыляющей струи, увеличивается размер частиц, снижается их скорость.

Было предложено [9] длину начального участка распыляющей струи от критического сечения сопла Лавалю до участка плавления электродов выбирать в зависимости от температуры плавления распыляемого материала проволок и их диаметра, используя выражение

$$X = \alpha DT^{0,7}, \quad (1)$$

где  $X$  — длина начального участка распыляющей струи, мм;  $T$  — температура плавления распыляемого материала, °С;  $D$  — диаметр проволоки, мм;  $\alpha$  — коэффициент, численно равный 0,007, 1/°С<sup>0,7</sup>.

Для того чтобы изменять расстояние от критического сечения сопла до участка плавления электродов, крышка выполнена с возможностью перемещения относительно корпуса вдоль оси симметрии камеры, а выходное сопло Лавалю — в виде втулки, которая также может перемещаться вдоль оси камеры сгорания. Кроме того, корпусы токоподводов установлены на сферических опорах с возможностью изменения их положения относительно оси камеры.

Таблица 1

**Результаты экспериментальных исследований процесса ГМ**

Напыляемый материал	Температура плавления материала, °С	Диаметр проволоки, мм	Расстояние x, мм	
			Эксперимент	Вычисления
Сталь	1410	1,6	1,8	1,793
		1,8	2,0	2,016
		2,0	2,2	2,240
		3,0	3,3	3,360
Алюминий	660	1,6	1,0	1,0205
		1,8	1,2	1,148
		2,0	1,3	1,276
		3,0	2,0	1,913
Цинк	420	1,6	0,7	0,768
		1,8	0,9	0,864
		2,0	1,0	0,960
		3,0	1,4	1,440
Нихром Х20Н80	1770	1,6	2,1	2,103
		1,8	2,4	2,3657
		2,0	2,6	2,6286
Молибден	2610	1,6	2,7	2,767
		1,8	3,1	3,113
		2,0	3,5	3,459

Таблица 2

**Характеристики используемых в эксперименте проволок**

Марка	Диаметр, мм	Наполнители	Размер частиц наполнителей, мкм
ПП-Нп-ПСТ 350Т (ЗАО "Спецсплав", Украина)	1,6...1,8	WC, Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> , TiC	120...350
DURMAT AS-815 (DURUM, Германия)	1,62	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> , B <sub>4</sub> C, SiC	40...100
ПП-ПМ-6 (ООО "Северсталь-метиз", РФ)	1,8	WC, B <sub>4</sub> C	100...250
ПП-Нп-19ГСТ (ООО "Северсталь-метиз", РФ)	1,6...1,8	WC, карбоборид хрома	80...160
Sulzer Metco 8297 (Sulzer Metco Inc., США)	1,62	WC, SiC, TiC	40...60
ПП-ОИМ-ГМ (по заказу ОИМ)	1,8	SiC, Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	5...20

Выражение (1) было получено путем математической обработки результатов экспериментальных исследований, проведенных на модернизированной установке гиперзвуковой металлизации типа АДМ-10, и приведенных в табл. 1 данных. Корпус головки металлизатора с установленным в нем соплом Лавалля был выполнен с возможностью перемещения вдоль оси головки. Оценивали величину распыленных частиц, стабильность горения дуги и процесса распыления, наличие налипших на сопло частиц. При достижении наиболее стабильных результатов и мелкого распыла расстояние от критического сечения сопла до очага плавления электродов фиксировали и заносили в табл. 1, в столбец "Эксперимент". В столбце "Вычисления" приведены значения X, определенные по эмпирической формуле (1). Сравнение полученных значений показывает, что с помощью формулы (1) с достаточной степенью точности можно определить значение расстояния X.

Следующим параметром была оценка возможности использования порошковых проволок с различным размером наполнителей для различных процессов электродуговой металлизации.

Использовали четыре типа металлизаторов, каждому из которых соответствовали свои скорости распыляющей струи. Традиционную электрометаллизацию осуществляли на установке ЭМ-14 при расходах воздуха 36...43 м<sup>3</sup>/ч и давлении 0,40...0,54 МПа, что позволяло получить скорость распыляющей воздушной струи от 80 до 150 м/с. Увеличение давления воздуха до 0,65 МПа и расхода до 60 м<sup>3</sup>/ч на металлизаторе модели ЭМ-12 позволило повысить скорость воздушной струи до 320 м/с. Активированная электродуговая металлизация (АДМ) на установке АДМ-6, оснащенной камерой сгорания пропано-воздушной смеси с соплом Лавалля, обеспечила скорость распыляющей струи 380...850 м/с. Гиперзвуковой металлизатор конструкции Объединенного института машиностроения (ОИМ) НАН Беларуси позволил распылять струей, летящей со скоростью до 1500 м/с. Скорость струи определяли с помощью прибора ИССО-1. Для нанесения покрытий использовали порошковые проволоки, приведенные в табл. 2.

Покрытия наносили на образцы для оценки коэффициента использования материала и на изношенную рабочую поверхность упорных пластин (сталь 20Х) размером 300×300×5 мм штамповой оснастки для изготовления керамических плиток. Перед восстановлением рабочую поверхность пластин подготавливали струйно-абразивным методом. Результаты испытаний (срок службы) приведены в табл. 3.

Анализ полученных результатов показывает, что если для наплавки размер наполнителя практически не оказывает влияния на его содержание



Таблица 3

Результаты испытаний

Марка проволоки	Метод металлизации	Скорость газовой струи, м/с	Коэффициент использования материала	Срок службы пластин, число смен
ПП-ПМ-6	ЭДМ	95	0,70...0,80	63
Нп-19ГСТ	ЭДМ	95	0,85...0,90	68
AS-815	ЭДМ	190	0,75...0,85	62
Metco 8297	ГМ	1100	0,85...0,90	69
Metco 8297	АДМ	780	0,80...0,85	64
Metco 8297	ЭДМ с избытком воздуха	190	0,85...0,90	69
ПП-ОИМ-ГМ	ГМ	1100	0,85...0,90	70
ПП-ОИМ-ГМ	АДМ	780	0,80...0,85	62
Нп-ПСТ 350Т	ГМ	1100	0,15...0,20	31
Нп-ПСТ 350Т	АДМ	780	0,20...0,25	34
Нп-ПСТ 350Т	ЭДМ	95	0,65...0,75	51
ПП-ПМ-6	АДМ	780	0,20...0,30	35
Нп-19ГСТ	АДМ	780	0,30...0,35	37
AS-815	АДМ	780	0,55...0,65	52

в конечном продукте — покрытии, то при электрометаллизации этот параметр играет очень важную роль. Чем больше скорость эвакуации частиц наполнителя из зоны дуги и скорость их движения в струе, тем меньше степень их прогрева и тем больше вероятность отскока от упрочняемой поверхности детали, что снижает коэффициент использования материала, а соответственно, и интегральную твердость и износостойкость покрытий.

Коэффициент использования материала — это отношение количества наполнителя в покрытии к количеству наполнителя в проволоке. Он характеризует степень перехода наполнителя из напыляемого материала в покрытие. В результате измерений твердости покрытий установлено, что покрытия, сформированные распылением проволок производства ЗАО "Спецсплав", имеющие низкий коэффициент использования металла, не обеспечивают твердости, гарантированной изготовителями (52...58 HRC). Как правило, твердость покрытий не превышала 32 HRC.

Для того, чтобы обеспечить достаточно высокое содержание наполнителя в покрытии, необходимо выбирать скорость движения распыляющей струи в зависимости от максимального размера частиц наполнителя в порошковой проволоке.

Было установлено определенное соотношение между этими параметрами:

$$V \leq Ae^{-0,02d}, \quad (2)$$

где  $V$  — скорость газовой струи, м/с;  $A$  — коэффициент, равный 1470 м/с;  $e$  — основание натурального логарифма;  $d$  — величина, численно равная максимальному диаметру в микронах частиц износостойкого наполнителя.

Проведенные исследования позволили разработать технологические приемы формирования износостойких покрытий [10], учитывающие динамические параметры металлизации и размеры частиц наполнителей порошковых проволок.

На основании анализа результатов исследования зависимости коэффициента использования распыляемого материала от основных технологических параметров процесса (силы тока, напряжения, давлений пропана и воздуха) для нанесения покрытий из композиционных проволок фирм Dugum и Sulzer Metco были выбраны следующие режимы гиперзвуковой металлизации: ток — 120...150 А, напряжение — 32...33 В, давление пропана — 0,43 МПа, давление воздуха — 0,45 МПа, дистанция — 150 мм. В качестве материала подслоя использовался сплав X20H80 (20 % Cr, 80 %Ni).

Первые эксперименты показали, что материалы Dugum весьма чувствительны к толщине наносимого покрытия. Так, на указанных выше режимах из материала DURMAT AS-897 (аналог Sulzer Metco 8297) практически не удавалось получить покрытия толщиной более 1,1 мм. После напыления слоя толщиной около 0,9 мм на нем появлялись микротрещины, после напыления 1 мм они увеличивались в размерах и при достижении толщины 1,1 мм покрытие лопалось.

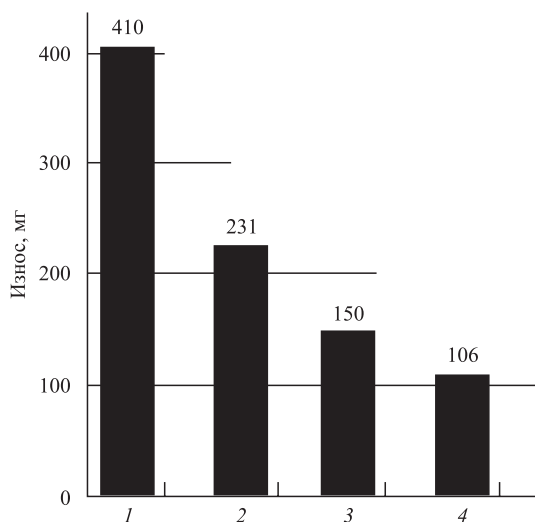
Материалы DURMAT AS-815 и DURMAT AS-760 позволяют получать покрытия большей толщины (до 2 мм), однако для этого необходимо уменьшать толщину формируемого за один проход слоя, увеличивать число проходов и непрерывно контролировать теплонагруженность образца.

Ускоренные триботехнические испытания образцов с покрытиями в режиме трения скольжения в 12%-ном растворе соляной кислоты, содержащем частицы двуокиси кремния, показали, что по износостойкости гальваническое хромовое покрытие уступает напыленным покрытиям из материалов DURMAT AS-815 и Sulzer Metco 8297 (рис. 2).

Для получения покрытий толщиной 1,5 мм и более из материалов Sulzer Metco 8297 и DURMAT AS-897 были проведены эксперименты, в которых последовательно наносили слои из различных литых и порошковых проволок, а верхний слой формировали из AS-897.

Анализ микроструктуры показал, что: в верхнем слое из AS-897 трещины отсутствуют; плотность напыленных слоев из стали 40X13 и из порошковой проволоки 30X20НМ близка к плотности компактного материала;

в слое AS-897 присутствуют включения и поры, которые трудно отличить друг от друга. Как правило, в газотермических покрытиях редко встре-



**Рис. 2. Износ покрытий за  $10^4$  циклов:**  
 1 — покрытие из стали X18H10T; 2 — гальваническое хромовое покрытие; 3 — покрытие DURMAT AS-815; 4 — покрытие Sulzer Metco 8297

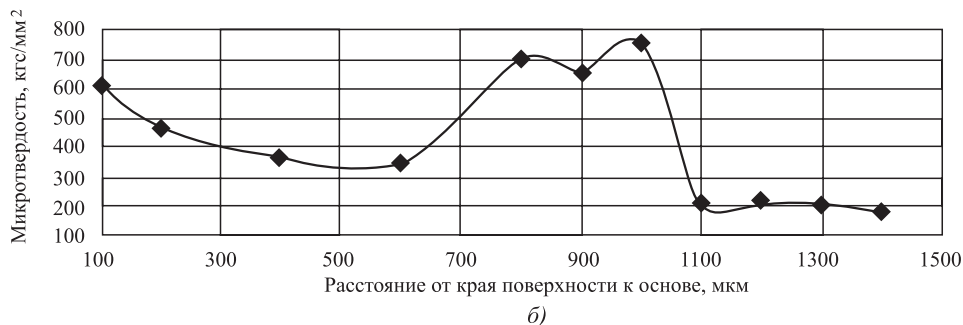
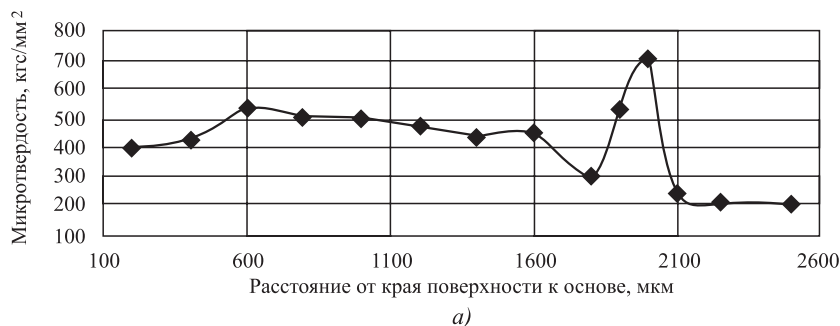
чаются поры сферической формы, поскольку они образуются на границах деформированных при ударе частиц и имеют вытянутую форму.

Исследование микротвердости напыленных слоев из материала DURMAT AS-897 показало следующее (рис. 3). Первый слой толщиной 100...120 мкм из AS-897, напыленный на подслои из X20H80, имеет наибольшую микротвердость, которая составляет 700...800 кгс/мм<sup>2</sup> (7000...8000 МПа). Последующие слои имеют твердость значительно ниже, что можно объяснить только влиянием температуры образца, накапливающейся с каждым последующим слоем.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости дискретного выполнения операции напыления и интенсивного охлаждения детали после напыления каждого слоя толщиной не более 120 мкм.

Одним из эффективных методов модифицирования стальных газотермических покрытий в целях придания большей твердости, износо- и коррозионной стойкости является ионно-лучевое азотирование [11]. Технология ионно-лучевой обработки обеспечивает достаточно высокие механические и адгезионные характеристики покрытий, получаемых гиперзвуковой металлизацией. Ее основным недостатком является небольшая толщина имплантированного слоя (до 15...18 мкм), обусловленная наличием большого количества оксидов, а также малым размером распыленных частиц (1...25 мкм). Это обстоятельство значительно ограничивает область рационального использования процесса ионно-лучевого азотирования стальных покрытий.

Процесс гиперзвуковой металлизации осуществляют, как правило, при давлении воздуха от 0,45 до 0,55 МПа и соотношении пропана и воздуха от 1:23 до 1:29, поскольку максимальные скорость истечения и температура пропано-воздушного факела достигаются при соотношениях пропана и воздуха от 1:25 до 1:28. Однако при этом в смеси находится достаточно большое количество воздуха, обуславливающего интенсивное окисление расплавленного металла проволок. Задачей последующих исследований



**Рис. 3. Распределение микротвердости по толщине покрытий из материала DURMAT AS-897:**

а — покрытие, включающее подслой X20H80 ( $\approx 200$  мкм), слой DURMAT AS-897 ( $\approx 600$  мкм), слой смеси AS-897 + 40X13 ( $\approx 900$  мкм); б — покрытие, включающее подслой X20H80 ( $\approx 200$  мкм) и далее слой DURMAT AS-897

явилось определение режимов напыления, позволяющих уменьшить степень окисления распыленных частиц.

При повышении размера распыляемых частиц увеличиваются области в покрытии, лишенные оксидных пленок, которые появляются на границах частиц, упавших на поверхность изделия. А уменьшение степени окисления снижает толщину оксидных пленок на частицах и, соответственно, снижает величину барьера для диффузии атомов азота. Эти факторы используются только при напылении поверхностных слоев покрытия — самый верхний удаляется механической обработкой, а последующий используется для имплантации азотом. Остальное покрытие необходимо напылять на режимах, обеспечивающих мелкий распыл при высокой скорости полета частиц, что позволяет получить необходимые физико-механические свойства основного материала покрытия.

Экспериментальные исследования осуществляли при распылении проволок из стали 40X13. Ионно-лучевую обработку проводили на экспериментальной установке, оснащенной ионным источником УВН-2М. Плотность тока ионного пучка — 2 мА/см<sup>2</sup>, время обработки — 3 ч. Кон-

центрацию кислорода в покрытиях определяли с помощью локального микрорентгеноспектрального анализатора VEGA 3M. Металлографические исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе TESCAN Vega 3LMH и оптическом универсальном микроскопе Altamyl Met 1MT. Объемную пористость покрытий определяли методом планиметрии, реализованном в прикладном пакете AxioVizion применительно к микроскопу Altamyl Met 1MT. Результаты экспериментов приведены в табл. 4.

Анализ результатов выполненных исследований (табл. 4) показал, что снижение количества воздуха от соотношения 1:16 (нижний порог горения пропана) до 1:18 позволяет в 2,1...2,5 раза уменьшить количество кислорода и оксидов в покрытии. При снижении давления воздуха с 0,35...0,55 МПа до 0,12...0,16 МПа размер распыленных частиц увеличился в 2,5...5 раз, что позволило повысить толщину азотированного слоя в 1,5...2 раза. Давление ниже 0,12 МПа применять нецелесообразно, поскольку это приводит к резкому повышению пористости покрытий, а соответственно, и снижению механических характеристик.

### Заключение

В результате выполненных исследований предложена новая конструкция соплового наконечника металлатора, позволяющая изменять расстояние от критического сечения сопла Лавала до участка плавления электродов в зависимости от диаметра и материала проволочных электродов.

Установлена зависимость количества частиц порошкового наполнителя композиционных проволок, попадающих в покрытие при электродуговой металлации, от их размера. Показано, что при гиперзвуковой металлации необходимо использовать порошковые проволоки с размерами частиц наполнителя менее 50 мкм. Определено, что износостойкость покрытий, напыленных материалами DURMAT AS-815 и DURMAT AS-897, превышает износостойкость гальванического хромового покрытия в 1,5...2,1 раза.

Установлено, что при гиперзвуковой металлации композиционных проволок, содержащих большое количество высокотвердых неметаллических наполнителей, необходимо за один проход наносить слои толщиной не более 100...120 мкм и после каждого прохода охлаждать слои до комнатной температуры.

Найдены режимы гиперзвуковой металлации стальных покрытий, предназначенных для последующего модифицирования методом ионно-лучевого азотирования, позволяющие повысить толщину модифицированного слоя в 1,5...2 раза.

Таблица 4

**Свойства покрытий из стали 40X13 и толщина формируемого на них азотированного слоя в зависимости от состава газовой смеси факела и давления подаваемого в смесь воздуха**

Состав газовой смеси факела (соотношение пропана и воздуха)	Давление воздуха, МПа	Размер распыленных частиц, мкм	Количество кислорода в покрытии, %	Пористость покрытий, %	Толщина азотированного слоя, мкм
1:16	0,45	10...25	0,6	6...8	30...35
1:18	0,45	10...25	0,8	≤ 5	30...35
1:19	0,45	10...20	1,1	≤ 5	30...35
1:22	0,45	10...25	1,4	< 5	25...30
1:25	0,45	5...15	1,9	< 5	20...25
1:28	0,45	5...15	2,2	< 5	20...25
1:17	0,11	65...80	0,7	11...13	55...70
1:17	0,12	60...75	0,7	6...8	55...60
1:17	0,13	55...65	0,7	5...7	50...60
1:17	0,15	55...60	0,7	≤ 5	50...55
1:17	0,16	50...55	0,7	≤ 5	50...55
1:17	0,17	45...50	0,7	< 5	45...50

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоцерковский М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий. Минск: УП "Технопринт", 2004. 200 с.
2. Белоцерковский М.А., Барановский В.Э. Активированное напыление покрытий комплексом "ТЕРКО" // Газотермическое напыление в промышленности—93. СПб., 1993. С. 74—77.
3. Белоцерковский М.А., Прядко А.С. Активированное газопламенное и электродуговое напыление покрытий проволоочными материалами // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 12. С. 17—23.
4. Белоцерковский М.А., Прядко А.С., Черепко А.Е. Методы и оборудование для формирования высокоэнергетических двухфазных потоков // Физика плазмы и плазменные технологии. В 4 т. Т. 4. Минск, 1997. С. 670—673.
5. Прядко А.С., Коробов Ю.С., Луканин В. Л. Активированная дуговая металлизация — характеристики оборудования и его применение // Пленки и покрытия '98: Тр. 5-й Международной НТК. СПб., 1998. С. 249—251.
6. Восстановление деталей методом активированной дуговой металлизации / Ю.С. Коробов, В.М. Изотко, А.С. Прядко, В.Л. Луканин // Автомобильная промышленность. 2000. № 1. С. 23—24.
7. Белоцерковский М.А., Прядко А.С., Черепко А.Е. Технологические особенности и области использования гиперзвуковой металлизации // Инновации в машиностроении: сб. науч. тр. / Редкол.: М.С. Высоцкий и др. Минск, ОИМ НАН Беларуси, 2008. С. 479—484.
8. Пат. № 6 245 390 США. МКИ С 23 С 4/12; В 05 В 1/24. 2001.
9. Способ гиперзвуковой металлизации и устройство для его осуществления: Евразийский пат. 024778, МПК В 05 В 7/18 / Белоцерковский М.А., Дюжев А.А., Прядко А.С., Черепко А.Е., Скворцов В.А., Сосновский А.В.; Заявитель ОИМ НАН Беларуси; Заявл. 30.09.2013.
10. Способ нанесения износостойкого покрытия на металлическую подложку: пат. 20975 РБ, МПК С 23 С 4/123 / Белоцерковский М.А., Дюжев А.А., Прядко А.С., Черепко А.Е., Сосновский А.В.; Заявитель ОИМ НАН Беларуси; Заявл. 23.05.2014.
11. Steel Thermal Sprayed Coatings: Superficial Hardening by Nitrogen Ion Implantation / M. Belotserkovsky, A. Yelistratov, A. Byeli, V. Kukareko // Welding Journal. 2009. Vol. 88, No. 12. P. 243—248.

УДК 621.793.18

<sup>1</sup>В.Н. Гадалов, <sup>2</sup>А.Б. Коломенский, <sup>1</sup>И.В. Ворначева, <sup>1</sup>Е.А. Филатов, <sup>1</sup>И.А. Макарова  
 (<sup>1</sup>Юго-Западный государственный университет, Курск,  
<sup>2</sup>Воронежское акционерное самолетостроительное общество" (ПАО "ВАСО"))  
 E-mail: gadalov-vn@yandex.ru

## Исследование фазового состава, структуры и свойств композита быстрорежущая сталь с магнетронным покрытием

*Изучено воздействие расстояния катод — подложка на направление преимущественной кристаллографической ориентации, температурные условия формирования, стадии формирования, фазовый состав, свойства и структурообразования пленки TiN при вакуумном реакционном магнетронном осаждении титановой мишени в смеси газов аргона с азотом. Процесс магнетронного реакционного осаждения осуществлен на модернизированной установке ВУ-15. Показано, что термоактивация — один из основных факторов, влияющих на размер зерна слоев тонкопленочного покрытия.*

**Ключевые слова:** тонкопленочное покрытие, титан, подложка, упрочнение, быстрорежущая сталь, режущий инструмент.

*The effect of distance cathode — substrate forming on the temperature conditions, crystallographic direction of preferred orientation, phase composition, properties and structure formation step of forming TiN film during reactive of magnetron vacuum deposition of a titanium target in a mixture gas of argon and nitrogen are shown. Magnetron reactive deposition process performed on the upgraded installation VU-15. It is shown that the thermal activation — one of the main factors influencing the grain size of the thin film layer coating.*

**Keywords:** thin film coating, titanium, substrate, hardening, high-speed steel, cutting tools.

Создание конкурентоспособной продукции в области машиностроения связано с использованием новых материалов и прогрессивных техно-

логических процессов. В настоящее время предъявляются особые требования к прочностным характеристикам применяемых материалов и методам

их упрочняющей обработки, поскольку возникают повышенные требования к эффективности операций обработки, отвечающих целям производства. Как правило, эти задачи решаются путем разработки высокопроизводительных процессов, эффективность которых повышается в основном за счет применения новых типов инструментальных материалов, разнообразных по структуре и составу износостойких покрытий. Поэтому повышение долговечности и качества режущего инструмента путем нанесения тонкопленочных покрытий сегодня является актуальным.

Проблема улучшения свойств режущего инструмента при эксплуатации пар трения, определяющихся поверхностными свойствами применяемых материалов, решается нанесением защитных и упрочняющих ионно-плазменных тонкопленочных покрытий (пленок) [1–4]. В настоящее время неисследованными являются проблемы равномерности, точного воспроизведения и постоянства структуры, химического состава и свойств пленок, что обусловлено сложностью и многообразием явлений, происходящих в зоне транспортировки плазменного потока. Параметры формирующейся пленки (структура, размер зерна, состав, толщина, присутствие дефектов, адгезия к подложке) характеризуются многофакторным физическим процессом в зоне транспортировки плазменного потока, его сложной связью с плотностью ионного тока на подложке, составом плазменного заряда, напряжением смещения на подложке, энергией конденсирующихся частиц, расстоянием катод–подложка [5], параметрами подложки (материалом, подготовкой, температурой, теплофизическими свойствами материала), плазмохимическим синтезом соединений, скоростью формирования пленки, температурными условиями формирования пленки. Трудности при математическом моделировании физического процесса в зоне транспортировки плазменного потока обуславливают необходимость экспериментальных исследований тепловых и структурных процессов, протекающих в формируемой пленке.

Целью работы является повышение работоспособности и качества поверхности инструментальных материалов путем формирования износостойких поверхностных структур, а основными задачами — выявление факторов, обеспечивающих получение качественных легированных слоев с необходимыми триботехническими свойствами покрытий; установление влияния режимов напыления, элементов покрытия, состава электродных и покрываемых материалов на структуру, фазовый состав, свойства формируемых покрытий.

Магнетронное реакционное осаждение проводили на модернизированной установке ВУ-1Б, имеющей планарную несбалансированную магнетронную распылительную систему (ПНМРС), источник питания которой при стабилизации выходного напряжения работал в двух режимах: 450 и 800 В при разрядном токе до 2 А. Мишенью магнетронного источника являлся титановый диск ВТ1-00 диаметром 100 мм и толщиной 5 мм, при этом конфигурация магнитной ловушки на поверхности мишени формировалась электромагнитом.

Магнитное поле бокового полюсного наконечника подвергалось усилению относительно центрального полюса для создания несбалансированной конфигурации магнитного поля с протяженной зоной в области мишень–подложка на поверхности мишени [5, 6]. Особенность ПНМРС — наличие области с противоположным направлением магнитного поля на оси устройства, причем расстояние от мишени до осевой точки, где напряженность поля изменяется на противоположную, зависит от соотношения центрального и периферийного магнитных потоков. В связи с этим расстояние мишень–подложка  $L$  для большинства экспериментов выбрали так, чтобы коэффициент геометрической несбалансированности  $K_G = L/D$  равнялся 1,5 при диаметре средней линии зоны распыления  $D \approx 80$  мм; подложку из быстрорежущей стали закрепляли неподвижно на расстоянии 120 мм от мишени.

Формирование упрочняющего слоя-пленки нитридом титана проводили следующим образом. Образцы размещали в вакуумной камере модернизированной установки ВУ-1Б, далее осуществляли ее вакуумирование до давления  $p = 5,0 \cdot 10^{-2}$  Па с дальнейшим напуском аргона до  $p = 0,1 \dots 0,3$  Па. Затем проводили термоактивацию рабочих поверхностей подложек с помощью пучка электронов, эжектированных из плазмы несамостоятельного газового разряда, до температуры  $(420 \dots 480 \pm 20)$  °С. Параметры технологического процесса:

потенциал смещения  $V_{см}$  на инструменте — от 40 В;

плотность электронного тока —  $10^{-6}$  А/м<sup>2</sup>;

длительность термоактивации — 10...15 мин;

давление в камере установки — 0,51...1,1 Па.

Далее устанавливали потенциал на подложкодержателе  $V_{см} \approx -70 \dots -72$  В и напускали азот до  $p = 0,5 \dots 1,6$  Па; в смеси 90 % N<sub>2</sub> и 10 % Ar проводили нанесение покрытия [7].

Выявлено, что при высоких напряжениях разряда (750...800 В) кинетику осаждения покрытия определяет давление азота и она слабо зависима от давления аргона, а при низких напряжениях (430...450 В) определяющим является давление ар-

гона. Скорость осаждения составляет 0,2...0,3 нм/с, а общая толщина покрытия  $h = 2,0...4,4$  мкм.

Регулирование давления в камере и расхода газов осуществляли с помощью натекателей игольчатого типа и контролировали с помощью вакуумметра ВИТ-3. В качестве подложек использовали режущий инструмент (РИ) из стали Р6М5 и композит сталь Р6М5 после цианирования. Образцы подложек вырезали из прутков из стали Р6М5 в состоянии поставки, после чего вместе с РИ (фрезами, резцами и сверлами) подвергали обычной для этой стали закалке при температуре 1230 °С в масле с дальнейшим трехкратным отпуском при температуре 560 °С и охлаждением в печи. Длительность каждого отпуска составляла 1 ч (после термообработки твердость составляла 63...65 HRC).

Использование ПНМРС объясняется рядом положительных моментов:

полностью отсутствуют микрокапли (микрочастицы) в генерируемой плазме и, соответственно, в структуре покрытия;

синтез нанокompозитных структур возможен при относительно невысоких температурах (200...300 °С) в сравнении с методами дуговой катодно-ионной бомбардировки (более 500 °С) и химико-парового осаждения (500...600 °С);

хорошая возможность контроля и тонкой настройки параметров магнетронного разряда и, соответственно, достижения необходимой стехиометрии напыляемого соединения;

при относительно высокой скорости формирования покрытий достаточно высокая степень ионизации плазмы, которая обеспечивает необходимый уровень ионной бомбардировки в целях получения хорошей поверхностной мобильности осаждаемых атомов, что важно для проведения фазовой наносегрегации.

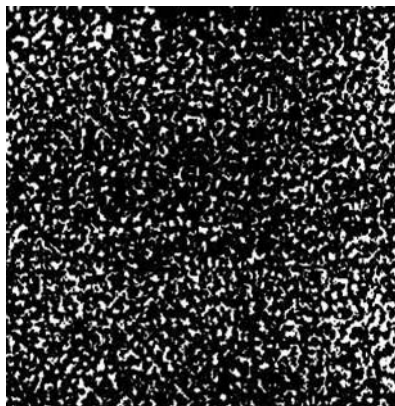


Рис. 1. Микроструктура композита сталь Р6М5 с покрытием TiN, полученным в среде 30 % N<sub>2</sub> и 70 % Ar (×600)

Установлено [7], что ионная бомбардировка может воздействовать на размер покрытия и кристаллографическую ориентацию зерен, повышать внутренние напряжения в покрытии и его плотность, влиять на возникновение точечных дефектов и уплотнение границ зерен. Низкоэнергетическая бомбардировка (с энергиями ионов  $E_{ion} = 10...100$  эВ) обеспечивает хорошую мобильность адсорбированных атомов и осуществляет контроль механизма роста покрытия. Одно из основных условий для осуществления фазовой наносегрегации осаждаемых атомов в процессе синтеза нанокompозитных (или наноструктурированных) покрытий — высокая степень ионной бомбардировки (отношение падающего потока ионов к потоку осаждаемых атомов приблизительно равно 10).

Были проведены комплексные исследования нанесенного покрытия. Шлифы для исследований готовили по стандартной методике, путем чередования паст ГОИ различной фракции (от 60/40 до 1/0 мкм), а также с помощью метода косого среза.

Для устранения имеющихся после шлифовки неровностей поверхности (без деформации материала) проводили механическое полирование на шлифовальном диске, обтянутом фетром, предварительно промытым и вымоченным в воде в течение 1—2 ч. Абразивный материал подавался к центру полировального круга в виде бедной водной суспензии, которую готовили следующим образом: 10 г оксида хрома отмачивали в большом количестве воды (на 1 л воды 1...2 г порошка), фракцию, осевшую в течение первого часа, отбрасывали.

Рентгеноструктурный фазовый анализ выполняли на дифрактометрах ДРОН-3М и УРС-60. Съемку дифрактограмм проводили с использованием медного, хромового, кобальтового и железного  $K_{\alpha}$ -излучения при напряжении 35 кВ. Расшифровку дифрактограмм проводили вручную с использованием стандартных методик [8]. Результаты рентгеноструктурного анализа хорошо соотносятся с данными металлографических исследований [9, 10]. Сплошной нитридный слой, имеющий толщину от 0,4 до 1,3 мкм, хорошо выявляется в микроструктуре поверхности образцов, азотированных в атмосфере 100 % N<sub>2</sub>, а также в смеси с аргоном с высоким содержанием азота (до 75 % N<sub>2</sub>). При азотировании в газовой смеси, содержащей менее 60...70 % азота, поверхностный нитридный слой не наблюдается (рис. 1). Результаты исследований показывают, что в условиях вакуумно-дугового разряда при использовании азотоаргоновых газовых сред с различным составом возможно получать азотированный слой с

практически любой структурой, необходимой для заданных условий эксплуатации инструмента.

Дифрактограммы в интервале углов Брэгга 25...80° показывают отражения (111), (220), (311) и (222) кубической фазы TiN; отражения (110), (101), (102) и (110) гексагональной фазы TiN<sub>0,3</sub> и одно отражение (111) тетрагональной фазы Ti<sub>2</sub>N.

Разупорядоченное тонкопленочное покрытие формируется при давлении газовой смеси 0,5 Па. Это покрытие имеет две фазы: кубическую TiN и TiN<sub>0,3</sub> — гексагональную с максимальной интенсивностью рефлекса (311) и (110) соответственно, а также дополнительную тетрагональную фазу Ti<sub>2</sub>N (111) с объемной долей 1,1 % и максимальным отклонением межплоскостного значения от табличного (рис. 2).

При давлении 0,9...1,0 Па формируется покрытие-пленка, которое состоит из следующих фаз: TiN, TiN<sub>0,3</sub> — гексагональной с максимальной интенсивностью рефлекса (110), кубической с преимущественной ориентацией (111) и тетрагональной Ti<sub>2</sub>N (объемная доля 0,4...0,5 % — (110)) с отклонением межплоскостного расстояния от табличного значения, многократным уменьшением элементов Mo<sub>2</sub>N (возможно, и W<sub>2</sub>N), α-фазы, которая является твердым раствором углерода и азота в Fe<sub>α</sub> (мартенсите), а также карбидов (карбонитридов) типа Fe<sub>3</sub>(W, Mo)<sub>3</sub>(C, N), избыточных в стали Р6М5. Съёмкой методом скользящего пучка показано, что на глубине до ~ 1 мкм образуется практически сплошной нитридный слой из ε-фазы.

Обнаружено, что при разбавлении азота инертным газом аргоном блокируется образование ε-фазы, а Mo<sub>2</sub>N и Fe<sub>3</sub>(W, Mo)<sub>3</sub>(C, N) сохраняются в поверхностном слое, но их количество уменьшается от ~ 7,5 % (на глубине до ~ 2 мкм) до 4,5 % (на глубине до ~ 7 мкм) [10] (таблица).

При увеличении давления до 1,5 Па и многократном снижении рефлексов кубической фазы (311) TiN и гексагональной фазы (110) TiN<sub>0,3</sub>, а также при усилении интенсивности рефлекса (111) кубической фазы TiN получается пленка, которую составляют основная кубическая фаза TiN с направлением преимущественной кристаллографической ориентации (111), дополнительная (объемная доля 0,8 %) гексагональная фаза TiN<sub>0,3</sub> с наибольшей интенсивностью рефлекса (101), с наибольшим отклонением межплоскостного расстояния от табличного значения и максимальной шириной пика кубической фазы (111) TiN, наименьшими соответствующими значениями у гексагональной фазы, разным направлением смещения положительных пиков (111) TiN и (101) TiN<sub>0,3</sub>, наибольшим увеличением микротвердости

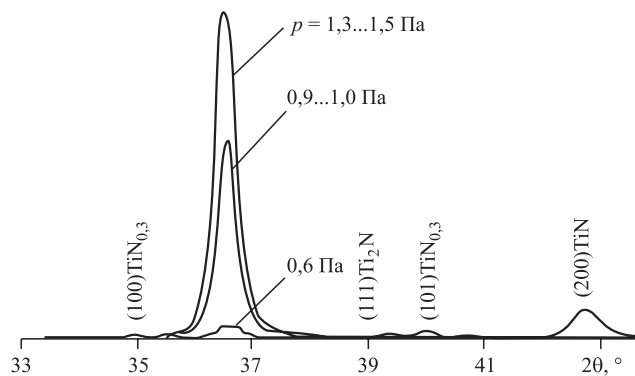


Рис. 2. Фрагмент дифрактограммы образцов покрытий TiN, нанесенных методом катодно-ионной бомбардировки при давлении газовой смеси  $p$ , равном 0,6; 0,9...1,0; 1,3...1,5 Па, интенсивности рефлекса (311) TiN и максимальных значениях суммарной интенсивности всех фаз и незначительных увеличениях микротвердости композиции

композиции. При этом отмечается усиление максимальной интенсивности рефлекса (111) кубической фазы TiN при многократном уменьшении интенсивности рефлекса (101) гексагональной фазы TiN<sub>0,3</sub>. Установлено, что максимальная микротвердость  $H_{\mu} = 26...27$  МПа пленки-покрытия TiN соответствует оптимальному режиму осаждения-напыления: давление газовой смеси 1,0 Па; температурный интервал 400...450 К; скорость нагрева пленки 3,7 °С/мин и содержание азота в газовой смеси 90 %; достижение температуры пленки 400 °С (через 10 мин осаждения). При дальнейшем увеличении температуры в формируемой пленке происходит фазовое превращение (311) TiN → (111) TiN, приводящее к появлению преимущественно

Фазовый состав поверхностного слоя нитридного покрытия на композите сталь Р6М5 в газовых средах с различным содержанием азота, % ат.

Фаза	Объемная доля в слое		
	80 % N <sub>2</sub> + 20 % Ar	100 % N <sub>2</sub>	
		Съемка в Cu K <sub>α</sub> -излучении скользящего пучка, α = 5°	Съемка в Co K <sub>α</sub> -излучении скользящего пучка, α = 5°
Fe <sub>2</sub> N	—	22,6	84
Mo <sub>2</sub> N	1,1	3,4	5,6
Fe <sub>α</sub> (CN)	95,5	70	4,1
Fe <sub>3</sub> (W, Mo) <sub>3</sub> CN	3,4	4,0	6,3



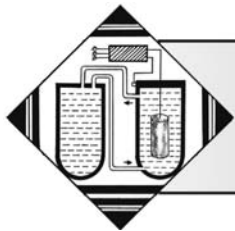
кристаллографической ориентации (111) поликристаллической составляющей пленки. Причина ухудшения механической характеристики пленок с увеличением давления газовой смеси выше 1,0 Па рентгendifракционным фазовым анализом участков пленок TiN не выявлена.

Методом атомно-силовой микроскопии на микроскопе AistNT SmartSPM после термоактивации образцов поверхности стали Р6М5 и напыления TiN обнаружено, что состояние (качество) поверхности — шероховатость, величина внутренних напряжений в поверхностном слое, термоактивация — является одним из основных факторов, который влияет на размеры зерна последующих слоев тонкопленочного покрытия. Развитость и правильность элементов структуры верхнего слоя тонкопленочного покрытия TiN со средним параметром шероховатости  $Ra = 3...5$  нм, в отличие от нитридных покрытий, формирующихся при помощи вакуумно-дугового разряда, характеризуется, по нашему мнению, размером лежащего ниже слоя.

В работе установлено, что покрытие TiN, нанесенное с помощью метода магнетронного распыления при использовании несбалансированного магнетрона постоянного тока, с параметром шероховатости  $Ra = 4...5$  нм повышает работоспособность деталей из стали Р6М5 в 1,5...1,7 раза в условиях непрерывного резания и до 3...5 раз при сверлении сталей марок 40 и 45 в сравнении с инструментом, не подвергавшимся упрочнению. Выявлено уменьшение схватываемости и длины участка контакта поверхности инструмента со стружкой, что предопределяет снижение сил резания и температуры поверхности инструмента в зоне контакта с обрабатываемой деталью и связано со снижением шероховатости поверхностного слоя и улучшением контактных свойств при уменьшении давления газов до 0,5 Па. Увеличение твердости и сглаживание покрытий при  $Ra$ , равном 16, 7 и 4 нм, характеризуется изменением потенциала смещения  $V_{см}$  от 0 до  $-80$  В. При оптимизированных условиях эксперимента на рентгенограммах присутствует высокий пик интенсивности при  $2\theta = 36,38^\circ$ , характеризующий кубическую фазу TiN (111), и отражен пик с низкой интенсивностью при  $2\theta = 42,51^\circ$ , ответственный за кубическую фазу TiN (200). Другие пики были отражены слабо, что говорит о поликристаллической природе покрытия при среднем размере кристалла 6...8 нм.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Применение** тонкопленочных покрытий для повышения стойкости режущего инструмента / В.Н. Гадалов, В.И. Шкодкин, Д.Н. Романенко и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 5. С. 22—25.
2. **Миронов М.М.** Упрочнение металлообрабатывающего инструмента с использованием плазменных нанотехнологий // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 11. С. 519—521.
3. **Влияние** термообработки на структуру и механические свойства сплава Ti—6Al—6V—2Sn / В.Н. Гадалов, А.В. Филонович, С.В. Ковалев и др. // Известия ЮЗГУ. Сер. Техника и технологии. 2016. № 3 (20). С. 37—42.
4. **Электроискровое** легирование поверхности сплавов на основе никеля и титана / В.Н. Гадалов, С.Г. Емельянов, Н.М. Игнатенко и др. // Известия ЮЗГУ. Сер. Техника и технологии. 2016. № 1 (18). С. 9—20.
5. **Свадковский И.В.** Ионно-плазменные методы формирования тонкопленочных покрытий / под ред. А.П. Достанко. Минск: Бестпринт, 2002. 242 с.
6. **Мельников С.Н., Кундас С.П., Свадковский И.В.** Моделирование и численные исследования параметров магнетронных распылительных систем // Докл. БГУИР. 2007. № 3 (19). С. 80—87.
7. **Верещака А.С., Дачева А.В., Анисеев А.И.** Повышение работоспособности режущего инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов путем комплексного применения наноструктурированного износостойкого покрытия и твердого сплава оптимального состава // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2010. № 1. С. 99—106.
8. **Курочкин А.В.** Технологические особенности многофункциональных наноструктурированных покрытий для режущего инструмента // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьёва. 2010. № 3. С. 166—172.
9. **Панькин Н.А., Смоланов Н.А.** Рентгенографическое исследование покрытий, полученных вблизи катода при ионно-плазменном осаждении нитрида титана // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 6. С. 102—105.
10. **Федоров С.В.** Комбинированная поверхностная ионно-плазменная обработка инструмента из быстрорежущей стали: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2004. 24 с.



М.С. Степанов, Ю.М. Домбровский, Л.В. Давидян  
(Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону)  
E-mail: stepanovms@yandex.ru

## Теплофизический анализ и кинетика микродугового нагрева стали

*Проведен теплофизический анализ и исследована кинетика нагрева стали пропусканием электрического тока в микродуговом режиме. Определены основные этапы микродугового нагрева. Выделен главный этап, характеризующийся концентрацией микродугов вокруг поверхности образца с образованием зоны локального газового разряда в виде микродугового ореола и протеканием процесса диффузионного насыщения углеродом и карбидообразующими элементами. Предложен механизм нагрева стали множественными микродуговыми источниками и выполнен теплофизический анализ этого процесса. Получено аналитическое выражение для распределения температуры цилиндрического образца по его сечению, а также зависимость температуры образца от продолжительности микродугового нагрева. Полученные зависимости необходимы для расчета энергетических режимов процесса микродуговой химико-термической обработки в зависимости от марки стали, площади поверхности обрабатываемого изделия, температуры и продолжительности процесса диффузионного насыщения.*

**Ключевые слова:** поверхностное упрочнение, микродуговая химико-термическая обработка, микродуговой нагрев стали.

*Investigated thermophysical analysis and kinetics of the heating of steel by passing electric current in microarc regime. Revealed the main stages of the microarc heating. Allocated the main stage with microarcs concentration around the sample surface and formation of zones of local discharge in the form of microarc aura and the flow of a process of diffusion saturation with carbon and carbides-formation elements. The proposed mechanism of the steel heating by multiple microarc sources and performed thermophysical analysis of this process. The studies obtained the analytical expression of the temperature of the cylindrical sample by its cross section and the dependence of sample temperature on the duration of the microarc heating. The dependences necessary for calculation of the energy modes of microarc thermochemical treatment process depending on the steel grade, the surface area of the workpiece, temperature and duration of the diffusion saturation.*

**Keywords:** surface hardening, microarc thermochemical treatment, microarc heating of steel.

### Введение

Поверхностное упрочнение стальных изделий с использованием химико-термической обработки (ХТО) широко применяется в современном производстве, однако известные процессы диффузионного насыщения характеризуются большой продолжительностью. В настоящее время предложен ряд методов интенсификации ХТО, основанных на применении электронагрева, одним из которых является микродуговая химико-термическая обработка (МДХТО). Стальное изделие погружается в электропроводный контейнер, заполняемый порошком каменного угля, и

нагревается пропусканием электрического тока. В результате пиролиза угля в контейнере образуется углеродсодержащая атмосфера, что позволяет осуществлять цементацию стали [1]. В случае предварительного нанесения на поверхность изделия обмазки, содержащей карбидообразующий элемент, формируется покрытие карбидного типа [2—5]. Особенность МДХТО заключается в том, что диффузионное насыщение стали протекает в условиях воздействия на ее поверхность микродуговых разрядов, возникающих на границе металла и окружающей порошковой среды, что позволяет значительно ускорить поверхностное насыщение [6, 7].

В ранее проведенных исследованиях не рассматривались тепловые и энергетические параметры процесса МДХТО, поэтому **целью работы** являлись анализ процесса нагрева стального изделия и расчетная оценка температуры стали в условиях микродугового нагрева.

### Методика проведения исследований

Исследование кинетики нагрева проводили на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 1.

Образец *1* из стали 20 цилиндрической формы диаметром 12 мм и длиной 35 мм погружали на глубину 15 мм в металлический цилиндрический контейнер *2* диаметром 36 мм, заполненный порошком *3* каменного угля (антрацита) А ГОСТ 25543—2013 с размером частиц 0,4...0,6 мм. Нижнюю часть контейнера изготавливали из огнеупорного изолятора *4*, имеющего в центре выемку, в которую помещали нижнюю часть образца для обеспечения его соосности с контейнером. В верхней части образец крепили винтом *5* к металлической державке *6*. Спай термопары типа ТПП (платина-платинородий) с диаметром провода 0,3 мм был зачеканен в поверхность образца, а свободные концы термопары через керамическую трубку *7* выводились наружу и подсоединялись к измерительной системе *8*, включающей цифровой мультиметр АРРА-305, с которого измерительная информация передавалась на персональный компьютер через интерфейс RS-232 и обрабатывалась с использованием программного обеспечения WinDMM 300. Образец подключали к положительному полюсу *9* источника питания, контейнер — к отрицательному полюсу *10*. Пита-

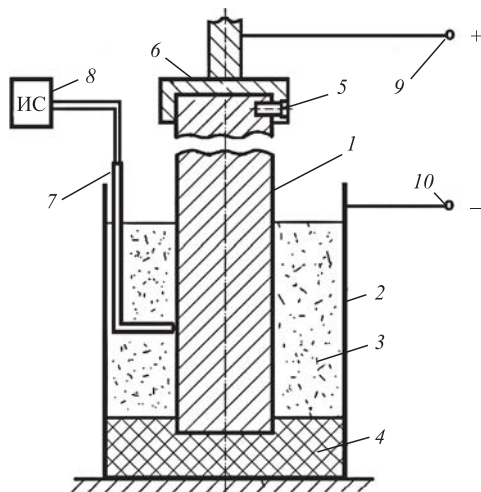


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования кинетики нагрева стального образца

ющее напряжение составляло 260 В, электрический ток в цепи был равен 3 А.

Для изучения процесса микродугообразования использовали фотоаппарат CANON 70D в режимах фотосъемки AUTO и Tv с приоритетной выдержкой 1/8000 с и режиме видеосъемки с частотой 50 кадров в секунду.

### Результаты исследований и их обсуждение

Результаты регистрации температуры образца представлены в виде графика на рис. 2. На кривой нагрева можно выделить три этапа, отличающихся механизмом влияния микродугового нагрева на температуру образца.

На начальном этапе температура сначала быстро возрастает до 200 °С со скоростью около 16 °С/с, а затем скорость нагрева снижается и нагрев в диапазоне температур 200...270 °С протекает со скоростью 3,5 °С/с. Снижение скорости нагрева объясняется тем, что в этом интервале температур в структуре каменного угля протекают эндотермические процессы, сопровождающиеся активацией макромолекул и термическим разрывом наименее прочных связей, при этом тепло расходуется на испарение воды и выделение оксида и диоксида углерода [8]. На этом этапе микродуговые разряды распределены в объеме угольного порошка равномерно (рис. 3). Электрическая энергия расходуется на нагрев порошка, однако увеличение плотности тока в направлении от контейнера к поверхности образца постепенно приводит к выделению значительной доли рассеиваемой электрической мощности в объемах порошка, прилегающих к образцу. В результате начинается концентрация микродуг вокруг поверхности образца. Пиролиз угля приводит к выделению оксида углерода, который воспламеняется при достижении температуры возгорания.

С этого момента начинается второй этап нагрева, соответствующий монотонному возрастанию

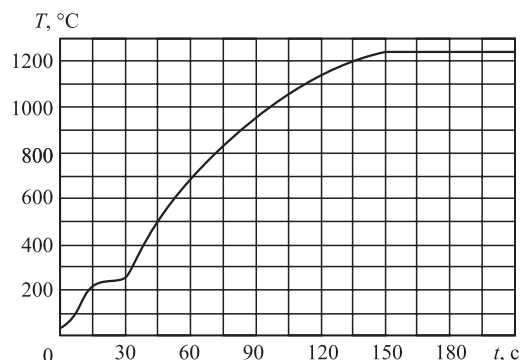


Рис. 2. Зависимость температуры *T* поверхности образца от продолжительности *t* микродугового нагрева

нию температуры образца. Микродуговые разряды сконцентрированы вокруг поверхности образца, образуя зону локального газового разряда в виде микродугового ореола (рис. 4). В результате образец нагревается со средней скоростью около



Рис. 3. Первый этап микродугового нагрева — фото-съемка в режиме AUTO



Рис. 4. Второй этап микродугового нагрева — фото-съемка в режиме AUTO



Рис. 5. Третий этап микродугового нагрева — фото-съемка в режиме AUTO

9 °С/с. Далее скорость нагрева начинает медленно уменьшаться из-за снижения интенсивности микродуг на поверхности образца в связи с постепенным выгоранием угольных частиц вокруг образца, которое в некоторой степени компенсируется теплом за счет горения угольного порошка.

На третьем этапе образование микродуговых разрядов вокруг образца прекращается, однако в остальном объеме угольного порошка микродугообразование и горение угольных частиц продолжают (рис. 5), а температура образца стабилизируется на уровне 1250 °С (по крайней мере до полного выгорания угольного порошка в контейнере).

Очевидно, что второй этап нагрева является главным, поскольку именно он характеризуется микродугообразованием на поверхности образца, достижением температуры интенсивного диффузионного насыщения стали углеродом и карбидообразующими элементами.

При рассмотрении тепловых процессов на втором этапе нагрева целесообразно использовать метод источников [9]. Для этого вводится понятие мгновенного точечного источника, который вносит в бесконечно малый объем нагреваемого тела за малый промежуток времени некоторое количество теплоты. Дальнейшее распространение теплоты по телу описывается дифференциальным уравнением теплопроводности [9]. Пользуясь принципом наложения, все многообразие источников теплоты можно описать комбинацией мгновенных точечных источников.

В процессе МДХТО понятие мгновенного точечного источника является не абстрактным, а отражающим реальную физическую картину процесса. Нагрев поверхности металла происходит в результате воздействия множественных микродуговых разрядов, что позволяет рассматривать каждую микродугу как мгновенный точечный источник.

Для описания процесса МДХТО предлагается следующая модель. Порошковая среда состоит из совокупности угольных частиц, представляющих собой шары диаметром  $d$ , при этом заполнение контейнера частицами соответствует простой кубической решетке, в которой каждая частица контактирует с шестью соседними. Причиной нагрева образца является микродугообразование, возникающее в местах контакта его поверхности с прилегающим первым слоем угольных частиц.

Распределение температуры на поверхности полубесконечного тела при действии мгновенного точечного источника имеет вид [9]

$$T(r, t) = \frac{2Q_0}{\rho c (4\pi at)^{3/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right), \quad (1)$$

где  $Q_0$  — количество теплоты, внесенной в тело источником;  $r$  — расстояние от источника тепла до точки с координатами  $x, y, z$ ;  $\rho$  — плотность;  $c$  — удельная теплоемкость;  $a$  — температуропроводность;  $t$  — время, прошедшее с момента теплового импульса.

$Q_0$  можно определить по формуле для количества теплоты, введенной в металл мгновенным дуговым источником [8],

$$Q_0 = \eta UI_0 t_0, \quad (2)$$

где  $\eta$  — эффективный к.п.д. процесса нагрева;  $U$  — питающее напряжение;  $I_0$  — ток микродугои;  $t_0$  — продолжительность импульса.

Тогда получим

$$T(r, t) = \frac{2\eta UI_0 t_0}{\rho c (4\pi a t)^{3/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right). \quad (3)$$

Для расчетов с использованием выражения (3) необходимо знать значения параметров  $\eta$ ,  $I_0$  и  $t_0$ .

Значение  $\eta$  приняли равным 0,95, учитывая, что микродугои возникают непосредственно между поверхностью образца и пограничным слоем частиц угля и окружены слоем горящего угольного порошка, что компенсирует потери энергии во внешнюю среду за счет излучения.

Продолжительность микродугового импульса  $t_0$  определили по данным работы [10], приняв  $t_0 = 10^{-4}$  с.

Значение  $I_0$  можно определить как

$$I_0 = I/n, \quad (4)$$

где  $I$  — ток в цепи;  $n$  — число микродуг, одновременно воздействующих на поверхность образца.

Для оценки значения  $n$  использовали фотосъемку процесса МДХТО с выдержкой 1/8000 с, соизмеримой с длительностью микродуговых импульсов, что исключало повторный подсчет микродуг

от одной частицы за время выдержки. На полученной серии фотографий суммировали число микродуг в верхнем слое угольных частиц, прилегающих к поверхности образца. Всего проанализировали 200 кадров. Общее число микродуг оказалось равным 155, при этом на некоторых кадрах микродугои не обнаруживались (рис. 6), так как визуальному восприятию доступны только микродугои, образующиеся в верхнем слое порошка.

Искомое значение  $n$  получено умножением среднего числа микродуг в верхнем слое на общее число слоев порошка в контейнере, равное отношению  $h/d$ :

$$n = \frac{155 h}{200 d},$$

где  $h$  — глубина погружения образца в угольный порошок,  $h = 15$  мм;  $d$  — средний размер угольных частиц,  $d = 0,5$  мм.

Расчетное значение  $n$  равно 23, откуда из формул (2) и (4) с учетом значений  $U = 260$  В и тока в цепи  $I = 3$  А получаем  $I_0 = 0,13$  А;  $Q_0 = 3,211 \cdot 10^{-3}$  Дж.

С помощью выражения (3) рассчитали распределение температуры от мгновенного точечного источника на поверхности образца из стали 20 (рис. 7). В расчетах использовали следующие значения:  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>;  $c = 569$  Дж/(кг·°С),  $\lambda = 27$  Вт/(м·°С),  $t = 120$  с.

Совместное действие микродуг от точечных источников на поверхности нагреваемого тела может быть представлено в виде суммарной мощности теплового потока  $P$ , действующего на площадь  $S$  нагреваемой поверхности. Это позволяет при расчете использовать граничные условия второго рода.

Плотность теплового потока

$$q = P/S. \quad (5)$$

Для определения величины  $P$  необходимо знать общее число микродуговых разрядов, воздейству-



Рис. 6. Второй этап микродугового нагрева — фотосъемка в режиме Tv с приоритетной выдержкой 1/8000 с

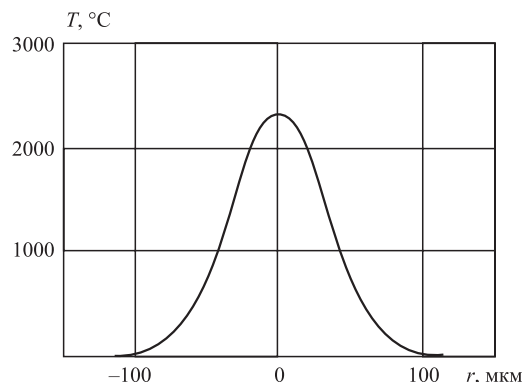


Рис. 7. Распределение температуры по поверхности образца при распространении теплоты от мгновенного точечного источника в полубесконечном теле



ющих на поверхность образца в единицу времени. В этих целях применяли видеосъемку процесса МДХТО с частотой 50 кадров в секунду (рис. 8). В связи с тем, что выдержка одного кадра (0,02 с) многократно превышала время "жизни" микродугообразования за время выдержки. В режиме покадрового воспроизведения видеозаписи подсчитывали число микродуг в слое угольных частиц, прилегающем к поверхности образца. Всего было проанализировано 500 кадров. Среднее число микродуг в верхнем слое угольного порошка вокруг образца оказалось равным 15.

С учетом частоты кадров съемки это означает, что в верхнем слое частиц за 1 с на образец воздействуют  $15 \cdot 50 = 750$  микродуговых разрядов, а на всю его поверхность с учетом глубины погружения образца и числа слоев порошка —  $750h/d = 22\,500$  микродуговых разрядов. За 1 с они передают образцу количество теплоты, равное  $22\,500Q_0 = 72,25$  Дж, что соответствует мощности теплового потока  $P = 72,25$  Вт. Учитывая, что  $S = 2\pi Rh$ , где  $R$  — радиус образца, с помощью выражения (5) получаем  $q = 12,78 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>.

Если принять, что в начальный момент времени температура цилиндрического образца в его объеме одинакова и равна  $T_0$ , то распределение температуры по его сечению в процессе нагрева описывается известным [9] решением дифференциального уравнения теплопроводности с учетом принятых начальных и граничных условий:

$$T(r, t) = 2T_0 + \frac{qR}{\lambda} \left[ 2 \frac{at}{R^2} - \frac{1}{4} \left( 1 - 2 \frac{r^2}{R^2} \right) \right]. \quad (6)$$

С помощью выражения (6) выполнили расчеты температуры образца, используя следующие



Рис. 8. Второй этап микродугового нагрева — снимок получен в режиме видеосъемки с частотой 50 кадров в секунду

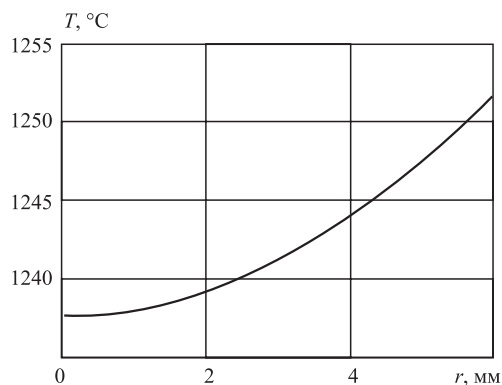


Рис. 9. Распределение температуры по сечению цилиндрического образца

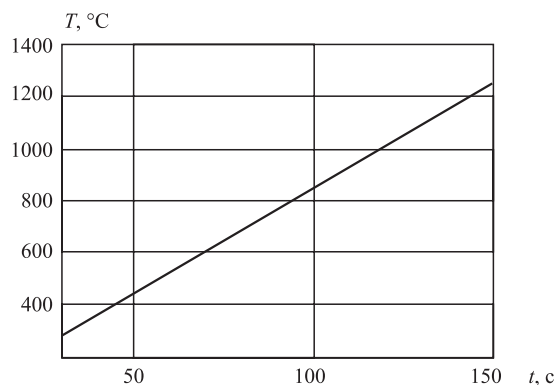


Рис. 10. Изменение температуры поверхности образца во времени

исходные данные:  $T_0 = 270$  °C;  $R = 0,006$  м;  $d = 5 \cdot 10^{-4}$  м;  $\lambda = 27$  Вт/(м·°C);  $t = 120$  с.

Распределение температуры по сечению образца на этапе микродугового нагрева представлено на рис. 9. Видно, что разность температур на оси и поверхности образца не превышает 15 °C.

Зависимость температуры поверхности образца от времени, рассчитанная с помощью выражения (6) в диапазоне значений  $t$  от 30 до 150 с, представлена на рис. 10. Из рис. 10 следует, что на втором этапе микродугового нагрева температура возрастает линейно. Скорость нагрева составляет 8,2 °C/с, а температура достигает около 1250 °C, что практически совпадает с полученными экспериментальными значениями и свидетельствует о правильности выполненных расчетов.

### Выводы

1. Исследована кинетика нагрева стального образца в процессе МДХТО и определены основные этапы микродугового нагрева.

2. Предложен механизм нагрева стали множественными микродуговыми источниками и осуществлен теплофизический анализ этого процес-

са, результаты которого практически совпали с полученными экспериментально данными.

3. Получены аналитические выражения для расчета энергетических режимов процесса МДХТО в зависимости от марки стали, площади поверхности обрабатываемого изделия, температуры и продолжительности процесса диффузионного насыщения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Степанов М.С., Домбровский Ю.М., Пустовойт В.Н. Диффузионное насыщение углеродистой стали в режиме микродугового нагрева // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2017. № 1 (739). С. 54–57.

2. Степанов М.С., Домбровский Ю.М. Формирование карбидного покрытия при микродуговом хромировании стали // *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2015. № 1 (121). С. 35–38.

3. Степанов М.С., Домбровский Ю.М. Формирование карбидного покрытия при микродуговом молибденировании стали // *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2015. № 10 (130). С. 34–38.

4. Домбровский Ю.М., Степанов М.С. Формирование покрытия карбидного типа при микродуговом ванадировании стали // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 4. С. 262–267.

5. Степанов М.С., Домбровский Ю.М., Пустовойт В.Н. Микродуговое диффузионное насыщение стали углеродом и карбидообразующими элементами // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2017. № 5 (743). С. 45–49.

6. Степанов М.С., Домбровский Ю.М., Корнилов Ю.А. Причины ускорения диффузии при микродуговой цементации // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2016. № 8 (140). С. 34–38.

7. Степанов М.С., Домбровский Ю.М. Механизм ускорения диффузионных процессов при микродуговом нагреве стали // *Физика и химия обработки материалов*. 2017. № 1. С. 5–11.

8. Глущенко И.М. Теоретические основы технологии горючих ископаемых. М.: Металлургия, 1990. 296 с.

9. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 600 с.

10. Микродуговое оксидирование (обзор) / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин и др. М., МАТИ, 2001. 38 с.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

Степанов М.Н., Зинин А.В.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

М.: Инновационное машиностроение, 2016. 392 с.

Цена 1000 руб.

Монография содержит систематическое изложение существующих расчетных методов оценки характеристик сопротивления усталости традиционных конструкционных и новых композитных материалов на основе полимерной матрицы, а также методов расчета выносливости типовых элементов высоконагруженных конструкций.

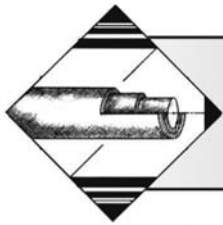
Методология расчетных методов определения характеристик выносливости основана на использовании статистических данных о характеристиках механических свойств материалов при кратковременном нагружении и экспериментально обоснованных моделей учета влияния различных факторов на несущую способность конструкций при циклическом нагружении. Показано, что применение предлагаемых расчетных методов обеспечивает достаточно высокую точность оценки характеристик сопротивления усталости, не уступающую показателям точности экспериментальных исследований. Особое внимание уделено вопросу возможности оценки характеристик усталости полимерных композитных материалов в зависимости от их структурных параметров и особенностей механического поведения и механизмов усталостного разрушения.

Для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий, конструкторских и технологических бюро, лабораторий механических испытаний, научных сотрудников, аспирантов и студентов механических специальностей.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2; по e-mail: realiz@mashin.ru.  
Дополнительная информация по телефону: (495) 785-60-69 и на сайте www.mashin.ru





# ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

УДК 621.9 + 621.791.92

**Г.В. Санамян, Н.И. Бойко**

(Ростовский государственный университет путей сообщения),

**В.А. Лебедев**

(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)

E-mail: va.lebidev@yandex.ru

## Оценка силовых и стойкостных показателей термофрезерования наплавленного металла

*Раскрыта сущность одного из эффективных методов восстановления деталей — термофрезерования, обеспечивающего уменьшение усилий резания и, как следствие, повышение стойкости режущего инструмента. Предложены расчетные зависимости для оценки силы резания и стойкости фрезы при термофрезеровании наплавленного металла.*

**Ключевые слова:** восстановление деталей, наплавка, термофрезерование, сила резания, стойкость инструмента.

*The article reveals the essence of one of the effective methods of restoring details — thermomilling, which reduces cutting forces and, as a consequence, increases the resistance of the cutting tool. Calculated dependences are proposed for estimating the cutting force and the resistance of the milling cutter during thermal milling of the weld metal.*

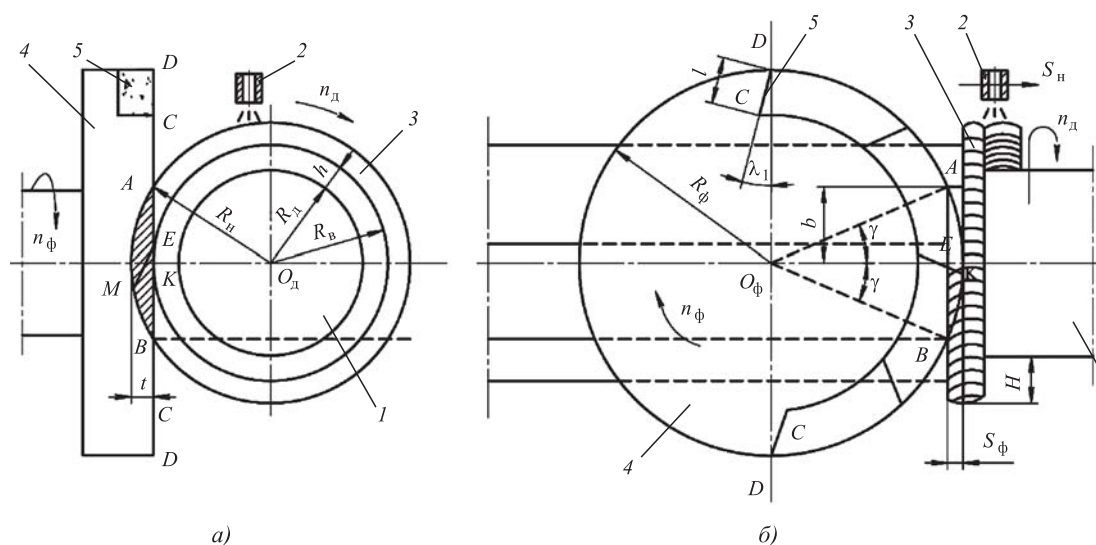
**Keywords:** restoration of parts, surfacing, thermomilling, cutting force, tool life.

### Введение

Главная задача ремонтного производства — экономически эффективное восстановление работоспособности машин. Одним из направлений решения этой задачи является восстановление изношенных деталей. Обусловлено это тем, что большинство деталей, поступающих в ремонт, выбраковываются вследствие износа рабочих поверхностей, хотя более 60 % из них имеют значительный остаточный ресурс по прочности и могут быть использованы повторно после восстановления изношенных поверхностей.

Анализ современной научно-технической литературы показывает, что обоснованный процесс восстановления наплавкой изношенных поверхностей деталей в системе вторичного производства является природоохранным, ресурсосберегающим и обеспечивает получение деталей со свойствами, близкими к свойствам новых деталей или превосходящими их. Нарботка таких деталей соответствует, а в ряде случаев превосходит норма-

тивную наработку новых деталей. Следует, однако, отметить, что механическая обработка таких поверхностей связана со значительными трудностями, обусловленными спецификой свойств наплавленного металла и геометрией его поверхности. Наплавленный металл в отличие от материала, используемого при изготовлении деталей, имеет неравномерную поверхностную твердость и неоднородную структуру, зоны различного термического влияния, характеризуется значительными внутренними напряжениями и широким спектром дефектов. Наличие впадин и выступов в местах перекрытия наплавленных валиков, достаточно большой дефектный слой требуют большого припуска на механическую обработку. В связи с этим при обработке наплавленных материалов возникают значительные силы резания и вибрации, что приводит к снижению качества обработанной поверхности, интенсивному износу и хрупкому разрушению режущего инструмента. В итоге вследствие занижения режимов резания падает производительность обработки и возрас-



**Рис. 1. Схема процесса наплавки и обработки торцевой фрезой наплавленного металла:**  
*а* — вид с торца детали; *б* — вид с торца фрезы

тает ее себестоимость. Из-за применения такой технологии технико-экономические показатели механической обработки наплавленного металла значительно ниже показателей процесса механической обработки конструкционных материалов, из которых выполнены восстанавливаемые детали.

### Сущность термофрезерования

Опыт показывает, что радикальным методом повышения эффективности обработки наплавленного металла является его обработка в горячем состоянии. При этом наибольший эффект достигается в результате совмещения в одной технологической операции процессов электродуговой наплавки компенсирующего слоя и его фрезерования торцевой фрезой. Схема процесса наплавки и обработки торцевой фрезой наплавленного металла представлена на рис. 1.

Фрезерование наплавленного слоя цилиндрической детали *1* осуществляется торцевой фрезой *4*, оси  $O_d$  и  $O_\phi$  которых взаимно перпендикулярны. Частота вращения фрезы  $n_\phi$  значительно превосходит частоту вращения детали  $n_d$ . Фреза совместно с наплавочным автоматом *2* перемещается вдоль оси детали. Подача фрезы  $S_\phi$  равна шагу наплавки  $S_n$ . На деталь радиусом  $R_d$  наплавляется валик *3* высотой  $H$  в виде узкой винтовой полосы, форма поперечного сечения которой приближается к круговому сегменту. Геометрия формирующегося поверхностного слоя металла при наложении отдельных валиков представляет собой винтовую поверхность с шагом выступов, равным подаче наплавки, имеющую в поперечном сечении фор-

му кругового сегмента. Радиус детали при этом увеличивается до  $R_n$ . Одновременно горячий слой металла обрабатывается торцевой фрезой радиусом  $R_\phi$  с числом зубьев  $z$ , оснащенных твердосплавными пластинами *5*. Вспомогательные режущие кромки твердосплавных пластин *5* фрезы устанавливают перед наплавкой на расстоянии  $h$  от восстанавливаемой поверхности детали. Глубина резания  $t = H - h$ .

В работах [1–3], посвященных исследованию процесса термофрезерования, показано, что высота рельефа поверхности в диапазоне наиболее часто используемых режимов наплавки цилиндрических деталей диаметром 50...120 мм (сила тока 190...230 А, напряжение 22...25 В, скорость подачи наплавочной проволоки 1,5...2,5 м/мин, частота вращения детали 2...3 мин<sup>-1</sup>, подача 3,5...4,5 мм на оборот детали) лежит в пределах 0,5...0,9 мм и в зависимости от диаметра наплавочной проволоки и толщины наплавленного слоя может быть принята в соответствии с данными табл. 1. На рис. 2 показана поверхность детали после наплавки.

Таблица 1

**Высота рельефа наплавленного металла**

Диаметр электродной проволоки, мм	Толщина наплавленного слоя, мм	Высота выступов наплавленного металла, мм
1,2	1,6	0,5
1,6	2,0	0,6
1,8	2,5	0,8
2,0	3,5	0,9

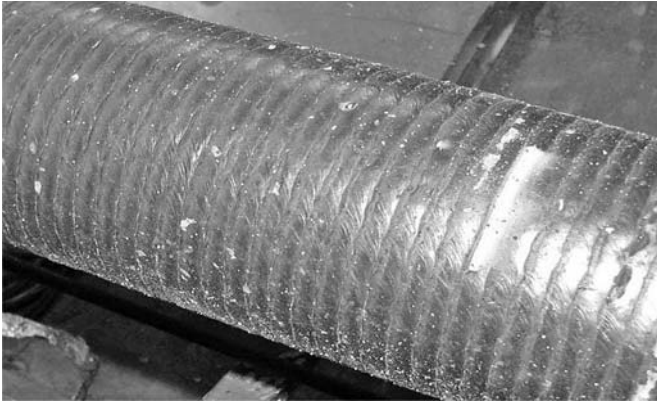


Рис. 2. Поверхность детали после наплавки

Отличительной особенностью указанного процесса является нагрев детали сварочной дугой. Результаты исследований, представленных в работах [4, 5], свидетельствуют, что установившаяся температура материала детали при наиболее часто используемых режимах наплавки лежит в пределах 770...830 °С.

Такая технология обработки наплавленного металла требует меньших усилий резания, в результате чего существенно повышается стойкость режущего инструмента, улучшаются параметры качества поверхностного слоя деталей, возрастают технико-экономические показатели восстановления деталей. Однако отсутствие расчетных зависимостей, описывающих связь силы резания и стойкости фрезы с режимами обработки, затрудняет разработку оптимальных технологических процессов восстановления изношенных деталей.

### Оценка силы резания при термофрезеровании

Для установления расчетной модели для оценки усилия терморезания в качестве базового принято уравнение

$$P_z = KF_{\max}\sigma_B(T_H), \quad (1)$$

где  $K$  — корректировочный коэффициент;  $F_{\max}$  — максимальная площадь сечения снимаемой стружки, мм<sup>2</sup>;  $\sigma_B(T_H)$  — предел прочности металла при заданной температуре  $T_H$ , МПа.

Для определения величины  $\sigma_B(T_H)$  предложено эмпирическое выражение

$$\sigma_B = \kappa_B \exp[1,6968C - (0,005008C^3 - 0,008563C^2 + 0,005124C + 0,0025)T_H],$$

где  $\kappa_B$  — корректировочный коэффициент, МПа;  $C$  — содержание углерода в наплавленном металле, %;  $T_H$  — температура наплавленного металла, °С.

На основании моделирования процесса фрезерования получена следующая зависимость для определения максимальной площади сечения снимаемой стружки при фрезеровании наплавленного металла:

$$F_{\max} = \frac{\pi(B_1^2 + H_B^2)^2}{720H_B^2} \times \arcsin\left(\frac{16\sqrt{a_{\max}H_B(B_1^2 + H_B^2 - H_B a_{\max})}}{B_1^2 + H_B^2}\right) - \frac{4(B_1^2 + H_B^2 - 2H_B a_{\max})}{H_B^2} \times \sqrt{a_{\max}H_B(B_1^2 + H_B^2 - H_B a_{\max})}, \quad (2)$$

где  $B_1$  — половина ширины выступа наплавленного валика, мм;  $H_B$  — высота наплавленных валиков, мм;  $a_{\max}$  — максимальная толщина срезаемой стружки, мм.

Максимальная толщина срезаемой стружки определяется с помощью зависимости

$$a_{\max} = \left[ \sqrt{(2R_H - t)t} - (R_H - t) \operatorname{tg} \frac{\pi n_d}{zn_\phi} \right] \sin \frac{2\pi n_d}{zn_\phi},$$

где  $R_H$  — радиус наплавленной детали, мм;  $t$  — глубина резания, мм;  $n_d$  — частота вращения детали, мин<sup>-1</sup>;  $n_\phi$  — частота вращения фрезы, мин<sup>-1</sup>;  $z$  — число зубьев фрезы.

Учитывая сложности, связанные с теоретическими исследованиями по установлению значений коэффициента  $K$ , входящего в уравнение для расчета силы резания, его значения определяли путем сопоставления расчетных значений сил резания с экспериментальными. Эксперименты выполняли с использованием наплавочных проволок марок СВ-08А, СВ-08Г2С, НП-30ХГСА, пружинной проволоки 2-го класса. В качестве флюсов применяли флюс АН-348А и этот же флюс с легирующими добавками. Наплавку и механическую обработку наплавленного металла осуществляли в широком диапазоне режимов наплавки и фрезерования. Силы резания замеряли с помощью тензометрических датчиков сопротивления, наклеенных на державку фрезы. Сигналы от датчиков усиливали и регистрировали осциллографом. При выборе наплавочных материалов для экспериментальных исследований, режимов наплавки и механической обработки преследовалась цель проверки универсальности полученных зависимостей и возможности практического применения результатов исследований.

Математическая обработка полученных результатов показала, что значения коэффициента  $K$  могут быть рассчитаны по формуле

$$K(t) = 491,67e^{-0,318t}. \quad (3)$$

С учетом формул (2), (3) уравнение (1) преобразуется к виду

$$P_z = 491,67e^{-0,318t} \left[ \frac{\pi(B_1^2 + H_B^2)}{720H_B^2} \times \arcsin \left( \frac{16\sqrt{a_{\max}H_B(B_1^2 + H_B^2 - H_B a_{\max})}}{B_1^2 + H_B^2} \right) - \frac{4(B_1^2 + H_B^2 - 2H_B a_{\max})}{H_B^2} \times \sqrt{a_{\max}H_B(B_1^2 + H_B^2 - H_B a_{\max})} \right] \sigma_B. \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет прогнозировать необходимую силу резания при обработке горячего наплавленного металла с достаточной для практики точностью. Расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 10 %.

### Оценка стойкости фрезы при термофрезеровании

Наплавку и фрезерование наплавленного металла выполняли на установке, содержащей токарно-винторезный станок модели 16К20, сварочный преобразователь и универсальную наплавочную головку ГМВК-2У, суппорты наплавочной и фрезерной головок. Фрезерование осуществляли универсальной торцевой фрезой с механическим креплением пластин и регулируемыми геометрическими параметрами режущей части. В качестве режущей части фрезы применяли стандартные пятигранные твердосплавные пластины ВК4, Т15К6 и Т14К8.

Наплавленный металл обрабатывали в горячем и холодном состояниях. Износ зубьев фрезы определяли с помощью универсального измерительного микроскопа УИМ-21 и фотографировали при помощи бинокулярного стереоскопического микроскопа МБФ-1. Исследовали износ пластин по передней и задней поверхностям.

Проведенные исследования показали, что при фрезеровании наплавленного металла в холодном состоянии зубья фрезы выходят из строя через 5...20 мин из-за многочисленных сколов на режущей кромке (рис. 3). При фрезеровании нагретого в процессе наплавки металла у всех режущих

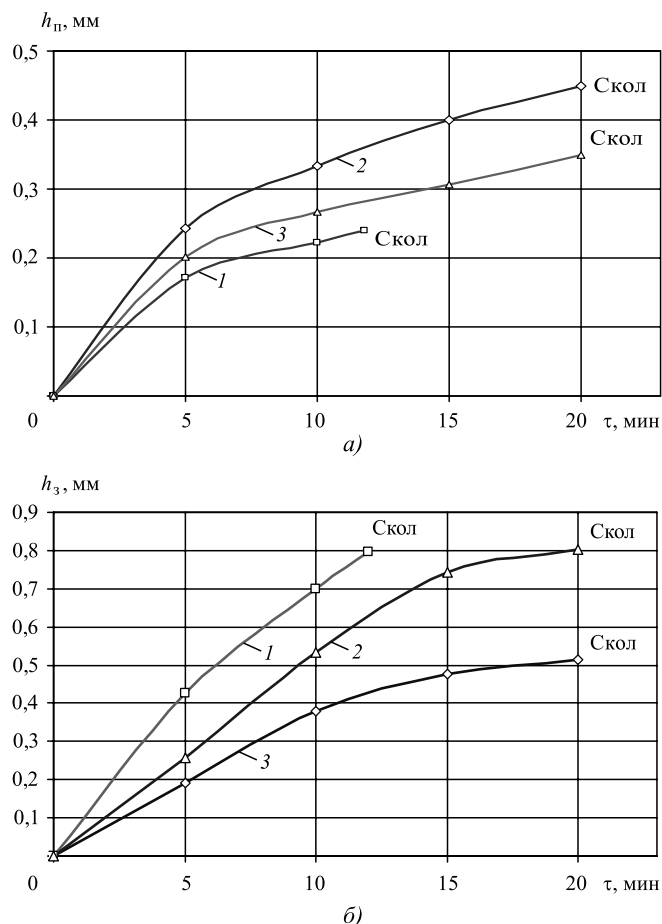


Рис. 3. Зависимости износов по передней  $h_n$  (а) и задней  $h_z$  (б) поверхностям зубьев фрезы от времени резания  $\tau$  при обработке наплавленного металла в холодном состоянии на глубину 0,8 мм:

1 — пластина Т15К6; 2 — Т14К8; 3 — ВК4

пластин фрезы наблюдается равномерный относящийся к категории истирания износ по длине как передней, так и задней поверхности режущих кромок (рис. 4, 5).

Как следует из представленных на рис. 3, 4 зависимостей, износ по задней поверхности является преобладающим, так как превосходит износ по передней поверхности в 1,4...2 раза. Лучшая износостойкость среди использованных стандартных пластин отмечается у твердосплавных пятигранных пластин из Т15К6, стойкость которых по критерию затупления 0,5 мм превышает 200 мин. Наблюдаемая закономерность повышения стойкости фрез при обработке горячего наплавленного металла в процессе его нанесения объясняется изменением физико-механических свойств обрабатываемого металла, снижением его прочностных характеристик.

Методом математического планирования эксперимента с учетом критерия затупления зубьев

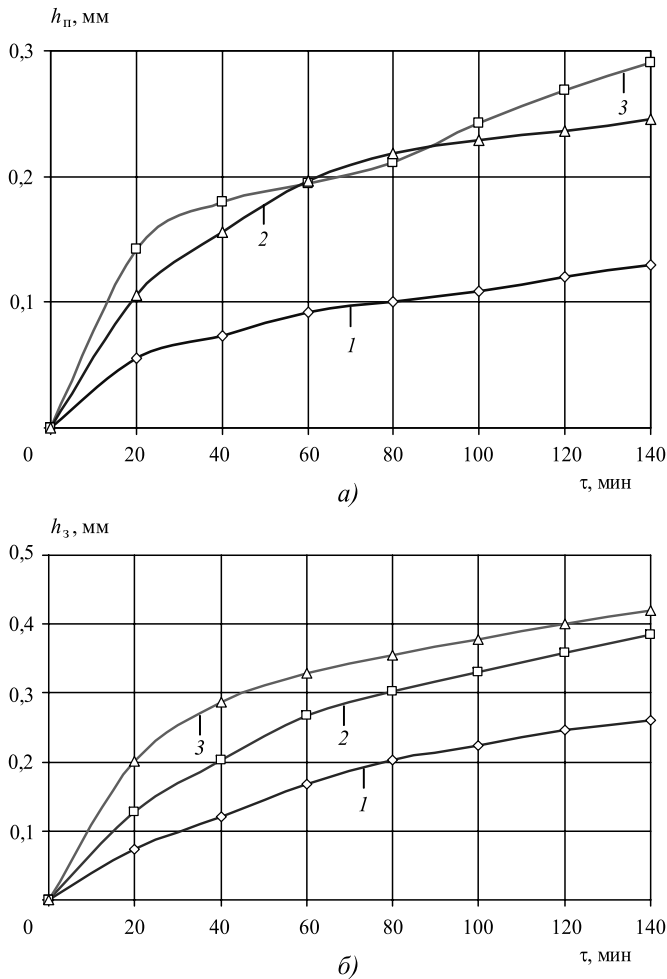


Рис. 4. Зависимости износов по передней  $h_2$  (а) и задней  $h_3$  (б) поверхностям зубьев фрезы от времени резания  $\tau$  при обработке наплавленного металла в горячем состоянии на глубину 0,8 мм:  
 1 — пластина Т15К6; 2 — Т14К8; 3 — ВК4

фрезы, равного 0,5 мм, получена эмпирическая формула зависимости стойкости фрезы  $T$  от режимов обработки горячего наплавленного металла

$$T = \frac{136\ 626}{V^{1,411} S_z^{0,404} t^{1,058}}, \quad (5)$$

где  $S_z$  — подача на зуб, мм;  $V$  — скорость резания, м/мин;  $t$  — глубина резания, мм.

Пределы варьируемых параметров режима фрезерования представлены в табл. 2.

Из зависимостей стойкости фрезы от режимов обработки, представленных на рис. 6, 7, следует, что наибольшее влияние на стойкость фрезы при обработке горячего наплавленного металла оказывает глубина резания  $t$ , затем скорость резания  $V$  и меньшее влияние оказывает подача на зуб фрезы  $S_z$ .

Представленные результаты исследований износа режущих пластин торцевых фрез в процессе

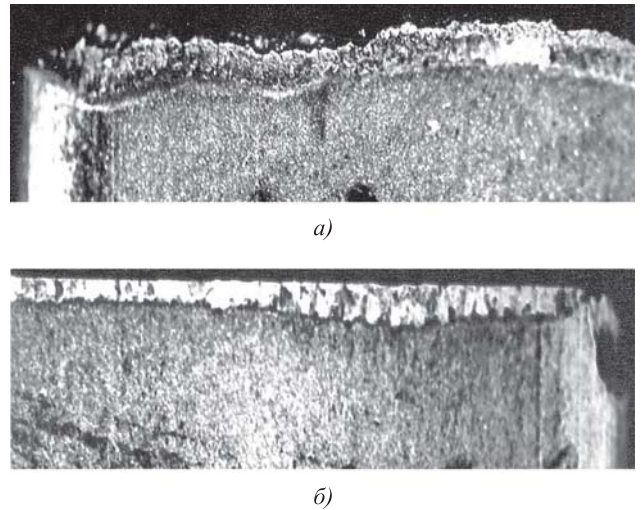


Рис. 5. Износ зубьев фрезы, оснащенной пластинами Т14К8, по задней поверхности реза после обработки на глубину 0,8 мм в течение 15 мин холодного (а) и в течение 90 мин горячего (б) наплавленного металла

Таблица 2

Пределы варьируемых параметров режима фрезерования  $V, S_z, t$

Уровень факторов	$V$ , м/мин	$S_z$ , мм	$t$ , мм
Верхний (+)	283,3	0,1869	1,5
Нижний (-)	157,6	0,0779	0,5

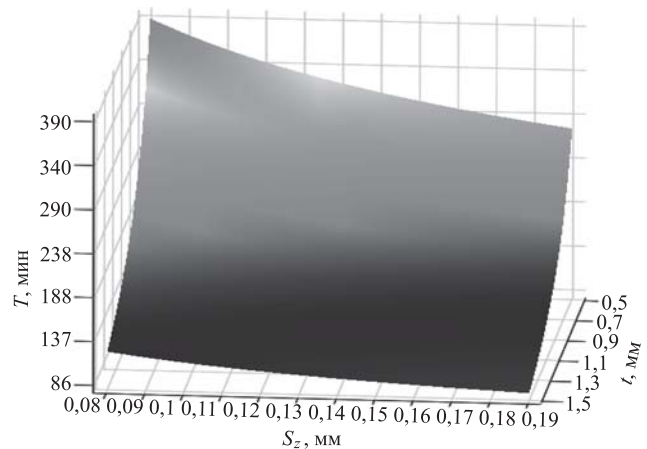


Рис. 6. Зависимость стойкости фрезы от подачи на зуб и глубины резания

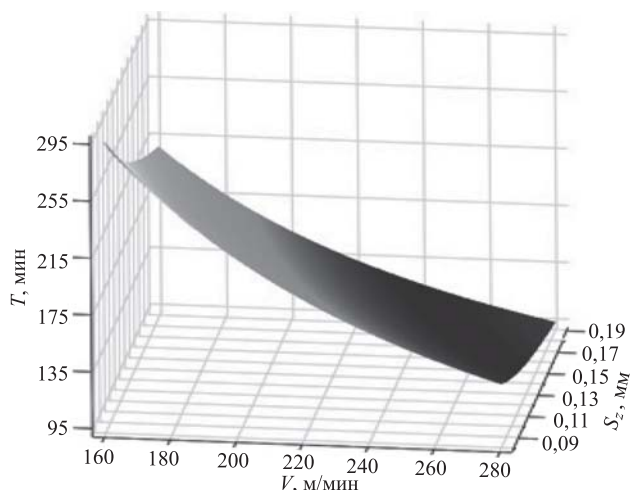
обработки горячего наплавленного металла при совмещении в единой технологической операции процессов наплавки и фрезерования показали, что стойкость фрезы при резании горячего наплавленного металла на порядок и более выше стойкости фрезы при обработке наплавленного металла в холодном состоянии, при этом основным видом износа зубьев фрезы, который может

### Заключение

Установленные в результате исследований зависимости могут быть положены в основу методики автоматизированного выбора рациональных режимов обработки и характеристик режущего инструмента при термофрезеровании наплавленного металла, обеспечивающих минимальную энергоёмкость процесса.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Безбородов И.А.** Совершенствование расчета параметров режима механизированной наплавки // Сварочное производство. 2008. № 1. С. 5—9.
2. **Хачкинаян А.Е.** Управление формообразованием и качеством наплавленного металла поверхностным пластическим деформированием деталей путевых машин и подвижного состава: Дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, ДГТУ, 2004. 187 с.
3. **Зиновьев В.Е.** Повышение сроков службы восстановленных деталей ходовой части подвижного состава: Дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, РГУПС, 1999. 188 с.
4. **Бойко Н.И., Санамян Г.В.** Малооперационная ресурсосберегающая технология повышения качества наплавленного металла. Ростов н/Д, РГУПС, 2007. 226 с.
5. **Бойко Н.И., Фисенко К.С., Санамян Г.В.** Исследование температуры наплавленного металла в зоне механической обработки. Ростов н/Д, ФГБОУ ВПО РГУПС, 2015. 139 с.



**Рис. 7. Зависимость стойкости фрезы от подачи на зуб и скорости резания**

быть отнесен к категории износа истиранием, является износ по задней поверхности, который превышает износ по передней поверхности в среднем в 1,4...2 раза. Предложенная расчетная зависимость (5) позволяет прогнозировать стойкость фрезы с достаточной для практики точностью в диапазоне значений параметров режимов резания: скорость резания 157,6...283,3 м/мин, подача на зуб фрезы 0,779...0,187 мм, глубина резания 0,5...1,5 мм.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



Кирсанов С.В., Гречишников В.А., Бабаев А.С.

## ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СВЕРЛЕНИЯ ГЛУБОКИХ И ТОЧНЫХ ОТВЕРСТИЙ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ

Под общ. ред. С.В. Кирсанова. 2016 г. 188 с.

Цена 600 руб.

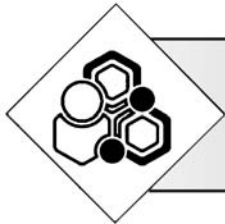
Рассмотрены современные конструкции ружейных свёрл с твердосплавными стержнями, применяемые для сверления глубоких и точных отверстий малых диаметров. Даны рекомендации по их проектированию, изготовлению и эксплуатации. Приведены сведения о технологических возможностях этих инструментов.

Для технологов и конструкторов машиностроительных предприятий, может быть полезна студентам вузов.

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

по почте: 107076, г. Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2; по e-mail: realiz@mashin.ru.  
Дополнительная информация по телефону: (495) 785-60-69 и на сайте www.mashin.ru





УДК 621.793

**Ю.В. Панфилов**

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

E-mail: panfilov@bmstu.ru

## Наноструктурированные тонкопленочные покрытия с различными упрочняющими эффектами

*Проанализированы публикации по упрочняющим тонкопленочным покрытиям и выявлены необычные эффекты, связанные с режимами формирования наноструктурированных покрытий, полученных различными методами нанесения тонких пленок в вакууме.*

**Ключевые слова:** упрочняющие тонкопленочные покрытия, методы нанесения тонких пленок, вакуумное оборудование, наноструктурированные покрытия, сверхвысокая твердость, аномально низкое трение.

*A number of articles on strengthening thin film coatings were analyzed and a lot of unusual effects associated with process formation of nanostructured coatings by the different thin film deposition methods were analysed.*

**Keywords:** strengthening thin film coatings, thin film deposition methods, vacuum equipment, nanostructured coatings, super high hardness, ultra low friction coefficient.

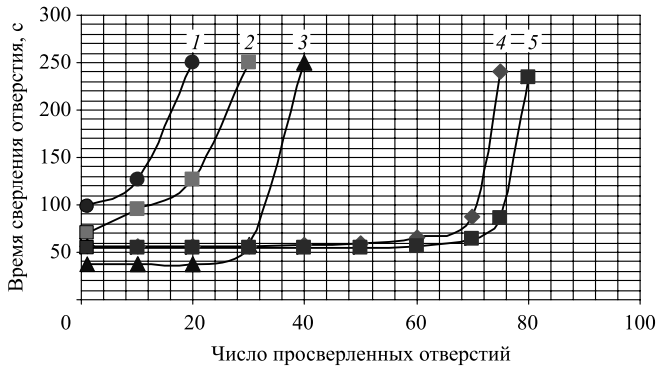
Анализ публикаций по функциональным и упрочняющим покрытиям в различных журналах, включая журнал "Упрочняющие технологии и покрытия", показал, что наноструктурированные тонкопленочные покрытия занимают достаточно большое место среди средств повышения долговечности деталей машин, стойкости инструмента, антифрикционных свойств пар трения. В зависимости от метода и режима нанесения в вакууме тонкопленочного покрытия изменяются упрочняющие эффекты, а следовательно, и функциональные характеристики покрытия.

Так, магнетронное распыление многокомпонентных мишеней типа TiBSiN, TiBCrN, TiAlCN и др., изготовленных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [1], дает возможность получать наноструктурированные тонкопленочные покрытия с размером зерен 1...4 нм. Такие покрытия обладают уникальными характеристиками: микротвердостью  $HV > 50$  ГПа, коррозионной стойкостью свыше 10 мкм/год в  $H_2SO_4$ , довольно низким коэффициентом трения и др.

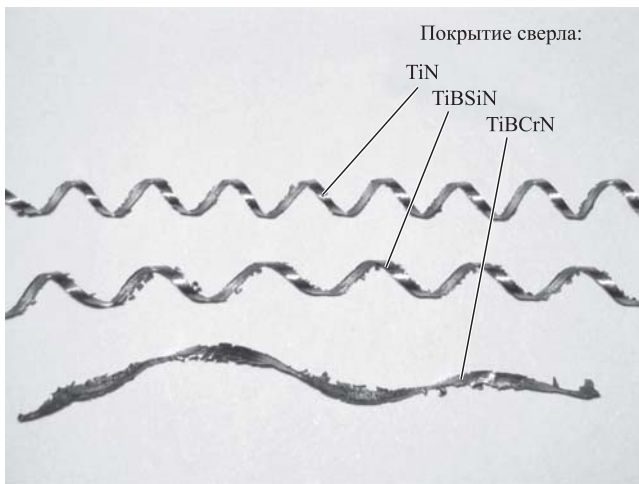
Нанесение таких покрытий на режущий инструмент дает возможность не только увеличить стойкость резцов, фрез, сверл, метчиков и другого инструмента, но и повысить режимы обработки, например увеличить подачу инструмента и тем самым уменьшить время обработки и сократить сроки окупаемости дорогостоящего оборудования (немаловажный фактор при закупке импортных металлорежущих станков).

На рис. 1 представлены результаты исследования СВС-покрытий, нанесенных на сверла из инструментальной стали Р18 диаметром 4,2 мм. Обрабатываемый материал — плита из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т толщиной 15 мм [2].

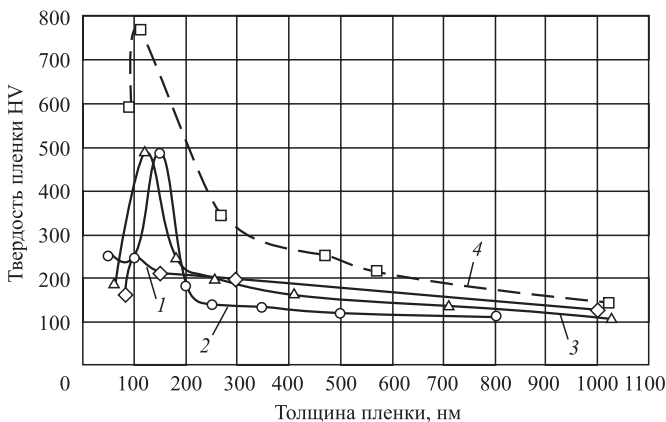
Из графиков, приведенных на рис. 1, следует, что сверла с покрытиями имеют и более высокую износостойкость (число просверленных отверстий), и меньшее время сверления плиты толщиной 15 мм из труднообрабатываемой стали 12Х18Н10Т по сравнению со сверлами без покрытия, а наилучшими характеристиками обладают сверла с покрытиями из TiBSiN. Кроме того, был обнаружен неожиданный эффект, проявившийся



**Рис. 1.** Экспериментальная зависимость времени сверления отверстия от числа просверленных отверстий и материала покрытия при одинаковой нагрузке на сверло: 1 — без покрытия; 2 — TiN; 3 — TiBCrN; 4 — TiBN + 20 % Si; 5 — TiBSiN



**Рис. 2.** Вид стружки при сверлении инструментом с различными покрытиями



**Рис. 3.** Экспериментальная зависимость микротвердости HV образцов от толщины покрытия: 1 — Al; 2 — Cu; 3 — Ti; 4 — Nb

ся в различном виде стружки при использовании сверл с различным покрытием (рис. 2), причем при сверлении инструментом с покрытием TiBCrN, обладающим наименьшим коэффициентом трения и обеспечивающим наименьшее время сверления (см. рис. 1), стружка имеет наименьшее число витков — сверло входит в сталь "как в масло".

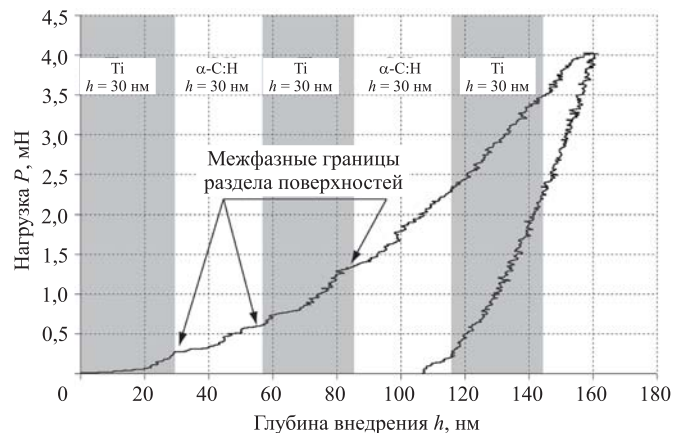
Еще один неожиданный упрочняющий эффект был обнаружен при измерении микротвердости образцов из Al, Cu, Ti и Nb с нанесенными на них покрытиями из тех же самых материалов (рис. 3) — при толщине покрытия 100...150 нм микротвердость увеличивается в несколько раз по сравнению с покрытиями толщиной 300 нм и более [3].

Наноиндентирование многослойного покрытия Ti — α-C:H (титан — гидрогенизированный углерод) с толщинами слоев 30 нм показало (рис. 4), что на границах раздела слоев твердость возрастает по сравнению с твердостью самого слоя, что объясняется силами поверхностного натяжения на границах слоев и/или образованием более твердой карбидной фазы [4].

Осаждение наноструктурированных тонкопленочных покрытий из сепарированной плазмы дугового разряда с графитовой мишенью [5] обеспечивает получение алмазоподобных углеродных пленок (АУП) со следующими характеристиками: достаточно равномерная поверхность, количество дефектов незначительно (рис. 5);

микротвердость 38,9...41,5 ГПа, что позволяет отнести их к классу сверхтвердых материалов;

микротвердость 38,9...41,5 ГПа, что позволяет отнести их к классу сверхтвердых материалов; достаточно низкий коэффициент трения скольжения — около 0,2, который не изменяется на всем пути трения.



**Рис. 4.** Результаты наноиндентирования многослойного покрытия Ti — α-C:H

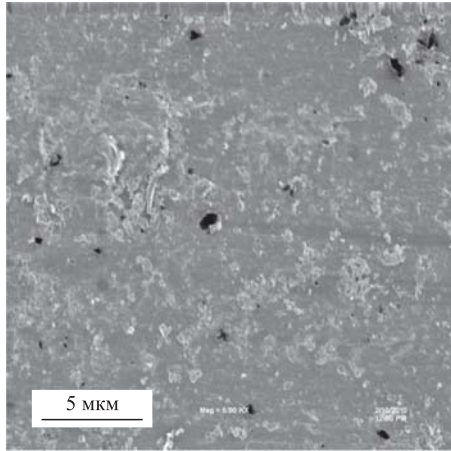


Рис. 5. Изображение покрытия, полученное с помощью растрового электронного микроскопа

Исследование твердости покрытий проводили на микротвердомере ПМТ-3М по специальной методике, включающей в себя измерение твердости основы и композиции "основа — покрытие", измерение толщины и расчет твердости покрытия.

Исследование фрикционных характеристик покрытий проводили на специальном стенде. Результаты представлены на рис. 6.

Довести покрытия до полного износа не удалось, так как они оказались более твердыми и износостойкими, чем индентор (закаленный шарик). На фотографиях внизу рис. 6 видно, что после удаления продуктов износа (фото справа) дорожки трения (фото слева) не осталось, т. е. продукты износа принадлежали индентору.

Нанесение такой пленки на мелкогабаритный инструмент дало неожиданный упрочняющий эффект: сплошная алмазоподобная углеродная пленка не только повышает стойкость инструмента, но и увеличивает изгибную жесткость сверл диаметром 50...300 мкм, предназначенных для сверления отверстий в печатных платах (ПП) [3]. Увеличение изгибной жесткости сверл дало возможность повысить точность сверления отверстий в ПП. Причиной изгиба сверла в процессе микрообработки является радиальная сила, обусловленная существенной в масштабах сверла неоднородностью обрабатываемого материала диэлектрического слоя ПП, содержащего армирующие нити из стекловолокна и эпоксидное связующее (рис. 7).

Полученные результаты продемонстрировали, что изгибная жесткость сверла диаметром 0,105 мм с АУП на 21,6 % превысила жесткость сверла без покрытия. За счет крайне малой жесткости микроразмерных сверл наименьших диаметров вклад упрочняющего покрытия в это может быть весьма значительным (рис. 8).

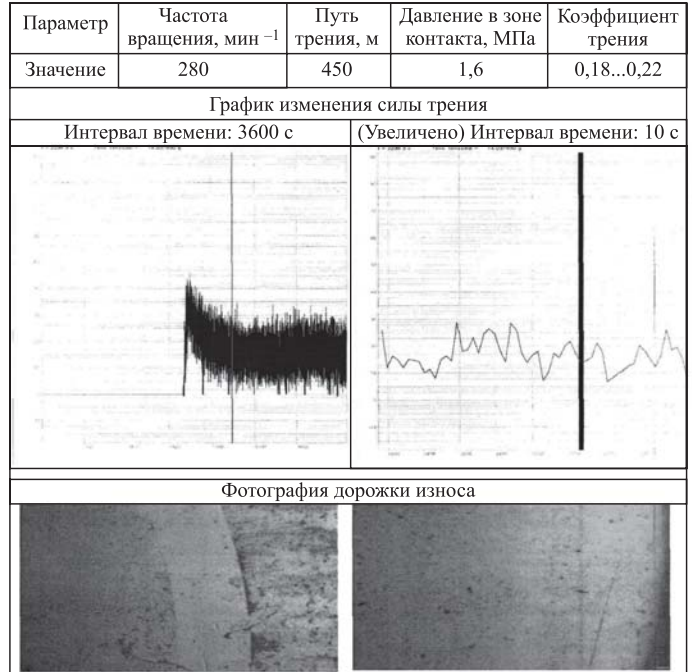


Рис. 6. Результаты исследования фрикционных характеристик покрытий

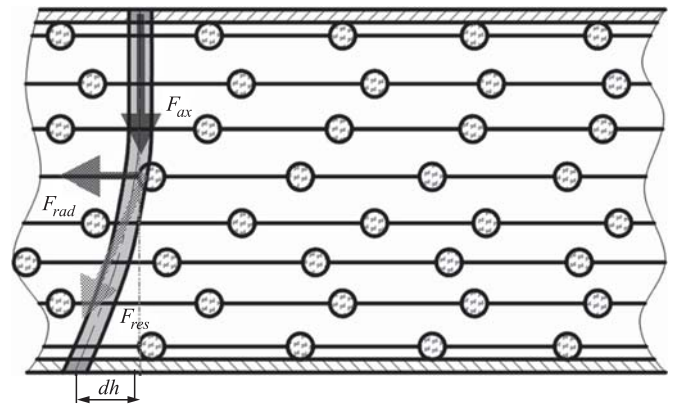


Рис. 7. Иллюстрация механизма отклонения оси сверла от прямолинейной траектории на скрутке стеклянных волокон [4]:

$F_{ax}$  — осевое усилие;  $F_{rad}$  — радиальное усилие;  $F_{res}$  — вектор результирующего усилия

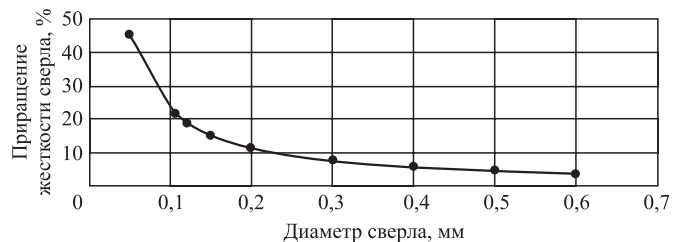


Рис. 8. Относительное приращение изгибной жесткости сверл различного диаметра с упрочняющим покрытием

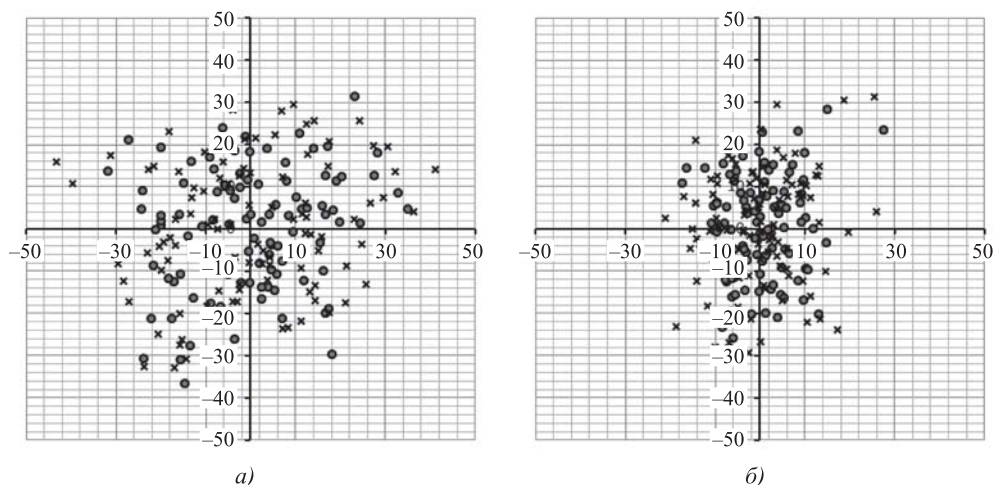


Рис. 9. Отклонения координат центра отверстия от номинального положения, мкм, диаметр сверла — 0,3 мм: а — сверло без покрытия; б — сверло с покрытием; ● — на входе; × — на выходе

Исходя из полученных результатов можно предположить, что при сверлении микроразмерных отверстий в ПП сверлами с упрочняющим покрытием случайная погрешность, обусловленная уводом оси сверла, снизится пропорционально отношению приращению изгибной жесткости сверла. В частности, для сверл диаметром 0,3 мм среднее квадратичное отклонение смещения координаты центра отверстия при сверлении сверлами с покрытием уменьшается на 28,9 %, или 6,5 мкм, чем при сверлении обычными сверлами (рис. 9).

Эффект сверхнизкого трения был получен на антифрикционном тонкопленочном покрытии состава  $\text{MoS}_2\text{D}_x$  (где D — легирующий элемент) при нормальных условиях на воздухе путем магнетронного распыления двух мишеней: из  $\text{MoS}_2$  и Ga [3]. По сравнению с коэффициентами сухого трения скольжения ( $f = 0,7...0,9$ ) двух металлических поверхностей и трения скольжения твердых антифрикционных материалов ( $f = 0,1...0,2$ ) коэф-

фициент трения скольжения покрытия  $\text{MoS}_2\text{D}_x$  имеет очень маленькое значение ( $f = 0,001...0,0001$ ).

Разработана модель, объясняющая механизм антифрикционного действия покрытий состава  $\text{MoS}_2\text{D}_x$ , имеющих сверхнизкие коэффициенты трения при триботехнических испытаниях в нормальных условиях на воздухе — легирующий элемент уменьшает трение скольжения между слоями слоистой структуры дисульфида молибдена [6].

На рис. 10 приведена зависимость коэффициента трения скольжения от длительности испытаний покрытий  $\text{MoS}_2$  и  $\text{MoS}_2\text{D}_x$ , нанесенных высокочастотным катодным распылением. Испытания по схеме диск—сфера проводились на воздухе при нормальных условиях [7].

### Заключение

Метод и режим нанесения тонкопленочного покрытия в вакууме определяют энергомассоперенос материала покрытия, его структурные и функциональные характеристики, а также необычные упрочняющие эффекты, описанные в данной статье. Управляемый энергомассоперенос и наноструктура покрытия — двух- и трехмерная — обеспечивают одновременно сверхвысокую твердость и пластичность; сверхвысокую твердость, низкий и сверхнизкий коэффициент трения скольжения; высокую износостойкость и повышенную жесткость конструкции.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новые материалы / под науч. ред. Ю.С. Карабасова. М., МИСиС, 2002. 736 с.

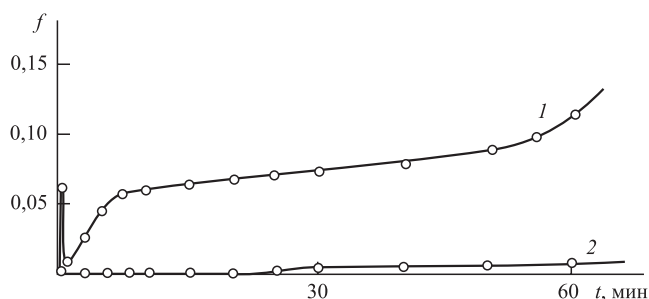


Рис. 10. Зависимости коэффициента трения скольжения от длительности испытаний для двух типов покрытий: 1 —  $\text{MoS}_2$ ; 2 —  $\text{MoS}_2\text{D}_x$

2. **Levashov E.A., Shtansky D.V., Panfilov Yu.V.** Multi-component nanostructure thin film wear-resistant coatings // 7<sup>th</sup> Intern. Conf. on Nanostructured Materials, June 20–24, 2004. Viesbaden, Germany. P. 35.

3. **Булыгина Е.В., Панфилов Ю.В., Осипов А.В.** Измерение твердости пленочных структур / Состояние и проблемы измерений // Матер. 8-й Всеросс. науч.-техн. конф. Ч. 1. М., 2002. С. 111–112.

4. **Исследование** твердости многослойных пленочных структур титан-гидрогенизированных аморфный углерод микро- и наноиндентированием / А.В. Осипов, Ю.В. Панфилов, М.И. Петржик и др. // Справочник. Инженерный журнал. 2004. № 9. С. 14–19.

5. **Литвак Ю.Н., Панфилов Ю.В.** Применение упрочняющих покрытий для повышения точности микро-размерного сверления печатных плат // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 1. С. 3–7.

6. **Ноженков М.В.** О слабых взаимодействиях частиц в твердых телах // Наноинженерия. 2012. № 3 (9). С. 41–47.

7. **Ноженков М.В.** Кристаллическая структура и свойства покрытий, наносимых вакуумными ионно-плазменными методами // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 9. С. 38–48.

## Продолжается подписка на журнал "Упрочняющие технологии и покрытия"

За наличный и безналичный расчет  
Слюбого номера и на любой срок  
Без почтовых наценок

Присылайте заказы и обращайтесь за дополнительной информацией  
в отдел продаж, маркетинга и рекламы:

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2  
Тел.: (495) 785-60-69  
e-mail: [realiz@mashin.ru](mailto:realiz@mashin.ru), [www.mashin.ru](http://www.mashin.ru)

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2.  
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".

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

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

Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96.

Технический редактор *Конова Е.В.* Корректор *Сажина Л.И.*

Сдано в набор 04.09.2017 г. Подписано в печать 31.10.17 г. Формат 60×88 1/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.

Отпечатано в ООО "Канцлер", 15008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49

Оригинал-макет: ООО "Авансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1

Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)





# Поздравляем

**Виктора Евгеньевича Громова,  
доктора физ.-мат. наук, профессора,  
с 70-летием!**

26 ноября 2017 г. исполнилось 70 лет члену редакционного совета нашего журнала Виктору Евгеньевичу Громову — известному в России и за рубежом металлофизику, заслуженному деятелю науки РФ, почетному металлургу РФ, члену Межгосударственного совета по физике прочности и пластичности материалов, Научного совета РАН по физике конденсированных сред, доктору физико-математических наук, профессору, заведующему кафедрой естественно-научных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета. В.Е. Громов зарегистрирован в Федеральном реестре экспертов в научно-технической сфере Министерства образования и науки и РАН, он член редакционных коллегий четырех журналов, входящих в список ВАК.

Как высококвалифицированный специалист широкого профиля Виктор Евгеньевич по праву занимает ведущее место среди ученых России в области материаловедения, физики прочности и пластичности сталей и сплавов. На протяжении долгой научной деятельности его учителями и соратниками являются известные российские ученые-металлофизики и материаловеды В.Е. Панин, Л.Б. Зуев, Э.В. Козлов, А.М. Глезер, Ю.Ф. Иванов.

Экспериментальные и теоретические исследования в области физики прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий (электрических полей и токов, плазменных и электронных пучков), выполненные за 40 лет В.Е. Громовым и его учениками, получили широкую известность и признание в научных кругах и привели к созданию нового научного направления. Результаты исследований нашли применение как в академических, отраслевых и учебных институтах при изучении природы формоизменения металлов и сплавов, так и на ряде предприятий металлургической промышленности и машиностроения при разработке соответствующих электротехнологий. Они внедрены со значительным экономическим эффектом на предприятиях Кузбасса.

За цикл работ по внедрению безкислотной технологии удаления окалина при производстве проволоки из малоуглеродистых и низколегированных сталей на предприятиях металлургической отрасли В.Е. Громов удостоен премии Правительства РФ в области науки и техники. В 2013 г. он становится лауреатом премии РАН имени академика И.П. Бардина. В последние годы научная школа "Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий", возглавляемая В.Е. Громовым, плодотворно работает в области наноструктурного материаловедения по грантам РФФИ, РНФ и целевым программам Министерства образования и науки.

За период работы в высшей школе Виктор Евгеньевич проявил качества талантливого педагога и организатора высшего образования. В.Е. Громов — "Лучший профессор Кузбасса 2003", "Почетный профессор Кузбасса 2015" и один из ведущих профессоров университета, пользуется заслуженным уважением студентов и коллег. Его лекции отличает сочетание высокого теоретического уровня с ясной формой изложения.

Виктор Евгеньевич воспитал плеяду талантливых научных сотрудников — 8 докторов и свыше 35 кандидатов наук, плодотворно работающих в высшей школе, на производстве, в бизнесе. Он автор более 3300 научных публикаций, в том числе 25 патентов и 70 монографий.

В.Е. Громов — действительный член Международной академии энергоинформаторных наук и Российской академии естественных наук. Его заслуги отмечены медалями "За служение Кузбассу", "За особый вклад в развитие Кузбасса" II и III степени, другими наградами и грамотами администрации Кемеровской области.

*Коллектив редакции, редакционный совет нашего журнала, ученики и друзья  
сердечно поздравляют Виктора Евгеньевича с юбилеем  
и желают ему доброго здоровья, благополучия  
и новых научных свершений и достижений!*