

# УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 7 (67)

ИЮЛЬ

2010

Издается с января 2005 г.

**Главный редактор**

д-р техн. наук,  
Ю.В. ПАНФИЛОВ

**Председатель редакционного совета**

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

**Заместители главного редактора:**

И.Н. ЖЕСТКОВА  
д-р физ.-мат. наук  
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

**Заместители председателя редакционного совета:**

д-р техн. наук  
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН  
д-р техн. наук  
А.В. КИРИЧЕК  
д-р техн. наук  
О.В. ЧУДИНА

**Редакционный совет:**

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

**Редакция:**

Е.П. ЗЕМСКОВА  
Т.В. ПАРАЙСКАЯ

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Камышанченко Н.В., Кузьменко И.Н., Никулин И.С., Кунгурцев М.С., Неклюдов И.М., Волчок О.И. Температурная зависимость механических свойств титана марки ВТ1-0 ..... 3

Ситников А.А., Алексеев Н.С., Бойко Е.А. Износ электрокорунда при микрорезании плазменного покрытия ..... 7

### МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Попов М.Е. Проектирование операций упрочняющей обработки деталей машин методами ППД ..... 11

### ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Духопельников Д.В., Марахтанов М.К., Мелик-Парсаданян А.К. Электрические параметры и массоперенос в вакуумно-дуговом разряде с монокристаллическим кремниевым катодом ..... 21

Илюшечкин Е.В., Витальский Д.В., Абрамов А.Г. Методологический подход при моделировании процесса упрочнения посредством ионной имплантации ... 25

Кадырметов А.М., Станчев Д.И., Сухочев Г.А. Технология плазменного нанесения и упрочнения покрытий в ресурсосберегающих производственных процессах ..... 29

Суслов А.Г., Говоров И.В., Семенцев А.М. Особенности модифицирования поверхностного слоя стальных деталей под воздействием лазерного излучения ..... 37

Табаков В.П., Смирнов М.Ю., Тулисов А.Н., Чихранов А.В. Исследование напряженного состояния и циклической трещиностойкости многослойных покрытий режущего инструмента ..... 42

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

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

# STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 7 (67)

July

2010

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 Assistants:**

I.N. ZHESTKOVA

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

S.N. GRIGORIEV

V.Yu. ZAMYATIN

V.A. ZEMSKOV

S.A. KLIMENKO

V.A. LASHKO

V.A. LEBEDEV

V.V. LYUBIMOV

F.I. PANTELEENKO

H.M. RAHIMYANOV

B.P. SAUSHKIN

V.P. SMOLENTSEV

A.M. SMYSLOV

V.A. SHULOV

G.A. SUHOCHEV

V.P. TABAKOV

M.L. KHEIFETS

**Edition:**

E.P. ZEMSKOVA

T.V. PARAYSKAYA

## CONTENTS



### GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

**Kamyshanchenko N.V., Kuzmenko I.N., Nikulin I.S., Kungurtsev M.S., Neklyudov I.M., Volchok O.I.** The temperature dependence of mechanical properties of VT1-0 titanium . . . . . 3

**Sitnikov A.A., Alexeev N.S., Boiko E.A.** The wear of synthetic corundum during microcutting plazma coatings . . . . . 7



### MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

**Popov M.E.** Designing of operations of strengthening processing of details of machines by methods SPD . . . . . 11



### PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

**Dukhopelnikov D.V., Marakhtanov M.K., Melik-Parsadanyan A.K.** The electric parameters and mass transfer rate in vacuum arc discharge on monocrystal silicone cathode . . . . . 21

**Ilyushechkin E.V., Vitalsky D.V., Abramov A.G.** The methodological approach at Modelling of the process of hardening by means of ionic implantation . . . . . 25

**Kadyrmetov A.M., Stanchev D.I., Sukhotchev G.A.** The technology of the plasma-spraying and coat-strengthening in resource-saving production processes. . . . . 29

**Suslov A.G., Govorov I.V., Sementsev A.M.** Features of modifying of the blanket of steel details under the influence of laser radiation . . . . . 37

**Tabakov V.P., Smirnov M.Ju., Tulisov A.N., Chihranov A.V.** Research of a tension and cyclic stability of cracks multilayered coverings of the cutting tool . . . . . 42

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

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

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



УДК 539.4.015:382.4

Н.В. Камышанченко, И.Н. Кузьменко, И.С. Никулин, М.С. Кунгурцев (БелГУ),  
И.М. Неклюдов, О.И. Волчок (НИЦ "Харьковский физико-технический институт")  
E-mail: Nikulin@bsu.edu.ru

## Температурная зависимость механических свойств титана марки ВТ1-0

*Изучены влияния механического и температурного воздействий на структуру и механические свойства титана ВТ1-0. Выявлено, что формирование макроструктуры при нагреве выше температуры полиморфного превращения определяется как температурой нагрева, так и скоростью последующего охлаждения. Установлено, что титан марки ВТ1-0 независимо от способа обработки относится к группе  $\alpha$ -сплавов.*

**Ключевые слова:** титан, прокатка, отжиг, механические свойства, скольжение, двойникование.

*The research was aimed at the mechanical and temperature influence on the structure and mechanical properties of VT1-0 titanium. Macrostructure formation during the heating above the temperature of polymorphic transformation is determined both by the heating temperature and the following cooling rate. According to the X-ray results VT1-0 titanium, despite the method of treating, belongs mainly to the group of  $\alpha$ -alloys.*

**Keywords:** titanium, rolling, annealing, mechanical properties, glide, twinning.

### Введение

Текстура, сформированная в процессе интенсивной пластической деформации, оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики деталей, изготовленных из технического чистого титана. В частности, уровень механических параметров, их анизотропия, особенности протекания процесса деформации и разрушения во многом определяются структурным состоянием.

Установлено, что формирование структуры титана и механические свойства, формируемые в процессе пластического деформирования, определяются в основном механизмом двойникования [1]. При этом двойникование преимущественно развивается по плоскостям {101}, {102}, {112} [2, 3]. С развитием деформации обнаружены изменения угла разориентации на границах зерна с последующим превращением двойниковых границ в произвольные [4]. Эти закономерности еще больше усугубляются в титане в результате последующего температурного воздействия.

### Материалы и методы исследования

В качестве материала исследования использовали технически чистый титан марки ВТ1-0 с исходным размером зерна 100 мкм и содержанием примесей не более, % мас.: 0,3 Al; 0,3 Fe; 0,1 Si; 0,20 O; 0,07 C;

0,04 N; 0,01 H; прочие – 0,3. Титан подвергался поэтапной прокатке при температуре 773 К с обжатием в интервале скоростей  $10^{-4} \dots 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  до 40, 60, 80 % с толщиной образца соответственно 1,5; 0,8; 0,4 мм.

Из прокатанных листовых заготовок электроэрозионным способом на установке Sodick AQ 300L вырезали образцы вдоль направления прокатки для одноосного растяжения с длиной рабочей части 12 мм. Из полученных образцов отбирали первую партию для последующего испытания. Вторую партию составили образцы, подвергнутые для снятия внутренних напряжений, образованных в процессе деформации, неполному отжигу при температуре 823 К в течение 1 ч в вакууме. Образцы третьей и четвертой партий подвергали отжигу при температурах 973 и 1153 К. Образцы пятой и шестой партий после отжига при температуре выше полиморфного превращения закаляли в воде при температуре 293 К.

Механические испытания проводили по стандартной методике на одноосное растяжение до разрушения при комнатной температуре с постоянной скоростью нагружения 1,5 мм/мин на универсальной машине INSTRON 5882. Структурные исследования поверхности после прокатки и различных видов термообработки проводили на оптическом микроскопе Olympus GX71. Скорость деформационного упрочнения ( $d\sigma/d\varepsilon$ ) вычисляли из диаграмм деформирования.

Микротвердость измеряли на микротвердомере DM8 с автоматическим анализом результатов. Рентгенографический анализ осуществляли на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA.

### Экспериментальные результаты

Исходный материал до пластической деформации имел крупнозернистое состояние. Пластическое деформирование привело к значительным изменениям морфологии, структуры и размеров кристаллитов, зависящим от степени обжатия. Полиэдричность, свойственная большинству зерен в исходном состоянии, с изменением толщины в процессе пластической деформации утратила форму, приобрела довольно сложную конфигурацию, и характерная зеренная структура в основном перестала проявляться.

Степень обжатия от 40 % и выше влияет на количество выхода механических двойников на поверх-

ность образца. С увеличением степени обжатия отмечаются значительные искажения зеренной структуры, границы которой содержат высокую плотность дислокаций, а на темнопольном изображении видны дисперсные частицы.

Прочностные характеристики и микротвердость существенно изменились в сравнении с исходными параметрами (ГОСТ 19807–91), что подтверждает эффективность фазового наклепа. Размельчение структуры в результате перекристаллизации, происходящее в процессе интенсивной пластической деформации, способствовало увеличению механических параметров (таблица).

Дополнительный неполный отжиг при 823 К несколько стабилизирует структурное состояние, что заметно влияет на механические параметры (см. таблицу).

#### Прочностные параметры

Толщина прокатки, мм	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Микротвердость*, НВ	Коэффициент упрочнения, $(\Delta\sigma/\Delta\epsilon) \cdot 10^3$
После обжатия прокаткой				
0,4	637	765	271	23,540
0,8	683	752	275	16,275
1,5	468	548	170	11,614
После обжатия прокаткой и неполного отжига при 823 К				
0,4	292,6	404,1	183	–
0,8	288,3	376,8	158	–
1,5	249,03	313,1	144	–
После рекристаллизационного отжига при 973 К				
0,4	149	299,8	166	8,538
0,8	128	324	160	8,035
1,5	168	318	169	6,902
После отжига при температуре 1173 К				
0,4	190,0	328,9	168	13,578
0,8	147,1	283,5	149	9,363
1,5	135,02	263,4	148	9,031
После закалки от температуры 1373 К				
0,4	802	805	405	23,893
0,8	652	655	390	19,416
1,5	557	604	355	13,066

\*Микротвердость измеряли при нагрузке  $F = 0,1$  Н.

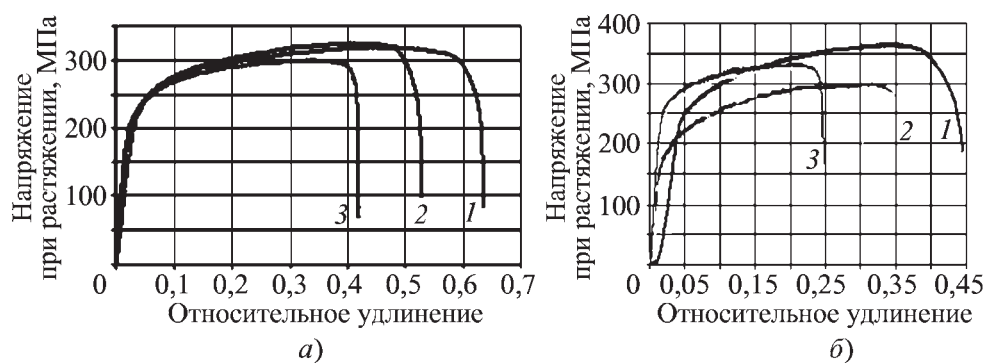


Рис. 1. Зависимость растягивающего напряжения от величины перемещения захватов испытательной машины при отжиге 973 К (а) и 1173 К (б) при толщине образцов, мм: 1 – 1,5; 2 – 0,8; 3 – 0,4

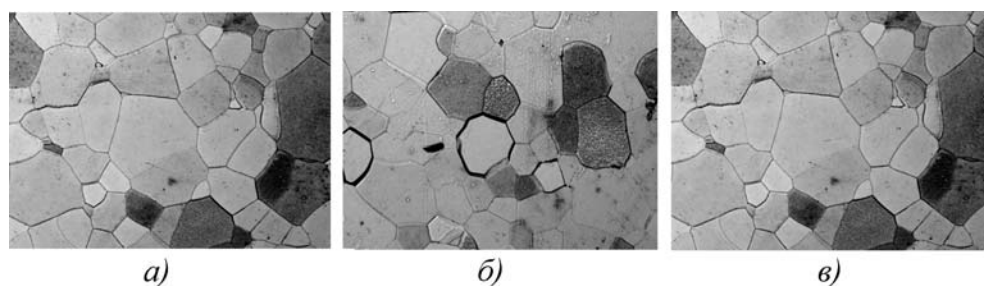


Рис. 2. Макроструктура поверхности титана после пластического деформирования прокаткой и отжига при 973 К ( $\times 200$ ) при толщине образцов, мм: а – 0,4; б – 0,8; в – 1,5

Как следует из экспериментальных результатов, уровень механических свойств и особенность процесса деформации определяются структурным состоянием материала. Так, например, механические параметры ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ) зависят от степени деформации и слабо зависят от температуры отжига (см. таблицу, рис. 1).

В макроструктуре отожженных при 973 К образцов произошли значительные изменения. Структура образцов вне зависимости от степени обжатия при прокатке практически полностью рекристаллизовалась (рис. 2).

С приближением температуры отжига к температуре полиморфного превращения механические и структурные параметры претерпевают заметные изменения.

Формирование макроструктуры при нагреве выше температуры полиморфного превра-

щения определяется как температурой нагрева, так и предысторией термического воздействия и скоростью охлаждения. В данном случае происходило медленное охлаждение на воздухе при комнатной температуре, что соответствует медленной закалке.

Повышение температуры предварительного нагрева выше температуры полиморфного превращения с последующей закалкой в воде приводит к существенному увеличению механических параметров ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ) с одновременным ухудшением пластических свойств (рис. 3, см. таблицу).

При перестройке высокотемпературной модификации в низкотемпературную в процессе закалки от 1373 К было отмечено существенное упрочнение структуры титана. Если при нагреве до полиморфного превращения (см. рис. 2) в

образцах титана наблюдались в основном однородные полиэдрические зерна с четко обрешенными границами, то закалка привела к существенному изменению не только размеров, но и формы образовавшихся кристаллов (рис. 4).

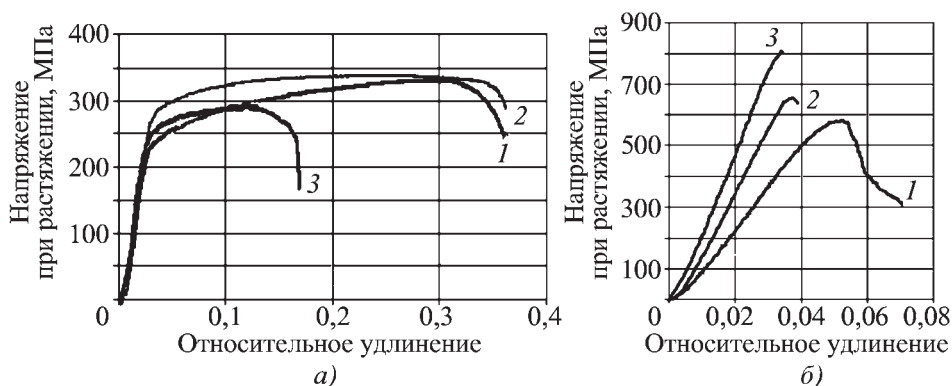


Рис. 3. Зависимость растягивающего напряжения от величины перемещения захватов испытательной машины при закалке 1123 К (а) и 1373 К (б) при толщине образцов, мм: 1 – 1,5; 2 – 0,8; 3 – 0,4

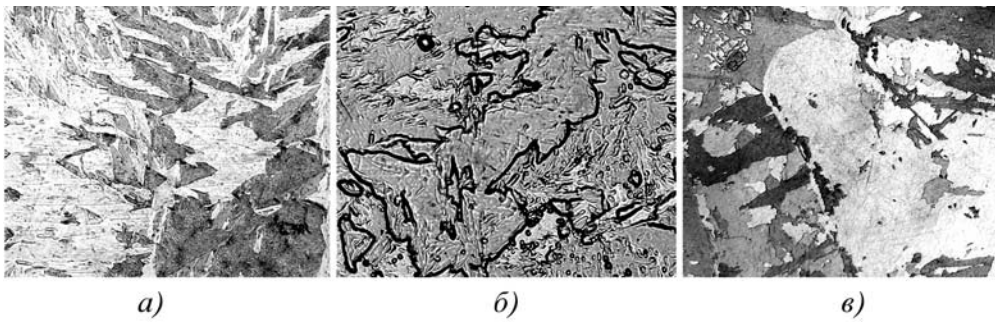


Рис. 4. Макроструктура поверхности титана после пластического деформирования и последующей закалки от температуры 1373 К при толщине образцов, мм:

*a* – 0,4 (×200); *б* – 0,8 (×200); *в* – 1,5 (×50)

### Обсуждение результатов. Выводы

Сравнение рентгенографических данных для образцов после прокатки, неполного отжига и закалки от

высоких температур с эталоном позволило установить, что независимо от способа обработки полученные ГПУ-решетки относятся в основном к группе  $\alpha$ -сплавов (рис. 5, 6). Некоторое несоответствие относительной интенсивности в экспериментально полученных рентгенограммах в сравнении со справочными данными связано, очевидно, с текстурой, созданной в процессе деформации прокаткой. Сдвиг интерференционных линий и расширение их в закаленных образцах по сравнению с образцами, подвергнутыми температурному отжигу, позволяет утверждать о наличии микронапряжений и измельчении блоков, происходящих в процессе закалки.

Изменение механических параметров, очевидно, связано со структурными преобразованиями в зернах титана при  $\beta \leftrightarrow \alpha$ -превращении. Такие изменения возможны, если структура исходного титана сформировалась в  $\beta$ -области, но затем подвергалась быстрому охлаждению.

При быстром охлаждении по бездиффузионному мартенситному механизму происходит образование  $\alpha'$ -фазы при одновременном  $\beta \rightarrow \alpha$ -превращении. Образование  $\alpha'$ -фазы приводит к искажению решетки, в результате чего по сравнению с  $\alpha$ -фазой повышаются твердость и прочность и существенно ухудшается пластичность.

Можно предположить, что при высокотемпературной модификации за областью полиморфного превращения в крупных зернах титана возникают не только зародыши новой фазы, но одновременно образуются вакансионно-дислокационная структура. С последующим переходом в низкотем-

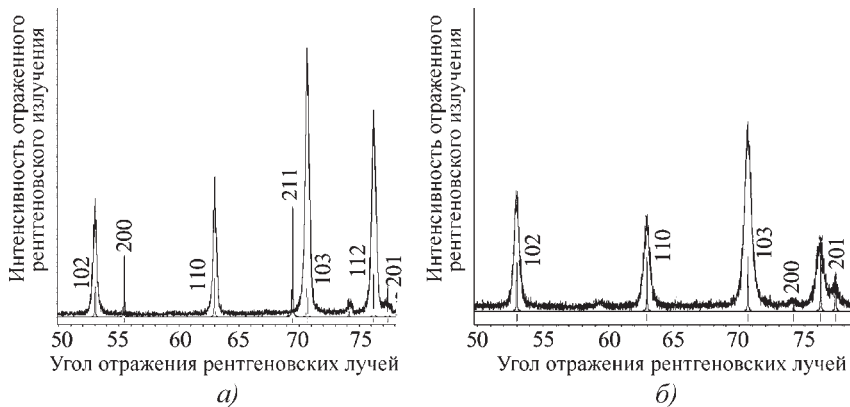


Рис. 5. Рентгеноструктура титана:

*a* – эталонный образец; *б* – после прокатки до толщины 0,8 мм

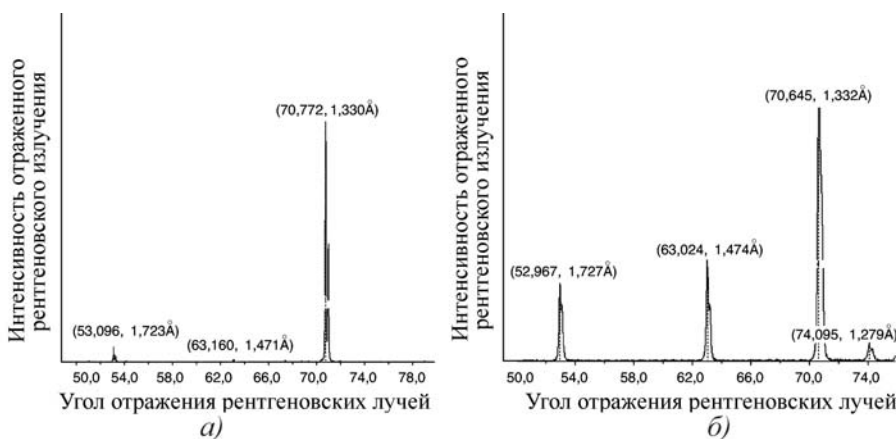


Рис. 6. Рентгеноструктура титана после неполного отжига (*a*) и после закалки от 1373 К (*б*) при толщине образцов 0,8 мм

пературный режим происходит превращение  $\beta$ -фазы в  $\alpha + \alpha'$ -фазу с одновременными дополнительными изменениями дефектности структуры, степень влияния которой зависит от скорости закалки.

Изменение механических параметров закаленных образцов и коэффициента упрочнения сопоставимо с особенностями эволюции субструктуры поликристаллического титана на различных стадиях деформации. Наблюдаемые изменения кривых упрочнения при умеренных положительных температурах объясняют [5] особенностями эволюции структуры и формированием ансамблей образованных на второй и последующих стадиях деформационного упрочнения и хаотически расположенных вакансионно-дислокационных дефектов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Conrad H. Effect of interstitial solutes on the strengths and ductility of titanium // Progr. Mater. Sci. 1981. № 26. P. 123–403.
2. Salem A.A., Kalidindi S.R., Doherty R.D. Strain hardening of titanium: role of deformation twinning // Acta Met. 2003. № 51. P. 4225.
3. Shin D.H., Kim I., Kim J. Acta Met. 2003. № 51. P. 983.
4. Миронов С.Ю., Мышляев М.М. Анализ эволюции дислокационных границ в ходе холодной деформации микрорекристаллического титана // ФТТ. 2007. Т. 49. В. 5. С. 815–821.
5. Москаленко В.А., Смирнов А.Р., Ковалева В.Н., Нацик В.Д. Стадийность деформационного упрочнения поликристаллического титана при низких температурах и ее связь с эволюцией субструктуры // Физика низких температур. 2002. Т. 28. В. 12. С. 1310–1319.

УДК 621.922.02

А.А. Ситников (ГОУ ВПО "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова", г. Барнаул),  
 Н.С. Алексеев, Е.А. Бойко (Рубцовский индустриальный институт (филиал)  
 ГОУ ВПО "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова")  
 E-mail: sitalan@mail.ru

## Износ электрокорунда при микрорезании плазменного покрытия

Приведены результаты исследований износа единичных абразивных зерен из электрокорунда хромтитанистого при микрорезании плазменного порошкового покрытия и закаленной стали 45. Выявлена кинетика затупления абразивных зерен при микрорезании указанных покрытий. Установлено, что в основе механизма износа абразивов при микрорезании покрытий лежат явления как механического разрушения, так и физико-химического взаимодействия элементов абразива с металлами.

**Ключевые слова:** покрытие, абразивы, микрорезание, износ, микрорельеф, риска.

The article deals with a wear research of single abrasive grains in the synthetic chromium-titanium based corundum during microcutting plasma powdered coatings and hardened steel 45. The blunting kinetics of abrasive grains during microcutting the coatings in question is revealed. The results research proved that the abrasive wear during microcutting coatings is subject to mechanical destruction as well as physical and chemical reaction of abrasive components with metals.

**Keywords:** coating, abrasives, microcutting, wear, microrelief, mark.

### Введение

К высокоэффективным технологиям восстановления и упрочнения изношенных деталей машин относятся различные способы нанесения износостойких микропористых покрытий электродуговой металлизацией, газотермическим напылением, электроконтактным напеканием металлических порошков и др. [1, 2]. При механической обработке этих покрытий широко применяются различные абразивные материалы.

Однако высокая адгезионно-химическая активность и низкая теплопроводность указанных покрытий создают трудности при их дальнейшей абразивной обработке. Эти трудности обусловлены интен-

сивным налипанием частиц покрытия на рабочую поверхность шлифовальных кругов (эффект "засаливания") и повышенным износом абразивного инструмента [3].

В большинстве опубликованных работ изучение износа абразивных зерен производилось непосредственно при шлифовании кругами. Это позволило установить лишь самые общие положения об износе абразивов, так как в работе круга кроме зерен участвует связка, влияющая на износ абразивов и способная в ряде случаев производить резание; при этом невозможно создать одинаковые условия нагружения разных зерен и получить количественные данные об их износе.

Поэтому целью данной работы являлось исследование износа абразива при микрорезании плазменно-порошкового покрытия (далее просто покрытия) единичным абразивным зерном.

### Методика исследования

Микрорезание выполняли на круглошлифовальном полуавтомате высокой точности 3M152МВФ2 с ЧПУ со скоростью 35 м/с и продольной подачей стола, равной 425 мм/мин. Образец из обрабатываемого материала, представляющий собой вал диаметром около 75 мм и длиной рабочей части 300 мм, устанавливали в центрах станка и подвергали шлифованию до шероховатости по параметру  $Ra = 0,15$  мкм. При этом отклонения от круглости и цилиндричности поверхности вала не превышали 0,002 мм.

Износостойкость единичных зерен определяли согласно известной методике [4]. Сущность ее состоит в том, что испытание зерен проводится в условиях, приближенных к реальным условиям их эксплуатации при шлифовании.

Для исследований применяли абразивные зерна из электрокорунда хромтитанистого (95А) (далее просто электрокорунд) зернистостью № 40. Абразивное зерно заделывали в специальную металлическую державку с помощью медной амальгамы. Эту державку закрепляли на стальном диске, установленном вместо круга на планшайбе круглошлифовального станка. Зерно подводи́ли до касания с образцом из обрабатываемого материала. Затем задавали требуемую глубину резания (10 мкм) и на образец наносили риски до износа зерна на величину, равную заданной глубине резания, вследствие чего резание прекращалось. Снова задавали глубину 10 мкм, и опыт повторяли с каждым зерном до пяти раз.

В качестве напыляемого материала использовали широко распространенный в ремонтном производстве порошок интерметаллида марки ПВ-Н85Ю15, химический состав которого приведен ниже:

Химический состав . . . . .	Ni	Al	Ca	Fe	C
Значение, % . . . . .	84	14,6	0,07	0,04	0,03

Металлографический и рентгеноструктурный анализ показал, что структура полученного покрытия – легированный твердый раствор и сложная эвтектика на никелевой основе с различными твердыми включениями в виде карбидов и оксидов. Микротвердость покрытия 652 HV. Для сравнения опыты ставили также на закаленной стали 45 (далее просто сталь 45) твердостью 39...42 HRC.

Исследования износа абразивов в условиях микрорезания выполняли без смазочно-охлаждающей

жидкости, так как при этом особенно четко выявляются свойства материалов, связанные с их сопротивлением износу.

Критерием оценки износа различных абразивов был принят относительный износ  $\varepsilon$ , определяемый по формуле

$$\varepsilon = (h_0 - h)/h_0, \quad (1)$$

где  $h_0$  – средняя глубина первых трех рисок;

$h$  – глубина последующих рисок, замеренная через каждые 100 рисок для покрытия и через 800 рисок для стали 45.

Этот критерий был выбран с целью исключения влияния величины разброса глубин первоначальных рисок.

Глубину рисок измеряли на профилографе-профилометре АБРИС-ПМ7 посредством обработки профилограмм измеренных поверхностей, увеличенных в 4 раза. Установлено, что уменьшение глубины царапины численно равно величине износа абразива.

Вследствие некоторой разницы геометрии зерен наблюдался разброс опытных данных. Поэтому в проведенных исследованиях принимали среднеарифметическое значение износа не менее чем за десять опытов, где величина относительной ошибки средних значений при доверительной вероятности 0,95 не превышала  $\pm 15\%$ .

Для качественной оценки явлений, сопровождающих износ, предусматривалось исследование состояния рабочих поверхностей зерен в процессе микрорезания и после окончания опыта. В связи с этим профиль зерна в течение опыта периодически осматривали с помощью инструментального микроскопа ИМЦЛ 100×50А и фотографировали.

Для изучения микрорельефа и субмикрорельефа поверхностей абразива после микрорезания применяли растровый электронный микроскоп (РЭМ) EVO 50 фирмы ZEISS (Германия). Протекание химических реакций в зоне взаимодействия абразива с металлом оценивали по изменению химического состава их поверхностных слоев толщиной 5...10 мкм, который определяли с помощью приставки для микрорентгеноспектрального анализа JNCA x-act к вышеуказанному электронному микроскопу.

### Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенных исследований выявлена кинетика затупления абразивных зерен из электрокорунда при микрорезании покрытия и стали 45. На рис. 1 приведен график изменения относительного износа электрокорунда от числа нанесенных рисок при контакте острия с покрытием и сталью 45.



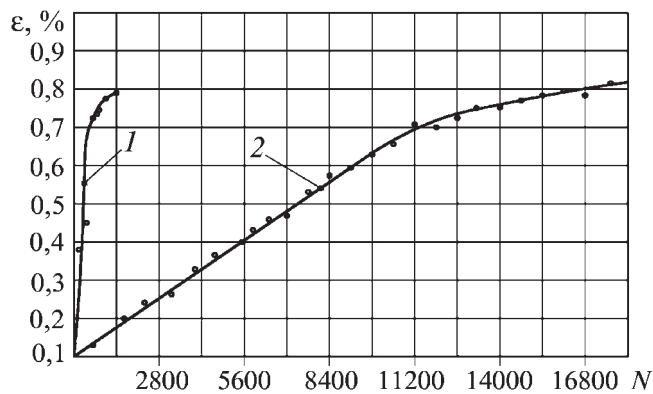


Рис. 1. Зависимость относительного износа  $\varepsilon$  острия из электрокорунда от числа рисок  $N$  при микрорезании: 1 – плазменного покрытия ПВ-Н85Ю15; 2 – стали 45

Как показали полученные экспериментальные данные, с течением времени происходит постепенный износ абразива. При этом закономерности износа абразива по покрытию и стали 45 качественно одинаковы. В обоих случаях в начальный период относительный износ возрастает пропорционально числу нанесенных рисок. На первом участке кривой при большом контактном давлении интенсивность износа электрокорунда по покрытию примерно в 18 раз выше, чем по стали 45.

В дальнейшем, когда глубина резания уменьшается настолько, что процесс приближается к внешнему трению, интенсивность износа уменьшается. На этом участке кривой интенсивность износа электрокорунда по покрытию в 8...10 раз выше, чем по стали 45.

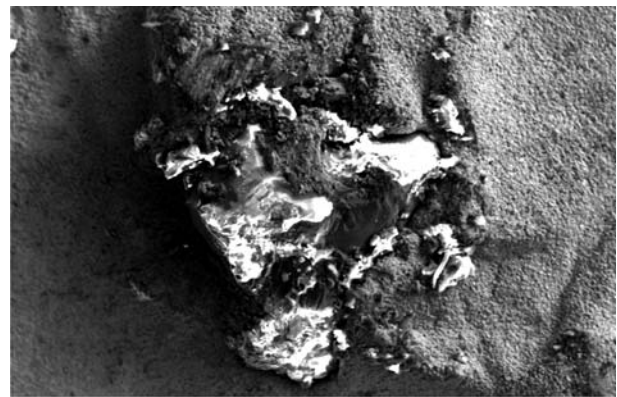
Наблюдаемое различие в интенсивности износа можно объяснить следующим образом. В начальный период микрорезания абразивное зерно работает в условиях больших контактных давлений, что приводит к взаимодействию ювенильных поверхностей металлов и абразивов. Это повышает возможность схватывания и адгезионного износа [4].

В завершающий период работы абразивного зерна в условиях внешнего трения на трущихся поверхностях образуются окисные пленки, снижающие интенсивность износа [4].

Электронно-микроскопические исследования микрорельефа рабочих поверхностей абразивных зерен свидетельствуют о различном характере износа электрокорунда при микрорезании покрытия и стали 45.

На рис. 2 в качестве примера показаны РЭМ-изображения общего вида рабочих поверхностей зерен из электрокорунда после микрорезания покрытия и стали 45.

После микрорезания покрытия поверхность абразивного острия (рис. 2, а) представляет собой сплош-



а)



б)

Рис. 2. Общий вид рабочих поверхностей зерен электрокорунда после микрорезания плазменного покрытия (а) и стали 45 (б) ( $\times 250$ )

ную площадку с участками налипшего металла, вследствие чего происходит контактирование металлических поверхностей налипшего металла и металла образца. Известно [4], что образование металлического контакта способствует значительному повышению силы микрорезания и интенсивности износа абразива (см. рис. 1, кривая 1).

При микрорезании стали 45 на рабочую поверхность абразива металл практически не налипает (рис. 2, б), и износ абразива в этом случае значительно меньше, чем по покрытию (см. рис. 1, кривая 2).

Результаты электронно-микроскопического анализа отдельных участков микрорельефа рабочих поверхностей абразивных зерен позволяют предположить, что после микрорезания покрытия (рис. 3, а), обладающего высокой истирающей способностью, острие из электрокорунда вначале подвергается поверхностному разрушению. Это приводит к его быстрому притуплению и образованию площадок износа. Образование таких площадок способствует увеличению работы трения скольжения и повышению темпе-

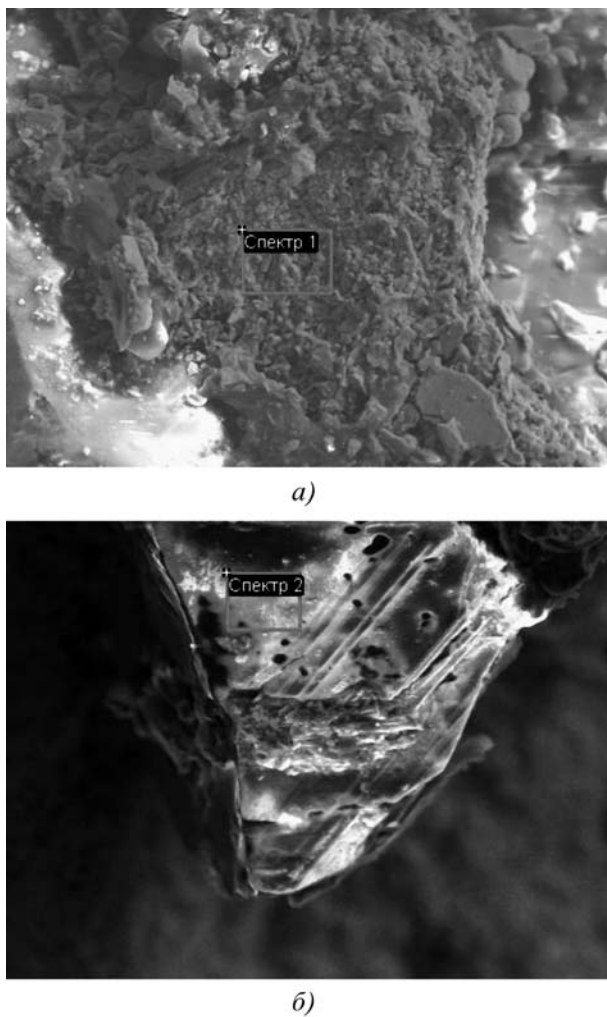


Рис. 3. Участки рабочего микрорельефа абразивного острия из электрокорунда после микрорезания плазменного покрытия (а) ( $\times 1150$ ) и стали 45 (б) ( $\times 1700$ )

ратуры в контакте. Указанные факторы, а также химическое сродство электрокорундов с покрытием приводят к интенсивному налипанию разогретого металла на площадки износа [4]. По мере износа размер площадки и количество налипшего на нее металла увеличиваются.

После микрорезания стали 45 микрорельеф абразивного острия характеризуется чередованием микрорезцов и гладких площадок (рис. 3, б). Следовательно, можно предположить, что и здесь имеет место поверхностное изнашивание абразивного зерна вследствие истирания кромок, приводящее к их приуплению и возникновению площадок износа. Происходит также макроразрушение абразивных зерен в виде поверхностного выкрашивания. Однако интенсивного налипания металла на площадки износа не происходит вследствие инертности электрокорунда к стали 45.

Микрорентгеноспектральные исследования поверхностных слоев острия из электрокорунда подтверждают высказанные предположения. Результаты проведенного микроанализа изменения химического состава рабочих поверхностей электрокорунда после микрорезания покрытия свидетельствуют о наличии никеля в пределах 3...50 % мас., а на отдельных участках более 70 % мас. (рис. 3, а, спектр 1).

Микрорентгеноспектральный анализ рабочей поверхности абразивного острия из электрокорунда, проведенный после микрорезания стали 45, показал наличие железа в пределах 3...16 % мас., а некоторые участки оказались полностью свободными от налипшего металла (рис. 3, б, спектр 2).

Это свидетельствует о более активном физико-химическом взаимодействии электрокорунда с покрытием по сравнению со сталью 45.

### Выводы

1. Микрорезание стали 45 абразивным зерном из электрокорунда сопровождается в значительной степени механическим истиранием его вершин. Это позволило достигнуть чистого микрорельефа рабочей поверхности зерна, характерного для инертного контакта в паре абразив–покрытие.

Следовательно, при взаимодействии электрокорунда со сталью 45 доминирующими процессами являются механические. Это подтверждается данными, полученными в работе [5].

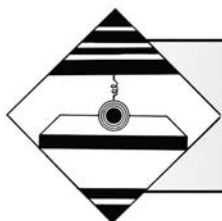
2. Микрорезание покрытия абразивным острием из электрокорунда протекает в условиях адгезионного взаимодействия абразива с покрытием, в результате которого изменяются свойства абразива и возрастает интенсивность его износа.

Следовательно, при взаимодействии электрокорунда с покрытием доминирующими являются физические, химические и механические процессы.

3. Для эффективной абразивной обработки покрытий необходимо провести дальнейшие исследования по микрорезанию с использованием других серийных абразивных материалов, таких как карбиды кремния, эльбор, алмазы и другие с целью поиска таких сочетаний абразив–покрытие, при которых доминирующими процессами должны быть механические, так как управлять ими проще, чем физико-химическими процессами.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черноиванов В.И., Лялякин В.П. Организация и технология восстановления деталей машин. 2-е изд., доп. и перераб. М.: ГОСНИТИ, 2003. 488 с.
2. Надежность и ремонт машин / под ред. В.В. Курчаткина. М.: Колос, 2000. 776 с.
3. Алексеев Н.С., Ольховацкий А.К. Засаливание и износ кругов при шлифовании микропористых покрытий // Технология металлов. 2000. № 1. С. 28–30.
4. Носенко В.А. Шлифование адгезионно-активных металлов. М.: Машиностроение, 2000. 261 с.
5. Саюгин Г.И., Носенко В.А. Шлифование деталей из сплавов на основе титана. М.: Машиностроение, 1987. 81 с.



## Проектирование операций упрочняющей обработки деталей машин методами ППД

*Рассмотрены вопросы структурно-функционального моделирования и проектирования операций упрочняющей обработки деталей машин методами ППД. Изложены основные направления и задачи исследований в области технологии упрочняющей обработки деталей методами ППД, закономерности взаимодействия деформирующего элемента с поверхностью упругопластического тела, условия устойчивости технологической системы обработки деталей методами ППД.*

**Ключевые слова:** проектирование операций, упрочняющая обработка, поверхностное пластическое деформирование, математические модели, управление, устойчивость, выглаживание.

*Problems of structurally functional modelling and designing of operations of strengthening processing of details of machines by methods SPD are considered. Phenomenological and mathematical models of mechanics of superficial plastic deformation elastic-plastic bodies are resulted. Questions of management by accuracy and stability of processes of processing of details methods SPD are investigated.*

**Keywords:** strengthening processing, superficial plastic deformation, mathematical models, management, accuracy, stability, smoothing of roughnesses.

### Введение

Одним из наиболее эффективных путей повышения безотказности и долговечности деталей из высокопрочных сталей и сплавов является применение методов объемной и поверхностной упрочняющей обработки.

Объемное упрочнение повышает статическую прочность деталей, у которых рабочие напряжения распределены по сечению более или менее равномерно. Для деталей, разрушение которых начинается с поверхности, разработано большое количество методов поверхностного упрочнения.

### Системно-структурное и функциональное описания процессов упрочняющей обработки методами ППД

Можно выделить три основных направления исследований в области технологии упрочняющей обработки:

- субстантное;
- структурное;
- функциональное.

*Субстантное направление* связано с поиском физических эффектов и физических принципов действия и исследованием возможности их использования для создания метода упрочняющей обработки и повышения физико-механических свойств материала в целом или поверхностного слоя детали.

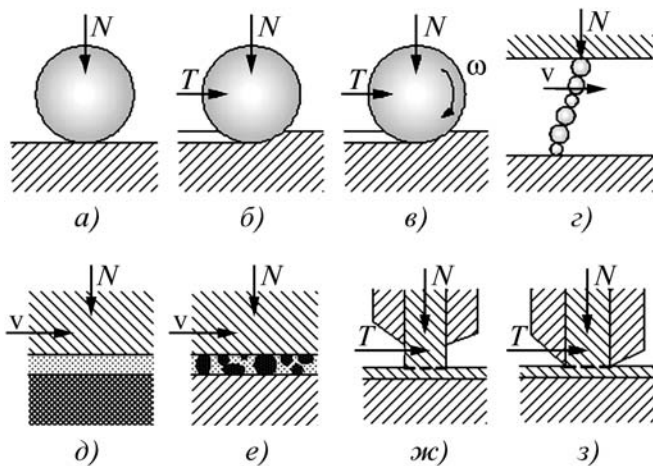
*Структурное направление* связано с созданием и исследованием новых методов упрочняющей обработки путем совершенствования геометрии и конструкции инструмента, кинематических схем обработки в рамках известного физического принципа действия метода упрочняющей обработки.

Наиболее многочисленными и распространенными в машиностроении являются методы упрочнения *поверхностным пластическим деформированием* (ППД), которые подразделяется на сравнительно небольшое число отдельных основных процессов (рис. 1), но почти все они имеют много разновидностей [1–5].

*Функциональное направление* связано с исследованием технологических возможностей, закономерностей и связей между входными и выходными параметрами метода упрочняющей обработки и технологическими условиями обработки.

На рис. 2 показана схема процесса обкатывания полых валов с целью обеспечения нужной точности и шероховатости поверхности с механическими свойствами, не выходящими за допустимые пределы.

Обрабатывается вал радиусом  $R$  и толщиной стенки  $A$  шаром радиуса  $r$  при усилии  $P(t)$ , воздействующем через нажимной конус. При этом шар внедряется на глубину  $h(t)$ , вызывая пластическое деформирование на глубину  $h_s(h)$ , упругий прогиб стенок вала  $u_1(t)$  и нажимного конуса  $u_2(t)$ . Входные параметры характеризуются через  $X(t)$  и выходные – через  $Y(t)$ .



**Рис. 1. Схемы основных процессов ППД:**  
 а – вдавливанием; б – скольжением; в – качением; з – комбинированным контактным воздействием; д – атомарным переносом; е – плакированием; ж – нитрированием; з – истечением слоев материала третьего тела

Под действием силы  $P(t)$  происходит внедрение деформирующего элемента на глубину  $h(t)$ , в результате чего достигается определенная величина степени деформации  $\dot{\epsilon}(t)$  и соответствующее изменение механических свойств, макро- и микрогеометрических параметров.

Модель процесса в функциональном виде показана на рис. 3. Конечными параметрами являются шероховатость поверхности  $Rz'$ , поверхностная твердость  $H_\mu$  и глубина пластической деформации  $h_s$ . Эти параметры достигаются функцией трансформации  $P(t) = f(\dot{\epsilon})$ . На окончательное формирование  $Y(t)$  влияют еще конструкция детали  $u_2(t) = f(A/R)$  и оборудование: параметры инструмента, подача, скорость.

В модели существуют также обратные связи:  
 $F1(t)$  – между выходными параметрами и процессом;

$F2(t)$  – между выходными параметрами и оборудованием;

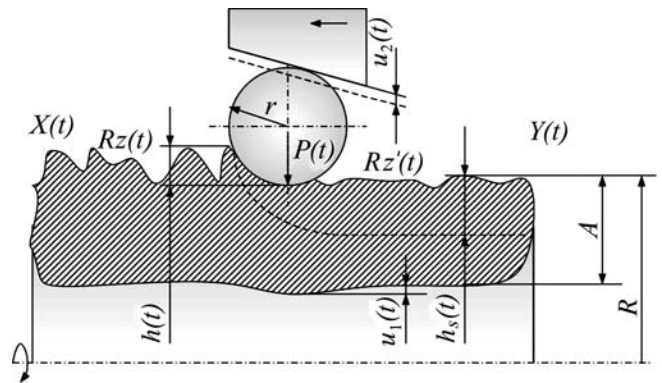
$F3(t)$  – между выходными параметрами и деталью.

Обратные связи осуществляются через следующие функции:

–  $F1(t)$  через фактическую площадь контакта  $F = f[Rz'(t)]$ ; глубину деформации  $h_s = f(\sigma_{0,2})$ ; поверхностную твердость  $H_\mu = f(\dot{\epsilon}, \sigma_{0,2})$ , где  $\dot{\epsilon}$  – степень деформации;  $\sigma_{0,2}$  – предел пропорциональности;

–  $F2(t)$  через высоту микронеровностей  $Rz' = f(S, Rz, r)$ ; поверхностную твердость  $H_\mu = f(\dot{\epsilon})$ ; глубину деформации  $h_s = f(\dot{\epsilon})$ , где  $\dot{\epsilon}$  – скорость деформирования;

–  $F3(t)$  учитывает, что в детали создаются объемные напряжения, в результате чего суммарные напряжения  $\sigma_c = \sigma_k + \sigma_o$ , складывающиеся из контактных и объемных напряжений,



**Рис. 2. Схема процесса обкатывания полого вала**

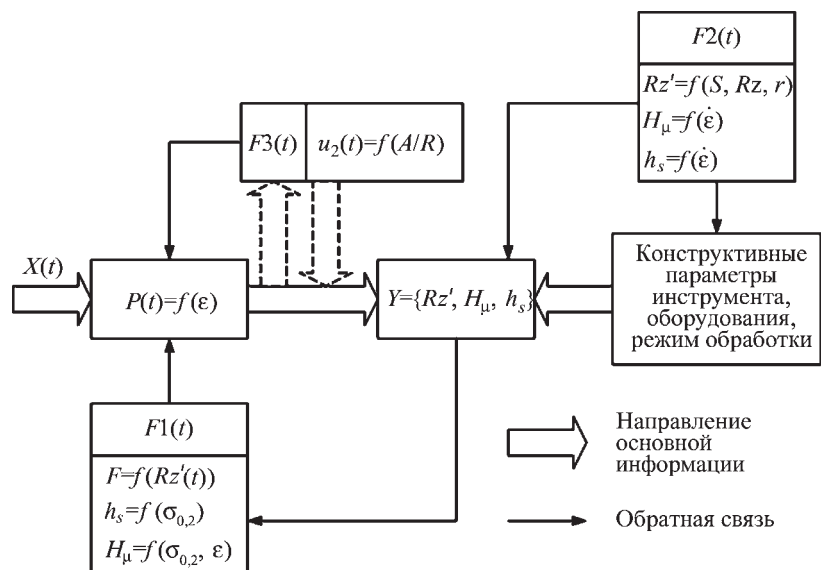
выше расчетного, что требует введения соответствующих корректур.

Все описываемые элементы модели имеют случайный характер ввиду влияния большого количества параметров различного характера. При подборе функций для описания отдельных элементов необходимо найти аналитическое выражение с проверкой влияющих параметров на существенность.

Для решения поставленных задач требуется новый подход. Не имея возможности строгого математического описания отдельных элементов, целесообразно прибегать к их описанию в неявном виде, используя методику планирования эксперимента и статистического аппарата для анализа и оценки.

Определив все элементы модели, учитывая конкретный процесс, возможно проектировать процессы ППД при помощи ЭВМ.

В развитии функционального направления исследования технологии упрочняющей обработки методами ППД важное значение имеют две научные задачи:



**Рис. 3. Схема процесса обкатывания в функциональной форме**

- раскрытие закономерностей механики ППД упруго-пластического тела;

- разработка принципов управления технологическими процессами обработки деталей методами ППД.

Решение данных задач позволит совершенствовать процессы, создавать автоматизированные системы проектирования технологических операций упрочняющей обработки деталей машин методами ППД.

### Закономерности взаимодействия деформирующего элемента с поверхностью упругопластического тела

Многие тела при деформировании проявляют упругие, пластические и вязкие свойства. Для моделирования подобных сложных систем удобно использовать структурные элементы [6, 7], описывающие в отдельности тот или иной физический механизм деформирования (рис. 4).

Упругий механизм деформирования можно моделировать с помощью структурного элемента в виде линейной или нелинейной пружины, сопротивление перемещению которого зависит от жесткости пружины  $C$  (рис. 4, а). Пластический механизм может быть смоделирован с помощью структурного элемента сухого трения ( $P$ ), сопротивление перемещению которого зависит от величины коэффициента сухого трения  $f$  (рис. 4, б). Вязкий механизм можно изобразить с помощью структурного элемента вязкого трения, сопротивление перемещению которого зависит от коэффициента вязкого трения  $v$  и скорости перемещения  $v$  (рис. 4, в).

Рассматривая различные комбинации соединения структурных элементов, можно строить структурные модели тела с различными деформационными свойствами.

После построения структурной модели тела можно получить для этого тела определяющие соотношения, устанавливающие функциональную зависимость между мерами напряженного и деформированного состояния всего агрегата, что является одной из самых сложных задач в механике деформируемого твердого тела (в частности в теории пластичности).

Для построения связи между мерами напряженного и деформированного состояний (и/или их скоростями) упругопластического тела рассмотрим для произвольного момента процесса деформирования двумерную структурную модель тела, включающую все виды структурных элементов и условно изображенную на рис. 5.

В данной схеме внешние упругие элементы моделируют упругое деформирование, а внутренний упругий элемент описывает эффект деформационного упрочнения. Вязкие элементы моделируют скоростное упрочнение (или разупрочнение) материала при деформировании. Вследствие того, что тело считается изотропным, упругие и вязкие свойства тела в обоих направлениях совпадают. Это можно легко смоделировать, задав одинаковые характеристики структурных элементов ( $C$  и  $v$ ).

Обозначим силы, действующие на внешние упругие элементы, через  $P_z$  и  $P_y$ , во внутренних вязких элементах – через  $S_z^v$  и  $S_y^v$ , во внутреннем упругом элементе – через  $S^e$ . Перемещения во внешних упругих элементах обозначим

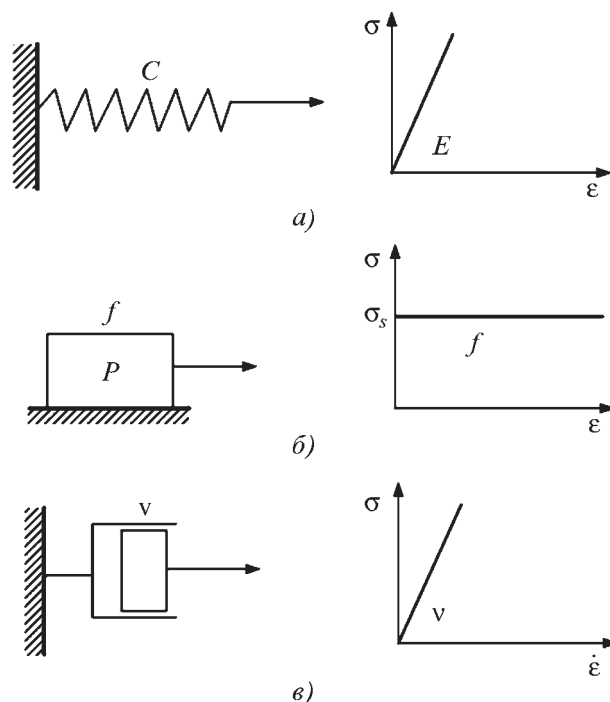


Рис. 4. Структурные элементы деформирования: а – упругий; б – пластический; в – вязкий

через  $l_z$  и  $l_y$ , перемещения пластического элемента – через  $u_z$  и  $u_y$ . Требуется установить функциональную зависимость между внешними воздействиями (усилиями  $P_z$  и  $P_y$ ) и откликом системы (ее перемещениями). Другими словами, необходимо определить функциональную зависимость вида

$$\varepsilon = F(\sigma),$$

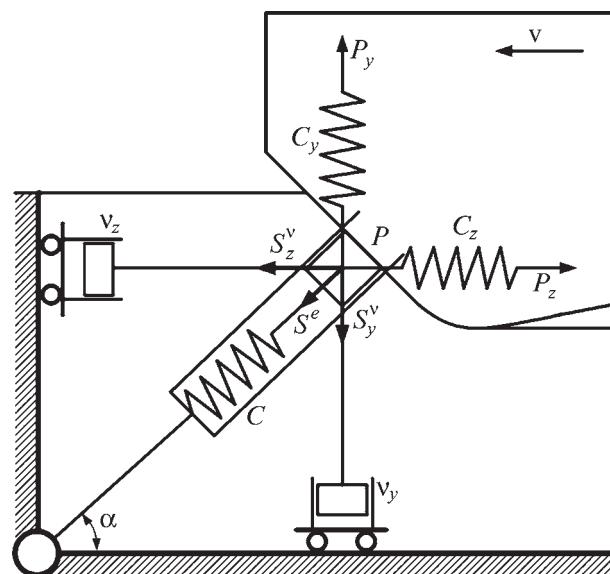


Рис. 5. Двумерная структурная модель ППД упругопластического упрочняющегося тела

где  $\varepsilon$  – некоторая мера деформаций;

$\sigma$  – мера напряженного состояния;

$F$  – неизвестный оператор, вид которого требуется определить. При этом будем считать, что полная деформация складывается из упругой, пластической и вязкой деформаций.

Для нахождения функциональной зависимости (вид оператора  $F$ ) между мерами напряженного и деформированного состояний упругопластического упрочняющего тела воспользуемся построенной структурной моделью. Для внешних упругих элементов можно записать

$$l_z = \frac{1}{C_z} P_z; l_y = \frac{1}{C_y} P_y. \quad (1)$$

Очевидно, что перемещение пластического элемента  $P$  (поршень в цилиндре с сухим трением) будет происходить, когда результирующие силы достигнут некоторого предельного значения:

$$(P_z - S_z)^2 + (P_y - S_y)^2 = K^2, \quad (2)$$

где  $K = \text{const}$  – предельное значение силы сухого трения.

Внутренние силы определяются следующим образом:

$$S_z = S_z^v + S^e \cos \alpha; S_y = S_y^v + S^e \sin \alpha; \text{tg} \alpha = P_y / P_z.$$

Приращение перемещения элемента пластичности происходит по направлению равнодействующей:

$$\frac{\Delta u_z}{P_z - S_z} = \frac{\Delta u_y}{P_y - S_y}. \quad (3)$$

Сила натяжения во внутренней пружине связана с перемещениями следующим образом:

$$S^e = C u. \quad (4)$$

Перемещения вязких элементов связаны с усилиями следующими соотношениями:

$$S_z^v = v \dot{u}_z; S_y^v = v \dot{u}_y. \quad (5)$$

Соотношения (1)–(5) полностью описывают механическое поведение построенной структурной модели. Переходя от усилий к напряжениям, а от перемещений к деформациям, их можно переписать в форме, принятой в теории пластичности [8]. Из условия (2) следует, что существует функция нагружения  $g$ , с помощью которой можно установить момент возникновения пластических деформаций. При этом функция нагружения имеет вид окружности постоянного радиуса  $R$ . Тогда условие (2) можно переписать в виде

$$g(\sigma - S) = R; R = \text{const}, \quad (6)$$

где  $S$  – тензор внутренних напряжений. Это условие известно в теории пластичности как условие пластичности Мизеса [6, 7].

Соотношения (3) показывают, что вектор скоростей пластических деформаций должен быть направлен по нормали к поверхности нагружения  $g$ , что соответствует известному ассоциативному закону пластического течения [6]:

$$d\varepsilon^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma}, \quad (7)$$

где  $d\lambda$  – некоторый множитель.

Тогда определяющие соотношения, соответствующие построенной структурной модели, имеют вид

$$\begin{aligned} d\varepsilon &= d\varepsilon^e + d\varepsilon^p; \\ d\varepsilon^e &= \frac{1}{E} d\sigma; d\varepsilon^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma}; \\ g(\sigma - S) &= R; R = \text{const}; \\ dS &= E_1 d\varepsilon^p; S = v \frac{d\varepsilon^v}{dt}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $E_1$  – модуль упрочнения материала, зависящий от жесткости внутренней пружины и коэффициента вязкого трения.

Система (8) полностью описывает поведение упругопластического тела с учетом эффектов деформационного и скоростного упрочнения. При этом, изменяя параметры системы ( $C$ ,  $C_1$ ,  $v$  и  $f$ ), можно получать различные диаграммы деформирования. Например, задавая жесткость внутренней пружины и коэффициент вязкого трения пренебрежимо малыми, получим модель идеально упругопластического тела. Если, наоборот, эти коэффициенты задать достаточно большими, то пластический элемент "включаться" не будет, и получим модель упругого тела. В случае, когда коэффициент вязкого трения мал, а жесткость внешних пружин выше жесткости внутренней пружины, имеем модель упругопластического тела с линейным упрочнением. И, наконец, можно подобрать коэффициент вязкого трения и жесткость внутренней пружины таким образом, что получим модель упругопластического тела с нелинейным упрочнением.

На показатели качества поверхностного слоя при ППД наибольшее влияние оказывает усилие деформирования, максимальные значения нормальных и касательных напряжений, действующие в точке деформации, а также соотношение их значений, определяющих направление деформаций и перемещений металла в зоне контакта.

Известно, что напряжения непосредственно связаны с перемещениями и скоростями точек деформируемой поверхности, находящимися в зоне контакта. Исходя из этого, решение задачи сводится к нахождению указанной взаимосвязи [3, 4].

При монотонном нагружении поверхности зависимость между напряжениями и деформациями может быть определена из диаграммы растяжения–сжатия, которую называют также кривой упрочнения. Считают, что кривая упрочнения является фундаментальной характеристикой металла, устанавливающей однозначную связь пластических деформаций с напряжениями [6, 8].

Кривые упрочнения аппроксимируются функциями различного вида. Учитывая, что кривая упрочнения имеет

вид явно выраженной степенной зависимости, ее представляют формулой

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^m, \quad (9)$$

где  $A, m$  – константы, зависящие от физико-механических свойств деформируемого материала.

Если получен график кривой упрочнения, то из него

$$m = \left( \ln \frac{\sigma_T}{\sigma_B} \right) / \left( \ln \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_B} \right);$$

$$A = E \varepsilon^{1-m},$$

где  $\sigma_T, \sigma_B, \varepsilon_T, \varepsilon_B$  – соответственно пределы текучести, прочности, а также деформации, соответствующие пределам текучести и прочности;

$E$  – модуль упругости обрабатываемого металла.

Таким образом, для вычисления напряжений по формуле (9) необходимо установить деформации поверхности в зоне контакта или, что то же самое, кинематику точек деформируемой среды.

Так, на основании исследований, приведенных в работе [3], было установлено, что при ППД роликами траекториями точек деформируемой поверхности без учета проскальзывания являются циклоиды, эпициклоиды и гипоциклоиды при обработке плоскостей, валов и отверстий соответственно.

Движение по циклоидам описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} S_z &= r_p [(\varphi_k - \varphi_m) - \sin(\varphi_k - \varphi_m)]; \\ S_y &= r_p [1 - \cos(\varphi_k - \varphi_m)], \end{aligned} \quad (10)$$

где  $r_p$  – изменение радиуса ролика по длине контакта;

$\varphi_k$  – угол контакта, соответствующий полуширине контакта  $z_k$ ;

$\varphi_m$  – параметр семейства, соответствующий текущему значению угла контакта  $0 \leq \varphi_m \leq \varphi_k$ .

Произведя преобразования и проинтегрировав полученные выражения по  $z$  и  $y$ , получим относительные деформации  $\varepsilon_z$  и  $\varepsilon_y$ :

$$\begin{aligned} \varepsilon_z &= \frac{dS_z}{dz} = \left[ \frac{1}{\sqrt{r_p^2 - \frac{(z-z_k)^2}{r_p}}} - 1 \right]; \\ \varepsilon_y &= \frac{dS_y}{dy} = \left[ \frac{z_k - z}{r_p \sqrt{1 - \frac{(z-z_k)^2}{r_p}}} \right], \end{aligned} \quad (11)$$

где  $r_p$  – радиус ролика;

$z$  – изменение текущей характеристики полуширины контакта.

Анализ уравнений (10) и (11) показал, что выбор движения точек деформируемой поверхности по циклоидам яв-

ляется более предпочтительным, так как объясняет некоторые экспериментально полученные результаты [3].

Учитывая связь напряжений с деформациями, определяемую формулой (9), можно определить распределение напряжений по площади контакта на фронтальной поверхности ролика:

$$\sigma_z = A \left[ \frac{1}{1 - \left( \frac{z-z_k}{r_p} \right)^2} - 1 \right]^m; \quad \sigma_y = A \left[ \frac{z_k - z}{r_p \sqrt{1 - \left( \frac{z-z_k}{r_p} \right)^2}} \right]^m.$$

Соответственно нормальные и касательные составляющие силы деформирования можно определить из зависимостей:

$$\begin{aligned} P_z &= A \int_0^{L_k} \left\{ \int_0^{z_k} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(z-z_k)^2}{r_p^2}}} - 1 \right]^m dz \right\} dl; \\ P_y &= A \int_0^{L_k} \left\{ \int_0^{z_k} \left[ \frac{z-z_k}{r_p \sqrt{1 - \frac{(z-z_k)^2}{r_p^2}}} \right]^m dz \right\} dl, \end{aligned}$$

где  $L_k$  – длина контактной зоны;

$l$  – текущее значение длины контактной зоны;

$z_k$  – изменение полуширины контакта:

$$z_k = \sqrt{R_d^2 - \left[ \frac{(R_d + r_p)(R_d - h_k)}{R_d - (r_p - h_k)} \right]^2},$$

где  $R_d$  – радиус обрабатываемой детали.

Таким образом, понимание законов взаимодействия деформирующих элементов с поверхностью детали позволяет получить как закон распределения напряжений в контактной зоне, так и составляющие усилия деформирования, необходимые для достижения оптимального качества обрабатываемой поверхности.

### Анализ устойчивости технологической системы обработки деталей методами ППД

Рассмотрим анализ устойчивости процесса ППД на примере технологического процесса обработки деталей ППД методом выглаживания. При обработке заготовок выглаживанием могут возникнуть колебания инструмента [9–12], которые являются следствием действия переменных нагрузок и обусловлены свойствами упругой системы конструкции станка (недостаточная жесткость, демпфирующая способность и масса).

При выглаживании, как и при обычном резании, на инструмент действуют три составляющие равнодействующей

силы ( $P_R$ ):  $P_x$  – осевая;  $P_y$  – радиальная и  $P_z$  – главная (касательная). Причем текущие значения и соотношения сил  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  меняются за каждый цикл колебания инструмента. В итоге суммарная амплитуда колебаний инструмента может достичь такого значения, что упругая технологическая система может выйти за границу устойчивости. Поэтому при проектировании технологического процесса выглаживания необходимо производить расчет на устойчивость.

Учитывая, что определяющим фактором в формировании и распространении упругих волн в инструменте для выглаживания и в технологической системе являются радиальная и тангенциальная составляющие амплитуды, рассмотрим эти колебания как систему с двумя степенями свободы (рис. 6).

Проанализируем случай, когда инструмент для выглаживания является доминирующей колебательной системой, т.е. он совершает более интенсивные по амплитуде колебания, чем система заготовки. Математическую модель процесса выглаживания составим в виде одномассной динамической модели с заменой распределенных параметров на сосредоточенные (эквивалентные). Для этого введем эквивалентные коэффициенты жесткости ( $C_y, C_z$ ) и сопротивления или демпфирования  $v_y, v_z$  инструмента вдоль осей  $y$  и  $z$  соответственно, а их равномерно распределенную массу заменим эквивалентной массой  $m$  (рис. 6). На рассматриваемую систему действуют силы инерции  $P_{ин}$ , сопротивления (демпфирования)  $P_{сопр}$ , упругости  $P_{упр}$  и выглаживания (равнодействующая)  $P_R$ .

В соответствии с принятыми обозначениями представим действующие на рассматриваемую систему силы в виде векторных выражений.

Для силы инерции:

$$\bar{P}_{ин} = -m(\ddot{y}\bar{j} + \ddot{z}\bar{k});$$

для силы сопротивления (демпфирования):

$$\bar{P}_{сопр} = v_y\dot{y}\bar{j} + v_z\dot{z}\bar{k};$$

для силы упругости:

$$\bar{P}_{упр} = C_y y\bar{j} + C_z z\bar{k},$$

где  $\ddot{y}, \ddot{z}$  – ускорения;

$\bar{j}, \bar{k}$  – единичные векторы;

$\dot{y}, \dot{z}$  – скорости;

$y, z$  – перемещения при выглаживании по осям  $y$  и  $z$  соответственно.

Для рассматриваемой колебательной системы в соответствии с принципом Д'Аламбера имеет место равенство

$$P_{ин} + P_{сопр} + P_{упр} + P_R = 0.$$

С использованием полученных выше аналитических выражений для сил инерции, сопротивления и упругости, движение в плоскости  $yoz$  описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{y} + v_y\dot{y} + C_y y &= P_y(t) \\ m\ddot{z} + v_z\dot{z} + C_z z &= P_z(t) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

При выглаживании  $P_y(t)$  и  $P_z(t)$  определяются соотношениями

$$\left. \begin{aligned} P_y(t) &= P_y - \Delta P_{\Delta a} \sin(\omega t - \varphi) + \Delta P_{\Delta b} \cos(\omega t) \\ P_z(t) &= P_z + \Delta P_{\Delta a} \cos(\omega t - \varphi) + \Delta P_{\Delta b} \sin(\omega t) \end{aligned} \right\}$$

Здесь составляющие силы выглаживания  $P_y(t)$  и  $P_z(t)$  состоят из двух слагаемых: составляющих сил при стационарном процессе  $P_y, P_z$  и сил, появляющихся при возникновении вибраций ( $\Delta P_{\Delta a}, \Delta P_{\Delta b}$  – максимальные составляющие силы выглаживания, обусловленные изменением толщины деформируемого слоя и твердости материала заготовки соответственно).

Фазовый угол определяется выражением

$$\varphi = \pi i,$$

где  $i$  – отношение остатка периода колебаний, не уложившегося во время одного оборота детали, к периоду колебаний. При форме колебаний, близких к гармоническим, максимальные значения новых членов суммы определяются по формулам теории рядов Фурье [9, 10]:

$$P_y = \frac{1}{T} \int_0^T P_y(t) dt;$$

$$\Delta P_{\Delta a} = \frac{2}{T} \int_0^T P_y(t) \sin(\omega t) dt;$$

$$\Delta P_{\Delta b} = \frac{2}{T} \int_0^T P_y(t) \cos(\omega t) dt,$$

где  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  – период вынужденных колебаний;

$\omega$  – круговая частота вынужденных колебаний.

Решение системы уравнений (12) определит дополнительные перемещения инструмента по осям  $y$  и  $z$ . Например, перемещение инструмента по оси  $y$  от действия силы  $P_y(t)$ :

$$y = \frac{P_y}{C_y} + \frac{\Delta P_{\Delta a}}{\sqrt{(C_y - m\omega^2)^2 + 4v_y^2\omega^2}} \sin(\omega t) + \frac{\Delta P_{\Delta b}}{\sqrt{(C_y - m\omega^2)^2 + 4v_y^2\omega^2}} \cos(\omega t);$$

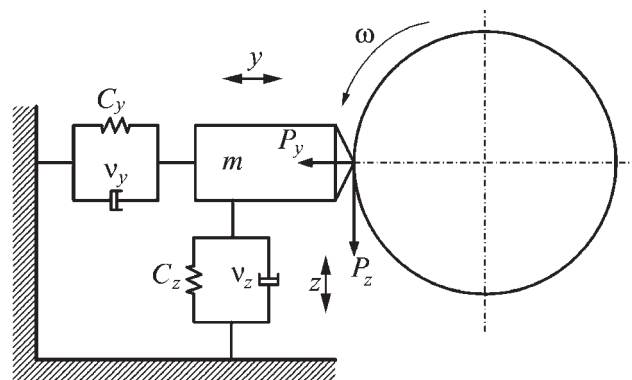


Рис. 6. Расчетная динамическая модель процесса выглаживания



$$y = \frac{P_y}{C_y} + \frac{\Delta P_{\Delta a}}{C_y \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{p^2}\right)^2 + 4 \frac{\omega^2}{p^2}}} \sin(\omega t) + \frac{\Delta P_{\Delta b}}{C_y \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{p^2}\right)^2 + 4 \frac{\omega^2}{p^2}}} \cos(\omega t),$$

где  $p = \sqrt{\frac{C_y}{m}} = \frac{C_y}{v_y}$  – собственная частота колебания упругой технологической системы при отсутствии затухания.

Таким образом, перемещение рассматриваемой парциальной системы представлено суммой трех членов: первый характеризует статическое смещение под действием силы  $P_y$ , второй и третий – перемещения под действием переменных составляющих силы выглаживания, обусловленных изменением толщины деформируемого слоя ( $\Delta P_{\Delta a}$ ) и твердости материала ( $\Delta P_{\Delta b}$ ) заготовки при выглаживании. Аналогичными выражениями определяются перемещения по оси  $z$  от действия силы  $P_z(t)$ .

Общее перемещение инструмента от переменных нагрузок и недостаточной упругости конструкции определяем по принципу суперпозиции.

На рис. 7 показана схема процесса ППД выглаживателем, закрепленным в державке с гидравлическим демпфером. Державка состоит из корпуса 3, поршня 2 со штоком, в котором закреплен выглаживатель 1, пружины 8 и винта 6. Резервуар 5 соединен дросселем 4 с полостью 7, заполненной жидкостью. При перемещении поршня 2 жидкость, перетекая из полости 7 в резервуар 5, создает демпфирующее действие, т.е. дополнительное сопротивление движению поршня. Поршень 2 перемещается под действием упругих сил, действующих со стороны заготовки 9 с одной стороны и пружины 8 – с другой.

Для случая процесса выглаживания детали, закрепленной в центрах с некоторым биением  $\delta$  (см. рис. 7), дифференциальное уравнение, описывающее процесс ППД, будет иметь вид

$$m\ddot{y} + v\dot{y} + C(\Delta + y + \delta \sin \omega t) = -ES(\Delta_1 - y - \delta \sin \omega t) \text{sign}(\Delta_1 - y - \delta \sin \omega t), \quad (13)$$

где  $m$  – приведенная масса инструмента, кг;  
 $v$  – коэффициент демпфирования, Н/(мм/с);  
 $C$  – жесткость пружины, Н/мм;  
 $\Delta$  – предварительный натяг пружины, мм;  
 $\delta$  – биение детали, мм;  
 $\omega$  – угловая скорость детали, рад/с;  
 $E$  – жесткость материала детали на единицу площади деформирования, Н/мм<sup>2</sup>;  
 $S$  – площадь пятна контакта деталь–инструмент, мм<sup>2</sup>;  
 $\Delta_1$  – предварительный натяг инструмента в деталь, мм;  
 $\text{sign}(\dots)$  – единичная функция, описывающая силовое воздействие поверхности детали на инструмент в случае контакта и отсутствие его при отрыве инструмента от детали.

Для того чтобы выявить зависимость деформации  $y$  во время соприкосновения инструмента с обрабатываемой по-

верхностью заготовки и зависимость  $y$  от изменения предварительного натяга пружины  $\Delta$ , выполнено моделирование процесса выглаживания с применением пакета Mathcad.

Для значений

$$\omega = 100 \text{ рад/с}; C = 1000 \text{ Н/мм}; v = 200 \text{ Н/(мм/с)};$$

$$\delta = 0,05 \text{ мм}; \Delta_1 = 0,01 \text{ мм}; ES = 100 \text{ кН/мм}; \Delta = 1 \text{ мм}$$

результаты расчета приведены в графическом виде на рис. 8, а. Там же в том же масштабе времени и перемещений построен график функции

$$y_1(t) = \Delta_1 - \delta \sin \omega t,$$

показывающий положение кромки детали, вращающейся с биением.

В процессе вычислений автоматически рассчитывается значение натяга инструмента в динамике ("+" – натяг, "-" – зазор). Поэтому интересно исследовать динамику изменения натяга. Кривая изменения натяга, построенная на двух предыдущих графиках в том же масштабе времени, может дать интересные сведения о динамике процесса.

Анализ изменения натяга в процессе с угловой скоростью  $\omega = 100$  рад/с показывает невозможность работы на таких частотах вращения деталей, поскольку контакт инструмента и детали не постоянный, а периодически повторяется.

При угловой скорости  $\omega = 20$  рад/с и таких же значениях остальных параметров натяг существует постоянно (рис. 9, а), однако максимальное значение натяга смещено по фазе от максимального приближения поверхности детали к инструменту несколько больше, чем на половину периода, амплитуда колебаний натяга составляет  $\pm 0,0025$  мм. Это вызвано инерционностью системы установок инструмента. Поэтому максимальный натяг будет в зоне наибольшего удаления детали от вершины инструмента и, наоборот, минимальный натяг – в зоне наибольшего приближения. При работе такая система будет не уменьшать биение детали, а, возможно, даже увеличивать.

Изменяя параметры дифференциального уравнения, а следовательно, и реальной системы, можно изменить относительный сдвиг этих кривых и таким образом непосредственно влиять на изменение формы детали.

При использовании гидравлических демпфирующих устройств демпфирующий член уравнения может иметь вид  $Cy^2$ . В уравнении (13) принято допущение, что площадь пятна контакта не изменяется в процессе изменения натяга. Однако при обработке тороидальным или сферическим инструментом с небольшим радиусом ( $r \leq 3$  мм) образующих поверхностей и незначительными натягами, площадь пятна контакта может изменяться приблизительно пропорционально квадрату или даже кубу натяга:

$$S \approx k(1 + \Delta_1 - Y - \delta \sin \omega t)^3. \quad (14)$$

Подстановка этих двух нелинейностей в уравнение (13) существенно усложняет его анализ. В формуле (14)  $k$  принят равным единице. Численное решение уравнения (13) с

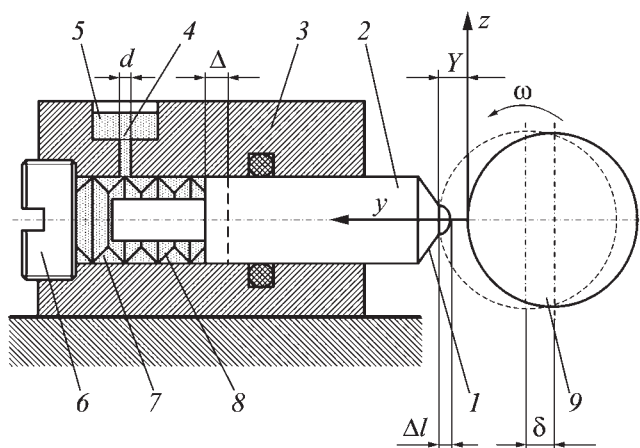


Рис. 7. Схема динамического моделирования процесса ППД выглаживателем с гидравлическим демпфером

нелинейностью (14) при  $k \approx 1$  и  $\omega = 100$  рад/с приведено на графике функции  $Y = Y(t)$ , показанном на рис. 8, б.

Анализ решения уравнения (13) с учетом нелинейностей свидетельствует, что это уравнение более правдоподобно отражает поведение реальной системы, поскольку натяг инструмента не может быть больше нескольких сотых долей миллиметра, поэтому вторая модель в большей степени отражает реальный процесс.

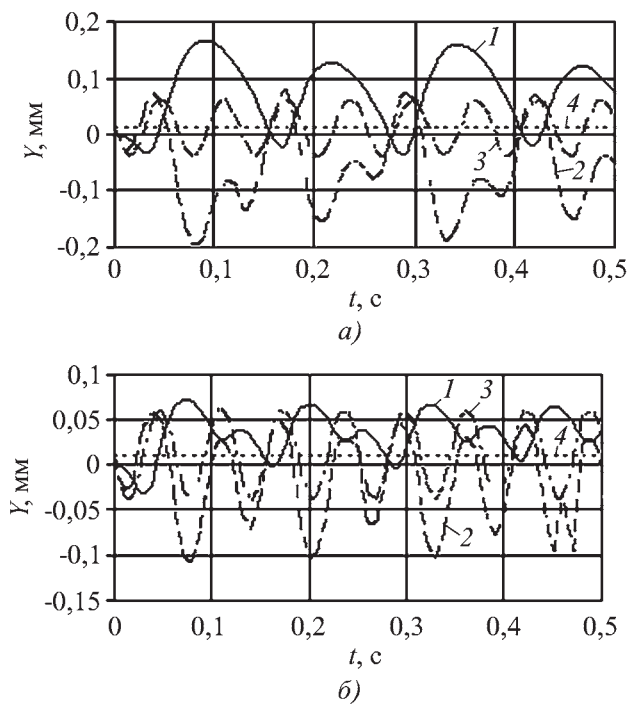


Рис. 8. Изменение натяга и перемещения инструмента по уравнению (13) при  $\omega = 100$  рад/с: а – без учета нелинейности; б – с нелинейностью (14)

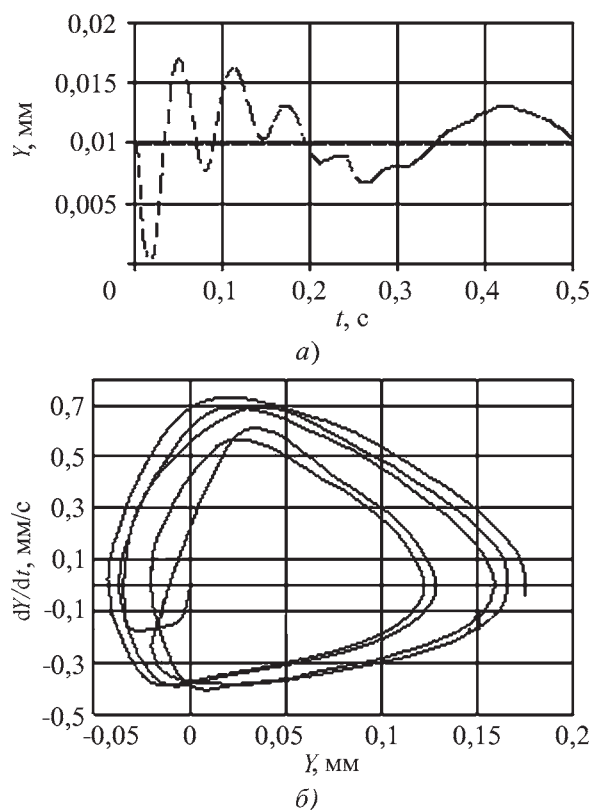


Рис. 9. Изменение натяга в процессе выглаживания при  $\omega = 20$  рад/с (а) и фазовый портрет уравнения движения (13) при  $\omega = 100$  рад/с (б)

Последующий анализ экспериментальных данных и уточнение уравнения (13) позволят создать модель, адекватную реальному процессу. Однако и эти графики могут помочь уточнить модель, определить уравнение периодического решения, а следовательно, спектр частот, приведенную массу системы и т.п.

Решив для каждого отдельного участка движения соответствующее уравнение, предварительно задавшись рядом различных начальных условий, можно построить семейство фазовых траекторий (лист фазовой плоскости). Каждая из фазовых траекторий данного листа изображает движение инструмента в процессе выглаживания для заданных начальных условий (рис. 9, б). Рассматривая движение изображающей точки для различных условий системы, можно выявить так называемые особые точки, а также устойчивые и неустойчивые предельные циклы.

Одним и тем же условиям процесса выглаживания соответствуют два случая:

- процесс устойчив, инструмент при небольших возмущениях возвращается в состояние равновесия;
- процесс неустойчив, инструмент совершает автоколебательное движение с постоянными частотой и амплитудой.

Анализ фазовых траекторий (рис. 9, б) показывает, что система, описываемая уравнением (13), имеет устойчивое положение равновесия, представляет собой предельный цикл, и при любом отклонении начальных условий она с течением времени выходит на этот цикл. Указанный предельный цикл характеризует наличие в системе устойчивых периодических колебаний, к которым система приходит вне зависимости от начального отклонения.

Многолистный фазовый портрет позволяет определить характер колебательного движения инструмента при любых начальных условиях [10–12].

Представленная математическая модель процесса выглаживания дает возможность получать требуемое качество поверхности за счет обоснованного выбора параметров технологической системы.

### Выводы

1. Несмотря на многообразие процессов ППД, они могут описываться математическими моделями, имеющими общую структуру, что позволяет совершенствовать процессы, создавать автоматизированные системы проектирования технологических процессов упрочняющей обработки деталей машин методами ППД.

2. Управляемость и устойчивость технологических процессов обработки деталей методами ППД зависят от режимов обработки и динамических свойств технологической системы.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пла-

стическим деформированием. Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2004. 288 с.

2. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 311 с.

3. Отений Я.Н. Теория и технологическое обеспечение качества деталей машин при обработке поверхностным пластическим деформированием роликами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Ростов-на Дону, 2005.

4. Попов М.Е. Основы САПР технологических процессов упрочняющей обработки: учеб. пособие. Ростов-на-Дону: РИСХМ, 1987. 91 с.

5. Шнейдер Ю.Г. Технология финишной обработки давлением: справочник. СПб.: Политехника, 1998. 414 с.

6. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. М.: Наука, 1983. 279 с.

7. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел. М.: Наука, 1984. 115 с.

8. Теоретические основы процессов поверхностного пластического деформирования / под ред. В.И. Беляева. Минск: Наука и техника, 1988. 184 с.

9. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. М.: Высшая школа, 1980. 408 с.

10. Кузнецов В.П., Горгоц В.Г., Губанов В.Ф., Схиртладзе А.Г. Обеспечение требуемого качества поверхностей деталей на основе управления динамической системой процесса выглаживания: учеб. пособие. Курган: Изд-во Курганского ун-та, 2005. 85 с.

11. Панин В.Е., Зуев Л.Б., Данилов В.И., Мних Н.М. Пластическая деформация как волновой процесс // Доклад АН. 1999. № 2. С. 1375–1379.

12. Свицерский Э.А. Решение технологических задач в машиностроении с применением микрокалькуляторов. М.: Машиностроение, 1987. 160 с.

## Óâàæààì ù á ÷èò àò áèè!

Ī òī āī èæàòñÿ ĩ î āī èñèà

í à í àò÷í í -ò áõí è÷áñèèè è ĩ òí èçáí áñò ááí í ù é æóđí àè

"ÓĪ ĐĪ ×Í ßÛ Ù ÈÁ ÒÁÓÍ Ī ÈĪ ÆÈÈ È Ī Ī ÊĐŪ ÒÈß"

Ī ĩ āī èñí ù á éí ááèñŭ ĩ î èàòàèĭ æāì :

"ĐĪ ñĭ á÷àòŭ" – 85159, "Ī ðáññà Đĭ ññèè" – 39269, "Ī ĩ ÷òà Đĭ ññèè" – 60252.

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

Đĭ ññèÿ, 107076, Ī ĩ ñèáà, Ñò đĭ ĩ ù í ñèèé ĩ áđ., á. 4,

Ī Ī Ī "Èçàò àèŭñò áí ĩ àò éí í ñò đĭ áí èà"

Òàè.: (499) 269-66-00 (ĭ òááè ðáàèèçàòèè), (499) 268-40-77 (ðáààèèòèÿ);

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

# Ирина Николаевна ЖЕСТКОВА (1937–2010)



23 èp í ý í à 74-ì ā äó æçì è ñēí í ÷àèàñü Èðēí à Í è-  
ēí èääáí à Æāñōēí āà – æàáí ú è ðāāàèōí ð èçāàòàèüñòāà  
"Í àø èí í ñòðí áí èà", æàáí ú è ðāāàèōí ð æòðí àēí à "Ñí ðā-  
āí ÷í èē. Èí æáí áðí ú è æòðí àē", "Òðáí èà è ñí àçèà á í àø è-  
í àø è í àðáí èçí àð", çàì . æàáí í ā ðāāàèōí ðà æòðí àēí à  
"Āāñōí èē ēí ì ì üp òáðí ú ò è èí ò í ðì àòēí í í ú ò òáðí í ēí æē",  
"Ñáí ðèà á ì àø èí í ñòðí áí èē è ì ðèáí ðí ñòðí áí èē", "Ó ðí ÷-  
í ýp ù èà òáðí í ēí æē è ì í ððú òèý", ÷-èáí ðāāàèōēí í í ú ò ñí -  
āáðí á æòðí àēí à "Çāā òí àèòàèüí ú á ì ðí èçāí āñòāà á í àø è-  
í í ñòðí áí èē", "Èí í òðí èü. Āèāā í ñòèèà".

Ā 1963 ā Ē.Í . Æāñōēí āà çàēí í ÷-èèà ì ĀÓÓ èì . Í . Ý . Āáó-  
í áí à ì ì ñí àòèàèüí í ñòè "Í àø èí ú è òáðí í ēí æē èèòáēí í ā ì ðí èçāí āñòāà" ì àðáí èēí -òáðí í ēí æ-āñēí ā  
ò àèóèüòàòà è ñðāçó æá ì ðèø èà í à ðááí òó á èçāàòàèüñòáí . Í āāp æéí í ú è òí á ñí ÷-àòáí èē ñ áí áðí ñí āà -  
ñòí ú ì í òí í ø áí èàì è ðááí òá ì í çāí èèèè áé óæá ÷-áðāç āāà ā àà ñòàòú ñòàðø èì ðāāàèōí ðí ì ðāāàèōèèè  
"Āí ðý-àý í áðááí òèà ì àòàèèà", à áú á ÷-áðāç òðè ā àà — í àó-í ú ì ðāāàèōí ðí ì .

Ā 1976 ā Ē.Í . Æāñōēí áó í àçí à-āp ò çāāāáóp ù áé ðāāàèóèáé ñí ðááí ÷-í í é èèòáðàòòðú . Ì í æí ááç  
í ðáóááèè-áí èý ñèàçàòú, ÷-òí ñ Èðēí í é Í èēí èääáí í é ðááí òàè āāñü òáàò òáðí è-āñēí é è í àó-í í é èí òàè -  
èèæáí òèè ðí ññèè . ðááí òàèè, òáí èèè è áí í ñèāāñòáèè ñòāāàèèñü áðóçüýì è àèàááí èèè, ì ðáí í áāāàòà -  
èè, ðóēí áí àèòàèè ì ðááí ðèýòèè è āñí èðáí òú .

Ā 1983 ā Ē.Í . Æāñōēí āà òáí ñòí áí à ì ì ÷-àòí í ā çāáí èý "Í òèè-í èēí á-àòè", á ýòí æá ā áó ì í èó-èèà  
Ñāðááðýí óp ì áààèü ĀĀÍ Ō çà ñí ðááí ÷-í èè "Èñí ú òàòàèüí àý òáðí èèà". Èí èæ, ì ðāāàèòèðí ááí í ú á Èðè -  
í í é Í èēí èääáí í é, í á ðāç í í èó-àèè ì áààèè ĀĀÍ Ō .

Ā 1996 ā Ē.Í . Æāñōēí āà ñòèà æàáí ú ì ðāāàèōí ðí ì ðāāàèóèè ýí òèèèí í áàè-āñēí é è ñí ðááí ÷-í í é  
èèòáðàòòðú . Āp áú èà çàáòí áí à è ì ì ÷-òè ì í èí í ñòp áú ì òú áí à á ñáàò óí èèàèüí àý ñí ðí èàòí ì í àý ýí -  
òèèèí í áàèý "Í àø èí í ñòðí áí èà".

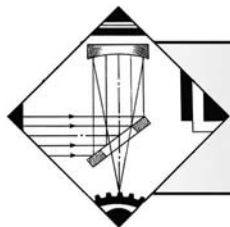
Í í èí èèòàèèáá è ì ðè í áí í ñòāāñòááí í ì ò-āñòèè Èðēí ú Í èēí èääáí ú óàèááèè ñáàò òàèèà áāñòñáè -  
èáðú òáðí è-āñēí é èèòáðàòòðú , èàè "Ñí ðááí ÷-í èè ēí í ñòðóèóí ðà-ì àø èí í ñòðí èòáèý" Ā.È. Áí òðúáàà (òðè  
òí ì à), "Í àðí ÷-í èè ñòàèáé è ñí èááí á", "Ñí ðááí ÷-í èè òáðí í ēí æ-ì àø èí í ñòðí èòáèý" (áàà òí ì à), "Í áú á -  
òáðí è-āñēèè ñí ðááí ÷-í èè", "Ñí ðááí ÷-í èè ì àòàèèèñòā" á ì ýðè òí ì àð, "Āèáðàòèè à òáðí èèà" á ø ñòèè òí -  
ì àð, "Ñí ðááí ÷-í èè èèòáèü èèà" Í .Ā. Í ðēí áà, Ā.Í . ×òðñēí à, "Ñēí áàðü-ñí ðááí ÷-í èè ì ì ì àðáí èçí àí " Ā.Ō. Èðáēí áàà, "Ñí ðááí ÷-í èè ì ì æèüááí í ì í èðú òèýì á ì àø èí í ñòðí áí èè" Í .N. Ì áèüí èēí áà, "Ñí áòèàèü-  
í ú á ñí ì ñí áú èèòüý", "Í áðāçðòø áp ù èè ēí í ððí èü è àèāā í ñòèèà" ì ì á ðáá. Ā.Ā. Èèp áàà, "Ñáàðèà, ðāçèà,  
ēí í ððí èü" ì ì á ðáá. Í .Í . Āèāø èí à è ĀĀ ×áðí ú ò í áà á ááóò òí ì àð, "Āàéóóí í àý òáðí èèà", "Āàèü è ì ì ì -  
ðú ñí ì àø èí í èèàì è èà-áí èý. Èí í ñòðóèðí ááí èà è ðāñ-áð" Í .Í . Èáèèè áà è ì í í æá áðóæá ñí ðááí ÷-í èèè,  
í àó-í í -òáðí è-āñēèà èçāáí èý, ó-ááí èèè è ó-ááí ú á ì ì ñí àèý áèý ì ì áā òí áèè ñí àòèàèèñòí á á ì áèāñòè  
ì àø èí í ñòðí áí èý, ì ðèáí ðí ñòðí áí èý, ì àòàèéóðæè, áàèàòèí í í í é è ēí ñí è-āñēí é òáðí èèè, áàèæáðáèá -  
ñòðí áí èý.

Í ì á áà ðóēí áí ñòáí ì áú ì òñèàèèñü ēí èæ ñáðèè "Āèáèèí òáèà ēí í ñòðóèóí ðà", "Āèáèèí òáèà òáðí í ēí æá",  
"Āèáèèí òáèà èí ñòðóí áí òàèüü èèà", "Ñáðèý ñí ðááí ÷-í èēí á àèý ðááí ÷-èð", ðýä í àó-í í -òáðí è-āñēèò æòð -  
í àēí á.

Āí áðí òà, ì òçú á-èáí ñòú, ì ì ðýáí ÷-í í ñòú, ì ðí ò áññēí í àèèçí è í áááðí ýòí àý ýí áðæý Èðēí ú Í èēí èà -  
ááí ú ñí èñèàèè óáàæáí èà è èp áí áú āñāā ēí èèáèòèèè èçāàòàèüñòáà è ì æí ì í í ā ÷-ñèèà ááòí ðí á.

**Ñáàò èàý ì àí ýò ú ì Í Èðēí á Í èēí èääáí á Æāñō ēí áí é í áāñāāāá í ñò áí áò ñý á í àø èò ñáðáòàò.**

**Í àí ýò ú ì í ì ðáèðáñí ì ì ÷-áēí ááèá, ì ðí ò áññēí í áèá ñáí ááí ááèá, í àó-èáø àí í áñ í á ò í èüēí  
áí áðí ñí áāñò í í ðááí ò àò ú, í í è òáí èò ú, è èp áèò ú ì èðóæáð ù èò.**



## ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

УДК 621.793

Д.В. Духопельников, М.К. Марахтанов, А.К. Мелик-Парсаданян (МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
E-mail: duh@power.bmstu.ru

### Электрические параметры и массоперенос в вакуумно-дуговом разряде с монокристаллическим кремниевым катодом

*Получена вольт-амперная характеристика вакуумно-дугового разряда на кремниевом катоде  $p$ -типа в диапазоне токов от 50 до 170 А. Определены угловое распределение потока массы из кремниевого катода и коэффициент эрозии кремния, который в 6 раз превосходит коэффициент эрозии титана при тех же условиях разряда.*

**Ключевые слова:** дуговой разряд низкого давления, вакуумнодуговой испаритель, кремний, коэффициент эрозии.

*The current-voltage characteristic of the vacuum arc discharge on  $p$ -type silicone cathode on current from 50 to 170 A was obtained. The angle distribution of mass flow from the cathode and the erosion rate of the silicone and the silicone erosion coefficient in 6 times more than titanium one in the same condition were calculated.*

**Keywords:** low pressure arc discharge, vacuum arc gun, silicon, erosion coefficient.

#### Введение

Кремний широко используется при производстве элементов микроэлектроники и фотопреобразователей. В настоящее время кремний начинают использовать для нанесения наноструктурированных и нанокompозитных износостойких покрытий в машиностроении [1]. Для нанесения таких покрытий используют метод магнетронного [2] и вакуумно-дугового испарения [3].

Известно, что вакуумно-дуговое испарение обеспечивает максимальную скорость роста при приемлемом качестве покрытия. Разработчиков вакуумно-дуговых испарителей прежде всего интересует скорость эрозии катода в вакуумно-дуговом разряде и электрические параметры этого разряда. Однако работы, связанные с изучением дуги на кремниевом катоде, посвящены в основном исследованию состава и свойств плазмы дугового разряда [4, 5].

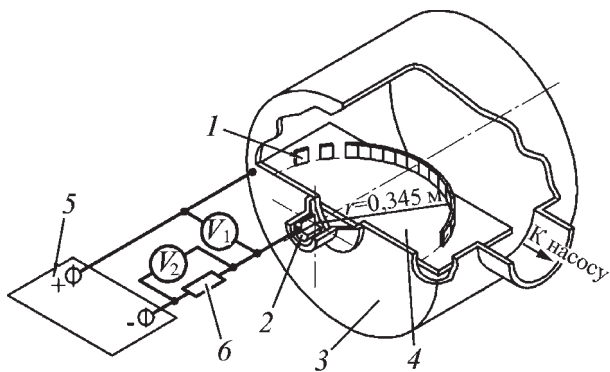
Вакуумно-дуговой разряд на кремнии имеет некоторые отличия от такого же разряда на металлическом катоде. Экспериментально установлено, что плотность тока в катодном кратере вакуумной дуги на кремниевом катоде составляет  $4,37 \cdot 10^8 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$ . Это в 3,6 раза меньше, чем соответствующая плотность тока титанового катода. При этом время жизни катодного пятна на кремниевом катоде в 3,2 раза меньше, чем на катоде из титана [6].

В данной работе получена вольт-амперная характеристика вакуумно-дугового разряда на кремниевом катоде  $p$ -типа, определены угловое распределение потока массы из кремниевого катода и коэффициент эрозии кремния.

#### Методы исследований

Эксперименты проводили в установке вакуумного напыления УВН 70-А2 с камерой диаметром 700 мм и длиной 700 мм. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Для испарения кремния использовали вакуумно-дуговой испаритель с торцевым катодом диаметром 78 мм. Разряд питался от сварочного выпрямителя ВД-306. Остаточное давление в камере составляло  $5 \cdot 10^{-3}$  Па. Для стабилизации разряда при токах дуги менее 70 А применяли аргон. Давление аргона в камере составляло  $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па. При работе дуги внешнее магнитное поле не использовали.

Дуговой разряд зажигали с помощью импульсного коаксиального инжектора плазмы. Катод был выполнен из монокристаллического кремния с проводимостью  $p$ -типа. Кремниевый диск диаметром 76 мм и высотой 18 мм был припаян к массивной медной подложке припоем ПОС-61. На поверхность кремния, предназначенную для пайки, был нанесен магнетронном в вакууме переходный слой из комбинации четырех металлов: железо, хром, никель, медь. Затем этот



**Рис. 1. Схема экспериментальной установки:**  
 1 – напыляемые образцы; 2 – катод дугового испарителя;  
 3 – вакуумная камера; 4 – горизонтальная пластина; 5 – сварочный выпрямитель ВД-306; 6 – шунт

слой покрыли оловянным припоем толщиной около 0,1 мм. Медную шайбу фиксировали в катодном узле дугового испарителя и охлаждали водой с температурой 15 °С. Анодом служила поверхность вакуумной камеры.

Ток разряда определялся измерением падения напряжения на шунте, включенном в цепь катода (см. рис. 1). Напряжение разряда измеряли между камерой и катодом в точках подключения токоподводов.

Для определения коэффициента эрозии обычно используют метод измерения массы, унесенной с катода, с помощью взвешивания [7]. Для повышения точности измерения увеличивают время горения дугового разряда. Как оказалось, при длительной работе и, особенно сильно, при выключении разряда кремниевый катод крошится [6], что исключает возможность точного измерения массы испаренного вещества. Поэтому в данной работе применили метод косвенного измерения коэффициента эрозии. Для этого было определено угловое распределение потока испаренного материала, отнесенное к току разряда, а затем интегрированием полученного распределения, с учетом материала, осевшего на элементах конструкции испарителя, определяли коэффициент эрозии.

Угловое распределение потока испаренного материала определяли путем взвешивания массы покрытия, нанесенного на стеклянные образцы-свидетели. Схема расположения образцов 16 шт. в камере показана на рис. 1. Стеклянные прямоугольные образцы размером 50×65 мм размещали на горизонтальной стеклянной пластине. Образцы располагали на окружности радиусом 345 мм с центром, совпадающим с центром катода, и устанавливали перпендикулярно к потоку испаренного кремния. Горизонтальную пластину располагали на 25 мм ниже оси катода, таким образом, чтобы плоскость, проходящая через центры

вертикально стоящих образцов, проходила через центр катода.

Перед нанесением покрытия каждый образец тщательно промывали теплой водой с моющим средством, сушили и взвешивали. После нанесения покрытия измеряли площадь покрытия на образце  $\Delta S$  и проводили повторное взвешивание. По разности определяли массу кремния  $\Delta m$ , нанесенную на каждый образец за время  $\Delta t$ . Взвешивание проводили на весах ВЛА 200-г-М. Погрешность определения точности массы  $\pm 0,2$  мг ( $\pm 2 \cdot 10^{-7}$  кг). Время нанесения покрытия составляло 2 мин при токе 100 А.

Угловое распределение потока материала, отнесенное к току разряда  $f(\varphi)$ , определяли как массовый расход кремния  $dm/dt$ , перенесенный из катода в телесный угол  $d\omega$  и отнесенный к току разряда  $I_p$ . При этом

$$d\omega = dS/R^2,$$

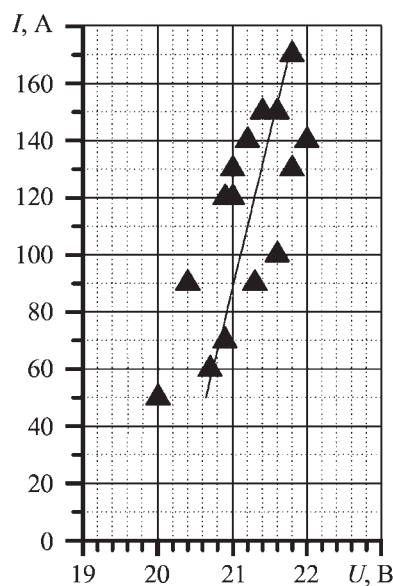
где  $dS$  – площадь образца;

$R$  – радиус, на котором располагались образцы. Угол  $\varphi$  равен углу между направлением телесного угла и нормалью к плоскости катода:

$$f(\varphi) = \frac{dm}{I_p dt d\omega} = \frac{R^2 dm}{I_p dS dt}. \quad (1)$$

### Результаты исследований

Вольт-амперная характеристика разряда приведена на рис. 2. На кремниевом катоде дуга горит при больших, по сравнению с титановым катодом, напря-



**Рис. 2. Вольт-амперная характеристика вакуумно-дугового разряда на кремниевом катоде в диапазоне тока разряда 50...170 А и давлении 0,04 Па**

Угловое распределение потока кремния, отнесенное к току разряда

№ образца	Угол $\varphi$ (от нормали к катоду), °	Площадь покрытия $S \cdot 10^3$ , м <sup>2</sup>	Масса покрытия $m \cdot 10^6$ , кг	Угловое распределение потока кремния, отнесенное к току разряда $f(\varphi)$ , $\cdot 10^8$ кг/(Кл·ср)
1	-70	2,68	0,2	0,07
2	-50	2,73	2,8	1,02
3	-42	2,45	28,3	0,11
4	-33	2,66	16,8	6,27
5	-23	2,55	18,7	7,27
6	-14	2,52	19,8	7,81
7	-6	2,41	21,6	8,87
8	3	2,32	20,3	8,66
9	15	2,40	21,5	8,88
11	24	2,48	21,5	8,60
12	34	2,54	21,9	8,56
13	42	2,42	19,5	8,00
14	52	2,43	18,2	7,42
15	60	2,51	11,1	4,39
16	70	2,61	8,2	3,11
Анод	65...90, -65...-90	451	1373	3,02

жениях. При токе разряда  $I_p = 100$  А напряжения на кремниевом и титановом катоде составляют  $U_{Si} = 20,3$  В и  $U_{Ti} = 17,8$  В.

В таблице приведены результаты измерений и расчета по уравнению (1). Диаграмма углового распределения потока кремния, отнесенного к току разряда, измеренного экспериментально, представлена на рис. 3. Из рисунка видно, что поток испаренного кремния распределяется по закону, близкому к косинусоидальному закону:

$$f(\varphi) = f_{\max} \cos(\varphi), \quad (2)$$

где  $f_{\max}$  – максимальная плотность потока кремния при  $\varphi = 0$ .

Коэффициент эрозии  $\chi$  кремния определяли по известному угловому распределению потока как

$$\begin{aligned} \chi &= \frac{dM}{J_p dt} = \int_S f(\varphi) d\omega = \int_0^{\pi/2} \frac{f(\varphi)}{R^2} dS(\varphi) = \\ &= \sum_0^{\pi/2} \frac{f(\varphi)}{R^2} \Delta S(\varphi) = \sum_0^{\pi/2} f(\varphi) 2\pi \sin \varphi \Delta \varphi, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\frac{dM}{dt}$  – масса материала, испаренного с катода в единицу времени;

$\Delta S(\varphi)$  – площадь кольцевого сегмента, лежащего на полусфере с радиусом  $R$  с шириной  $R\Delta\varphi$  (рис. 4).

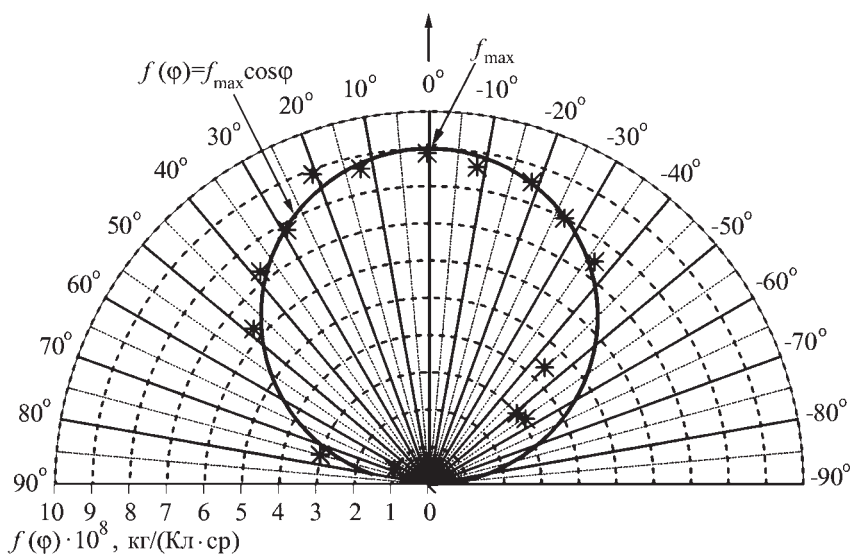


Рис. 3. Угловое распределение потока кремния, отнесенное к току разряда

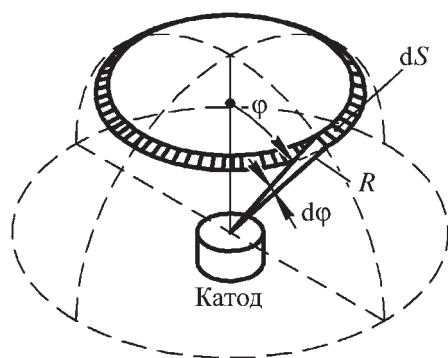


Рис. 4. Схема численного интегрирования потока распыленного материала

Численное интегрирование экспериментальных результатов по формуле (3) дало значение коэффициента эрозии для кремния  $\chi = 3,05 \cdot 10^{-7}$  кг/Кл, что примерно в 6 раз превосходит коэффициент эрозии для титана ( $\chi = 5,2 \cdot 10^{-8}$  кг/Кл).

Если подставить в (3) выражение (2), то для коэффициента эрозии будет справедливо:

$$\chi = \int_0^{\pi/2} f(\varphi) 2\pi \sin \varphi d\varphi = 2\pi f_{\max} \int_0^{\pi/2} \cos \varphi \sin \varphi d\varphi = \pi f_{\max}. \quad (4)$$

Как следует из таблицы,  $f_{\max} = 8,88 \cdot 10^{-8}$  кг/(Кл·ср) и согласно (4)  $\chi = 2,79 \cdot 10^{-7}$  кг/Кл.

### Обсуждение результатов исследований

Вид углового распределения потока испаренного (распыленного) материала может косвенно говорить о механизмах эмиссии частиц из тела.

Распределение потока испаренного материала по косинусоидальному закону наблюдается при термическом испарении вещества. Такое распределение было обосновано и экспериментально подтверждено Кнудсенем [8]. Кнудсеновское распределение обуславливается равновероятным распределением испаренных атомов по скоростям и направлениям при тепловом механизме испарения.

Исследования угловых распределений распыленного вещества при ионном распылении показали отличие от косинусоидального закона [8]. Причем на монокристаллических катодах распределение распыленного вещества зависит от угла падения ионов и обнаруживает максимумы вдоль плотно упакованных направлений кристалла [9]. На поликристаллических материалах распределение распыленного вещества представляет осреднение распределений от различно ориентированных кристаллов и при нормальном падении ионов приблизительно описывается косинусоидальным законом. Это опровергало предположе-

ния о термической природе эмиссии частиц катода при ионной бомбардировке [8].

Распределение потока испаренного материала исследовали также в дуговых испарителях с холодным поликристаллическим металлическим катодом (Ti, Cd, Cu, Mo) [7]. Выявлено, что поток испаренного металла распределяется по близкому косинусоидальному закону. Установлено, что процессы генерации вещества с поверхности холодного катода в вакуумно-дуговом разряде имеют тепловую природу. Это может объяснить косинусоидальный закон распределения потока испаренного материала.

Поскольку косинусоидальное распределение обуславливается равновероятным распределением испаренных атомов по скоростям и направлениям, то испарение испытуемого монокристаллического кремниевого катода и испарение известных охлаждаемых металлических катодов имеют общую физическую природу и определяются тепловыми процессами в кратере катодного пятна. Возможным механизмом плавления материала катода может быть неравновесный фазовый переход металла в жидкое или парообразное состояние, который вызван прохождением электрического тока высокой плотности в катодном кратере вакуумной дуги [10].

Высокий коэффициент эрозии кремния может быть обусловлен повышенной температурой катода в области катодного кратера [6].

### Выводы

1. Вольт-амперная характеристика вакуумно-дугового разряда с полупроводниковым кремниевым катодом аналогична вольт-амперной характеристике такого же разряда с металлическим катодом, но сдвинута в область больших напряжений.
2. Коэффициент эрозии для кремния примерно в 6 раз превосходит коэффициент эрозии для титана.
3. Поток кремния, испаренного с катода в вакуумно-дуговом разряде, распределяется по косинусоидальному закону.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Veprek S., Jilek M. Superhard nanocomposite coatings. From basic science toward industrialization // Pure Appl. Chem. 2002. V. 74. N. 3. P. 475–481.
2. Barshilia Harish C., Deepthi B., Rajam K.S. Deposition and characterization of TiAlN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> superhard nanocomposite coatings prepared by reactive direct current unbalanced magnetron sputtering // Vacuum Surface engineering, surface instrumentation & vacuum technology. 2006. V. 81. P. 479–488.
3. Андреев А.А., Саблев Л.П., Шулаев В.М., Григорьев С.Н. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. Харьков: ННЦ "ХФТИ", 2005. 236 с.



4. Bilek M., Chhowalla M., Weiler M., Milne W.I. Ion energy and plasma characterization in a silicon filtered cathodic vacuum arc // Journal of Applied Physics. 1996. N. 3. V. 79.

5. Bilek M., Martin P.J., McKenzie D.R. Influence of gas pressure and cathode composition on ion energy distributions in filtered cathodic vacuum arcs // Journal of Applied Physics. 1998. N. 6. V. 83.

6. Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Жуков А.В. и др. Вакуумная дуга с монокристаллическим кремниевым катодом для получения наноструктурированных материалов // Справочник. Инженерный журнал. 2008. № 9 (138). С. 22–27.

7. Хороших В.М. Капельная фаза эрозии катода стационарной вакуумной дуги // ФИП. 2004. Т. 2. № 4. С. 200–212.

8. Технология тонких пленок (справочник) / под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга; пер. с англ. под ред. М.И. Елинсона, Г.Г. Смолко. М.: "Сов. радио", 1977. Т. 1. 644 с.

9. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой: физ. распыление одноэлементных твердых тел / пер. с англ. под ред. Р. Бериша. М.: Мир, 1984. 336 с.

10. Марахтанов М.К. Металл как источник энергии // Известия академии наук: Энергетика. 2009. № 1. С. 79–90.

УДК 621.9.047.7

Е.В. Илюшечкин, Д.В. Витальский, А.Г. Абрамов (Тулльский государственный университет)  
E-mail: eilyushechkin@yandex.ru

## Методологический подход при моделировании процесса упрочнения посредством ионной имплантации

*Предложен методологический подход к вопросу разработки компьютерной динамической модели процесса упрочнения посредством ионной имплантации, которая позволит учесть как потери энергии частиц при их столкновении, так и их взаимодействие в равновесном состоянии.*

**Ключевые слова:** упрочнение, ионная имплантация, поверхностный слой.

*The methodological approach to a question of development of computer dynamic model of the process of hardening by means of ionic implantation which will allow to consider both the loss of energy of particles at their collision, and their interaction in an equilibrium condition is offered.*

**Keywords:** hardening, ionic implantation, coating surface.

### Введение

Технологические методы, связанные с использованием ионизированных атомов для упрочняющей обработки поверхностей, например имплантация азота в поверхностные слои различных материалов на основе стали, никеля, титана и алюминия, хорошо освоены современной промышленностью [1, 2].

Разделение функций между поверхностным слоем и основным материалом, из которого изготовлена деталь, позволяет расширить номенклатуру использования упрочняющих методов. Дозированная перестройка кристаллической решетки при ионной имплантации, например азота, открывает широкие возможности в формировании поверхностных слоев с уникальными физическими, химическими и механическими свойствами, позволяющими реализовывать их гетерогенность для обеспечения минимальной подвижности дислокаций. Последнее является одним из важных факторов, обеспечивающих высокую степень упрочнения поверхностных слоев.

В свою очередь, развитие методов упрочнения в настоящее время требует не только поиска новых тех-

нических решений известных задач, но и глубокого физического понимания явлений, сопутствующих различным технологическим методам. Это обстоятельство связано с необходимостью предсказания как свойств отдельных элементов конструкций и конструкции в целом, так и с необходимостью управления различного рода процедурами, направленными на достижение заданных свойств поверхностного слоя деталей.

В настоящее время нет единого подхода к вопросу назначения режимов упрочнения металлов и сплавов с использованием ионной имплантации азота. Это объясняется неоднозначностью теоретической оценки изменения прочности поверхностного слоя обрабатываемых материалов, которая основывается на:

- оценке свободного пробега и пространственного распределения имплантированных частиц;
- единстве критерия выбора потенциала взаимодействия между имплантируемыми частицами и атомами мишени.

Очевидно, что исследование свойств материалов на микро- и наноуровнях вынуждает учитывать эффекты, связанные с взаимодействием отдельных ато-

мов, кластеров и других агрегатов. Это также приводит к необходимости расчета характеристик межатомного и межмолекулярного взаимодействия. В настоящее время описание межатомного взаимодействия принято осуществлять с использованием так называемых потенциальных функций, которые характеризуют силу взаимодействия между частицами.

Все существующие модели носят приближенный характер и учитывают в основном отталкивающую часть взаимодействия между ионами азота и атомами металлической решетки, что не отражает реальный характер протекания данного процесса [3, 4].

Глубина проникновения ионов оценивается средней длиной проекционного пробега иона в материале мишени [4]. Тем не менее на глубине более  $R_p$  может находиться количество ионов, достаточно сильно влияющее на физико-механические свойства легированного слоя.

Принято считать, что профиль концентрации распределения имплантированных ионов симметричен относительно средней длины пробега  $R_p$ . Однако такое предположение нуждается в экспериментальной проверке.

Основная сложность в создании модели, описывающей физический процесс ионной имплантации азота и рассеивания материала матрицы, заключается в следующих вопросах:

1. На каком уровне следует рассматривать?
2. Как учитывать наличие примесей в металлах?
3. Какая наиболее приемлемая форма кристаллической решетки мишени?
4. Какие необходимо учитывать связи взаимодействия атомов мишени и ионов пучка?
5. Какую выбрать потенциальную функцию взаимодействия?

**Целью работы** является выработка методологического подхода качественной разработки компьютерной динамической модели процесса упрочнения посредством ионной имплантации, отражающей в большей степени реальный характер протекания данного процесса.

### Постановка вопроса моделирования процесса ионной имплантации

В настоящее время не представляется возможным описание процесса на макроуровне прямым методом решения задачи многих частиц. В связи с этим предлагается использовать поэтапное компьютерное моделирование процесса ионного упрочнения в следующей последовательности:

- 1) на первом этапе задачу многих частиц сводят к методу статистического усреднения частиц (атомов) на наноуровне ( $10^{-9} \dots 10^{-8}$  м);

- 2) формируют микрообразцы (крупные частицы), содержащие порядка  $10^2 \dots 10^4$  атомов;

3) исследованные с помощью компьютерного динамического моделирования микрообразцы подвергают статистическому анализу по количеству входящих и выходящих частиц для каждого выделенного фрагмента. По полученным результатам можно будет судить о количестве осажденных частиц внутри микрообразца;

- 4) формируют макрообразцы, содержащие порядка  $10^2 \dots 10^3$  крупных частиц;

5) по аналогии проводят статистический анализ смоделированного макрообразца.

Процесс ионной имплантации рассматривают на наноуровне ( $10^{-9} \dots 10^{-8}$  м) в рамках классической механики. Для рассматриваемой модели принято:

- атомы облучаемой детали (мишени) образуют правильную кристаллическую структуру [5, 6];
- материал мишени – это некоторые часто используемые в инженерных конструкциях металлы: железо, алюминий, хром, молибден, вольфрам (без примесей);
- ионный пучок образован ионами азота [7];
- взаимодействия всех частиц предполагаются парными и центральными (рис. 1);
- потенциал взаимодействия описывается зависимостью Ленарда-Джонса ( $n-m$ ):

$$U = \frac{A}{R^n} - \frac{B}{R^m},$$

где  $A, B, n, m$  – некоторые константы, характеризующие молекулы рассматриваемого вещества;

$R$  – расстояние между точками системы [7, 8].

Для разработанной компьютерной модели подпрограмма, определяющая силовые характеристики взаимодействия, может содержать описание любого из известных межатомных потенциалов.

При составлении модели процесса:

- 1) учитывают взаимодействия атомов мишени, ионов пучка: ион–ион, металл–металл, металл–ион. Например,  $N^+ - N^+$ ,  $Fe - Fe$ ,  $Fe - N^+$ . Для соответствующей

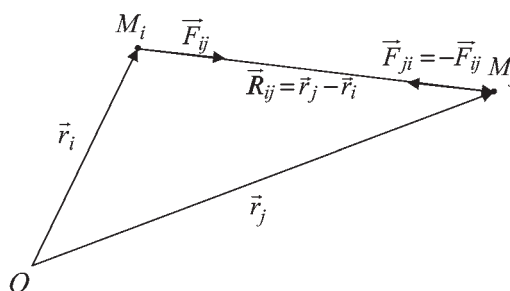


Рис. 1. Парное взаимодействие частиц

щих связей далее используются обозначения: I—I, M—M, M—I;

2) рассматривают эффективные атомы и ионы (квантово-механическая природа взаимодействия частиц учитывается в среднестатистическом смысле, ядерно-электронная структура не рассматривается), в результате уравнения движения записывают в классической форме согласно второму закону Ньютона (1):

$$m_i \frac{d^2 r_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^N \vec{F}_{ij}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где  $m_i$  — масса  $i$ -й частицы;

$r_i$  — модуль радиус-вектора расстояния между началом координат и  $i$ -й частицей;

$t_i$  — время взаимодействия;

$N$  — суммарное количество частиц образца (мишени) и ионов в пучке;

$F_{ij}$  — модуль силы взаимодействия пары частиц.

Предложенный С.Ф. Бойсом и И. Шевиттом потенциал в виде функционального ряда [9], с одной стороны, является обобщенной зависимостью, учитывающей притягивающую и отталкивающую части взаимодействия между ионами азота и атомами металлической решетки, а с другой — приводит к сложным расчетам множества дифференциальных уравнений.

Потенциал Бойса—Шевитта наиболее близок по своему характеру к часто используемому для аналитических исследований межмолекулярных и межатомных взаимодействий потенциалу Ленарда-Джонса (рис. 2). Это позволяет в качестве первого приближения рассматривать взаимодействие частиц с помо-

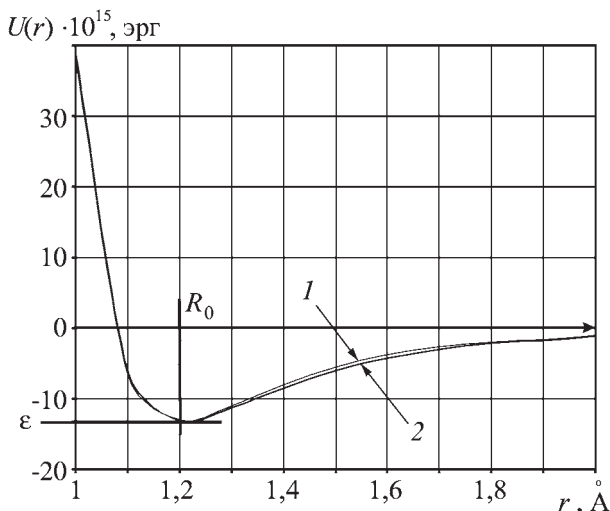


Рис. 2. Сравнение потенциалов Бойса—Шевитта (1) и Ленарда-Джонса (2)

щью потенциала Ленарда-Джонса как более доступного для соответствующих расчетов.

Кроме того, при моделировании столкновений ионов азота  $N^+$  с атомами, образующими структуру исследуемого образца, отдельные участки потенциала Ленарда-Джонса можно заменить другими зависимостями. То есть при уточнении модели столкновения с помощью ЭВМ можно будет использовать так называемые кусочные (составные) потенциалы. В пользу такого подхода говорит и тот факт, что экранированный кулоновский потенциал характеризует взаимодействия частиц только на очень близких расстояниях (отталкивание). Однако формирование слоя с имплантированными атомами азота должно также характеризоваться захватом атомов азота атомами металлической решетки.

Поэтому представляет интерес построение компьютерной модели процесса ионной имплантации, в которой имелась бы возможность учитывать как потери энергии при столкновениях частиц, так и взаимодействия частиц на расстояниях больших, чем предусмотрено моделью Фирсова.

Переход на макроуровень для описанного выше подхода затруднителен в связи с серьезными трудностями вычислительного характера, так как приходится решать очень большие системы нелинейных дифференциальных уравнений. Однако результаты, полученные выше, могут быть успешно использованы, если воспользоваться одной из модификаций метода частиц, иногда называемого методом крупных частиц [9–11].

Содержание основной идеи метода частиц в данном случае может быть сведено к следующим шагам моделирования больших (макроскопических) образцов:

1) исследованные с помощью компьютерного динамического моделирования микрообразцы, содержащие порядка  $10^2 \dots 10^4$  атомов, подвергаются статистическому анализу. Результатами такого анализа будут потоки входящих и исходящих ионов (атомов) азота, а также вероятности их прохождения, рассеяния и задержки в микрообразце;

2) для уточнения результатов пункта 1 строят гистограммы распределения частиц азота как по высоте (глубине), так и по ширине образца;

3) по результатам пунктов 1, 2 формируют компьютерную базу данных, содержащую информацию о микрообразцах (единичных блоках);

4) задают размеры исследуемого макрообразца или размеры его характерного фрагмента так, что в выбранном фрагменте содержится большое число  $10^2 \dots 10^3$  крупных частиц. В качестве крупных частиц выбирают блоки (микрочастицы), исследованные ра-

нее. С помощью компьютера заполняют шаблон образца крупными частицами;

5) используя сформированную компьютерную базу данных (пункты 1–3), определяют вероятности того, что в каждой из крупных частиц останется некоторое количество ионов азота, если на одну из сторон макрообразца направлен ионный пучок заданной интенсивности;

6) по аналогии с пунктом 2 проводят статистический анализ смоделированного макрообразца и строят гистограммы распределения имплантированных ионов азота по глубине;

7) используя стандартные зависимости для функций распределения [12, 13], с помощью метода наименьших квадратов [14] строят аппроксимацию гистограммы распределения имплантированных атомов азота по глубине моделируемого образца.

### Выводы

1. Предлагаемая методика моделирования имплантации частиц учитывает не только их основной поток, но и рассеяние, вторичную эмиссию, диффузию внедряемых атомов, что может подтверждаться статистическим материалом.

2. При дополнительном статистическом исследовании микрообразцов с помощью динамической модели возможен учет рассеяния и дрейфа атомов мишени, т.е. вероятное распределение дефектов, образованных как смещениями атомов решетки, так и появлением атомов примеси.

3. Предлагаемая компьютерная модель процесса ионной имплантации будет иметь погрешности вычислений и погрешности самой модели. Однако она позволит провести общую оценку различных зависимостей, описывающих взаимодействия имплантируемых частиц и атомов мишени.

4. В сочетании с методами статистической обработки результатов предлагаемая модель позволит

проводить экспресс-анализ глубины и профиля распределения имплантируемых ионов в основном материале.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Симонов В.В., Корнилов Л.А., Шашелев А.В., Шокин Е.В.** Оборудование ионной имплантации. М.: Радио и связь, 1988. 184 с.
2. **Белый А.В., Макушок Е.М., Поболь И.Л.** Поверхностная упрочняющая обработка с применением концентрированных потоков энергии / под ред. В.И. Беляева. Мн.: "Навука і тэхніка", 1990. 179 с.
3. **Ионная имплантация в полупроводники и другие материалы** // сб. статей: пер с англ. под ред. В.С. Вавилова. М.: Изд-во "Мир", 1980. 332 с.
4. **Риссел Х., Руге И.** Ионная имплантация / пер. с англ. под ред. М.И. Гусевой. М.: Наука, 1983. 360 с.
5. **Анималу А.** Квантовая теория кристаллических твердых тел. М.: Мир, 1981. 570 с.
6. **Бетчер Х.** Принципы динамической теории решетки. М.: Мир, 1986. 392 с.
7. **Каплан И.Г.** Введение в теорию межмолекулярных взаимодействий. М.: Наука, 1982. 312 с.
8. **Дедков Г.В.** Межатомные потенциалы взаимодействия в радиационной физике // УФН. 1995. Т. 165. № 8. С. 919.
9. **Хокни Р., Иствуд Дж.** Численное моделирование методом частиц. М.: Мир, 1987.
10. **Белоцерковский О.М.** Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Физматлит, 1994. 442 с.
11. **Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М.** Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент. М.: Наука, 1982. 370 с.
12. **Бокштейн С.Э.** Диффузия и структура металлов. Серия "Успехи современного металловедения". М.: Metallurgia, 1991. 320 с.
13. **Ван Кампен Н.Г.** Стохастические процессы в физике и химии. М.: Высшая школа, 1990. 376 с.
14. **Лоусон У., Хенсон Р.** Численное решение задач метода наименьших квадратов. М.: Наука, 1986. 232 с.



А.М. Кадырметов, Д.И. Станчев, Г.А. Сухочев  
(Воронежский государственный технический университет)  
E-mail: suhotchev@mail.ru

## Технология плазменного нанесения и упрочнения покрытий в ресурсосберегающих производственных процессах

*Обоснованы и представлены технологические пути совершенствования плазменного нанесения и упрочнения покрытий. Разработаны новые высокоэффективные ресурсосберегающие технологии и оборудование для нанесения и упрочнения покрытий на различные поверхности и детали. Представлен алгоритм выбора технологии и режимов плазменного нанесения и упрочнения покрытий в зависимости от назначения и типа детали, материала покрытия, типа и размеров напыляемой поверхности.*

**Ключевые слова:** технология нанесения покрытий, плазменное напыление, плазматрон, дуга прямая (выносная), дуга косвенная, плазменная струя, модуляция параметра, упрочнение, деталь, поверхность, охлаждение, водно-капельная струя, ресурсосбережение.

*Perform the technological ways of improvement in plasma-spraying processes are substantiated and shown. New effective technologies and equipment for covering and strengthening are constructed. There is a choice algorithm of technologies and modes of plasma spraying and coat-strengthening depending on using and type of a detail, surface material, type and size of coating surfaces.*

**Keywords:** coating technologies, plasma-spraying, plasmatron, direct arch, indirect arch, plasma jet, parameter modulation, strengthening, detail, surface, cooling, water-drop jet, resource-saving.

### Введение

В силу возрастающих современных требований к технике и с ростом удельных нагрузок на детали машин актуальным является применение современных технологий, позволяющих повысить качество новых и восстанавливаемых изделий, в том числе и за счет создания покрытий, стойких к различным эксплуатационным воздействиям (износу, коррозии и др.).

Экономическая эффективность от упрочнения при изготовлении новых деталей нанесением функциональных покрытий определяется:

- повышением надежности и долговечности выпускаемой и используемой продукции;
- сокращением затрат на изготовление запасных частей;
- экономией металла, расходуемого на изготовление запасных частей;
- высвобождением работников, занятых на изготовлении запасных частей и восстановлении деталей;
- увеличением выпуска продукции на существующем оборудовании, вследствие сокращения простоев для замены изношенных деталей и аварийных ремонтов оборудования.

Остается востребованным и экономически обоснованным восстановление изношенных деталей, так как при одинаковом ресурсе стоимость деталей, восстановленных газотермическими технологиями, в 4–5 раз ниже стоимости новых.

К современным технологиям нанесения функциональных и, в том числе, износостойких покрытий, повышающим ресурс деталей машин, относится широко применяемое и непрерывно развивающееся плазменное напыление. Оно характеризуется малым термическим воздействием на напыляемую основу (до 80...150 °С), высокой производительностью (до 8 кг/ч и более), экономичностью, наиболее широкой номенклатурой напыляемых материалов и универсальностью по отношению к материалам напыляемых деталей.

Использование плазменного напыления имеет ограничения: недостаточная прочность самого покрытия и его соединения с подложкой (например, при ударных и знакопеременных нагрузках); остаточные растягивающие напряжения, отрицательно влияющие на сопротивление усталости и ограничивающие толщину покрытий величиной около одного миллиметра; пористость и др. Устранение данных недостатков и повышение качества плазменных покрытий может быть реализовано технологическими путями, представленными на рис. 1. При этом основными критериями, по которым судят о совершенстве технологии плазменного напыления, являются качество покрытия, соответствующее эксплуатационным нагрузкам и воздействиям, производительность и экономичность процесса.

Следует отметить, что на качество наносимого покрытия существенно влияют способ и качество предварительной подготовки поверхности детали.



Рис. 1. Технологические пути совершенствования плазменного нанесения покрытий и упрочнения покрытий, поверхностей

### Технологические возможности

Из рис. 1 видно, что повышение эффективности технологии плазменного напыления целесообразно осуществлять путем совершенствования, развития и универсализации как самой технологической операции напыления покрытий, так и последующих технологических операций их упрочнения или совмещения с ними.

Совершенствование самой технологической операции напыления может быть обеспечено путем модуляции параметров плазматрона, путем добавления присадок в плазмообразующий газ (для плазмообразующего воздуха – путем добавления углеродсодержащих газов), газодинамическими способами, а также путем сочетания этих методов [1, 2].

Модуляция электрических параметров плазматрона заключается в наложении импульсов тока прямой и обратной полярности на средний ток дуги, что приводит, соответственно, к импульсному увеличению или снижению мощности дуги. Модуляция электрических параметров плазменного напыления (тока дуги плазматрона) является технологическим методом, позволяющим просто и эффективно регулировать электрические и энергетические характеристики дуги: генери-

ровать в плазменной струе ударные волны слабой интенсивности и интенсивные акустические волны; увеличить коэффициенты лобового сопротивления и теплоотдачи напыляемых частиц до двух и более раз и этим повысить энергетические параметры плазменной струи и напыляемых частиц (повысить скорость и температуру струи, скорость напыляемых частиц на 30...50 %) [1, 2].

Технологический метод добавления углеродсодержащих газов к плазмообразующему воздуху позволяет увеличить энтальпию и теплопроводность плазменной струи до 2 раз, создать нейтральную и восстановительную атмосферу; повысить тепловой КПД плазматрона; увеличить температуру плазменной струи (с 5300 до 6200 К для пропана) и скорость плазменной струи и напыляемых частиц на 10...30 % [2, 3].

Таким образом, технологические методы добавления присадок в плазмообразующий газ и модуляции параметров повышают энергетическое состояние напыляемых частиц перед их соударением с подложкой. Это приводит к улучшению физико-механических и триботехнических свойств покрытий: повышается прочность соединения покрытия с основой в 1,5...2 раза; увеличивается твердость покрытия в 1,2...1,7 раз; понижается газопроницаемость покрытия в 4...10 раз; повышается износостойкость покрытия (в условиях изнашивания в абразивно-масляной прослойке она возрастает в 1,14...1,9 раз) [2].

Упрочнение напыленных покрытий осуществляется технологическими операциями термо- и электромеханической обработки, позволяющими уменьшить припуск на финишные операции шлифования и полирования, залечить микротрещины, сэкономить дорогостоящие материалы покрытия и абразивного инструмента.

К современным известным прогрессивным технологическим методам упрочнения поверхностей и покрытий, позволяющим получить повышенное качество поверхности, относятся: плазменная закалка, модификация, финишное плазменное упрочнение [4], для поверхностей сложного профиля – комбинированная отделочно-упрочняющая обработка гранулированной токопроводящей средой. В этом случае

комбинированная обработка образцов до и после нанесения покрытия проводится на струйно-динамических установках эжекторного типа с наложением тока низкого напряжения [5]. Для упрочнения покрытий из самофлюсующихся материалов традиционно используется их оплавление.

С целью повышения производительности и эффективности нанесения покрытий во многих случаях целесообразно совмещение операции напыления и упрочнения покрытий (см. рис. 1). Это совмещение может быть осуществлено как с помощью косвенной дуги, горящей внутри плазматрона между катодом и анодом, так с помощью двух дуг (косвенной и прямой (выносной)), горящих между одним из электродов плазматрона и изделием. Процесс, использующий обработку двумя дугами, является известным гибридным процессом *плазменной наплавки–напыления* (ПНН) [4]. Качество получаемых этими процессами покрытий превышает качество традиционно напыленных покрытий за счет регулирования мощности дуг и охлаждения. Это обеспечивает гарантированное оплавление покрытия и меньшее тепловое воздействие на подложку в сравнении с традиционным оплавлением или наплавкой.

Модуляция выносной дуги позволяет получить покрытие с высокими физико-механическими и триботехническими свойствами [6]: прочность соединения покрытия с основой увеличивается в 1,15...1,25 раза; микротвердость – в 1,1...1,2 раза; сопротивление усталости образцов – до 1,2 раз; износостойкость покрытий – в 1,25...1,35 раза. Пористость покрытий понижается в 1,2...1,3 раза. Повышение основных физико-механических свойств покрытий позволяет использовать разрабатываемую технологию для деталей, работающих при знакопеременных и циклических ударных нагрузках.

Термомеханическая обработка покрытий позволяет дополнительно повысить качество покрытий [7]. При этом покрытие приобретает более плотную и равновесную структуру, а также остаточные напряжения сжатия вместо напряжений растяжения. Это приводит к повышению прочности соединения покрытия с основным металлом на 5...10 %, уменьшению его газопроницаемости в 5...6 раз, растеканию и заполнению пор и повышению предела выносливости восстановленных деталей на 14...18 %, повышению износостойкости в 1,3...1,4 раза, уменьшению припуска на шлифование до 0,03...0,05 мм.

Совершенствование технологии плазменного напыления в аспекте ее развития и универсализации предполагает распространение данной технологии для нанесения толстослойных покрытий (толщиной более 1 мм) [8] и покрытий на внутренние малогабаритные поверхности деталей машин [9].

Процесс плазменного напыления с малых дистанций на внутренние поверхности деталей характеризуется повышенным удельным теплоподводом к детали. Применение специальным образом организованного принудительного охлаждения позволяет снизить теплоподвод к детали, снизить остаточные напряжения и получить прочные и малопористые покрытия повышенной толщины.

Такое дополнение возможностей воздушно-плазменного напыления позволяет охватить подавляющее большинство деталей, нуждающихся в данной технологии, обеспечивает высокую производительность процесса и стабильность его выходных параметров при различных возмущающих воздействиях, т.е. стабильность качества покрытий.

### Оборудование

Для реализации технологии плазменного нанесения и упрочнения покрытий в соответствии с путями ее совершенствования было разработано оборудование, включающее установку, вспомогательное оборудование и приборы.

Установка включает в себя помимо базовых частей газовую систему для подачи присадок в плазмообразующий газ, контуры питания косвенной и выносной дуг, включающие в себя модуляторы (рис. 2). Принципиальным отличием установки от известных является наличие в ней модуляторов токов косвенной и прямой дуг [10]. Модуляторы позволяют импульсно

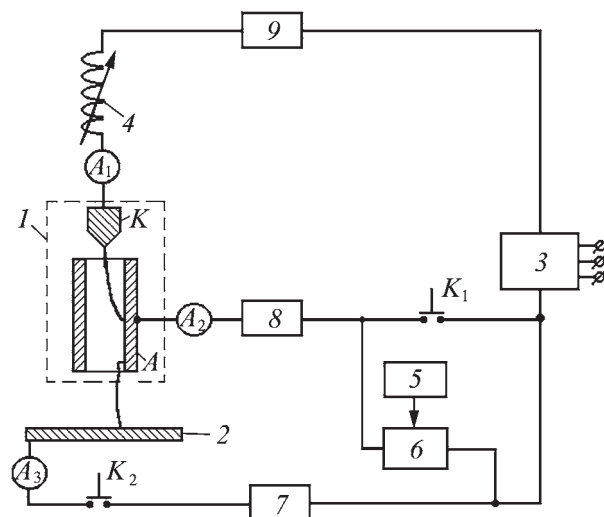


Рис. 2. Принципиальная схема установки ПНН с модуляторами токов прямой и косвенной дуг:

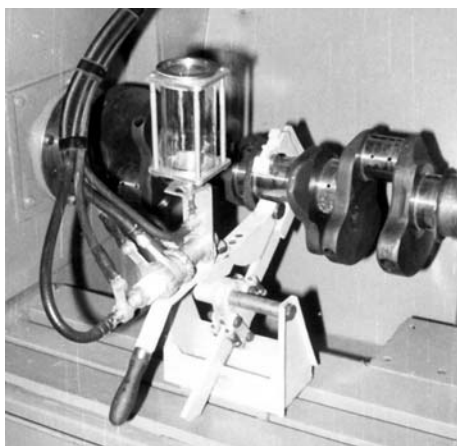
1 – плазматрон; 2 – подложка; 3 – источник питания; 4 – катушка индуктивности; 5 – блок управления модулятора; 6 – модулятор; 7, 8, 9 – балластные сопротивления; A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> – амперметры; K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> – контакторы

модулировать токи дуг плазматрона однополярными (прямой и обратной полярности) и двухполярными импульсами. Импульсы тока создаются от зарядов, накопленных в емкостях конденсаторов, и разряжаются на постоянные токи косвенной и прямой дуг. Заряды и разряды осуществляются открытием и закрытием тиристорных мостов, в которых заключена емкость конденсаторов.

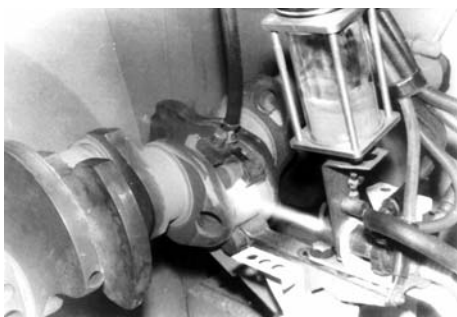
Тиристорные мосты выполнены на базе быстродействующих тиристоров, емкостей и сопротивлений. Блок управления модуляторами выполнен на базе фазоимпульсных регуляторов и звукового генератора для задания частоты модуляции.

Вспомогательное оборудование и приборы включают в себя устройства для нанесения и упрочнения покрытий на различные поверхности в зависимости от их типа и условий работы, в том числе устройства и приспособления:

- на профильные поверхности типа шатунных шеек коленчатых валов [11] (рис. 3);
- на клиновидные поверхности типа зубьев ковшей [12];



а)



б)

Рис. 3. Устройство для нанесения покрытий на шейки коленчатых валов [11]:

а – внешний вид; б – в процессе работы

– для термомеханического упрочнения покрытий на деталях типа вал [7];

– плазматрон для напыления на малогабаритные внутренние поверхности деталей машин с водно-капельной форсункой и отсасывающим устройством [9];

– устройство для охлаждения напыляемой детали с помощью водно-капельной струи, направленной поперечно плазменной струе и/или в место за пятном напыления при движении плазматрона, позволяющее поглотить значительную часть теплового потока к подложке при незначительных воздействиях на напыляемые частицы за счет нагревания и испарения капель воды в плазменной струе и/или на поверхности покрытия за пятном напыления [8, 9];

– приборы комплексного определения газодинамических параметров газовой и дисперсной фаз плазменной струи и другие нестандартизированные средства и оборудование.

### Технология

Технологические процессы плазменного нанесения и упрочнения покрытий, представленные на рис. 1, содержат в себе все те же операции, которые имеются в традиционном плазменном напылении. Основными из этих операций являются: предварительная подготовка поверхности, порошков, подготовка оборудования, нанесение покрытия и его упрочнение, контроль, последующая механическая обработка покрытия и окончательный контроль.

Отличие заключается в операциях нанесения и упрочнения покрытий, которые осуществляются либо в режиме модуляции электрических параметров путем наложения импульсов мощности на средние токи косвенной и прямой дуг [1, 6], либо путем термо- или электромеханической обработки покрытия [7], либо в режиме параллельного охлаждения напыляемой поверхности с помощью водно-аэрозольной струи, направленной поперечно плазменной струе [9] и/или в место за пятном напыления при движении плазматрона [8].

К технологическим параметрам импульсной модуляции тока дуги плазматрона относятся: частота модуляции и параметры импульсов – амплитуда, длительность, форма. Частота модуляции достаточно просто регулируется задающим генератором частоты. Амплитуда, длительность и крутизна импульсов регулируется подбором емкостей и активных сопротивлений модуляторов.

Исследования позволили разработать технологические рекомендации по выбору режимов операций нанесения и упрочнения покрытий с модуляцией электрических параметров для различных типов дета-



лей и условий работы их поверхностей трения. Методика выбора режимов нанесения и упрочнения покрытий в общем случае включает в себя два этапа. На первом этапе находятся оптимальные области режимов без модуляции, на втором — выбор схемы и режимов модуляции.

При выборе режимов модуляции для напыления косвенной дугой руководствуются двумя принципами. Первый принцип заключается в максимизации выделяемой энергии в каждом импульсе при минимально возможной его длительности, т.е. в максимизации амплитуды мощности импульсов. Целью здесь является получение ударных волн с возможно большей интенсивностью при умеренной эрозии электродов и испаряемости порошка. Для этого случая предпочтительна схема комплексной двухполярной модуляции, когда каждый импульс тока состоит из импульса вычитания и импульса сложения, причем импульс вычитания переходит в импульс сложения.

Другой принцип заключается в интенсификации теплообмена в системе дуга—плазменная струя—частицы с помощью создания интенсивных акустических волн в плазменной струе (свыше 150 дБ) на частотах более 5 кГц. Амплитуды импульсов тока могут быть ограничены. В данном случае предпочтительна схема однополярной импульсной модуляции (обратной полярности).

Режимы модуляции выносной дуги также основываются на двух принципах [6]. Первый принцип заключается в создании оптимальных амплитуды и длительности каждого импульса мощности, обеспечивающих локальные участки проплавления покрытия до границы переходной зоны покрытие—подложка в моменты воздействия импульсов. Второй — в оптимизации концентрации количества локальных зон проплавления и обеспечении равномерности свойств покрытия в масштабе всей поверхности покрытия. Второй принцип реализуется с помощью регулирования частоты модуляции.

Результаты проведенных исследований послужили основой для разработки новых эффективных технологий нанесения и упрочнения покрытий на наружные и внутренние малогабаритные поверхности, на плоские, цилиндрические и профильные поверхности деталей пар трения.

В табл. 1 приведены технологические рекомендации по нанесению покрытий из материала ПН55Т45 на наружные поверхности в режиме модуляции тока косвенной дуги для деталей, поверхности которых не подвержены ударным нагрузкам [6]. К таким деталям относятся сопрягаемые неподвижные относительно друг друга детали, детали пар трения скольжения.

В табл. 2 представлены технологические рекомендации по нанесению и упрочнению покрытий из мате-

риала ПГСР4 с одновременным оплавлением выносной модулируемой дугой для деталей, работающих в условиях трения при знакопеременных нагрузках (таких как коленчатые валы), абразивного изнашивания и ударных нагрузок (таких как рабочие органы почвообрабатывающих и строительно-дорожных машин) [6]. Использование модуляции тока выносной дуги позволяет управлять температурным полем системы покрытие—основа, обеспечить равномерное поле температур напыляемой детали и снизить или избежать коробления детали. Использование предложенной технологии для восстановления коленчатого вала на примере двигателя КамАЗ-740 позволило выявить и рекомендовать следующие технологические режимы:

— для шатунных шеек скорость напыления  $v = 0,15$  м/с; тепловая эффективная мощность плазматрона  $q = 1000$  Вт; шаг витков  $H = 0,004$  м; температура предварительного подогрева поверхности, обеспечиваемая за счет импульсной модуляции,  $T_{\text{спред.мод}} = 486$  °С; получаемая максимальная температура поверхности основы  $T_m = 559...575$  °С;

— для коренных шеек  $v = 0,597$  м/с;  $q = 1000$  Вт;  $H = 0,0031$  м;  $T_{\text{спред.мод}} = 500$  °С;  $T_m = 481...662$  °С.

Термомеханическое упрочнение покрытий целесообразно проводить двухступенчатой обработкой [7]. На первой стадии обработка проводится при высоких температурах покрытия ( $> 1400$  К). Целью первой стадии является выполнение размера образца, обеспечивающего минимальный припуск на шлифование. Усилия обкатывания при этом не превышают 250...550 Н/мм. Вторая стадия проводится традиционным способом без нагрева с постепенным увеличением усилия до 400...800 Н/мм. Целью второй стадии является упрочнение покрытия.

Оптимальные режимы для материала покрытия ПГСР4: на первой стадии скорость вращения детали  $n = 640$  об/мин; скорость перемещения плазматрона  $v = 0,46$  мм/об; усилие обкатывания  $P = 255$  Н/мм; дистанция оплавления  $l = 93$  мм; расход плазмообразующего газа (воздуха)  $Q = 66$  л/мин. На второй стадии обработки  $P = 780$  Н/мм;  $n = 160$  об/мин;  $v = 0,4$  мм/об. Для материала покрытия 50 % ПГСР4+50 % ПН85Ю15 на первой стадии  $n = 640$  об/мин;  $v = 0,46$  мм/об;  $P = 230$  Н/мм;  $l = 83$  мм;  $Q = 54$  л/мин. На второй стадии обработки  $P = 700$  Н/мм;  $n = 160$  об/мин;  $v = 0,4$  мм/об.

Оптимальными режимами для технологического процесса плазменного напыления на малогабаритные внутренние поверхности самофлюсующегося сплава ПГСР4 с размером частиц 63...100 мкм являются [9]: ток дуги — 40...50 А; напряжение на дуге — 30...40 В; расход плазмообразующего газа (воздух + 10 % пропан-бутана) — 4...5 л/мин; дистанция напыления — 25 мм; расход транспортирующего газа —

Таблица 1

Рекомендуемые режимы напыления для воздушных электродуговых плазматронов с вихревой стабилизацией дуги

Параметры исходного режима без добавления пропана и без модуляции	Режим	Расход пропана, м <sup>3</sup> /с (л/мин)	Частота модуляции, Гц	Параметры импульсов			
				Время, мкс		Амплитуда, А	
				вычитания	сложения	вычитания	сложения
$J_{cp} = 150 \text{ А};$ $U_{cp} = 200 \text{ В};$ $Q_{возд} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ (90 л/мин); $Q_{тр} = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ (6 л/мин); $L = 160 \text{ мм};$ Напыляемый материал – ПН55Т45 (55 % Ni; 45 % Ti); $G_{пор} = 2 \text{ г/с}$	Добавление пропана	$0,6 \cdot 10^{-3}$ (3,6)	–	–	–	–	–
	Добавление пропана, модуляция обратной полярности	То же	Более 5000, максимально возможная	Менее 60	–	$(0,1 \dots 0,8) J_{cp} = 15 \dots 120$	–
	Добавление пропана, комплексная модуляция	То же	300...2000, оптимизируется	50...70	70...300	$0,8 J_{cp} = 120$	Более 700

Параметры исходного режима без добавления пропана и без модуляции	Параметры модуляторов				Применяемость
	Емкость, мкФ		Сопротивление, Ом		
	вычитания	сложения	вычитания	сложения	
$J_{cp} = 150 \text{ А};$ $U_{cp} = 200 \text{ В};$ $Q_{возд} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ (90 л/мин); $Q_{тр} = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ (6 л/мин); $L = 160 \text{ мм};$ Напыляемый материал – ПН55Т45 (55 % Ni; 45 % Ti); $G_{пор} = 2 \text{ г/с}$	–	–	–	–	Для сопрягаемых неподвижных относительно друг друга поверхностей деталей
	Менее 4	–	1,3...2	–	Повышение степени теплообмена в системе дуга–струя–частицы. Для поверхностей пар трения
	4	40	1,3	Менее 0,1	Повышение скорости частиц. Для поверхностей пар трения с повышенной прочностью соединения покрытия с основой

Примечание.  $J_{cp}$ ,  $U_{cp}$  – средние значения силы тока дуги и напряжения на дуге соответственно;  $Q_{возд}$ ,  $Q_{тр}$  – расход плазмообразующего воздуха и транспортирующего пропана соответственно;  $L$  – дистанция напыления;  $G_{пор}$  – расход напыляемого материала.

Таблица 2

Технологические режимы ПНН в режиме модуляции тока выносной дуги

Диаметр вала, м	Скорость вращения детали, с <sup>-1</sup>	Амплитуда мощности импульса, кВт	Длительность импульса, мкс	Частота модуляции, Гц	
				начальная	конечная
0,02...0,06	1,5...0,5	4,5	100	180...320	25...35
0,06...0,10	0,5...0,3	12	175	70...180	25...80
0,10...0,14	0,3...0,2	22	250	65...100	30...50

Примечание. Исходный стационарный режим: расход плазмообразующего газа (воздуха) –  $(0,6 \dots 0,8) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ; расход транспортирующего газа (пропана) –  $(0,1 \dots 0,2) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ; расход порошка ПГСР4 –  $0,009 \dots 0,018 \text{ кг/с}$ ; дистанция напыления –  $0,015 \dots 0,020 \text{ м}$ , скорость продольного перемещения плазматрона –  $0,005 \dots 0,010 \text{ м/с}$ ; мощность прямой дуги –  $1,5 \dots 2,5 \text{ кВт}$ ; мощность косвенной дуги –  $3,5 \dots 4,5 \text{ кВт}$ .

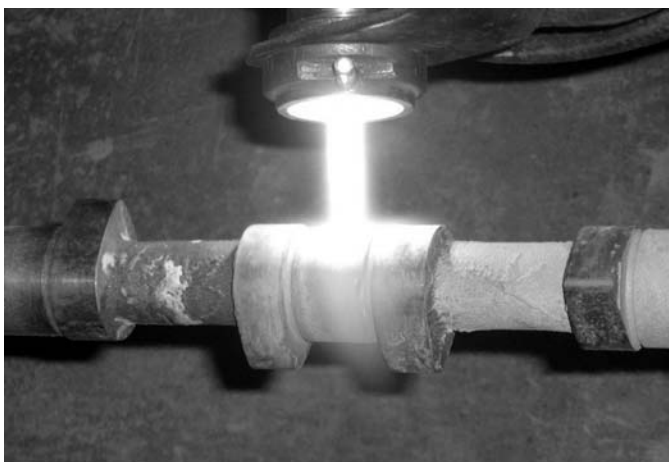
0,4...0,5 л/мин; расход порошка – 1,2 кг/ч.  
Параметры охлаждения: давление воды – 1 МПа;  
диаметр сопел – 0,5 мм.

Для технологического процесса напыления с одновременным оплавлением покрытия из композиционного порошка состава 60 % ПГСР4+25 %



а)

Рис. 4. Нанесение покрытий на шейки коленчатого (а) и распределительного (б) валов, на ступицу колеса (в)



б)



в)

ПН85Ю15+15 % WC на клиновидных коронках строительно-дорожных машин установлены следующие оптимальные режимы упрочнения, которые обеспечивают получение высокопрочных покрытий толщиной в диапазоне 1...2 мм [8]: мощность дуги плазматрона – 30 кВт (при напряжении на дуге 200 В и силе тока дуги 150 А); массовый расход порошка – 2 г/с; дистанция напыления – 10 мм; расход плазмообразующего газа (воздух с добавлением пропана) –  $(0,6...0,75) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ; расход транспортирующего газа (пропана) –  $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ; скорость перемещения плазматрона – 120 мм/с; массовый расход охлаждающей воды –  $1,07 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$ . Ширина щели форсунки  $b = 0,12 \text{ мм}$ , длина щели  $a = 5 \text{ мм}$ , перепад давления на форсунке  $\Delta P = 0,3 \text{ МПа}$ .

Сравнительные испытания упрочненных деталей машин (рис. 4) в стендовых и эксплуатационных условиях в различных организациях, эксплуатирующих

транспортную технику (в том числе при экстремальных нагрузках) подтвердили практическую эффективность предлагаемой технологии и показали повышение ресурса восстановленных деталей за счет повышения их износостойкости не менее чем на 30 % по сравнению с новыми деталями. Испытаниям были подвержены различные детали, в том числе коленчатые валы, валы коробок передач, гильзы цилиндров двигателей и пневмоцилиндров, рабочие органы почвообрабатывающих и строительно-дорожных машин (плуги, зубья). При этом снижения сопротивления усталости деталей не обнаружено.

Анализ полученных экспериментальных и эксплуатационных результатов позволил предложить в виде разработанного алгоритма (рис. 5) методику выбора технологии и режимов получения покрытий с использованием модуляции электрических параметров в зависимости от назначения и типа детали,

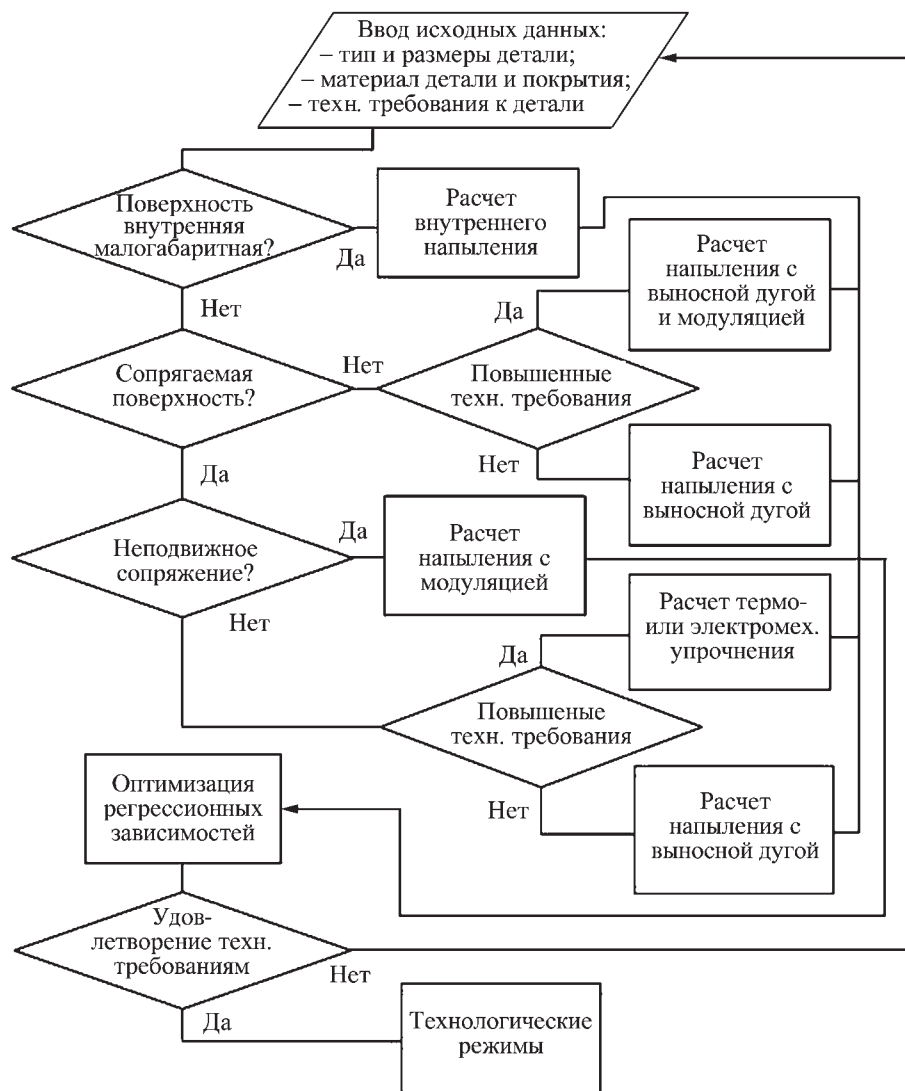


Рис. 5. Алгоритм выбора технологии нанесения и упрочнения покрытий

материала покрытия, типа и размеров напыляемой поверхности.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Кадырметов А.М., Сухочев Г.А. Особенности процесса воздушно-плазменного нанесения и упрочнения покрытий при модуляции электрических параметров // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 4. С. 25–28.  
 2. Кадырметов А.М., Станчев Д.И., Сухочев Г.А. Экспериментальные исследования параметров управляемости процесса воздушно-плазменного нанесения и упрочнения покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 11. С. 53–56.

3. Клубникин В.С., Карасев М.В., Петров Г.К. Плазменное напыление покрытий в активных средах. Л.: О-во "Знание" РСФСР, ЛО, ЛДНТП, 1990. 20 с.

4. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 406 с.

5. Сухочев Г.А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях. М.: Машиностроение, 2004. 287 с.

6. Кадырметов А.М. Повышение ресурса деталей машин методами воздушно-плазменного напыления и упрочнения покрытий // Перспективные технологии, транспортные средства и оборудование при производстве, эксплуатации, сервисе и ремонте: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ВГЛТА, 2006. С. 36–42.

7. Сухочев Г.А., Кадырметов А.М., Яковлев К.А. Поверхностное упрочнение защитных покрытий нагруженных деталей // Нетрадиционные технологии в машиностроении и приборостроении: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ, 1998. С. 80–85.

8. Кадырметов А.М. Оценка температур клиновидных поверхностей в процессе плазменного напыления // Технологическое обеспечение машиностроительных производств: межвуз. сб. науч. тр. вып. 2. Воронеж: ВГТУ, 2002. С. 55–59.

9. Станчев Д.И., Кадырметов А.М., Иванников В.А. Качество плазменных покрытий, напыленных на внутренние поверхности деталей // Новационные технологии и управление в технических

и социальных системах: тез. докл. межвуз. науч.-практ. конф. Воронеж, 1999. Вып. 1. С. 39–40.

10. Пат. 2211256 РФ, МПК<sup>7</sup> С 23 С 4/12. Способ нанесения покрытия / Д.И. Станчев, А.М. Кадырметов, В.Н. Бухтояров, А.В. Винокуров. 2003. БИ № 24.

11. Пат. 2085301 РФ, МКИ<sup>(6)</sup> В 05 В 13/04, 13/02, 15/08. Устройство для нанесения покрытий на шатунные шейки коленчатых валов / В.И. Посметьев, А.М. Кадырметов, В.В. Ливенцев, К.А. Яковлев. 1997. БИ № 21.

12. Пат. 2175024 РФ, МПК<sup>7</sup> С 23 С 4/12. Способ нанесения покрытия / С.И. Акиншин, А.М. Кадырметов, Д.И. Станчев. 2002. БИ № 34.

УДК 621.9.048.7

А.Г. Суслов, И.В. Говоров (Московский государственный индустриальный университет),  
А.М. Семенцев (Государственный университет управления, г. Москва)  
E-mail: mootechmagh@mail.ru

## Особенности модифицирования поверхностного слоя стальных деталей под воздействием лазерного излучения

*Рассмотрены технологические методы модифицирования функциональных поверхностей деталей машин и технологической оснастки с использованием лазерной энергии. Показаны возможности определения рациональных режимов лазерного излучения и составов легирующих обмазок, обеспечивающих требуемые эксплуатационные свойства обрабатываемых деталей.*

**Ключевые слова:** глубина упрочнения, детали машин, износостойкость, лазерная обработка, лазерное упрочнение, микротвердость, технологические методы, поверхностное модифицирование, эксплуатационные свойства.

*Technological methods of modifying of working surfaces of machine elements and industrial equipment with use of laser energy are considered. Possibilities of definition of rational modes of laser radiation and a parity of the alloying components providing demanded operational properties of processed details are shown.*

**Keywords:** depth of hardening, machine elements, wear resistance, laser processing, laser hardening, microhardness, technological methods, superficial modifying, operational properties.

Технологии лазерной поверхностной обработки материалов, несмотря на дороговизну применяемого оборудования и высокую энергоемкость соответствующих процессов, в современных условиях используются при изготовлении и восстановлении достаточно широкого круга деталей авиационной, ракетно-космической, автотракторной и инструментальной отраслей промышленности [1, 2]. Объясняется это хорошо известными особенностями взаимодействия лазерного излучения с обрабатываемой поверхностью, из которых наиболее привлекательными являются быстрый температурный цикл, сводящий к минимуму процессы окисления и коробления деталей, а также простота регулирования площади и параметров лазерного воздействия. Новые возможности для интенсивного применения лазерных технологий открываются в связи с развитием такого научного направления, как наномодифицирование материалов, в рамках которого получены значительные результаты, эффективно используемые, например, в литейном производстве [3].

Изменения структуры, фазового и химического состава (модифицирование) поверхностного слоя металлических изделий под воздействием лазерного излучения подробно изучены многими отечественными и зарубежными учеными, однако механизм их до сих пор описан достаточно приближенно, в связи с чем управление этими процессами осуществляется, как правило, на основе экспериментально полученных практических рекомендаций.

Многие исследователи отмечают уникальные структуры, формируемые при лазерной обработке по-

верхностей металлических образцов, и аномально высокие прочностные свойства получаемых слоев. Объяснения этому в большинстве случаев находят в сверхвысоких скоростях нагрева и охлаждения обрабатываемой лазером поверхности, а также в "захвате" лазерным лучом частиц разнообразных компонентов, находящихся в окружающей среде, что приводит к неконтролируемому процессу микролегирования.

В работе [4] формирование специфических по структуре и свойствам слоев при лазерной обработке сталей обосновывается комбинированным (в том числе электромагнитным) взаимодействием лазерного луча и компонентов расплава металла в зоне лазерного воздействия (ЗЛВ), что позволяет интенсифицировать массоперенос отдельных легирующих элементов к поверхности обрабатываемого материала или в глубь его. Управляя режимами лазерного излучения, можно создать благоприятные условия для перераспределения структурообразующих компонентов, находящихся в ЗЛВ, что в итоге приведет к формированию слоя, который по химическому составу, структуре и свойствам будет отличаться от основного металла. Проведенные исследования показали, что основными источниками массопереноса элементов в ЗЛВ являются неметаллические включения (оксиды, карбиды, сульфиды и комплексные соединения на их основе). За счет их миграции в зоне термического влияния, распада и диффузии в расплаве осуществляется перераспределение элементов в ЗЛВ.

Экспериментальные исследования выполняли на универсальной технологической установке

Таблица 1

Результаты лазерного модифицирования функциональных поверхностей режущего инструмента и деталей механизмов

Изделие, материал	Требуемые эксплуатационные свойства	Требуемое распределение неметаллических включений в поверхностном слое	Целесообразное перераспределение элементов в поверхностном слое	Режимы лазерной обработки		
				плотность мощности, Вт/см <sup>2</sup>	коэффициент перекрытия лазерного пятна	наличие оплавления поверхности
Режущий инструмент (сверла, развертки), сталь Р6М5	Износостойкость, красностойкость	Мелкодисперсная карбидная пленка	Повышенное содержание карбидообразующих элементов (W, Mo)	8·10 <sup>3</sup>	~ 1,0	Нет
Ковш пескометной машины, сталь 35Л	Износостойкость в условиях абразивного трения	Отсутствие крупных неметаллических включений	Повышенное содержание аустенитообразующих элементов (Mn)	5·10 <sup>5</sup>	0,75...0,9	Да
Зубило пневмомолотка, сталь У8	Износостойкость в условиях виброударного нагружения					

"Квант-18М", работающей в режиме свободной генерации (длина волны  $\lambda = 1,064$  мкм). Лазерной обработке подвергали функциональные поверхности изделий, изготовленных из различных сталей и отличающихся условиями эксплуатации (табл. 1). Для технологического обеспечения их требуемых эксплуатационных свойств подбирали режимы лазерного излучения, инициирующие процесс переноса в поверхностный слой из основного материала таких элементов, которые бы обеспечили формирование соответствующей металлической структуры.

Для режущих инструментов, изготовленных из стали Р6М5 и эксплуатирующихся в условиях интенсивного изнашивания при достаточно высоких температурах, целесообразно сформировать в поверхностном слое мелкодисперсную карбидную сетку, которая обеспечила бы больший период стойкости инструмента. Лазерная обработка режущей части инструмента с режимами, приведенными в табл. 1, создает условия для активного перемещения в поверхностный слой карбидообразующих элементов, какими, как показали эксперименты, являются молибден и вольфрам. Это не только обеспечивает формирование сетки карбидов, но и препятствует их коагуляции, что позволяет эксплуатировать инструмент более интенсивно: при неизменном периоде стойкости скорость резания можно увеличить на 15...20 %, при установленных режимах резания стойкость инструмента возрастает в 2,5...3 раза по сравнению с необработанным лазером.

Для ковша пескометной машины и зубила пневмомолотка, работающих в условиях абразивного и

виброударного изнашивания соответственно, важным является сформировать структуру, отличающуюся высокой поверхностной твердостью и вязкой подложкой. Этого можно достичь путем интенсификации массопереноса в поверхностный слой аустенитообразующего элемента – марганца. Получаемая структура поверхностного слоя характеризуется наличием высокодисперсного мартенсита на обработанной поверхности и фазы остаточного аустенита, равномерно распределенного по всей глубине ЗЛВ. Так как к соответствующим функциональным поверхностям рассматриваемых деталей не предъявляются жесткие требования по точности и шероховатости, то их лазерную обработку следует вести с оплавлением, что, с одной стороны, увеличивает глубину модифицирования (до 200 мкм), а с другой – обеспечивает разрушение скоплений неметаллических включений в поверхностном слое, являющихся концентраторами напряжений.

При лазерной обработке с режимами, инициирующими активный перенос в поверхностный слой материала марганца, срок службы ковшей пескометной машины удается увеличить в 5...6 раз (см. табл. 1). После лазерного термоупрочнения установочного торца и фиксирующего бурта зубила пневмомолотка становится возможным его перетачивание установленное число раз, так как резко (до 3 раз) снижается износ обработанных лазером поверхностей, вызываемый их контактными деформациями, что ранее существенно снижало долговечность этой детали.

Рассмотренный метод управления формированием модифицированных слоев путем функционально

направленного выбора режимов лазерной поверхностной обработки позволяет максимально использовать "внутренний потенциал" обрабатываемого материала, химический состав которого, в свою очередь, совместно с эффективными размерами ЗЛВ, "подвижностью" легирующих и структурообразующих компонентов ограничивает его возможности. Поэтому создание слоев с более высокими эксплуатационными показателями возможно лишь при подаче в ЗЛВ дополнительных компонентов, легирование которыми позволит более эффективно воздействовать на физико-механические свойства обрабатываемой поверхности. Для этих целей применяется достаточно много различных способов. Одним наиболее технологичным из них является предварительное нанесение на обрабатываемую поверхность обмазки, состоящей из подготовленного состава легирующих компонентов.

Авторами разработаны технологические решения по формированию модифицированных слоев на стальных образцах путем лазерного оплавления предварительно нанесенных обмазок, состав которых определялся требуемыми эксплуатационными свойствами обрабатываемых деталей. В основе этих решений лежит создание износостойких покрытий на базе соединений бора и хрома.

Известно, что высокая износостойкость борохромированных слоев определяется их значительными прочностными свойствами. При борохромировании в легированном слое наряду с высокопрочными, но хрупкими боридами железа образуются также и бориды хрома, обладающие как значительной твердостью (до 2300 HV), так и высокой трещиностойкостью при динамических нагрузках.

Поскольку бориды хрома и железа изоморфны, имеют одинаковый характер связи и близкие параметры решетки, взаимно растворимы друг в друге, а атомные диаметры хрома и железа близки по величине, при борохромировании в поверхностном слое создаются условия для образования непрерывного ряда твердых растворов. Формирующаяся при этом однородная структура, в отличие от иглообразной при борировании, способствует, кроме того, возникновению благоприятной для контактного нагружения эпюры остаточных напряжений.

Методология создания двухкомпонентных (базовых) составов обмазок на основе соединений бора и хрома для лазерного поверхностного модифицирования стальных деталей рассмотрена в работе [5]. Специфические условия эксплуатации конкретных деталей, определяющие в итоге соответствующие свойства их функциональных поверхностей, могут быть учтены путем введения в базовые составы обмазок дополнительных компонентов. При этом основными

причинами существенного расширения области эффективного применения упрочненных изделий в большинстве случаев являются увеличение глубины модифицированного слоя, а также интенсификация процессов вытеснения упрочняющих элементов из соответствующих соединений и образования новых высокопрочных и износостойких композиций.

При проведении исследований обмазки в виде мелкодисперсных ( $\mu \sim 20...30$  мкм) составляющих, перемешанных в связующем веществе (цапонлак + ацетон), наносили пневмораспылением на упрочняемые поверхности: толщина слоя – 0,1...0,15 мм при среднем расходе 0,05...0,08 г/см<sup>2</sup>. Режимы лазерного излучения подбирали из условия минимального оплавления обрабатываемой поверхности. Перечень исследуемых деталей машин и технологической оснастки, составы обмазок, применяемые для модифицирования их функциональных поверхностей, и соответствующие режимы обработки приведены в табл. 2.

Характерной особенностью эксплуатации большинства установочных, зажимных, направляющих и других элементов станочных приспособлений является непосредственный их контакт с периодически сменяемыми заготовками, что приводит к интенсивному локальному, часто неравномерному, износу их рабочих поверхностей. В результате снижаются точность и надежность приспособлений, что отрицательно сказывается на качестве обрабатываемых деталей.

Для повышения износостойкости элементов технологической оснастки в качестве базового состава для экспериментирования была использована комбинация  $Cr_2O_3 + B_2O_3$ , недостатком которой является небольшая глубина упрочнения [5]. В разработанном составе обмазки (см. табл. 2) подобрано такое соотношение борного ангидрида и окиси хрома, которое в условиях лазерного нагрева обеспечивает быстрое расплавление смеси, разложение окислов, формирование боридов хрома и железа с одновременным их внедрением в стальную матрицу.

Введение в состав углерода способствует более интенсивному поглощению световой энергии, а следовательно, проплавлению основного материала на большую глубину, восстановлению активных атомов хрома и бора и синтезу карбоборидов хрома, которые в смеси с боридами хрома и железа обеспечивают поверхностному слою высокие эксплуатационные свойства: для установочных элементов технологической оснастки (опорных призм) удастся обеспечить равномерный износ по всей поверхности контакта с устанавливаемыми заготовками при общем увеличении их долговечности до 3,5...4 раз.

Использование разработанного состава обмазки для снижения интенсивности изнашивания опорных роликов стола круглопильного полуавтомата оказы-

Таблица 2

Составы обмазок, режимы и результаты лазерного борохромирования стальных изделий

Упрочняемые детали, материал	Требуемые эксплуатационные свойства	Состав обмазки, % мас.	Режимы лазерной обработки		Свойства модифицированного слоя	
			плотность мощности, Вт/см <sup>2</sup>	коэффициент перекрытия лазерного пятна	поверхностная микротвердость, HV	глубина модифицирования, мм
Установочные (призмы) и зажимные элементы технологической оснастки, сталь 20, 40X	Контактная жесткость, износостойкость и коррозионная стойкость	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 15...20; C – 4...12; B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – остальное	(1,0...1,5)·10 <sup>5</sup>	0,5...0,6	2000...2200	0,2...0,24
Опорные ролики стола круглопильного полуавтомата, сталь 45	Контактная жесткость, износостойкость	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 15...28; ФС 80 – 6...12; B <sub>4</sub> C – остальное			1800...1900	0,26...0,29
Детали привода бурового оборудования, сталь 40X	Износостойкость в условиях абразивного трения, коррозионная стойкость	B – 3...10; TiO <sub>2</sub> – 20...25; Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – остальное	(0,6...0,8)·10 <sup>5</sup>	~ 1,0 (двукратный проход)	2100...2350	0,19...0,22
Пуансоны вырубных штампов, сталь У7, У8	Трещиностойкость, износостойкость в условиях абразивного трения	ФХ 70 – 28...44; SiC – 10...20; B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – остальное			2100...2400	0,15...0,18

ваются нецелесообразным, так как высокая поверхностная микротвердость синтезируемого покрытия негативно сказывается на сопряженной детали – направляющей оси, по которой перекатываются ролики в процессе работы оборудования. Вместе с тем срок службы роликов часто оказывается меньше длительности межремонтного периода, что создает определенные проблемы с обеспечением работоспособности оборудования. Таким образом, в процессе лазерной обработки следует сформировать покрытие, обладающее достаточно высокой износостойкостью и значительной глубиной упрочнения, обеспечивающей возможность ремонта роликов, при допустимом износе направляющей оси.

Увеличение глубины легирования в этом случае может быть достигнуто применением неразлагающихся под действием световой энергии компонентов, обладающих небольшой температурой плавления, а поэтому высокой жидкотекучестью. В этом случае эффект упрочнения будет сопровождаться более интенсивным процессом кавитационного перемешивания составляющих лигатуры в расплавленном поверхностном слое упрочняемого материала.

В целях практической проверки указанного предположения был разработан состав для лазерного ле-

гирования, содержащий окись хрома, ферросилиций и карбид бора (см. табл. 2). Ферросилиций (ФС 80) вводится в состав для достижения максимальной глубины легированного слоя. Входящий в него в достаточном количестве (не менее 80 %) кремний за счет относительно невысокой температуры плавления (около 1400 °С) и высокой жидкотекучести обеспечивает равномерное проплавление состава и достижение большей глубины модифицирования, а содержащееся в нем железо позволяет дополнительно за счет сродства добиться высокой адгезии легированного слоя к основному материалу.

Лазерное легирование поверхностей катания опорного ролика стола круглопильного полуавтомата с использованием рассмотренного состава обмазки позволяет существенно увеличить срок его службы (на отдельных полуавтоматах до 5 раз) и гарантированно предупредить аварийные остановки оборудования, связанные с необходимостью замены соответствующего узла опирания до проведения очередного сервисного мероприятия.

Детали приводов бурового оборудования, испытывая значительные знакопеременные нагрузки, подвергаются, кроме того, интенсивному абразивному износу в условиях воздействия внешней агрессивной



среды. В целях обеспечения их эксплуатационных свойств рассматривалась возможность упрочнения соответствующих функциональных поверхностей с использованием обмазки  $B + Cr_2O_3 + TiO_2$ .

Как показывают промышленные испытания, известные боротитанированные покрытия эффективно защищают изделия от газовой коррозии, гидроэрозии, абразивного износа и др. Однако легированные бором и титаном слои проявляют чрезвычайную хрупкость даже в условиях статических нагрузок. В то же время анализ литературных источников и проведенные экспериментальные исследования показали, что совместное насыщение упрочняемой поверхности бором, хромом и титаном сопровождается образованием на ней слоя карбидов и боридов титана с микротвердостью до 3300 HV, за которым следует пластичный слой, представляющий  $\alpha$ -твердый раствор хрома в железе. Получаемое покрытие обладает высокими прочностными свойствами, износостойкостью в абразивной среде и хорошо противостоит многоцикловым динамическим нагрузкам.

Для обеспечения равномерности распределения компонентов в легированном слое упрочнение проводили при двукратном проходе лазерного луча с коэффициентом перекрытия  $K_n = 1$ . При однократной обработке с  $K_n = 1$  образующийся слой характеризуется существенными перепадами микротвердости ( $HV_{max}/HV_{min} > 2$ ). При снижении коэффициента перекрытия до  $K_n = 0,5$  распределение микротвердости по упрочненной поверхности более равномерно, однако многократный последовательный (до 3 раз) нагрев отдельных участков приводит к образованию термических трещин на упрочненной поверхности. Локальное лазерное упрочнение функциональных поверхностей деталей (валик вертикальный, муфта привода, рессора и др.) с использованием разработанного состава обмазки позволяет увеличить их межремонтный период в 2 раза, что сопровождается значительным сокращением оборотного фонда запасных частей к соответствующему буровому оборудованию.

В целях повышения износостойкости пуансонов вырубных штампов рассматривали возможность создания обмазки, включающей соединения бора, хрома и карбида кремния (см. табл. 2). Выбор компонентов обмазки определяли необходимостью решения (сопутствующей повышению износостойкости пуансонов) проблемы появления эксплуатационных трещин и сколов на их рабочих поверхностях.

Слои на основе карбида кремния обладают высокими прочностными свойствами благодаря его повышенной микротвердости (3200 HV) и тепловой устойчивости, практически исключая разложение соединения под действием концентрированных источников тепловой энергии. Однако различие в теплотехнических свойствах карбида кремния и железа

приводит к тому, что при непосредственном легировании сталей карбидом кремния не происходит равномерного распределения его в расплавленной лучом лазера железной матрице. Результатом является неравномерное распределение микротвердости по упрочненной поверхности.

Устранить данную проблему без существенного снижения прочностных свойств покрытия удастся совместным насыщением поверхности стали карбидом кремния и бором. При небольших удельных нагрузках боросилицирование незначительно повышает износостойкость по сравнению с борированием, при увеличении же нагрузок этот эффект более ощутим, что связано с устранением игольчатого строения боридных слоев и увеличением их микротвердости до 2100...2300 HV. Феррохром (ФХ 70), входящий в предлагаемый состав обмазки, благодаря средству содержащегося в нем железа (около 30 %) с материалом подложки, повышает адгезию покрытия с основой. В то же время хром (около 70 %) в процессе лазерной обработки, вступая в реакцию с бором, образует твердые и прочные бориды.

Использование предлагаемого состава позволяет в 2,5...3 раза повысить стойкость пуансонов, при этом число замен пуансонов, вызванное сколами их рабочих поверхностей, снижается в 1,5 раза.

Перспективы развития технологий лазерной поверхностной обработки по-прежнему связаны с возрастающим дефицитом материальных ресурсов. Поверхностное модифицирование изделий (в том числе на микро- и наноуровне) с использованием лазерной энергии позволяет во многих случаях отказаться от применения дорогих высоколегированных материалов. Вместе с этим возможность локального изменения физико-механических свойств различных функциональных поверхностей детали обеспечивает наиболее успешную адаптацию ее в целом как к специфическим условиям работы в трибосопряжениях, так и к воздействию разнообразных внешних факторов. Экономическая эффективность применения методов лазерного поверхностного модифицирования, являющихся достаточно энерго- и капиталоемкими, определяется предполагаемыми объемами внедрения соответствующих технологий и стабильностью номенклатуры обрабатываемых изделий.

### Выводы

1. Модифицирование функциональных поверхностей деталей машин под воздействием лазерного излучения с целью повышения их эксплуатационных свойств может быть успешно осуществлено путем инициирования процессов массопереноса в поверхностный слой определенных структурообразующих элементов, что достигается варьированием режимов лазерной обработки. Большой эффективности лазер-

ного упрочнения можно достичь при введении в ЗЛВ комплекса дополнительных легирующих компонентов, например бор- и хромсодержащих.

2. Рассмотренные подходы к модифицированию поверхностных слоев стальных деталей предполагают одноступенчатое решение технологической задачи, когда режимы лазерной обработки и составы применяемых обмазок определяются исходя из эксплуатационных свойств детали и ее функциональных поверхностей. Это позволяет свести к минимуму вероятность конструкторской и технологической дискредитации изделия.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Технология** лазерной обработки конструкционных и инструментальных материалов в авиадвигателестроении / Р.Р. Латыпов, Н.Г. Тергулов, А.М. Смыслов, А.В. Лоба-

нов; под общ. ред. В.Ф. Безъязычного. М.: Машиностроение, 2007. 234 с.

2. **Архипов В.Е., Биргер Е.М., Лондарский А.Ф.** и др. Перспективные методы модификации поверхности металлов лазерной обработкой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 12. С. 26–31.

3. **Давыдов С.В.** Технология наномодифицирования доменных и ваграночных чугунов // Заготовительное производство. 2005. № 2. С. 3–9.

4. **Семенцев А.М.** Массоперенос легирующих элементов в технологических процессах лазерной обработки. М.: Машиностроение-1, 2006. 147 с.

5. **Говоров И.В., Колесников Ю.В., Миркин Л.И.** Повышение поверхностной прочности углеродистой стали при лазерном нанесении хромсодержащих покрытий // Физика и химия обработки материалов. 1988. № 5. С. 68–71.

УДК 621.9.025

**В.П. Табаков, М.Ю. Смирнов, А.Н. Тулисов**  
(ГОУ ВПО "Ульяновский государственный технический университет"),  
**А.В. Чихранов** (Технологический институт – филиал ФГОУ ВПО "Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия", г. Димитровград)  
E-mail: vpt@ulstu.ru

## Исследование напряженного состояния и циклической трещиностойкости многослойных покрытий режущего инструмента

*Исследовано влияние конструкции многослойного покрытия на напряженное состояние, циклическую трещиностойкость и интенсивность износа режущего инструмента.*

**Ключевые слова:** режущий инструмент, многослойные ионно-плазменные покрытия, циклическая трещиностойкость, напряжение, коэффициент интенсивности напряжения, интенсивность изнашивания.

*The influence of a design of a multilayered covering on a tension, cyclic stability of cracks and intensity of deterioration of the cutting tool is researched.*

**Keywords:** cutting tool, multilayered ionic-plasma coverings, cyclic stability of cracks, pressure, factor of intensity of pressure, intensity of deterioration.

Разрушение *износостойкого покрытия* (ИП) в процессе резания на контактной площадке по передней поверхности *режущего инструмента* (РИ) происходит вследствие образования и развития в покрытии трещин [1, 2]. Поэтому одной из важных характеристик ИП является его циклическая трещиностойкость, которую можно оценить по времени работы РИ до образования в покрытии трещины [2, 3].

В данной работе исследовали напряженное состояние и циклическую трещиностойкость многослойных покрытий с целью определения рациональной конструкции, обеспечивающей повышение работоспособности РИ при непрерывной токарной обработке. Циклическую трещиностойкость оценивали по методике, изложенной в работе [4]. Данная

методика позволяет определить циклическую трещиностойкость покрытий с учетом их физико-механических свойств, определяющих напряженное состояние покрытия, и процессов, протекающих на контактной площадке инструмента в процессе резания.

В качестве объектов исследования были выбраны многослойные покрытия на основе систем TiAlN–TiAlMeN, где Me – Cr, Zr, Mo, Si и TiZrN–TiZrMeN, где Me – Al, Cr, Mo, Si, которые наносили на твердосплавные пластины МК8 и МС146.

Выбор данных систем покрытий объясняется следующими обстоятельствами. Во-первых, их конструкция отвечает принципу формирования многослойных покрытий, используемых для РИ, работаю-

щего в условиях непрерывного резания [3]. Во-вторых, в качестве верхних слоев используются трехэлементные нитридные покрытия, более высокие физико-механические свойства (микротвердость, модуль Юнга и вязкость разрушения) которых согласно [2] способствуют значительному повышению времени работы РИ до образования в покрытиях трещин, что свидетельствует об увеличении способности материала покрытия сопротивляться усталостному разрушению. Интенсивность изнашивания РИ определяли по формуле

$$I = \frac{h_3}{tv} \cdot 10^{-3},$$

где  $h_3$  – величина фаски износа по задней поверхности, мм;

$t$  – время работы режущего инструмента до момента фиксирования величины  $h_3$ , мин;

$v$  – скорость резания, м/мин.

На первом этапе исследовали напряженное состояние и трещиностойкость указанных выше многослойных покрытий при общей их толщине, равной 6 мкм, и толщине слоев 3 мкм. Напряженное состояние оцени-

вали по остаточным  $\sigma_{ост}$  и термическим  $\sigma_{терм}$  напряжениям; напряжениям  $\sigma_1$ , возникающим в покрытиях в процессе резания; суммарным напряжениям  $\Sigma\sigma$ , действующим в слоях многослойного покрытия, и вязкости разрушения  $K_{Iсп}$ .

Результаты расчета напряжений и вязкости разрушения для многослойных покрытий системы TiAlN–TiAlMeN представлены в табл. 1.

Как видно из полученных данных, с увеличением толщины верхнего слоя покрытий наблюдается рост напряжений. Максимальная величина напряжений имеет место при толщине верхнего слоя покрытия, равной 4 мкм. Повышение величины суммарных напряжений с повышением толщины верхнего слоя покрытий составило 57,6...78 %. Наибольший уровень данных напряжений характерен для покрытий TiAlN–TiAlSiN.

По возрастанию суммарных напряжений покрытия можно расположить в следующий ряд: TiAlN–TiAlMoN; TiAlN–TiAlZrN; TiAlN–TiAlCrN; TiAlN–TiAlSiN. Для покрытий второй системы TiZrN–TiZrMeN получены аналогичные результаты. Для них также наблюдается повышение суммарных

Таблица 1

Значения напряжений и вязкости разрушения для покрытий TiAlN–TiAlMeN

№ п/п	Толщина слоя, мкм	$\sigma_{ост}$ , МПа	$\sigma_{терм}$ , МПа	$\sigma_1$ , МПа	$\Sigma\sigma$ , МПа	$K_{Iсп}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>
TiAlMoN						
1	2	–680	–919	354	–1246	10,77
	4	–1044	–1663	688	–2018	15,12
2	3	–1051	–1496	592	–1956	13,80
	3	–806	–1353	576	–1584	13,70
3	4	–1177	–1755	713	–2219	13,56
	2	–451	–793	347	–898	9,51
4	5	–1096	–1672	691	–2077	11,35
	1	–168	–302	135	–336	5,04
TiAlCrN						
1	2	–874	–939	351	–1462	10,44
	4	–970	–1688	685	–1974	14,79
2	3	–1225	–1538	588	–2175	12,68
	3	–680	–1383	574	–1489	12,88
3	4	–1273	–1816	710	–2380	12,02
	2	–353	–816	346	–823	8,73
4	5	–1152	–1743	689	–2207	9,97
	1	–128	–313	134	–307	4,60

Окончание табл. 1

№ п/п	Толщина слоя, мкм	$\sigma_{ост}$ , МПа	$\sigma_{терм}$ , МПа	$\sigma_1$ , МПа	$\Sigma\sigma$ , МПа	$K_{ICP}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>
TiAlZrN						
1	2	-875	-934	352	-1457	11,21
	4	-959	-1630	675	-1913	14,34
2	3	-1216	-1509	591	-2134	13,41
	3	-666	-1317	567	-1416	12,25
3	4	-1254	-1758	715	-2297	12,50
	2	-344	-767	343	-768	8,13
4	5	-1127	-1672	697	-2102	10,24
	1	-124	-292	134	-282	4,22
TiAlSiN						
1	2	-908	-976	365	-1519	12,29
	4	-995	-1659	680	-1974	14,79
2	3	-1284	-1593	614	-2263	14,96
	3	-703	-1354	571	-1486	12,86
3	4	-1348	-1874	742	-2480	14,19
	2	-369	-796	345	-820	8,69
4	5	-1232	-1806	725	-2313	11,84
	1	-135	-307	135	-307	4,60

Примечание. Последовательность слоев указана начиная с верхнего. Верхний слой – TiAlMeN, нижний – TiAlN.

напряжений с увеличением толщины верхнего слоя покрытий. Максимальные суммарные напряжения имеют покрытия TiZrN–TiZrSiN, а их рост с увеличением толщины верхнего слоя покрытий составил 77...85 %. По возрастанию суммарных напряжений покрытия данной системы располагаются следующим образом: TiZrN–TiZrMoN; TiZrN–TiZrAlN; TiZrN–TiZrCrN; TiZrN–TiZrSiN. Суммарные напряжения, возникающие в покрытиях TiZrN–TiZrMeN, выше на 5...10 % по сравнению с покрытиями TiAlN–TiAlMeN.

Увеличение толщины верхнего слоя покрытий как первой, так и второй системы ведет к росту вязкости разрушения, а максимальная ее величина наблюдается при толщине верхнего слоя, равной 3...4 мкм. При этом большее повышение вязкости разрушения имеет место для покрытий TiZrN–TiZrMeN. Так, для покрытий TiAlN–TiAlMeN повышение вязкости разрушения составило 17,6...28 %, для TiZrN–TiZrMeN – 27,9...31,1 %. Максимальную вязкость разрушения имеют покрытия, верхний слой которых легирован кремнием (TiAlN–TiAlSiN и TiZrN–TiZrSiN).

Результаты расчета циклической трещиностойкости для многослойных покрытий (рис. 1 и 2) показыва-

ли, что циклическая трещиностойкость многослойных покрытий существенно выше по сравнению с однослойными. Для покрытий первой системы циклическая трещиностойкость выше по сравнению с однослойным покрытием TiAlN в 5,7...7,8 раза в зависимости от конструкции покрытия, по сравнению с

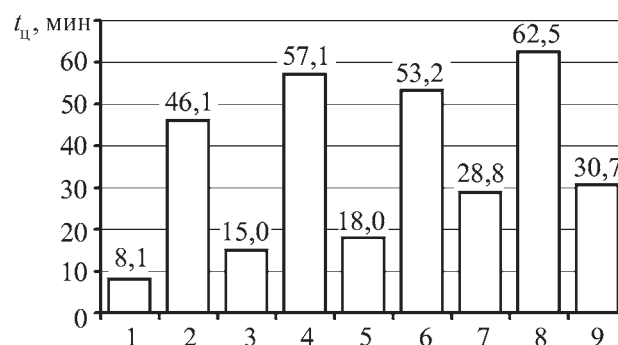
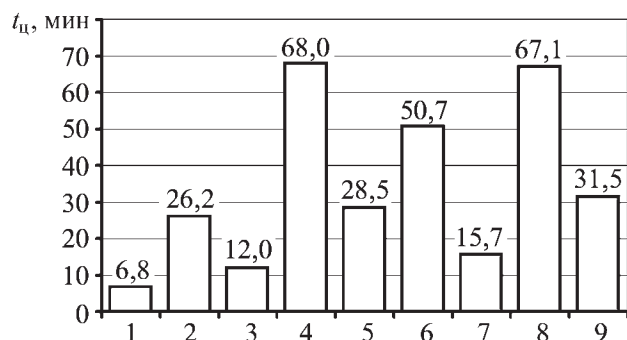


Рис. 1. Влияние конструкции многослойного покрытия TiAlN–TiAlMeN на циклическую трещиностойкость: 1 – TiAlN; 2 – TiAlN–TiAlMoN; 3 – TiAlMoN; 4 – TiAlN–TiAlCrN; 5 – TiAlCrN; 6 – TiAlN–TiAlZrN; 7 – TiAlZrN; 8 – TiAlN–TiAlSiN; 9 – TiAlSiN



**Рис. 2.** Влияние конструкции многослойного покрытия TiZrN–TiZrMeN на циклическую трещиностойкость: 1 – TiZrN; 2 – TiZrN–TiZrMoN; 3 – TiZrMoN; 4 – TiZrN–TiZrCrN; 5 – TiZrCrN; 6 – TiZrN–TiZrZrN; 7 – TiZrZrN; 8 – TiZrN–TiZrSiN; 9 – TiZrSiN

трехэлементными однослойными покрытиями в 1,9...3 раза.

Наибольшей циклической трещиностойкостью обладают покрытия TiAlN–TiAlSiN, величина которой выше по сравнению с покрытиями TiAlN–TiAlCrN; TiAlN–TiAlZrN и TiAlN–TiAlMoN соответственно на 9,3, 17,4 и 35 %. Таким образом, по возрастанию циклической трещиностойкости покрытия первой системы можно расположить в следующий ряд:

TiAlN–TiAlMoN; TiAlN–TiAlZrN; TiAlN–TiAlCrN; TiAlN–TiAlSiN.

Для покрытий системы TiZrN–TiZrMeN получены аналогичные результаты. По сравнению с однослойным покрытием TiZrN циклическая трещиностойкость многослойных покрытий TiZrN–TiZrMeN выше в 3,8...10 раз, по сравнению с однослойными трехэлементными покрытиями это повышение меньше и составляет 2,0...3,2 раза. Максимальную циклическую трещиностойкость имеют покрытия TiZrN–TiZrSiN и TiZrN–TiZrAlN соответственно 67,14 и 68,01 мин. По сравнению с покрытиями TiZrN–TiZrMoN и TiZrN–TiZrCrN циклическая трещиностойкость покрытий TiZrN–TiZrSiN и TiZrN–TiZrAlN выше в 2,7 и 1,4 раза соответственно.

Анализ полученных результатов исследований позволяет отметить, что наибольшей трещиностойкостью обладают покрытия TiZrN–TiZrAlN; TiZrN–TiZrSiN; TiAlN–TiAlSiN и TiAlN–TiAlCrN.

На втором этапе исследовали влияние конструкции многослойного покрытия на его напряженное состояние и циклическую трещиностойкость. В качестве исследуемых покрытий были выбраны по одному представителю из каждой системы многослойных покрытий, рассмотренных выше: TiAlN–TiAlCrN и TiZrN–TiZrAlN. Исследования проводили с исполь-

зованием симплекс-суммируемого ротатбельного плана второго порядка.

Влияние конструкции многослойного покрытия на величину напряжений, действующих в слоях покрытия, представлены в табл. 2 и на рис. 3.

Как видно из табл. 2 и рис. 3, конструкция многослойного покрытия (общая толщина и толщины отдельных слоев) оказывает существенное влияние на величину напряжений. Увеличение толщины верхнего слоя покрытий TiAlN–TiAlCrN и TiZrN–TiZrAlN приводит к росту остаточных термических напряжений и напряжений, действующих в покрытии в процессе резания. В результате этого растут и суммарные напряжения.

Такое влияние толщины верхнего слоя на величину напряжений наблюдается для всех общих толщин покрытия. Суммарные напряжения имеют максимальное значение при толщине верхнего слоя, равной 58...65 % от общей толщины многослойного покрытия.

Величина суммарных напряжений практически не зависит от общей толщины многослойного покрытия. Наблюдается небольшое снижение максимальных напряжений при увеличении общей толщины покрытия, которое составляет 3,5...4 %. Для покрытия TiAlN–TiAlCrN общей толщиной 5 мкм максимальные суммарные напряжения равны 3174 МПа, а толщиной 7 мкм – 3098 МПа. Аналогичная закономерность имеет место для покрытия TiZrN–TiZrAlN.

Увеличение толщины верхнего слоя многослойного покрытия оказывает влияние на величину вязкости разрушения (рис. 4). Зависимость данной величины от толщины верхнего слоя носит экстремальный характер. С ростом толщины верхнего слоя величина вязкости разрушения возрастает, достигает максимальной величины при его толщине, равной 50...66 % от общей толщины покрытия, а затем уменьшается. С увеличением общей толщины многослойного покрытия вязкость разрушения снижается. Для покрытия TiAlN–TiAlCrN это снижение составило 21 %, для TiZrN–TiZrAlN – 22,7 %.

Результаты расчета циклической трещиностойкости приведены в табл. 2 и на рис. 5.

Установлено, что увеличение толщины верхнего слоя многослойного покрытия ведет к росту циклической трещиностойкости, которая достигает своего максимального значения при его толщине, равной 40...60 % от общей толщины покрытия. Дальнейший рост толщины верхнего слоя приводит к снижению циклической трещиностойкости. Увеличение общей толщины многослойного покрытия вызывает некоторое снижение циклической трещиностойкости, которое составляет 5,5...7 % в зависимости от конструкции покрытия. Анализ полученных данных показы-

Таблица 2

Напряжения, действующие в слоях многослойного покрытия TiAlN–TiAlCrN

№ п/п	Толщина покрытия, мкм	Толщина верхнего слоя, мкм	Напряжения, действующие в верхнем слое, МПа				Циклическая трещиностойкость, мин
			$\sigma_1$	$\sigma_{ост}$	$\sigma_{терм}$	$\Sigma\sigma$	
1	5,0	3,5	724	-1439	-2635	-3174	41,7
2		3,0	678	-1521	-2500	-3108	51,8
3		2,5	588	-1513	-2195	-2826	55,4
4		2,0	453	-1413	-1722	-2330	52,3
5		1,5	276	-1223	-1080	-1619	42,6
6	7,0	5,5	613	-1104	-2170	-2493	12,5
7		5,0	673	-1374	-2433	-2903	32,4
8		4,5	690	-1553	-2527	-3098	45,7
9		4,0	662	-1641	-2453	-3079	52,4
10		3,5	591	-1639	-2210	-2845	52,5
11		3,0	476	-1545	-1798	-2396	45,9
12		2,5	318	-1361	-1217	-1732	32,8
13		2,0	115	-1085	-467	-854	13,0

вает, что большую циклическую трещиностойкость имеют покрытия TiZrN–TiZrAlN.

Как было сказано выше, трехэлементные одноосные покрытия на основе модифицированного нитрида  $\sigma$ , МПа

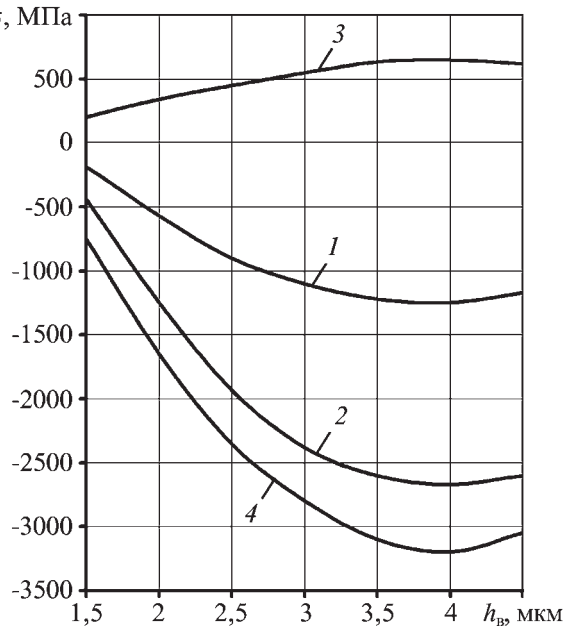


Рис. 3. Влияние толщины верхнего слоя TiZrAlN на величину напряжений, действующих в покрытии TiZrN–TiZrAlN: 1 –  $\sigma_{ост}$ ; 2 –  $\sigma_{терм}$ ; 3 –  $\sigma_1$ ; 4 –  $\Sigma\sigma$

да титана имеют более высокие физико-механические свойства и трещиностойкость. В связи с этим исследовали напряженное состояние, вязкость разрушения и циклическую трещиностойкость двухслойного покрытия, верхний слой которого представлял из себя сложный нитрид титана, циркония и кремния, а нижний – титана, циркония и алюминия – (TiZrAlN–TiZrSiN). Конструкция покрытия формировалась исходя из принципа, который был описан выше. Верхний слой покрытия имеет высокие меха-

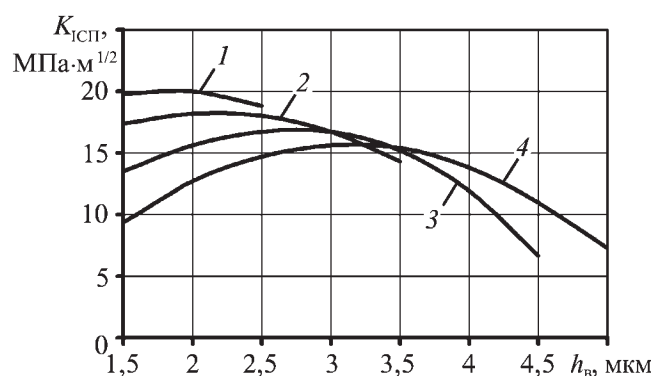
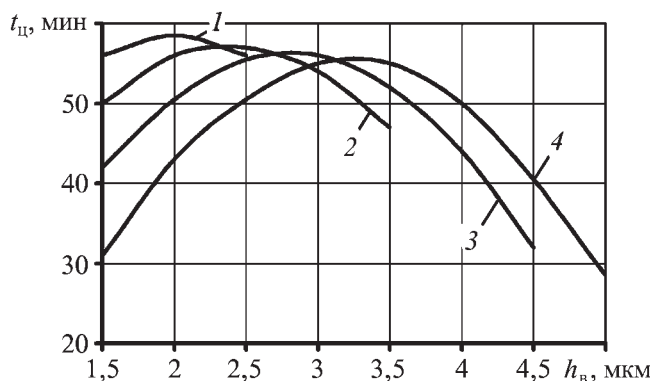


Рис. 4. Влияние толщины верхнего слоя TiAlCrN на вязкость разрушения покрытия TiAlN–TiAlCrN: 1, 2, 3, 4 – общая толщина покрытия 4, 5, 6 и 7 мкм соответственно

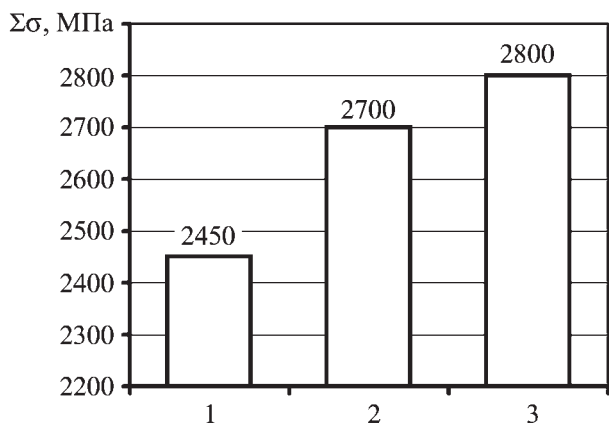


**Рис. 5.** Влияние толщины верхнего слоя TiZrAlN на циклическую трещиностойкость покрытия TiZrN-TiZrAlN: 1, 2, 3, 4 – общая толщина покрытия 4, 5, 6 и 7 мкм соответственно

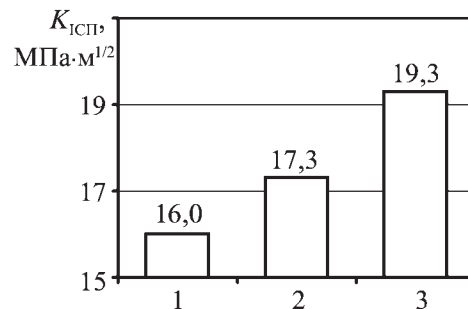
нические свойства, что позволяет сдерживать процессы образования трещин в покрытии, а нижний, благодаря наличию в нем алюминия, обеспечивает высокую прочность сцепления покрытия с инструментальной основой.

Установлено, что для покрытия TiZrAlN-TiZrSiN имеют место все закономерности, полученные для двух исследуемых выше многослойных покрытий. С увеличением толщины верхнего слоя наблюдается рост суммарных напряжений, возникающих в покрытии в процессе резания, вязкости разрушения и циклической трещиностойкости.

Максимальные значения перечисленных выше параметров наблюдаются при аналогичных толщинах верхнего слоя, как это имело место для покрытий TiAlN-TiAlCrN и TiZrN-TiZrAlN. В то же время покрытия TiZrAlN-TiZrSiN имеют более высокие зна-



**Рис. 6.** Суммарные напряжения, действующие в многослойных покрытиях: 1 – TiAlN-TiAlCrN; 2 – TiZrN-TiZrAlN; 3 – TiZrAlN-TiZrSiN

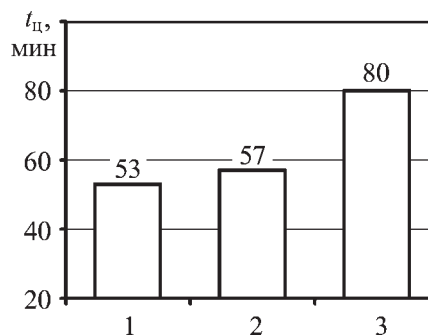


**Рис. 7.** Вязкость разрушения многослойных покрытий: 1 – TiAlN-TiAlCrN; 2 – TiZrN-TiZrAlN; 3 – TiZrAlN-TiZrSiN

чения суммарных напряжений, вязкости разрушения и циклической трещиностойкости (рис. 6–8): суммарные напряжения выше на 7,5...10 %, а циклическая трещиностойкость – на 18...25 % в зависимости от общей толщины покрытий и конструкции покрытия.

Таким образом, конструкция многослойных покрытий оказывает существенное влияние на напряжения, действующие в покрытиях, вязкость разрушения и циклическую трещиностойкость, а максимальная циклическая трещиностойкость имеет место при толщинах верхнего слоя, равных 40...60 % от общей толщины покрытия. Следовательно, многослойные покрытия с полученным соотношением слоев, должны обеспечить наибольшее снижение износа РИ.

Для проверки данного положения были проведены исследования по влиянию конструкции многослойного покрытия на интенсивность изнашивания РИ. Обработывали заготовки из сталей 30ХГСА и 12Х18Н10Т твердосплавными пластинами МС146 с покрытиями TiAlN-TiAlCrN. Установлено, что минимальная интенсивность изнашивания (рис. 9) для всех толщин покрытий наблюдается для конструк-



**Рис. 8.** Циклическая трещиностойкость многослойных покрытий: 1 – TiAlN-TiAlCrN; 2 – TiZrN-TiZrAlN; 3 – TiZrAlN-TiZrSiN

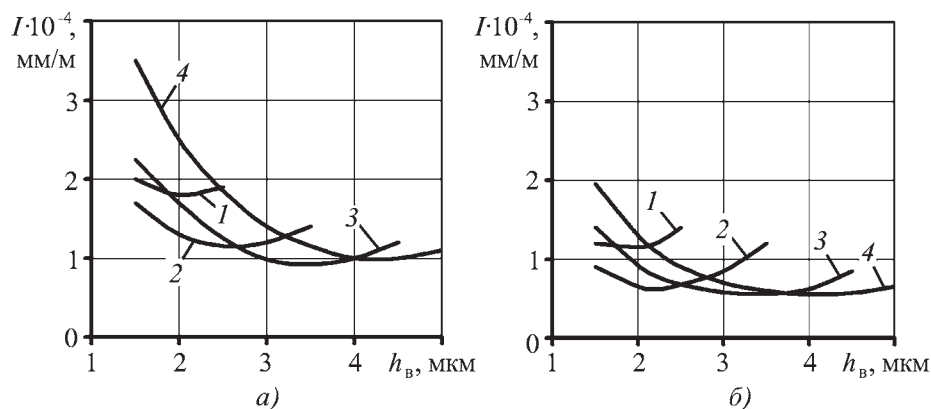


Рис. 9. Влияние толщины верхнего слоя TiAlCrN на интенсивность изнашивания РИ с покрытием TiAlN–TiAlCrN при обработке заготовки из стали 30ХГСА (а) и 12Х18Н10Т (б):

$a - v = 180$  м/мин,  $S = 0,25$  мм/об,  $t = 0,5$  мм;  $b - v = 80$  м/мин,  $S = 0,15$  мм/об,  $t = 0,5$  мм; 1, 2, 3, 4 – общая толщина покрытия 4, 5, 6, 7 мкм соответственно

ций, обеспечивающих максимальную циклическую трещиностойкость.

### Выводы

1. Многослойные покрытия по сравнению с многоэлементными однослойными покрытиями имеют более высокий уровень действующих в них суммарных напряжений, вязкость разрушения и циклическую трещиностойкость.

2. Трещиностойкость многослойных покрытий выше по сравнению с двухэлементными однослойными покрытиями в 3,8...10 раз, а по сравнению с трехэлементными однослойными – 1,85...3,23 раза в зависимости от конструкции покрытия.

3. Конструкция многослойного покрытия оказывает существенное влияние на суммарные напряжения, действующие в слоях многослойного покрытия, вязкость разрушения и циклическую трещиностойкость. Максимальная трещиностойкость многослойных покрытий наблюдается при толщинах верхнего слоя, равных 40...60 % от общей толщины покрытия. Данное соотношение имеет место для всех рассмот-

ренных многослойных покрытий независимо от их общей толщины.

4. Многослойные покрытия, имеющие наибольшую циклическую трещиностойкость, обеспечивают максимальное снижение интенсивности изнашивания РИ.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Табаков В.П. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями на основе сложных нитридов и карбонитридов титана. Ульяновск: УлГТУ, 1998. 123 с.
2. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2008. 311 с.
3. Табаков В.П., Чихранов А.В. Износостойкие покрытия режущего инструмента, работающего в условиях непрерывного резания. Ульяновск: УлГТУ, 2007. 255 с.
4. Табаков В.П., Смирнов М.Ю., Тулисов А.Н., Чихранов А.В. Методика расчета трещиностойкости многослойных покрытий режущего инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 3. С. 43–48.

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

Учредитель ООО "Издательство Машиностроение".

E-mail: utp@mashin.ru.

Web-site: www.mashin.ru.

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

Дизайнер Поджиготов К.Ю. Технический редактор Жиркина С.А.

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

Сдано в набор 11.05.10 г. Подписано в печать 14.07.10 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 6,26. Заказ 545. Свободная цена.

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

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15