ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 13
2017
№ 6 (150)
июнь

Издается с января 2005 г.

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

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

Заместитель главного редактора
д.ф.-м.н., проф.
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Заместители председателя редакционного совета:
д.т.н., проф.
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН
д.т.н., проф.
А.В. КИРИЧЕК
д.т.н., проф.
О.В. ЧУДИНА

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

Редакция:
И.Н. МЫМРИНА
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,
268-47-19.
Факс: (499) 269-48-97.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

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

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В. Разработка технологии непрерывного лазерного воздействия на титановольфрамовые твердые сплавы 243

Мокрицкий Б.Я., Соловьев В.А., Верещагин В.Ю., Саблин П.А. Повышение конкурентоспособности твердосплавных концевых фрез 247

Федосов С.А. Оценка трещиностойкости хрупких материалов методом индентирования 250

МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Блюменштейн В.Ю., Петренко К.П. Исследование влияния программ нагружения на шероховатость поверхности в процессах ППД 254

ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Безъязычный В.Ф., Румянцева Н.В. Способы восстановления радиальных зазоров турбины ГТД методами газотермического напыления и наплавки 259

Иванов В.И. Об эрозионной составляющей процесса формирования измененного поверхностного слоя на катоде при электроискровом легировании 264

ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Силаев Д.В., Сухочев Г.А., Коденцев С.Н. Комбинированная обработка поверхностей сложного профиля под покрытие 269

Смоленцев В.П., Кондратьев М.В., Иванов В.В. Проектирование технологических процессов получения высокоресурсных комбинированных покрытий 273

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

Абышев С.В. Способы магнитопорошкового контроля 281

ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ

Райков С.В., Кормышев В.Е., Громов В.Е., Кондратова О.А., Никитина Е.Н. Технология футеровки поверхностей большеобъемных ковшей экскаваторов 284

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

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней, в базу данных Chemical Abstracts, в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Упрочняющие технологии и покрытия", 2017

THE MONTHLY SCIENTIFIC AND PRODUCTION JOURNAL

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

Vol. 13
2017
№ 6 (150)
June

Since 2005, January

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

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

Editorial Assistant
Dr. of Phys.-Math. Sci.
V.Yu. FOMINSKY

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

Editorial council:
Yu.P. ANKUDIMOV
A.P. BABICHEV
V.P. BALKOV
V.M. BASHKOV
A.I. BELIKOV
A.I. BOLDYREV
S.N. GRIGORIEV
V.E. GROMOV
V.A. ZEMSKOV
S.A. KLIMENKO
Yu.R. KOPYLOV
N.K. KRIONI
V.P. KUZNETSOV
V.A. LEBEDEV
V.V. LYUBIMOV
E.D. MAKARENKO
B.Ya. MOKRITSKY
F.I. PANTELEENKO
H.M. RAHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.A. SHULOV
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
G.A. SUHOCHEV
V.P. TABAKOV
M.L. KHEIFETS

Edition:
I.N. MYMRINA
T.V. PARAYSKAYA

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogues: "Rospechat" **85159,** "Pressa Rossii" **39269**,"Pochta Rossii" **60252)** or in publishing office.
Ph.: (499) 269-52-98, 268-47-19.
Fax: (499) 269-48-97
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

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

CONTENTS

GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

Bogoduhov S.I., Kozik E.S., Svidenko E.V. Development of technology for continuous laser action on titanium-tungsten hard alloys 243

Mokritsky B.Ya., Solov'yov V.A., Vereschagin V.Yu., Sablin P.A. Increase of competitiveness carbide end mills 247

Fedosov S.A. Fracture toughness evaluation by the indentation method 250

MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Blumenstein V.Yu., Petrenko K.P. Research of stressing programs influence on surface roughness during surface plastic deformation 254

PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

Bezyazychnyi V.F., Rumyantseva N.V. Methods of recovery of the radial gaps of GTE turbine by means of thermal spraying and surfacing 259

Ivanov V.I. On the erosion part of the formation of the modified surface layer on the cathode at electro-spark alloying 264

PROCESSING BY COMBINED METHODS

Silaev D.V., Suhochev G.A., Kodentsev S.N. Combined treatment of surfaces of complex profiles under cover 269

Smolentsev V.P., Kondratyev M.V., Ivanov V.V. Designing of technological processes of production high resource composite coatings 273

QUALITY CONTROL OF STRENGTHENING PROCESSING

Abyshev S.V. The methods of the magnetic powder inspection 281

INFORMATION. PRODUCTION EXPERIENCE

Raykov S.V., Kormyshev V.E., Gromov V.E., Kondratova O.A., Nikitina E.N. Technology of surface lining of large volume excavator buckets 284

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

Journal is included in the List of the Highest Attestation Committee of Russian Federation (VAK RF) for publication of basic results of doctoral theses, Chemical Abstracts database, Russian Science Citation Index on Web of Science platform

© "Innovative mashinostroenie Publishers", "Strengthening Technologies and Coatings", 2017

УДК 621.78

С.И. Богодухов, Е.С. Козик, Е.В. Свиденко
(Оренбургский государственный университет)
E-mail: ogu@mailgate.ru

Разработка технологии непрерывного лазерного воздействия на титановольфрамовые твердые сплавы

Выполнен анализ методов повышения стойкости твердосплавного режущего инструмента, оказывающих различное влияние на его механические и эксплуатационные характеристики. Исследовано повышение эксплуатационных характеристик инструмента с твердосплавными пластинами при нагреве рабочей поверхности непрерывным лазерным излучением иттербиевого волоконного промышленного лазера ЛК-700 непрерывного действия.

Ключевые слова: *твердый сплав Т15К6, износ, число проходов, лазерный нагрев.*

The analysis of the numerous methods of increasing the resistance of carbide cutting tools providing a different effect on the mechanical and operational characteristics is made. Increase in operational properties of the tool with carbide insert while heating the working surface of the continuous laser radiation of ytterbium fiber laser LK industrial 700 continuous operation is carried out.

Keywords: *solid alloy T15K6, wear, number of passes, laser heating.*

Введение

В машиностроении особая роль принадлежит качеству инструментов, определяющих во многом производительность станков и себестоимость обработки в целом. Улучшение качества инструментов возможно достичь легированием инструментального материала, а также применением всех известных механизмов объемного упрочнения при термической обработке.

Развитие и совершенствование технологических процессов многих отраслей промышленности неразрывно связано с применением твердых сплавов.

Стойкость качественно изготовленного инструмента может быть значительно увеличена путем дополнительной обработки его поверхностного слоя или изменения структуры.

Существуют многочисленные методы повышения стойкости твердосплавного режущего инструмента, оказывающие различное влияние на механические свойства [1—11, 13—15]. Выбор того или иного метода повышения стойкости зависит от многих факторов, таких как тип инструмента; обрабатываемый материал; условия работы режущего инструмента; механические свойства, предъявляемые к режущему инструменту; наличие оборудования для повышения эксплуатационных свойств; экономическая целесообразность применения упрочняющей технологии.

Цель работы — разработка метода лазерной обработки изделий из титановольфрамовых твердых сплавов.

Материал и методики исследования

Повышение эксплуатационных характеристик инструмента с твердосплавными пластинами осуществляли нагревом рабочей поверхности непрерывным лазерным излучением. Для исследования использовали образцы в виде четырехгранных пластин, нагрев проводили излучением иттербиевого волоконного лазера ЛК-700 в среде азота при давлении 20...30 кПа и диаметре сфокусированного луча $d = 2{,}5$ мм. В начальной стадии нагрева при плотности мощности излучения 300 Вт/см^2 скорость перемещения луча лазера составляла 2, 4 и 8 мм/с, при этом имели место оплавление поверхности и коагуляция карбидов, затем увеличивали скорость перемещения луча лазера до 20, 30 и 40 мм/с. После лазерной обработки по матрице полного факторного эксперимента (план $N = 2K$, где 2 — число уровней (верхний +1 и нижний –1); K — число факторов, $K = 2$)

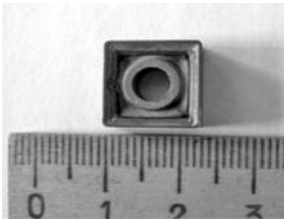


Рис. 1. Пластина после обработки на лазерном станке ЛК-700

проводили испытания на износ при резании. Фотография пластины после обработки на лазерном станке ЛК-700 представлена на рис. 1.

Изменяемыми факторами являлись x_1 — плотность мощности, Вт/см^2; x_2 — скорость перемещения лазерного луча, мм/с.

В качестве параметров оптимизации приняли три показателя: y_1 — микротвердость, Н/мм^2; y_2 — износ по передней поверхности, мм; y_3 — износ по задней поверхности, мм.

При лазерной закалке давление газа N_2 уменьшали до 0,2...0,3 атм. Диаметр сопла d = 2 мм, а диаметр пятна лазерного луча определяется фокусирующей системой. В начальной стадии при плотности мощности 300 Вт/см^2 и скорости перемещения луча 2, 4, 8 мм/с имело место оплавление, затем скорость увеличивали до 20, 30, 40 мм/с. После лазерной обработки при диаметре сфокусированного луча d = 2,5 мм согласно матрице планирования эксперимента проводили испытания резанием.

Результаты исследования и их обсуждение

Варьировали плотность мощности излучения, скорость перемещения лазерного луча в пределах (300 ± 100) Вт/см^2 и (20 ± 10) мм/с соответственно. После обработки экспериментальных данных, приведенных в таблице, получены аппроксимирующие зависимости износов, мм, пластин по передней поверхности $h_{п.п}$ и задней поверхности $h_{з.п}$ при резании как функции плотности мощности P, Вт/см^2, и скорости перемещения лазерного луча V, мм/с

$$h_{п.п}(P, V) = 0{,}06 + P(0{,}001 - 8{,}33333\cdot10^{-8}V), \quad (1)$$

$$h_{з.п}(P, V) = 0{,}14 + P(-0{,}0002 - 8{,}33333\cdot10^{-8}V) + 0{,}0000166667V. \quad (2)$$

Графические изображения рассчитанных по формулам (1) и (2) износов пластин при резании в зависимости от значений плотности мощности P и скорости перемещения лазерного излучения V, полученные с использованием пакета Mathematica 6.0, представлены на рис. 2 и 3.

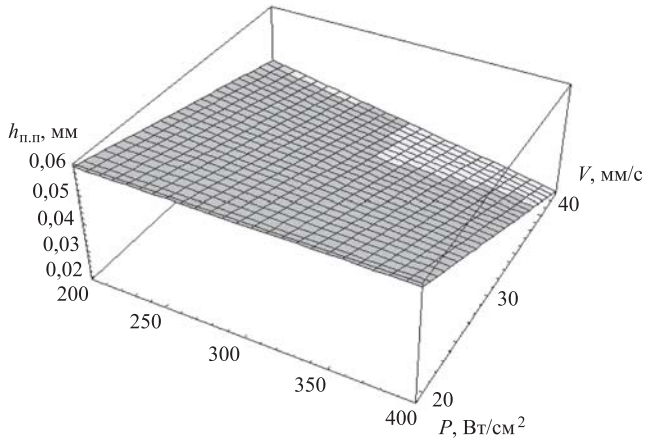


Рис. 2. Износ пластин при резании после обработки непрерывным лазерным излучением по передней поверхности

При определенном режиме обработки можно добиться того, чтобы износы по обеим кромкам были равномерными (линия *l* на рис. 4). Незначительная кривизна этой кривой четвертого порядка на рис. 4 делает ее похожей на прямую линию.

Экспериментально (с помощью термокарандашей фирмы Tempilstik) было установлено, что зависимость температуры на поверхности пластины от мощности лазерного излучения может быть представлена формулой

$$T = 42{,}000 + 0{,}3021P + 0{,}0018P^2. \quad (3)$$

Выходные параметры эксперимента

Номер опыта *i*	Значения факторов				Износ		
	Плотность мощности, Вт/см^2	Скорость перемещения лазерного луча, мм/мин	Кодирование	Натуральная величина, %	Число проходов	$h_{п.п}$	$h_{з.п}$
Опыты на верхнем и нижнем уровнях							
1	400	1250	+1	20	5	0,06	0,04
2	200	1250	+1	20	5	0,06	0,1
3	400	2250	–1	10	5	0,02	0,02
4	200	2250	–1	10	5	0,04	0,1
Параллельные опыты на основном уровне							
5-1	300	1250	0	15	5	0,03	0,02
6-2	300	1500	0	15	5	0,1	0,08
7-3	300	2250	0	15	5	0,08	0,08
Исходные значения	—	—	—	—	5	0,14	0,1

Формула (3) и входящие в нее числовые коэффициенты получены при замене точечного ряда кривой с помощью программы CurveExpert.

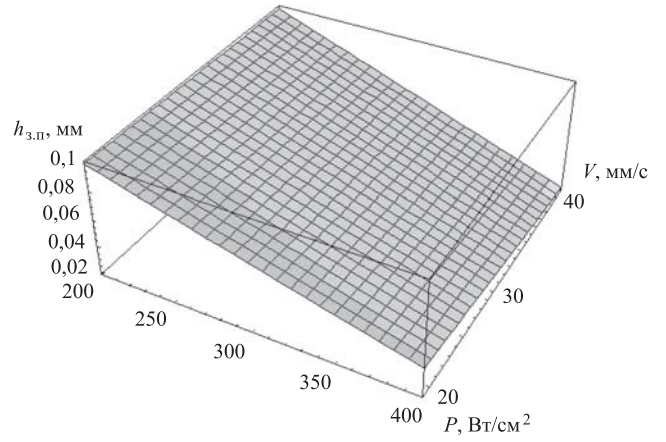


Рис. 3. Износ пластин при резании после обработки непрерывным лазерным излучением по задней поверхности

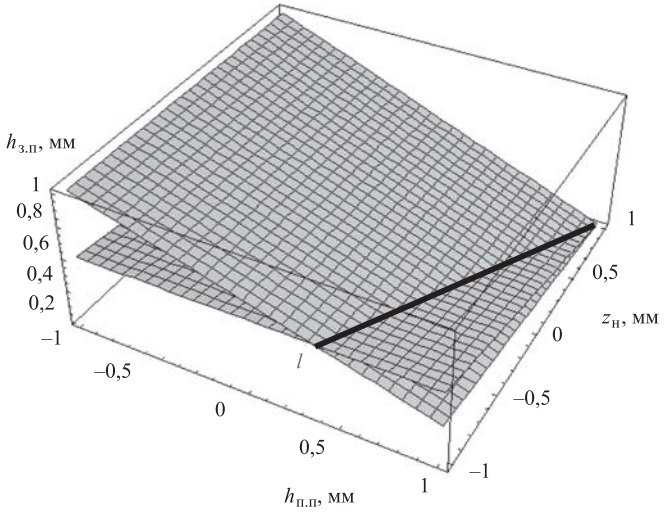


Рис. 4. Линия равномерного износа

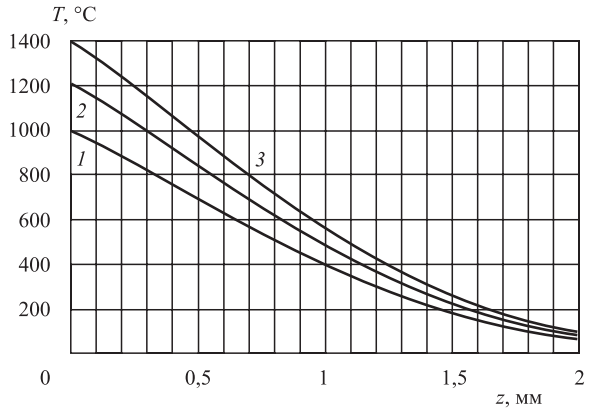


Рис. 5. Зависимости температуры нагрева *T* от глубины нагрева *z*: *1* — время нагрева $t = 0{,}01$ с; *2* — $t = 0{,}015$ с; *3* — $t = 0{,}02$ с

Трудности с определением температуры внутри пластины (процесс очень скоротечный) привели к необходимости построения аналитической модели.

За основу была взята известная зависимость для определения температуры нагрева лазерным излучением [12]

$$T(z, t) = \frac{q}{\lambda} 2(at)^{1/2} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right) - \right.$$
$$\left. - \frac{z}{2(at)^{1/2}} \Phi\left(\frac{z}{2(at)^{1/2}}\right) \right\}, \qquad (4)$$

где z — глубина нагрева, м; t — время нагрева, с; q — плотность мощности воздействия, Дж/м^2; λ — теплопроводность, Вт/(м·К); a — температуропроводность, м^2/с; $\Phi(z)$ — функция ошибок.

Температура нагрева поверхности (контролировали с помощью термокарандашей фирмы Tempilstik) коррелирует с экспериментальными данными, что свидетельствует об адекватности математической модели реальному процессу.

Зависимости температуры нагрева от его глубины и времени приведены на рис. 5 и 6.

Для описания зависимости скорости нагрева $v_н$ по глубине $z_н$ от времени t при лазерной обработке [12] предложено использовать модифицированную формулу Рыкалина

$$v_н = \frac{q_0}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \left\{ \frac{\exp[-z_н^2/(4at) - r^2/(4at + k^{-1})]}{\sqrt{t}(1 + 4akt)} - \right.$$
$$\left. - \frac{\exp\{-z_н^2/[4a(t-\tau) - r^2]/[4a(t-\tau) + \kappa^{-1}]\}}{\sqrt{t-\tau}[1 + 4ak(t-\tau)]} \right\}, \qquad (5)$$

где q_0, r, τ, κ — константы.

Эмпирически установлено, что между износом при резании по задней поверхности и микротвердостью

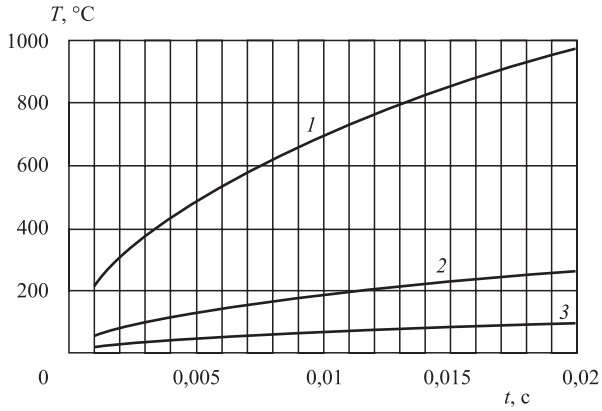


Рис. 6. Зависимости температуры нагрева *T* от времени нагрева *t*: *1* — глубина нагрева $z = 2{,}0$ мм; *2* — $z = 1{,}5$ мм; *3* — $z = 0{,}5$ мм

пластины существует связь, позволяющая по замерам микротвердости косвенно судить об износе пластины по задней поверхности,

$$h_{з.п} = -5{,}46 + HV \cdot 7{,}88 \cdot 10^{-4} - HV^2 \cdot 2{,}69 \cdot 10^{-8}, \quad (6)$$

где $h_{з.п}$ — износ по задней поверхности, мм; HV — микротвердость, Н/мм^2.

Эффективность нагрева регулируется скоростью перемещения лазерного луча и мощностью излучения. При использовании непрерывного лазерного воздействия в качестве источника нагрева износ при резании пластин твердого сплава Т15К6 уменьшается от 2 до 3 раз.

Выводы

1. Выполнен анализ многочисленных методов повышения стойкости твердосплавного режущего инструмента, оказывающих различное влияние на его механические и эксплуатационные характеристики.

2. Подтверждено повышение эксплуатационных характеристик инструмента с твердосплавными пластинами при нагреве рабочей поверхности непрерывным лазерным излучением иттербиевого волоконного промышленного лазера ЛК-700 непрерывного действия.

3. Получены зависимости износов пластин по передней и задней поверхностям при резании от плотности мощности и скорости перемещения лазерного луча.

4. Установлено, что между износом при резании по задней поверхности и микротвердостью пластины существует связь, позволяющая по замерам микротвердости косвенно судить об износе пластины по задней поверхности.

5. При использовании непрерывного лазерного воздействия в качестве источника нагрева при резании износ пластин твердого сплава Т15К6 уменьшается от 2 до 3 раз.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Лошак М.Г.** Прочность и долговечность твердых сплавов. Киев: Наук. думка. 1984. 326 с.

2. **Богодухов С.И., Гарипов В.С., Козик Е.С., Солосина Е.В.** Термическая обработка твердого сплава Т14К8 // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 12. С. 41—44.

3. **Способ** термической обработки режущего инструмента с напаянной твердосплавной пластиной: Пат. 2517093 РФ, МПК B 22 F 3/24 / Богодухов С.И., Проскурин А.Д., Козик Е.С., Шейнин Б.М., Солосина Е.В. // заявитель и патентообладатель Оренбургский государственный университет (RU). № 2013014370/02; Заявл. 09.04.2013; Опубл. 27.05.2014; Бюл. № 15. 5 с.

4. **Панов В.С., Чувилин А.М.** Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. М., МИСИС, 2001. 428 с.

5. **Лошак М.Г.** Упрочнение твердых сплавов. Киев: Наук. думка. 1977. 148 с.

6. **Способ** закалки твердого сплава: Пат. 2294261 РФ, МПК B 22 F 3/24, C 22 C 29/00 / Осколкова Т.Н. № 2005118570/02; Заявл. 15.06.2005; Опубл. 27.02.2007. Бюл. № 6. 5 с.

7. **Способ** закалки твердого сплава: Пат. 2356693 РФ, МПК B 22 F 3/ 24, C 22 C 29/00 / Осколкова Т.Н. № 2007139225/02; Заявл. 22.10.2007; Опубл. 27.05.2009. Бюл. № 15. 5 с.

8. **Способ** закалки твердого сплава на основе карбида вольфрама: Пат. № 2392342 РФ, МПК B 22 F 3/ 24 / Осколкова Т.Н. № 2009116915/02; Заявл. 04.05.2009; Опубл. 20.05.2011. Бюл. № 17. 5 с.

9. **Способ** закалки твердого сплава на основе карбида вольфрама: Пат. 2355513 РФ, МПК B 22 F 3/ 24, C 22 C 29/08 / Осколкова Т.Н., Щеглова А.Б. № 2007133961/02; Заявл. 11.09.2007; Опубл. 20.05.2009. Бюл. № 14. 3 с.

10. **Способ** получения режущего инструмента из карбидосодержащих сплавов вольфрамовой (ВК) и титановольфрамовой (ТК) групп: Пат. 2528539 РФ, МПК B 22 F 3/24 / Богодухов С.И. и др. № 2013121411/02; Заявл. 07.05.2013; Опубл. 20.09.2014. Бюл. № 26. 6 с.

11. **Guo Zhixing, Xiong Ji, Yang Mei, Jiang Cijin.** WC—TiC—Ni cemented carbide with enhanced properties // J. Alloys and Compounds. 2008. Vol. 465. № 1—2. P. 157—162.

12. **Вейко В.П., Шахно Е.А.** Сборник задач по лазерным технологиям. СПб, СПбГУ ИТМО, 2007. 67 с.

13. **Богодухов С.И., Козик Е.С.** Материаловедение. Старый Оскол: ТНТ, 2014. 536 с.

14. **Бондаренко В.А., Богодухов С.И.** Обеспечение качества и улучшение характеристик режущих инструментов. М.: Машиностроение, 2000. 144 с.

15. **Козик Е.С., Шейнин Б.М., Стрижов А.О., Свиденко Е.В.** Влияние режимов термической обработки на свойства твердосплавного режущего инструмента Т14К8 // Вестник ОГУ. 2015. № 1. С. 194—200.

УДК 621.9

Б.Я. Мокрицкий, В.А. Соловьев, В.Ю. Верещагин, П.А. Саблин
(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет)
E-mail: boris@knastu.ru

Повышение конкурентоспособности твердосплавных концевых фрез

При оснащении машиностроения современным металлообрабатывающим оборудованием и расширении номенклатуры обрабатываемых материалов в число важнейших задач включается снижение доли инструментальных затрат в себестоимости продукции. Показаны приемы снижения доли инструментальных затрат за счет экономии используемого твердого сплава. В том числе предложено применять составные концевые твердосплавные фрезы, у которых режущая часть выполнена из инструментального твердого сплава, а хвостовик — из конструкционной стали.

Ключевые слова: *составная концевая твердосплавная фреза, экономия твердого сплава.*

Vehicle engineering modern machines while expanding the range of processed materials to the highest priority task raises the need to reduce the share of tool costs in the cost of production. The paper shows techniques for reducing the share of tool costs by saving used hard alloy. Including proposed to use a composite tungsten carbide end mills, where the cutting part is made of tool hard alloy, and the shank is made of structural steel.

Keywords: *composite tungsten carbide end mill, saving hard alloy.*

Введение

В условиях высокопроизводительной обработки на станках с ЧПУ все более интенсивно применяются монолитные (цельные) твердосплавные концевые фрезы. Стоимость таких фрез высока в связи с высокой стоимостью инструментального твердого сплава и трудоемкостью вышлифовывания стружечных канавок на цельной цилиндрической заготовке. Высокие жесткость и износостойкость таких фрез актуальны при обработке заготовок деталей из высокопрочных материалов. Однако в авиа-, судостроении и в химическом и нефтегазовом машиностроении такие фрезы стали применять повсеместно, что привело к чрезмерному росту доли инструментальных затрат в себестоимости изделий. В частности, форсирование режима резания привело к тому, что вместо нормального процесса изнашивания зубьев фрезы стал доминировать отказ фрезы по причине излома хвостовика в месте его крепления в патроне (цанге) (рис. 1) [1]. Это обусловливает необходимость разработки конкурентных твердосплавных концевых фрез, исключающих такой вид отказа и снижающих долю инструментальных затрат без снижения качества и производительности обработки. Ниже приведены некоторые результаты разработки таких фрез.

Концепция повышения работоспособности твердосплавных концевых фрез за счет оптимизации свойств их хвостовика

Исследование поверхностей изломов монолитных фрез, выполненных из разных отечественных и зарубежных твердосплавных инструментальных материалов, показывает, что усталостная природа [1, 2] скола

а) *б)*

Рис. 1. Примеры отказов цельных твердосплавных концевых фрез при обработке заготовок деталей:
а — из коррозионно-стойких сталей; *б* — из алюминиевых сплавов

хвостовиков фрез связана в первую очередь с относительно невысокой сопротивляемостью твердых сплавов циклическому нагружению, тем более, в знакопеременных (при смене направления подачи со встречного фрезерования на попутное и наоборот) условиях фрезерования. Необходимо совершенствование концевых фрез. Возможны различные его направления: от управления свойствами материала до оптимизации конструкции фрез.

Совершенствование конструкции осуществляется, например, несколькими ведущими в мире зарубежными инструментальными фирмами (Iskar, Walter, Mitshubishi, Sandvic Coromant). Ими выпускаются сборные твердосплавные концевые фрезы, у которых хвостовик и режущая часть сочленены между собой с помощью стального переходника и выполнены из разных твердосплавных материалов, а именно хвостовик выполнен из твердого сплава, модуль упругости которого соответствует максимальному сопротивлению материала усталостному разрушению на изгиб и кручение (рис. 2). Это снижает вероятность усталостного разрушения хвостовика. Сборная конструкция такой фрезы обеспечивает возможность замены ее изнашивающейся твердосплавной режущей части. Для этого резьбовое соединение твердосплавной режущей части выполнено с переходником из конструкционной стали (трапецеидальная коническая резьба на выступе режущей части и ответная резьбовая поверхность в отверстии переходника). Соединение переходника с хвостовиком паяное. Необходимость в переходнике связана с тем, что вышлифовать резьбовую поверхность в стальном переходнике проще, чем в твердосплавном хвостовике.

Рис. 2. Сборная твердосплавная концевая фреза производства фирмы Sandvic Coromant и ее сменная рабочая часть (справа)

Такая конструкция фрезы хороша при высокой культуре выполнения фрезерных работ, когда при достижении допустимого износа режущих кромок фрезы смена режущей части будет проведена обязательно. Ограничением в ее применении является неоправданно высокая цена таких фрез (до двух раз дороже монолитной фрезы).

Для отечественных условий эксплуатации концевых твердосплавных фрез применение таких фрез пока преждевременно из-за низкой культуры производства. Необходимы иные, более дешевые решения. В качестве таких решений предлагается твердосплавную режущую часть концевой фрезы сопрягать с хвостовиком, выполненным из более дешевого материала, способного выдерживать циклические знакопеременные нагрузки, типичные для фрезерования торцевыми фрезами в течение длительного времени. Условно такие фрезы названы составными.

Это не означает, что составные фрезы должны вытеснить монолитные, но сократить их область применения могут. Монолитные фрезы останутся незаменимыми тогда, когда обработку невозможно провести составными, например, при требовании высокой точности изготовления.

Исследование эффективности составных фрез и обсуждение полученных результатов

Результаты анализа причин выхода из строя монолитных концевых фрез приведены на рис. 3. Если принять во внимание высокую стоимость таких фрез и объем их потребления (например, на авиационном предприятии), то становится вполне очевидной необходимость поиска новых решений.

Методы моделирования процесса резания методом конечных элементов получили в настоящее время зна-

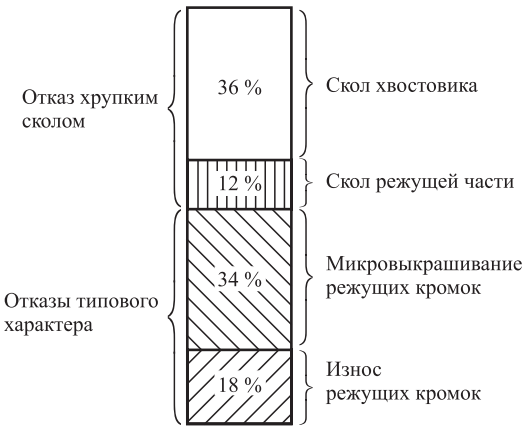


Рис. 3. Причины отказов твердосплавных монолитных фрез

чительное развитие, обеспечивая возможность прогнозирования формы и размеров стружки и обработанной поверхности, напряженно-деформированного состояния, температурного поля, проекций силы резания, остаточных напряжений, в случае необходимости даже с подводом дополнительной энергии. Совершенствование компьютерной техники открыло широкие возможности для имитационного моделирования рабочих процессов механической обработки методом конечных элементов. Есть основания считать, что программное обеспечение SolidWorks (лицензионный вариант имеется) позволяет решить стоящую задачу.

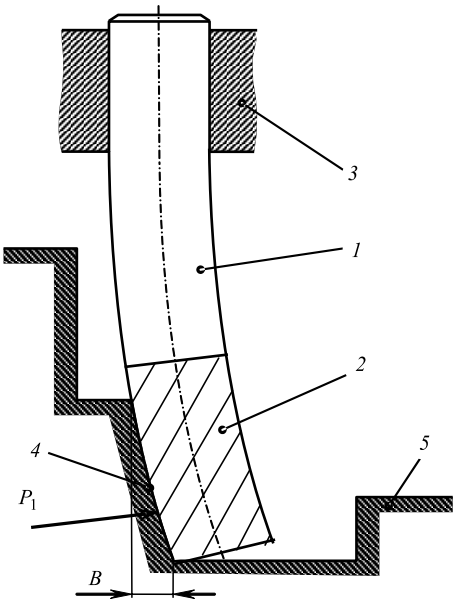


Рис. 4. Схема образования отклонения *B* от вертикали стенки обрабатываемого паза при действии радиальной составляющей P_1 силы резания:
1 — хвостовик фрезы; *2* — твердосплавная режущая часть фрезы; *3* — зажимное устройство станка; *4* — обработанная поверхность паза заготовки; *5* — паз заготовки

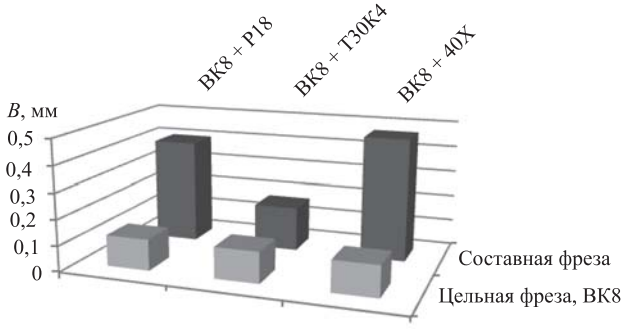


Рис. 5. Пример применения компьютерного моделирования для проектирования составных концевых твердосплавных фрез. Номограмма для сравнения точностных параметров обработки стенки паза, имеющей протяженность 40 мм, монолитной (цельной) и составной фрезами при общей длине фрез 220 мм

Вполне очевидно, что составные фрезы по жесткости проигрывают монолитным. Проигрывают тем больше, чем больше длина хвостовика. Но не следует оценивать проигрыш в точности изготовления изделий по прогибу фрезы на длине ее консольной части, поскольку не отклонение оси (цилиндра) фрезы определяет погрешность изготовления детали, а отклонение *B* обработанной поверхности детали, которое тем меньше, чем меньше протяженность этой поверхности (рис. 4).

С помощью компьютерного моделирования исследованы возможности применения различных материалов для изготовления хвостовика составной фрезы, в частности конструкционных сталей и инструментальных материалов. В ходе моделирования определяли напряжения в материале фрезы, по ним находили деформации корпуса фрезы, по деформациям вычисляли отклонение обработанной поверхности детали *B*. Пример результатов таких расчетов приведен на рис. 5. Анализ полученных результатов позволил создать несколько [3—8] конкурентоспособных конструкций составных фрез, позволяющих сократить на 30...70 % инструментальные расходы без ущерба для точности и производительности обработки.

Выводы

1. Теоретическое и экспериментальное исследование возможностей составных твердосплавных концевых фрез показало справедливость рассмотренной методологической предпосылки, на основе результатов компьютерного моделирования выявлены рациональные направления совершенствования концевых фрез, оптимизированы их конструкции.

2. Разработанные конструкции прошли эксплуатационную проверку. Каждое из решений может конкурировать с монолитными твердосплавными концевыми фрезами, у каждого из этих решений есть свои достоинства и недостатки.

3. Расчеты, моделирование и апробация составных твердосплавных концевых фрез показывают, что:

оптимизацией доли длины твердосплавной режущей части в общей длине фрезы можно обеспечить высокопроизводительную обработку заготовок деталей общемашиностроительного назначения, химического и нефтегазового машиностроения без снижения точности обработки;

повышение жесткости места сочленения твердосплавной режущей части и хвостовика можно обеспечить [4—8] повышением прочности их соединения и обеспечением передачи более значимых крутящих

моментов, что позволяет применять составные фрезы для изготовления ответственных деталей в авиа- и судостроении;

составные фрезы позволяют экономить от 30 до 70 % инструментальных твердосплавных материалов;

возможности совершенствования составных твердосплавных концевых фрез не исчерпаны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Мокрицкий Б.Я., Верещагина А.С., Верещагин В.Ю.** Моделирование напряжений и деформаций твердосплавных концевых фрез // Ученые записки КнАГТУ. № 1 (25). 2016. С. 82—87.

2. **Мокрицкий Б.Я., Верещагин В.Ю., Мокрицкая Е.Б., Пячин С.А., Белых С.В., Верещагина А.С.** Составные концевые фрезы как альтернатива цельным и сборным твердосплавным концевым фрезам // СТИН. 2016. № 6. С. 7—10.

3. **Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Кваша В.Ю.** Экспрессная сравнительная оценка работоспособности концевых твердосплавных фрез // Металлообработка. 2015. № 2 (86). С. 49—53.

4. **Пат. РФ 154597**, МПК B 23 C 5/10. Фреза концевая составная с центрирующим пояском / Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Панова Е.А. и др. Заявл. 10.03.2015; Опубл. 27.08.2015. Бюл. № 24.

5. **Пат. РФ 154595**, МПК B 23 C 5/10. Фреза концевая составная с пояском и шлицем / Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Панова Е.А. и др. Заявл. 10.03.2015; Опубл. 27.08.2015. Бюл. № 24.

6. **Пат. РФ 154596**, МПК B 23 C 5/10. Фреза концевая составная с центрирующим конусом / Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Панова Е.А. и др. Заявл. 10.03.2015; Опубл. 27.08.2015. Бюл. № 24.

7. **Пат. РФ 154594**, МПК B 23 C 5/10. Фреза концевая составная с пояском и крестовым шлицем / Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Панова Е.А. и др. Заявл. 10.03.2015; Опубл. 27.08.2015. Бюл. № 24.

8. **Пат. РФ 154593**, МПК B 23 C 5/10. Фреза составная с центрирующим конусом и шлицевым соединением / Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Панова Е.А. и др. Заявл. 10.03.2015; Опубл. 27.08.2015. Бюл. № 24.

УДК 620.17

С.А. Федосов
(Самарский государственный технический университет)
E-mail: fedosov@samgtu.ru

Оценка трещиностойкости хрупких материалов методом индентирования

Проведен сравнительный анализ методик оценки трещиностойкости и термостойкости материалов методом индентирования, рассмотрен вязкохрупкий переход.

Ключевые слова: *индентирование, трещина, хрупкость, вязкость, термостойкость.*

Critical review of the procedures for evaluation of crack and thermal shock resistance by indentation is presented. The brittle to ductile transition is considered as well.

Keyword: *indentation, crack, brittleness, toughness, thermal shock resistance.*

Применение методик индентирования позволяет оценивать многие механические характеристики материалов без необходимости разрушать изделие и подготавливать образцы специальной формы. Так, давно известно уравнение Табора—Марковца, которое для материалов, разрушающихся вязко, позволяет оценить предел прочности по твердости. Сделать такую оценку для хрупких материалов не представляется возможным. Вместе с тем индентирование хрупких материалов в случае когда под индентором твердомера сразу образуются трещины позволяет получить некоторые другие характеристики этих материалов [1].

Обзор наблюдений таких трещин был выполнен в [2]. По морфологии все трещины разделены на пять основных типов: 1) конические (герцевы) — образуются близко к контактной периферии и распространяются по направлению главных напряжений; 2) радиальные (Палмквиста) — распространяются из углов отпечатка

параллельно осям нагрузки; 3) медианные — образуются под пластическим ядром и также параллельны осям нагрузки; 4) радиальные и медианные трещины — часто растут вглубь и к поверхности соответственно, в результате чего формируются так называемые "полупенсовые" (half-penny) трещины; 5) боковые трещины — возникают под пластической зоной (обычно при разгружении) и распространяются параллельно поверхности.

Появление трещин при индентировании позволяет определять некоторые параметры разрушения. Вместе с тем возникает вопрос об их влиянии на получаемую нагрузочную кривую и измеряемые объемные параметры индентируемого материала, такие, например, как твердость. Согласно экспериментальным данным из [2] и МКЭ-моделированию, выполненному в [3, 4], это влияние в большинстве случаев незначительное. Также необходимо отметить, что моделирование конических (герцевых) трещин требует учета трения и по этой причине в [3, 4] оно не проводилось. Отмечается [4] хорошее выполнение модели Друкера—Прагера [5] в чувствительных к давлению твердых металлах и керамике.

Определение критического коэффициента интенсивности напряжений

Еще в начале 1980-х гг. было показано [6], что длина c образующихся при индентировании хрупких материалов радиальных трещин (рис. 1) связана с параметром K_{Ic}:

$$K_{Ic} = \chi_r F_c^{-3/2}, \qquad (1)$$

где K_{Ic} — критический коэффициент интенсивности напряжений; χ_r — коэффициент, зависящий от свойств материала и геометрии индентора; F — индентирующая сила.

Результирующие формулы моделей различных авторов для индентирования пирамидкой Виккерса приведены в таблице. Как правило, для определения K_{Ic}

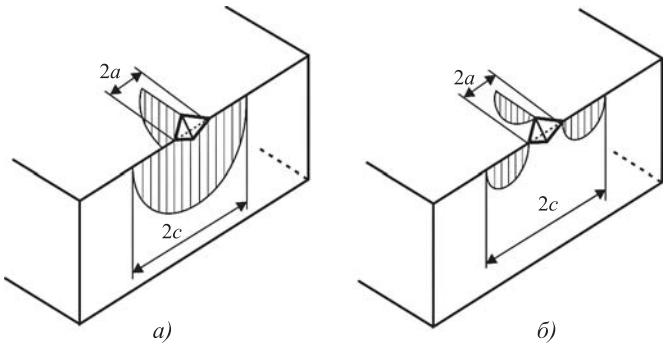


Рис. 1. Геометрические параметры, используемые для расчета K_{Ic} при индентировании хрупких материалов:
а — полукруговая трещина; *б* — бикруговая трещина; *c* — радиус трещины; $2a = d$ — диагональ отпечатка Виккерса

Формулы моделей для индентирования пирамидкой Виккерса

№ п/п	Тип трещины	Расчетная формула для K_{Ic}	Литературный источник
1	М	$0{,}016(E/\mathrm{H})^{1/2}(F/c^{3/2})$	[8]
2	М	$0{,}16\mathrm{H}a^{1/2}(c/a)^{-3/2}$	[9]
3	М	$\mathrm{H}a^{1/2}(E/\mathrm{H})^{0,4}10^{x}$	[10]
4	М	$0{,}067\mathrm{H}a^{1/2}(E/\mathrm{H})^{0,4}(c/a)^{-3/2}$	[11]
5	Р	$0{,}018\mathrm{H}a^{1/2}(E/\mathrm{H})^{0,4}(c/a-1)^{-1/2}$	[11]
6	Р	$0{,}073\mathrm{H}a^{1/2}(E/\mathrm{H})^{0,4}(c/a)^{-1,56}$	[12]
7	Р	$0{,}0889(\mathrm{H}F/4l)^{0,5}$	[13]
8	Р	$0{,}015(l/a)^{-0,5}(E/\mathrm{H})^{2/3}(F/c^{3/2})$	[14]
9	М	$0{,}01(E/\mathrm{H})^{2/3}F/c^{3/2}$	[15]
10	М	$0{,}028(\mathrm{H}a^{1/2})(E/\mathrm{H})^{1/2}(c/a)^{-1/2}$	[16]

Обозначения: М — полукруговая монотрещина; Р — бикруговая политрещина Палмквиста; E — модуль Юнга; Н — твердость; F — индентирующая сила; $x = f(c/a)$; $l = c - a$.

необходимо знать модуль упругости материала и его твердость, которые также могут быть оценены индентированием [1].

В работе [7] проведено сравнение значений K_{Ic}, рассчитанных по моделям Шетти (формула № 7 в таблице), Анстиса с сотрудниками (№ 1) и Ниихары (№ 4 и 5). Нагрузки составляли 50, 100 и 150 Н. В качестве образцов использовали α и β SiAlON-керамику, модуль упругости которой определяли стандартным ультразвуковым методом, четырехточечным изгибом и UCI-методом (в том числе с измерением отпечатков с помощью РЭМ).

Совпадение результатов, полученных по формулам Шетти и Ниихары, весьма хорошее — расхождение составляет не более ±20 % для всех нагрузок и способов определения модулей упругости. Модель Анстиса дала результаты на 30...50 % ниже.

Оценка термостойкости

Для определения термостойкости материала существует довольно много тестов. Весьма удобным и оперативным является способ, предложенный в [17].

Чтобы хорошо противостоять термоударам, материал должен быть устойчив к распространению трещин, т. е. иметь высокие значения коэффициента K_{Ic}, при одновременно высокой пластичности, способствующей релаксации термических напряжений σ_{th}. Опираясь на такие эмпирические соображения, для оценки термостойкости в работе [17] предложили использовать параметр $R_m = (K_c/\sigma_{th})^2$.

Пусть в результате закалки (термоудара) трещина, возникшая при индентировании, увеличилась в длине с c_0 до c. Применяя уравнение (1) и уравнение равновесия трещины в условиях напряжений, авторы работы [18] показали, что

$$R_m = \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{th}}\right)^2 = \frac{\pi\Omega c}{\left[1-\left(\frac{c}{c_0}\right)^{-3/2}\right]^2} \qquad (2)$$

(для полукруговой трещины $\Omega = 4\pi^2$).

Экспериментальную проверку проводили при закалке высокотемпературных сверхпроводящих керамик $YBa_2Cu_3O_n$ с комнатной температуры в жидкий азот и при закалке Al_2O_3 с температур 400...550 °С в масло. Индентирование проводили на приборе Виккерса при нагрузках в диапазоне 50...200 Н для сверхпроводников и от 100 до 1000 Н для оксида алюминия, что давало исходные трещины длиной в диапазоне 200...800 мкм. В обоих случаях с разумной для таких экспериментов точностью получили линейные зависимости $\pi\Omega c$ от параметра $[1-(c/c_0)^{-3/2}]^2$ (рис. 2).

Для оксида алюминия была также построена температурная зависимость R_m и рассчитан четвертый (энергетический) параметр термостойкости по Хассельману, основанный на механике разрушения [19]:

$$R^{\mathrm{IV}} = \frac{G_{Ic}E}{\sigma_r^2(1-\nu)} = \frac{K_{Ic}^2(1-\nu^2)}{\sigma_r^2(1-\nu)} = \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_r}\right)^2(1-\nu), \quad (3)$$

где G_{Ic} — критическая энергия развития трещин, Дж/м^2; σ_r — прочность керамики на разрыв.

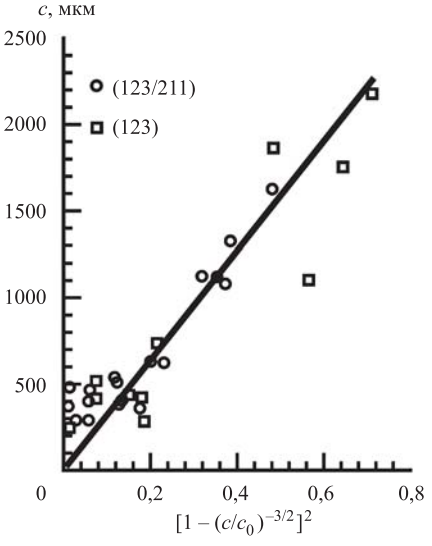


Рис. 2. Зависимость длины трещины c от параметра $[1-(c/c_0)^{-3/2}]^2$ для $YBa_2Cu_3O_{7-x}$-керамики (123) и для $YBa_2Cu_3O_{7-x}/Y_2BaCuO_2$-керамики (123/211), закаленных в жидкий водород [17]

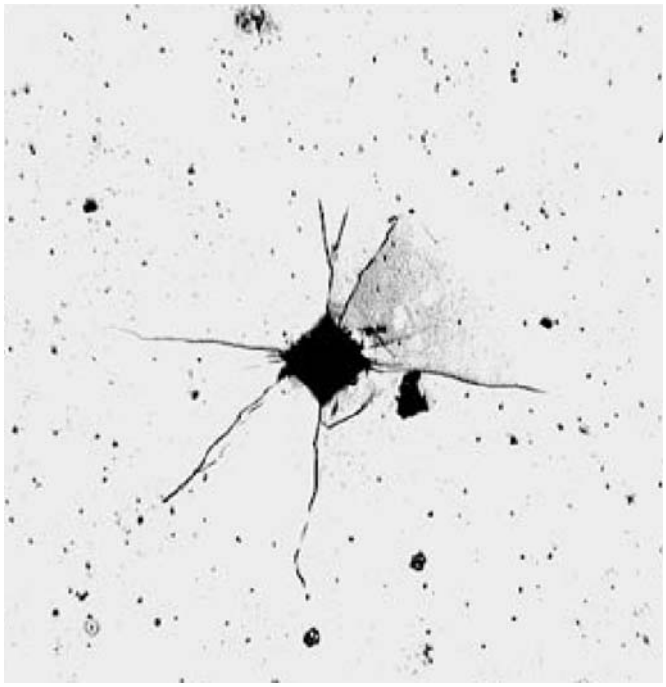


Рис. 3. Трещины на поверхности Y_2O_3-керамики после виккерс-индентирования [20]

Пересечение экстраполированных до больших температур графиков R_m с R^{IV} пришлось на область, где трещина возникала в гладком образце из Al_2O_3 (между 580 и 630 °С), что явилось дополнительным подтверждением валидности данной методики.

Таким образом, применение индентирования может помочь снять часто имеющуюся неопределенность по распределению первоначальных трещин в образце по размерам, позволяет количественно сравнивать различные материалы по термостойкости и значительно снизить трудоемкость определения термостойкости различных материалов, особенно при разработке новых, для которых еще плохо известны их механические свойства (рис. 3).

Вязкохрупкий переход

Известно, что при индентировании хрупких материалов с небольшими нагрузками трещины могут не появляться. При возрастании же нагрузки вокруг отпечатка образуются трещины, т. е. фактически наблюдается вязкохрупкий переход. Особенно востребовано изучение этого эффекта в отношении полупроводниковых материалов, используемых для изготовления подложек больших и сверхбольших интегральных схем.

В работе [21] построена частная количественная модель такого эффекта для монокристалла кремния, индентируемого в кристаллографическую плоскость (100)

клином с углом 70,53° или близким к этому значению (последнее имеет значение, так как от этого зависят активируемые плоскости скольжения).

В теории дислокаций принято считать, что микротрещина начинает зарождаться, когда в вершине скопления дислокаций расстояния между последними становятся меньше вектора Бюргерса. Применив механику дислокаций для данного конкретного кристаллографического случая, авторы [21] получили критическую глубину отпечатка h_c, которая соответствует данному условию и, следовательно, может считаться рубежом начала образования трещин:

$$h > h_c = \frac{\pi G b}{16\sigma_f(1-\nu)} \frac{\sin(\theta + 35,26°)}{\sin\theta}, \qquad (4)$$

где G, b и σ_f — модуль сдвига, вектор Бюргерса и напряжение трения дислокаций соответственно; θ — угол при вершине клина.

При выводе формулы (4) полагалось, что вся пластическая деформация объема отпечатка аккумулируется дислокациями (нет навала и выпучивания поверхности). Возможные фазовые превращения под индентором не принимались во внимание. В работе [21] также рассматривались условия вязкохрупкого перехода при шлифовании монокристалла кремния.

Было бы интересно получить критерии начала образования трещин при индентировании хрупких поликристаллических, а также многофазных материалов. Очевидно, что описанный выше подход здесь неприменим. Представляется довольно плодотворным использовать в данном случае анализ, подобный применяемому Ю.Я. Мешковым [22], с привлечением параметров $R_{мс}$ (сопротивление микросколу), $K_в$ (коэффициент вязкости) и т. д. [1].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Федосов С.А., Пешек Л.** Определение механических свойств материалов микроиндентированием. М., Физический факультет МГУ, 2004. 100 с.

2. **Cook R.F., Pharr G.M.** Direct Observation and Analysis of Indentation Cracking in Glasses and Ceramics // J. of the American ceramic society. 1990. Vol. 73. Iss. 4. P. 787—817.

3. **Giannakopoulos A.E., Larsson P.-L.** Analysis of pyramid indentation of pressure-sensitive hard metals and ceramics // Mechanics of Materials. 1997. Vol. 25. Iss. 1. P. 1—35.

4. **Larsson P.-L., Giannakopoulos A.E.** Tensile stresses and their implication to cracking at pyramid indentation of pressure-sensitive hard metals and ceramics // Materials Science and Engineering. 1998. Vol. A254. P. 268—281.

5. **Drucker D.C., Prager W.** Soil mechanics and plastic analysis or limit design // Quarterly of Applied Mathematics. 1952. Vol. 10. Iss. 2. P. 157—165.

6. **Petrovic J.** Effect of Indenter Geometry on Controlled-Surface-Flaw Fracture Toughness // J. of the American ceramic society. 1983. Vol. 66. Iss. 4. P. 277—283.

7. **Rudnayová E., Dusza J., Pešek L., Haviar M.** Comparative measurements of mechanical properties of α and β SiAlONs // Engineering Ceramics'96: Higher Reliability through Processing. P. 409—417.

8. **Anstis G.R., Chantikul P., Lawn B.R., Marshall D.B.** A Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: I. Direct Crack Measurements // J. of the American ceramic society. 1981. Vol. 64. Iss. 9. P. 533—538.

9. **Evans A.G., Charles E.A.** Fracture Toughness Determinations by Indentation // J. of the American ceramic society. 1976. Vol. 59. Iss. 7—8. P. 371—372.

10. **Evans A.G.** Fracture Toughness: The Role of Indentation Techiques // Fracture Mechanics Applied to Brittle Materials, ASTM STP 678. 1979. P. 112—135.

11. **Niihara K., Morena R., Hasselman P.H.** Evaluation of K_{Ic} of brittle solids by the indentation method with low crack-to-indent ratios // J. of Materials Science Letters. 1982. Vol. 1. Iss. 1. P. 13—16.

12. **Langford J.** Indentation microfracture in the Palmqvist crack regime: implications for fracture toughness evaluation by the indentation // J. of Materials Science Letters. 1982. Vol. 1. Iss. 11. P. 493—495.

13. **Shetty D.K., Wright I.G., Mincer P.N., Clauer A.H.** Indentation fracture of WC—Co cermets // J. of Materials Science. 1985. Vol. 20. P. 1873—1882.

14. **Laugier M.T.** New formula for indentation toughness in ceramics // J. of Materials Science Letters. 1987. Vol. 6. Iss. 3. P. 355—356.

15. **Laugier M.T.** The elastic/plastic indentation of ceramics // J. of Materials Science Letters. 1985. Vol. 4. Iss. 12. P. 1539—1541.

16. **Lawn R., Evans A.G., Marshall D.B.** Elastic / plastic indentation damage in ceramics the median / radial crack system // J. of the American Ceramic Society. 1980. Vol. 63. Iss. 9—10. P. 574—581.

17. **Tancret F., Osterstock F.** The vickers indentation technique used to evaluate thermal shock resistance of brittle materials // Scripta Materialia. 1997. Vol. 37. No. 4. P. 443—447.

18. **Chantikul P., Anstis G.R., Lawn B.R., Marshall D.B.** A Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: II, Strength Method // J. of the American Ceramic Society. 1981. Vol. 64. Iss. 9. P. 539—543.

19. **Hasselman D. P. H.** Thermal Stress Resistance Parameters for Brittle Refractory Ceramics: a Compendium // American Ceramic Society Bulletin. 1970. Vol. 49. Iss. 12. P. 1033—1037.

20. **M. Boniecki, Z. Librant, T. Sadowski, W. Wesolowski.** The Thermal Shock Resistance and Mechanical Properties at Elevated Temperature of Transparent Ceramics // Materials with Complex Behaviour II. Ed.: A. Öchsner, L.F. M. da Silva. H. Altenbach. Berlin: Springer-Verlag, 2012. P. 307—321.

21. **Lin H.Y., Chu J.L., Wu T.C., Lee S.** The brittle to ductile transition of single crystal materials — An indentation model // J. of Materials Science. 2001. Vol. 36. P. 3769—3775.

22. **Мешков Ю.Я., Сердитова Т.Н.** Разрушение деформированной стали. Киев: Наук. думка, 1989. 160 с.

УДК 621.787: 621.91

В.Ю. Блюменштейн, К.П. Петренко
(Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово)
E-mail: blumenstein.vu@gmail.com

Исследование влияния программ нагружения на шероховатость поверхности в процессах ППД

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) значительно повышает качество и долговечность деталей машин. Эффективность процессов ППД существенно возрастает при учете явления технологического наследования. Представлены результаты исследований шероховатости поверхности в процессах ППД. Они позволили установить закономерности формирования шероховатости поверхности в зависимости от накопленной поверхностным слоем металла деформации.

Ключевые слова: *шероховатость поверхности, обкатывание роликом, накопленная деформация, программа нагружения, поверхностный слой, технологическое наследование.*

Roller burnishing process considerably increases surface quality and service life of machine parts. Efficiency of roller burnishing rises greatly when technological inheritance is taken into account. In this paper results of surface roughness research in processes of surface plastic deformation are presented. Results obtained made it possible to establish mechanisms of surface roughness forming according to degree of surface layer deformation.

Keywords: *surface roughness, roller burnishing, degree of deformation, stressing program, surface layer, technological inheritance.*

Введение

Шероховатость — одна из важнейших характеристик поверхностного слоя, влияющая на эксплуатационные свойства и долговечность деталей машин. При поверхностном пластическом деформировании (ППД) выступы микронеровностей сминаются и металл заполняет впадины между выступами. Гладкая поверхность после обработки ППД формируется за счет пластического течения металла и снижения шероховатости. Многочисленные исследования [1—7] показали, что методы ППД за счет снижения шероховатости и формирования благоприятного профиля микронеровностей обработанной поверхности позволяют повысить износостойкость, коррозионную стойкость, сопротивление контактной усталости деталей и др.

Так, в работе [2] авторы исследовали влияние режимов выглаживания на шероховатость инструментов из закаленных быстрорежущих сталей. Было установлено, что шероховатость определяется главным образом радиальной силой, маркой стали и профильным радиусом инструмента, изготовленного из природного алмаза. Также были определены оптимальные режимы выглаживания, обеспечивающие минимальную шероховатость (усилие 230...250 Н, профильный радиус 1 мм).

В работе [3] авторы проводили исследования по обкатыванию конструкционных сталей одношариковым инструментом. В результате получены зависимости шероховатости от интенсивности пластической деформации. Установлено, что минимальная шероховатость достигается при интенсивности деформации, соответствующей 70...90 % от предельного значения. Также отмечается существенное влияние на шероховатость предшествующей обработки.

Е.Ю. Кропоткина [4] на основе решения контактной задачи взаимодействия ролика и детали предлагает аналитическую модель формирования микронеровностей поверхности, учитывающую как технологические факторы, так и упругопластические свойства обрабатываемого материала.

Авторы работы [5] исследовали влияние технологических факторов обкатывания шариком на параметры поверхностного слоя и эксплуатационные характеристики пластин из стали 1010. Была получена эмпирическая модель влияния усилия, подачи и скорости на параметр *Ra* в виде полинома третьей степени.

N.A. Chowdhury и M.A. Ullah Patwari [6] разработали инструмент, позволяющий путем быстрой замены шариков достигать различных значений профильного радиуса. Они выделяют зону пластического течения металла, после прохождения которой частицами металла формируются параметры поверхностного слоя. В результате получены зависимости шероховатости образцов из стали 1045 от усилия, подачи, диаметра шарика и исходной шероховатости.

Y.C. Lin с соавторами [7] вводят интегральный показатель выглаживания, учитывающий твердость обрабатываемого материала, контактное напряжение на границе инструмент—деталь, скорость скольжения инструмента относительно детали, вязкость смазочного материала и др. В итоге определяется оптимальное значение указанного показателя, соответствующее минимальной шероховатости.

Процессы ППД с точки зрения механики технологического наследования

В условиях современного производства представляется важным количественно оценить накопление деформаций и формирование свойств поверхностного слоя с позиций технологического наследования (ТН). Многочисленные исследования показали, что указанный подход возможен на основе механики технологического наследования [8].

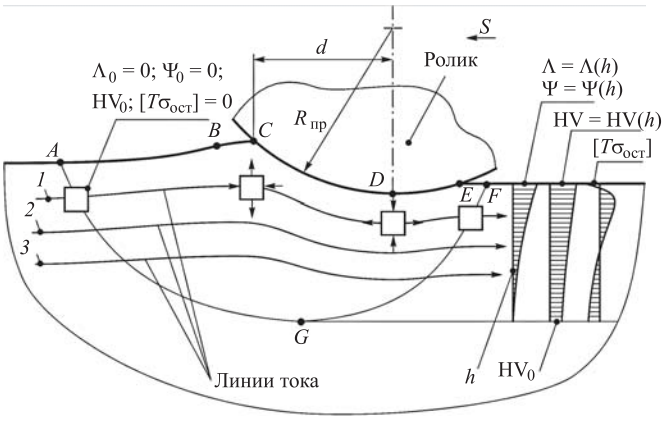


Рис. 1. Схема процесса ППД с характерными точками:
S — подача; $R_{пр}$ — профильный радиус деформирующего инструмента (ролика); $[T\sigma_{ост}]$ — тензор остаточных напряжений

Согласно ее основным положениям в процессах обработки и эксплуатации деталей машин происходят непрерывное накопление деформации и исчерпание запаса пластичности металлом поверхностного слоя. В качестве основных параметров механического состояния используются накопленная степень деформации сдвига Λ, показатель напряженного состояния Π, степень исчерпания запаса пластичности Ψ. Внедрение и перемещение режущего или деформирующего инструмента (резца, ролика) приводят к возникновению очага деформации (ОД) — локальной области пластического течения в поверхностном слое (рис. 1).

В ОД вдоль линий тока происходят накопление деформации, исчерпание запаса пластичности и формирование свойств поверхностного слоя. При последующих операциях механической обработки накопление деформации происходит с учетом свойств поверхностного слоя, сформированных на предыдущих операциях.

Ключевым элементом механики ТН является программа нагружения (ПН), которая представляет собой зависимость накопленной степени деформации сдвига Λ от показателя напряженного состояния Π (рис. 2).

ПН состоит из трех участков квазимонотонной деформации, на каждом из которых происходит непрерывное накопление деформации в условиях изменяющегося показателя напряженного состояния. В точках смены знака деформации происходят частичное "залечивание" дефектов и восстановление запаса пластичности металла. Программа нагружения описывает напряженно-деформированное состояние металла, определяется режимами обработки и формирует свойства поверхностного слоя. В процессе реализации ПН в очаге деформации происходит исчерпание запаса пластичности, что приводит к определенному механизму формирования состояния поверхностного слоя.

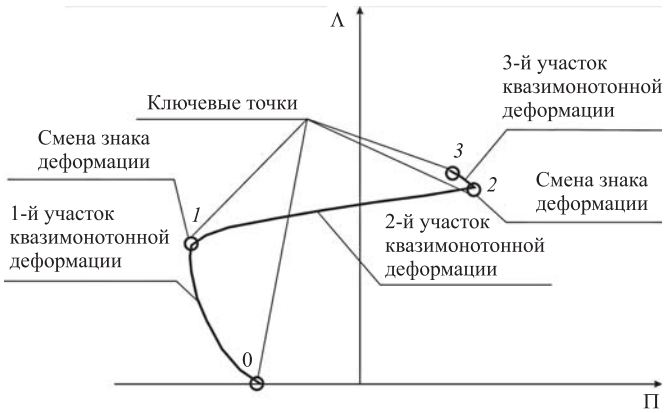


Рис. 2. Схема программы нагружения при ППД

Таблица 1

Химический состав стали 45 (ГОСТ 1050—2013), %

C	Si	Mn	Cr	S	P
			Не более		
0,42...0,50	0,17...0,37	0,50...0,80	0,25	0,040	0,035

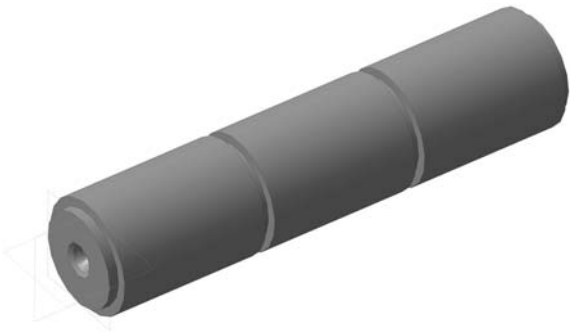


Рис. 3. Гладкий цилиндрический образец

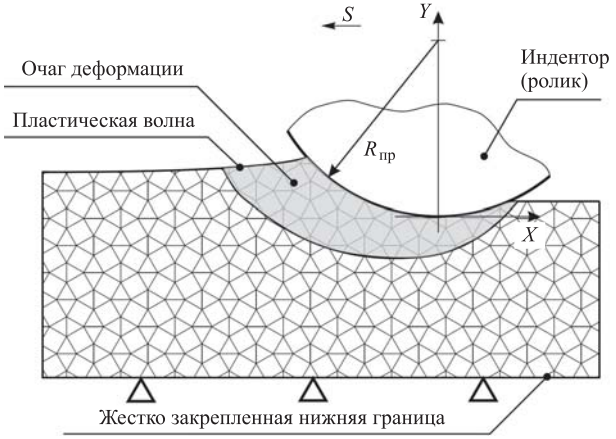


Рис. 4. Схема конечно-элементной модели при ППД

Методика выполнения экспериментальных исследований

Для оценки влияния программ нагружения на шероховатость поверхности были проведены экспериментальные исследования по обкатыванию роликами из стали ШХ15 гладких цилиндрических образцов из стали 45 (табл. 1). Сталь 45 является одним из самых распространенных материалов в машиностроении, ее пластические и прочностные свойства хорошо изучены.

Для исследований использовали цилиндрические образцы (рис. 3) диаметром 30...120 мм. На каждом образце имелось три шейки длиной 80 мм, отделенных друг от друга поперечными канавками, служащими для выхода инструмента и позволяющими выполнять исследование нескольких режимов на одном образце. Установку образцов в передний и задний центры станка осуществляли с помощью центровых отверстий.

Поверхностный слой образцов последовательно обкатывали роликовым инструментом вплоть до полного исчерпания запаса пластичности и появления следов разрушения.

Режимы экспериментальных исследований приведены в табл. 2.

Проведение исследований и анализ их результатов

Размеры полученных очагов деформации определяли на профилографе-профилометре Talysurf 5M. Геометрические параметры очага деформации использовали в качестве граничных условий при моделировании методом конечных элементов [9]. Для этого создавали конечно-элементные модели ролика и обрабатываемой детали (рис. 4).

Нижнюю границу детали жестко закрепляли, в нее внедряли абсолютно жесткий индентор и перемещали на величину подачи в горизонтальном направлении. В вертикальном направлении перемещение отсутство-

Таблица 2

Условия проведения экспериментальных исследований

Номер образца	Число рабочих ходов до разрушения металла	Режимы обкатывания				
		Диаметр ролика $D_р$, мм	Подача S, мм/об	Частота вращения шпинделя n, мин$^{-1}$	Профильный радиус ролика $R_{пр}$, мм	Усилие обкатывания P, Н
51	3	95	0,07	630	2,5	2500
52	4				5,0	
54	3	64			8,5	2000
56	4				5,0	1500

вало. При этом принимали схему плоского деформированного состояния в плоскости подачи ролика. Начальными условиями моделирования являлись модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}3$, плотность обрабатываемого материала $\rho = 7800$ кг/мм^3, коэффициент трения на контактной поверхности ролика и заготовки $f = 0{,}21$, а также кривая течения материала в виде зависимости $\sigma_i = 36 + 58{,}41\Lambda^{0{,}43}$.

В рамках описанной модели осуществляли расчет параметров напряженно-деформированного состояния в узлах конечных элементов с помощью специальной программной системы [10]. Далее проводили их перерасчет в точках линий тока, определяли интегральные показатели механического состояния и программы нагружения.

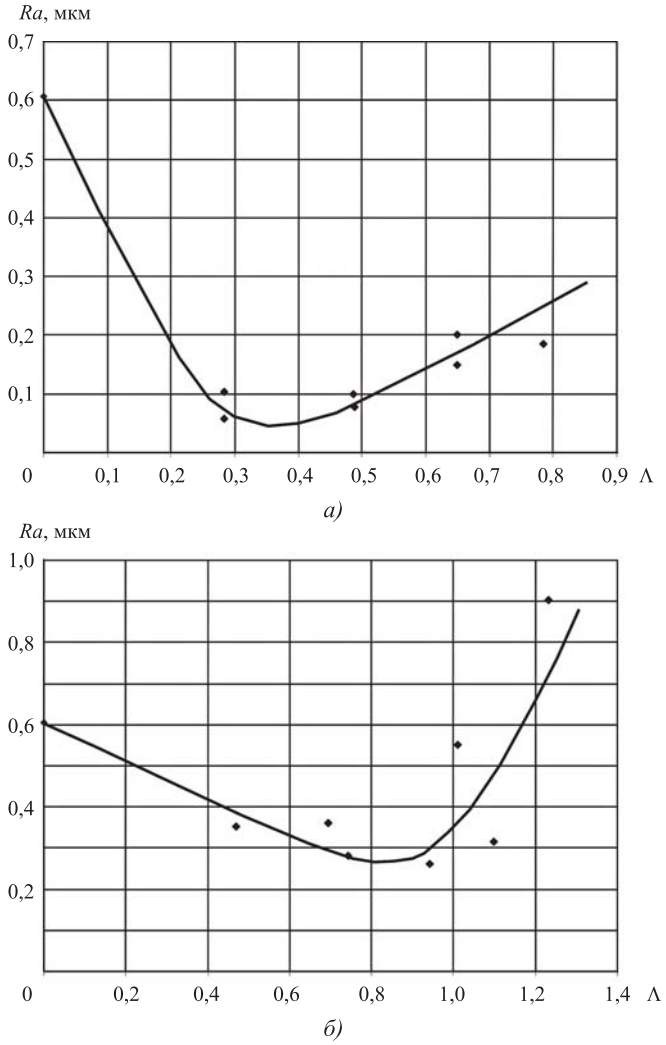


Рис. 5. Зависимость среднего арифметического отклонения профиля *Ra* от накопленной степени деформации сдвига:
а — для образцов № 54 и 56; *б* — для образцов № 51 и 52

Шероховатость поверхности определяли по профилограмме поверхности с помощью профилографа-профилометра Talysurf 5M. Формировали массив координат точек профилограммы, координаты пересчитывали в реальные путем деления соответственно на горизонтальное и вертикальное увеличения. Далее по методу наименьших квадратов определяли положение средней линии, после чего оценивали отклонения точек профиля от средней линии. Затем рассчитывали параметр *Ra* как среднее арифметическое отклонений точек профиля от средней линии. Анализ показал, что зависимость среднего арифметического отклонения профиля от накопленной деформации носит экстремальный характер и может быть описана многочленом третьей степени.

Для очагов деформации образцов № 54 и 56 (рис. 5, *а*)

$$Ra = -4{,}446\Lambda^3 + 7{,}401\Lambda^2 - 3{,}604\Lambda + 0{,}606.$$

Для очагов деформации образцов № 51 и 52 (рис. 5, *б*)

$$Ra = 1{,}884\Lambda^3 - 2{,}44\Lambda^2 + 0{,}333\Lambda + 0{,}599.$$

В очагах деформации с незначительным пластическим течением (№ 54 и 56) минимальное значение параметра шероховатости (0,05 мкм) достигается при $\Lambda = 0{,}35$, в очагах деформации с интенсивным пластическим течением (№ 51 и 52) минимум *Ra* (0,27 мкм) приходится на $\Lambda = 0{,}81$. При этом само значение параметра *Ra* больше. Указанные особенности объясняются сложным характером формирования микрогеометрии поверхности при ППД. Установлено, что шероховатость поверхности определяется не только накопленной деформацией, но и кинетикой деформирования.

Заключение

Таким образом, установлено, что в очагах деформации с малым пластическим течением минимальное значение параметра *Ra* достигается при относительно небольших значениях накопленной степени деформации сдвига. В очагах с интенсивным пластическим течением минимальное значение *Ra* формируется при бóльших значениях накопленной степени деформации сдвига.

Проведенные исследования показали возможность использования геометрических параметров наследственных очагов деформации для расчета накопленной степени деформации сдвига, программ нагружения и среднего арифметического отклонения профиля обработанной поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Направленное** формирование свойств изделий в машиностроении / А.С. Васильев, А.М. Дальский, Ю.М. Золоторевский и др. М.: Машиностроение, 2005. 352 с.
2. **Барац Ф.Я., Кочетков А.В.** Режимы и качество обработки инструментов из быстрорежущих сталей методом ППД // Автомобильная промышленность. 2013. № 3. С. 30—32.
3. **Сидякин Ю.И., Осипенко А.П., Бочаров Д.А.** Совершенствование технологии отделочно-упрочняющей обработки валов поверхностным пластическим деформированием // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 8. С. 23—26.
4. **Кропоткина Е.Ю.** Аналитическое исследование влияния параметров обкатывания на шероховатость поверхности // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 1. С. 6—9.
5. **Gharbi F., Sghaier S., Morel F., and Benameur T.** Experimental Investigation of the Effect of Burnishing Force on Service Properties of AISI 1010 Steel Plates // J. of Materials Engineering and Performance. December 2014.
6. **Chowdhury N.A., M.A. Ullah Patwari.** Design a ball burnishing rolling tool and investigating its effect on surface quality, Annals of Faculty Engineering Hunedoara // Intern. J. of Engineering. T. VIII. 2010. Fasc. 1. P. 147—152.
7. **Lin Y.C., Wang S.W., Lai H.-Y.** The relationship between surface roughness and burnishing factor in the burnishing process // Intern. J. Adv. Manuf. Technol. 2004. Vol. 23. P. 666—671.
8. **Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М.** Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение-1, 2007. 400 с.
9. **Петренко К.П.** Определение параметров наследственных очагов деформации в процессах резания и поверхностного пластического деформирования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 6. С. 3—7.
10. **Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А.** Наследственная механика поверхностного слоя деталей машин. Свид. об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610758. 18.05.2002.

Продолжается подписка на журнал "Упрочняющие технологии и покрытия"

- За наличный и безналичный расчет
- С любого номера и на любой срок
- Без почтовых наценок

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

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

УДК 658.58

В.Ф. Безъязычный, Н.В. Румянцева
(Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва, ПАО Научно-производственное объединение "Сатурн", г. Рыбинск)
E-mail: technology@rsatu.ru

Способы восстановления радиальных зазоров турбины ГТД методами газотермического напыления и наплавки

Выполнен анализ различных методов восстановления рабочих поверхностей деталей газотурбинных двигателей (ГТД): методом газотермического напыления и методом наплавки. Приведены результаты анализа качества напыления и наплавленного слоя после механической обработки.

Ключевые слова: *газотурбинный двигатель, ремонт, газотермическое напыление, наплавка, микроструктура, микротвердость.*

It is analysed various methods of restoration of working surfaces of gas turbine engine parts: by thermal spraying and welding method. Results of analysis of the quality and deposition deposited layer after machining are resulted.

Keywords: *gas turbine engine, repair, gas-thermal spraying, welding, microstructure, microhardness.*

Введение

Авиационный газотурбинный двигатель (ГТД), в частности Д30-КП/КУ, содержит множество узлов и систем, взаимодействующих между собой. При эксплуатации двигателя происходит повреждение поверхностей деталей, основными причинами которого являются:

абразивный износ деталей из-за попадания в проточную часть песка и пыли;

эрозионный износ деталей проточной части, возникающий при эксплуатации двигателя в местности с морским климатом;

механические повреждения деталей вследствие попадания посторонних предметов в двигатель;

износ при трении сопряженных пар, в результате которого детали изменяют свои первоначальные форму, размеры и массу.

Анализ дефектов деталей двигателя, возникающих в результате изнашивания, показывает, что происходит ускоренный износ трущихся поверхностей из-за несоответствия зазоров в сопряжениях, большого перепада температур, несовершенства технологии получения материала и изготовления деталей, образования нагара на поверхностях деталей при трении.

Газовая турбина является одним из самых нагруженных как в тепловом, так и в механическом отношении узлов ГТД. Условия работы корпуса турбины и соплового аппарата определяются высокими температурами, давлением газов и вибрацией при работе двигателя.

Наружные кольца сопловых аппаратов (СА) работают в сложных температурных условиях, на них действуют силы и моменты сил, вызванные давлением газов, поэтому в материале возникают значительные температурные напряжения. Кроме того, большинство дефектов связано со значительными вибрациями, возникающими при работе двигателя. Хотя при сборке выполняют многократные выверки биений для снижения вибраций, полностью их исключить пока не удается.

В наиболее тяжелых условиях работают рабочие и сопловые лопатки турбины в связи с неравномерностью распределения давления и температуры в сечении газового потока по окружности проточной части двигателя и вынужденными колебаниями. На рабочие лопатки кроме высокой температуры газов в зависимости

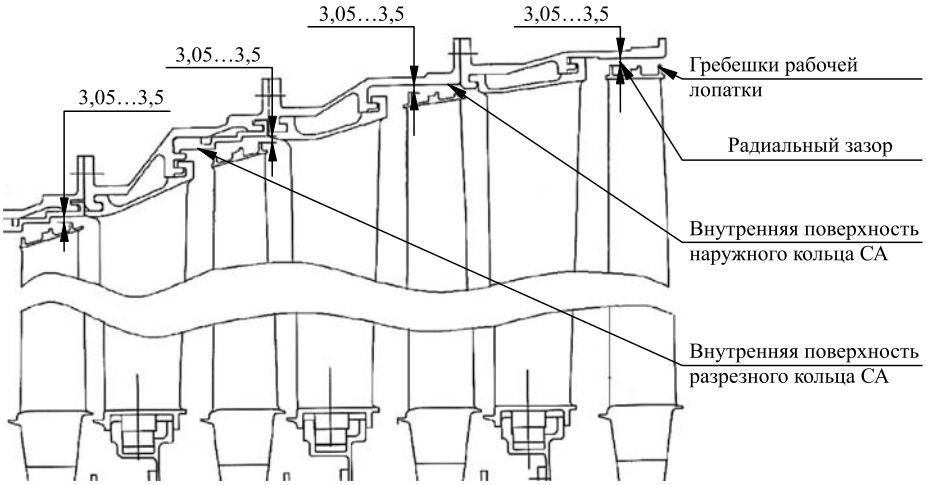


Рис. 1. Фрагмент турбины с указанием зазоров между гребешками, расположенными на внешних поверхностях полок рабочих лопаток, и разрезными и наружными кольцами СА

от условий работы двигателя действуют статические и динамические нагрузки.

Лопатки турбины, как сопловые, так и рабочие, подвержены износу, при этом в основном изнашиваются выходные кромки лопаток СА, что приводит к увеличению площади проходного сечения и, как следствие, увеличению температурного режима и уменьшению максимальной мощности двигателя. При воздействии крутящего момента, вызванного окружной составляющей скорости течения газа, выработке подвергаются контактные поверхности бандажных полок рабочих и сопловых лопаток, находящихся в сопряжении.

Гребешки бандажных полок рабочих лопаток совместно с разрезным кольцом или наружным кольцом СА образуют кольцевое лабиринтное уплотнение, уменьшающее радиальное перетекание газа в двигателе (рис. 1).

При изготовлении, сборке и ремонте турбины минимальный зазор, при котором отсутствует касание рабочих лопаток о наружные либо разрезные кольца, определяется допусками на их изготовление и физико-механическими свойствами материала, из которых они изготавливаются.

При эксплуатации двигателя вследствие действия центробежных сил при вращении турбины лопатки, поворачиваясь вокруг общей оси, начинают смещаться относительно закрепленного сечения, уменьшая зазоры. Зазор тем меньше, чем больше смещение лопаток. При увеличении наработки увеличиваются деформации, коробления и выработки деталей, радиальные зазоры сокращаются, и это приводит к касанию гребешков, расположенных на внешних поверхностях полок рабочих лопаток, о внутреннюю диаметральную поверхность наружного либо разрезного кольца, в зависимости от ступени турбины.

Изготовление новых деталей, особенно из жаропрочных сплавов, взамен изношенных — очень дорогостоящее мероприятие, поэтому исследование механизма износа деталей и разработка перспективных методов ремонта представляются очень важными и экономически целесообразными.

При ремонте деталей ГТД требуется применять оптимальные методы и способы ремонта. При выборе материала следует учитывать требования, которые обеспечат достаточную удельную прочность, износостойкость и сохранят необходимую надежность отремонтированных деталей. Поэтому процесс ремонта является сложным в технологическом и инженерном отношении.

Цель ремонта — устранить дефекты детали, обеспечить ее геометрические характеристики и восстановить основную структуру материала, которая была утрачена в результате эксплуатации. Моделирование технологического процесса ремонта необходимо для выбора его оптимального варианта при восстановлении деталей ГТД.

В ПАО "Сатурн" для продления ресурса двигателя и повышения ремонтопригодности деталей проводятся работы по разработке и апробации технологий ремонта с исследованием качества проведенного ремонта, последующим испытанием на технологическом двигателе и дальнейшим проведением работ по исследованию испытанных деталей. После этого принимается решение о внедрении того или иного метода ремонта или прекращении работ по нему.

Содержание исследования

В статье предложена технология ремонта наружных и разрезных колец, а также рабочих лопаток, обеспечивающая восстановление радиальных зазоров, предназначенных для уменьшения перетекания газов в осевом направлении двигателя. Работу проводили по двум направлениям:

восстановление внутренних диаметральных поверхностей наружных и разрезных колец сопловых аппаратов;

восстановление гребешков бандажных полок рабочих лопаток.

При разработке технологии по восстановлению внутренних поверхностей наружных либо разрезных колец рассматривали два метода ремонта: восстановление поверхностей методом газотермического напыления и наплавку изношенных мест. В ходе разработки технологии было необходимо обосновать выбор материала для наплавки и напыления и установить оптимальные режимы обработки:

при подготовке поверхности для обеспечения адгезии материала;

для механической обработки после напыления либо наплавки для исключения сколов, вырывов и других дефектов.

Восстановление поверхностей и обеспечение требуемых свойств за счет нанесения покрытия связано с адгезией, т. е. с обеспечением прочной связи покрытия с подложкой. При восстановлении поверхностей методом напыления не должен быть снижен уровень прочностных характеристик материала подложки.

Наиболее полно этим требованиям отвечает газотермическое покрытие, при котором формирование слоя происходит дискретными частицами напыляемого материала в расплавленном состоянии с сохранением физико-химических свойств основного материала. Использование защитных покрытий при восстановлении поверхностей является одним из перспективных направлений совершенствования ремонта, которое позволяет увеличить ресурс работы деталей и экономичность двигателей. Работоспособность защитных покрытий определяется подготовкой поверхности для обеспечения адгезии основного материала с материалом покрытия, технологией их нанесения, которая определяет величину остаточных напряжений, микроструктуру, адгезионную прочность и плотность покрытий.

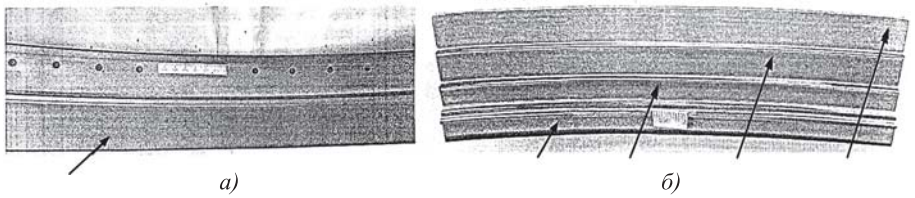
Были проведены опытные работы по восстановлению внутренних диаметральных поверхностей наружных и разрезных колец СА методом газотермического напыления. Технологию отрабатывали для сравнительной оценки свойства покрытия в зависимости от способа подготовки поверхности под напыление.

В качестве материала для напыления выбрали жаропрочный и износостойкий порошок ПВ-НХ16Ю6Ит с твердостью 35...40 HRC.

При подготовке деталей к напылению проводили механическую обработку внутренней поверхности наружного и разрезного колец шлифованием для удаления выработки и измененного поверхностного слоя металла после эксплуатации, а также обеспечения необходимой шероховатости. Глубина резания основного материала составила 0,16...0,25 мм на сторону. После этого детали подвергали абразивной обработке для очистки поверхности подложки и вывода ее из состояния термодинамического равновесия, т. е. для химической активации поверхности, электрокорундом марки 25А зернистостью F20. Давление воздуха составляло 25 МПа. Одновременно с получением необходимого микрорельефа при этом способе обработки создаются сжимающие напряжения в поверхностном слое. Напыление выполняли на установке А-3000S. Толщина напыленного слоя составила 0,35...0,45 мм на сторону. После этого выполнили механическую обработку на шлифовальном станке.

Качество покрытия после окончательной механической обработки оценивали двумя показателями: внешним видом образцов и микроструктурой. При внешнем осмотре покрытия ПВ-НХ16Ю6Ит наружных дефектов в виде трещин, сколов, отслоений, вспучиваний и т. д. не обнаружили (рис. 2).

Образцы для проведения металлографического анализа изготавливали из материала, взятого из места напыления наружного и разрезного колец. При металло-



а) *б)*

Рис. 2. Поверхности наружного (*а*) и разрезного (*б*) колец СА после восстановления поверхностей (указаны стрелками)

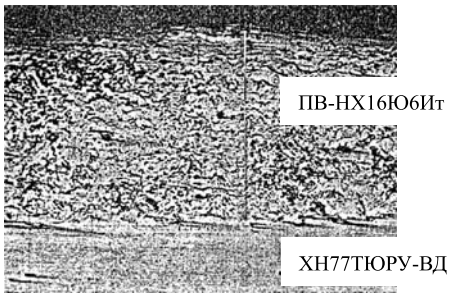


Рис. 3. Микроструктура покрытия ПВ-НХ16Ю6Ит наружного кольца СА

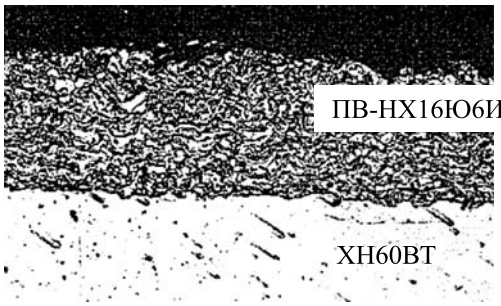


Рис. 4. Микроструктура покрытия ПВ-НХ16Ю6Ит разрезного кольца СА

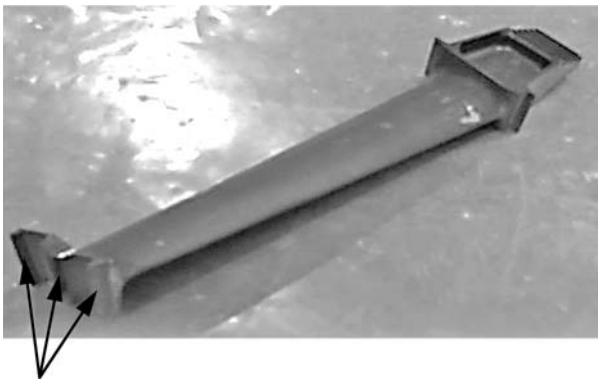


Рис. 5. Гребешки рабочей лопатки третьей ступени турбины (указаны стрелками)

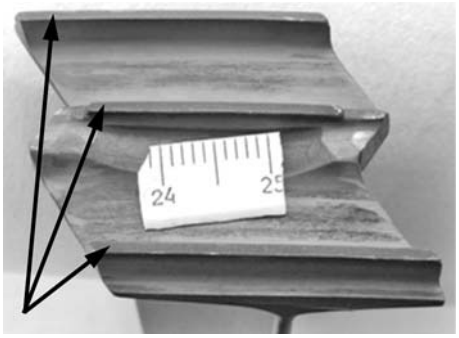


Рис. 6. Гребешки лопатки после наплавки (указаны стрелками)

графическом анализе установлено, что микроструктура напыленного материала удовлетворительная (рис. 3, 4), внутренних дефектов в покрытии и по границе покрытие—основа детали в виде трещин, отслаиваний, рыхлоты не обнаружено, т. е. выполнена оценка адгезионной прочности. Напыленный слой равномерный, толщина покрытия после механической обработки составила от 0,16 до 0,26 мм в зависимости от допуска на размер.

Опытные работы по восстановлению выработки методом наплавки технически и экономически себя не оправдали. Поскольку сварочный шов имеет определенную ширину, то выполняли местную механическую зачистку под сварку на фасонной поверхности вручную. При механической обработке после наплавки также возникли проблемы: при шлифовании на станке были получены зарезы на восстановленной и торцевой поверхностях.

В целях восстановительного ремонта рабочих лопаток турбины (рис. 5) были проведены работы по наплавке гребешков бандажных полок рабочих лопаток из материала ЖС6У-ВИ (рис. 6). Перед наплавкой выполнили подготовку поверхностей, которая включала в себя механическую обработку, а именно шлифование диаметральных поверхностей на глубину 0,2...0,4 мм на круглошлифовальном станке в собранном колесе, затем зачистку всех торцов гребешков до металлического блеска и обезжиривание. Наплавку проводили на лазерной установке серии PSM400. Высота наплавленного шва составила 1,5...2,0 мм.

Качество наплавки проверяли внешним осмотром, неразрушающим методом контроля ЛЮМ1-ОВ и с помощью металлографического анализа.

Обработку гребешков после наплавки также выполняли на шлифовальном станке в собранном колесе. После выполнения ремонта лопатки были визуально осмотрены. Дефектов не обнаружено и отклонений от чертежа не выявлено. Было установлено, что профиль пера и размеры всей лопатки изменились незначительно — меньше допустимых пределов. Это свидетельствует о том, что нагрев при наплавке был локальным и термическое влияние на наиболее нагруженные части рабочих лопаток — перо и замок — было незначительным.

По результатам исследования с помощью ЛЮМ-контроля на гребешках лопаток выявлены несквозные продольные свечения длиной около 2 мм, расположенные под наплавленным материалом (рис. 7).

После удаления краски по местам свечения на границе основного и наплавленного материалов были выявлены складки, послужившие причиной свечения (рис. 8). Дефектов в виде несплавлений и трещин не выявлено.

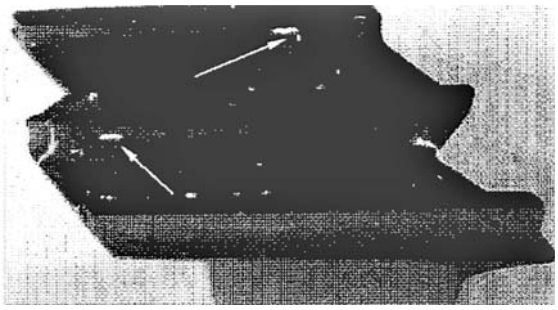


Рис. 7. Свечение люминофора на гребешках лопатки (продольные свечения показаны стрелками)

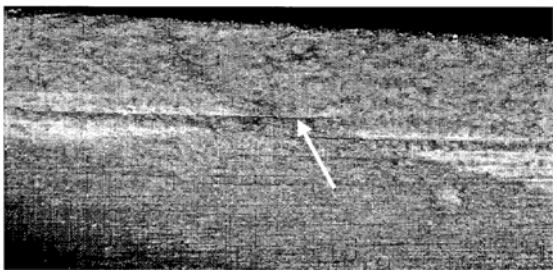


Рис. 8. Материал лопатки в месте продольного свечения люминофора (показано стрелкой)

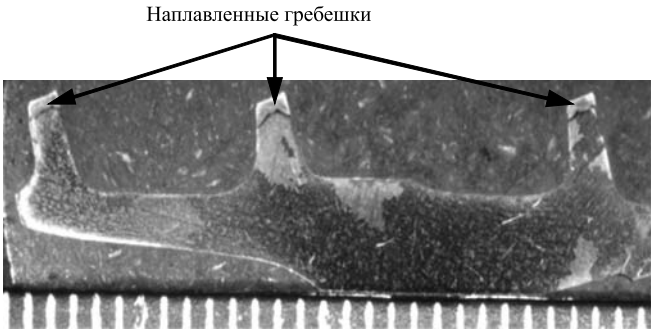


Рис. 9. Макроструктура материала лопатки в месте свечения люминофора

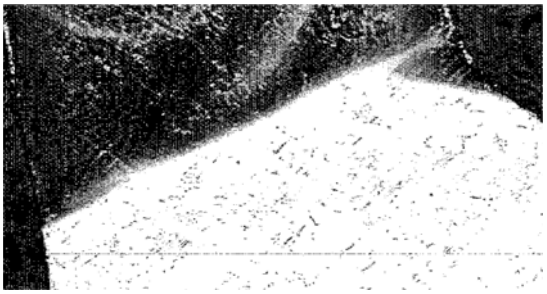


Рис. 10. Микроструктура материала лопатки в месте свечения люминофора

Рис. 11. Результаты замера микротвердости

Макроструктурный анализ в местах наплавки гребешков, в том числе в месте свечения люминофора, дефектов в виде трещин, раковин, несплавлений не выявил (рис. 9). Высота наплавленного слоя составила 0,38...0,74 мм.

Визуальным осмотром микроструктуры материала образцов в месте продольных свечений люминофора на лопатке внутренних дефектов (трещин, пор) также не обнаружено (рис. 10).

По местам наплавки гребешков выполнили замер микротвердости (рис. 11).

Микротвердость наплавленного материала в зоне наплавки (ЗН) ниже микротвердости основного материала лопаток (ОМ) и несколько ниже микротвердости в зоне термического влияния (ЗТВ). Поскольку сплав ЖС6У-ВИ относится к плохо свариваемым материалам, то правильно выбранный метод восстановительного ремонта обеспечил отсутствие холодных и горячих трещин в ЗТВ.

Наружные и разрезные кольца, а также рабочие лопатки турбины, восстановленные при ремонте, успешно прошли испытания на технологическом двигателе.

Заключение

Использование новых материалов, правильный выбор технологии ремонта и качественный восстановительный ремонт позволят обеспечить не только требуемые осевые зазоры между наружными кольцами и рабочими лопатками и, как следствие, сохранение технических характеристик двигателя, но и продление его ресурса при эксплуатации.

УДК 621.9.048

В.И. Иванов
(Федеральный научный агроинженерный центр "ВИМ")
E-mail: tehnoinvest-vip@mail.ru

Об эрозионной составляющей процесса формирования измененного поверхностного слоя на катоде при электроискровом легировании

Исследовано разрушающее действие искровых разрядов на катод при формировании на нем в процессе электроискрового легирования (ЭИЛ) измененного поверхностного слоя. Показано, что эрозионная составляющая изменения массы катода при ЭИЛ зависит от физических свойств его материала, шероховатости обрабатываемой поверхности, электрических параметров обработки и ее удельной длительности и может достигать 120 % от прироста массы катода. Предложены новые коэффициенты, для учета влияния энергии импульсов и удельной длительности обработки на эрозию катода.

Ключевые слова: *электроискровое легирование (ЭИЛ), искровой разряд, измененный поверхностный слой, катод, анод, эрозия, масса катода, физические свойства, коэффициент влияния.*

The article investigates the destructive action of sparks to the cathode at forming it in the ESD modified surface layer. Displaying the results of experimental work that the erosion of the cathode component of the change in mass at ESD depends on the physical properties of its material, surface roughness, electrical processing parameters and its specific duration. Erosion component size can be 120 % relative to the weight gain of the cathode. Proposed and used in the new coefficients pulse energy influence and the specific duration of treatment on the erosion of the cathode.

Keywords: *electrospark alloying, spark, changes in the surface layer, cathode, anode, erosion, cathode mass, physical properties, influence factor.*

Введение

Формирование при электроискровом легировании (ЭИЛ) металлических поверхностей измененного поверхностного слоя (ИПС) — сложный многофакторный процесс. В основе этого процесса лежит использование искрового разряда для воздействия на металлическую поверхность в газовой среде или вакууме. Еще Н.И. Лазаренко, одна из основоположников этого метода, отмечала протекание в результате искрового разряда на поверхности катода двух процессов: распыления катода и оседания в нем продуктов эрозии анода, причем подразумевалось, что эрозия материала катода происходит в паровой фазе [1]. Иначе говоря, изменение массы катода связано, с одной стороны, с переносом на него электродного материала (+), а с другой — с эрозионным разрушением поверхности (–).

Поскольку в практической деятельности специалистов интересовал преимущественно результат обработки методом ЭИЛ, выражающийся в количестве перенесенного материала анода на катод, получении покрытий требуемых толщины и свойств, улучшении или восстановлении эксплуатационных параметров различных изделий (деталей, инструмента), эрозионное разрушение при ЭИЛ поверхности катода не являлось объектом специальных исследований. Отмечая существование факта эрозионного разрушения катода при ЭИЛ, обычно называют долю потери массы изделия, составляющую порядка 10 % от прироста массы. Однако наши отдельные эксперименты показали значительное отличие значения этого параметра от указанного.

В связи с неопределенностью уровня отрицательного теплового воздействия на катод искровыми разрядами при ЭИЛ, отсутствием методики определения эрозионной составляющей изменения массы катода, автором выполнена экспериментальная работа по исследованию этого процесса.

Цель работы — определение разрушающего действия искровых разрядов при ЭИЛ.

Методика исследований

Использовали установку БИГ-5 [2], образцы (катод) из стали Ст3 в состоянии поставки, меди М1, алюминия АД1, титанового сплава ВТ6 (далее — титан) размером 20×50×10 мм с площадью обработки 5 см^2, металлокерамических твердых сплавов Т15К6 (15TiC + + 79WC + 6Co) и ВК8 (92WC + 8Co) размером

22×18×7 мм с площадью обработки 2,5 см^2, а также электрод (анод) из графита МПГ-6 размером 8×8×50 мм. Исходный параметр шероховатости *Ra* стальных образцов перед ЭИЛ — 3,3; 5,9 и 7,4 мкм; образцов из алюминия, титана, меди — 0,7...1,1 мкм; твердых сплавов — 1,2...1,8 мкм.

Выбор графита МПГ-6 в качестве материала электрода связан с его малой плотностью (1,65 г/см^3) и высокой эрозионной стойкостью для максимального исключения влияния на массоперенос при ЭИЛ, высокими температурой плавления (3845...3890 °С), теплопроводностью (3,55 Вт/см·К) и низким удельным сопротивлением электрическому току (0,390...0,602 Ом) [3].

Для обработки ЭИЛ образцов выбрали два электрических режима установки БИГ-5 с соответствующими паспортными параметрами: энергия импульсов — 0,11 и 1,8 Дж; амплитудный ток — 120 и 200 А; длительность импульсов — 50 и 500 мкс; частота импульсов — 160 Гц на обоих режимах. Обработку выполняли с удельной длительностью t_1 = 24 с/см^2 и $5t_1$ = 120 с/см^2 на 1-м режиме и t_{48} = 10 с/см^2 и $5t_{48}$ = 50 с/см^2 на 48-м режиме. Определяли изменение массы образцов гравиметрическим методом с точностью 10^{-4} г и их толщины измерением микрометром с точностью 0,01 мм.

Достоверность результатов обеспечивали троекратным проведением экспериментов, фиксировали средние значения полученных данных.

Решали две задачи: 1) изучение влияния искровых разрядов на катод в зависимости от исходной шероховатости его поверхности; 2) то же в зависимости от материала катода.

Результаты исследований и их анализ

Задача 1. Выполнена обработка стальных образцов с разной шероховатостью поверхности. Результаты обработки экспериментальных данных отражены на рис. 1.

Видно, что искровые разряды разрушают стальную поверхность. Уменьшение массы образцов отмечено во всех экспериментах. Их эрозия растет с увеличением энергии импульсов, ростом времени воздействия этими импульсами на поверхность, а также с повышением ее шероховатости.

Динамика изменения толщины образцов аналогична. При минимальном параметре шероховатости образцов *Ra* = 3,3 мкм наблюдаем максимальное увеличение их толщины до 20 мкм (1-й режим, энергия импульсов 0,11 Дж) и до 30 мкм (48-й режим, энергия импульсов 1,8 Дж) после обработки в течение удельного времени *t*. С увеличением времени обработки до 5*t* эти значения составляют соответственно 30 и 40 мкм. Повышение толщины образцов можно связать с взрывным характером воздействия на поверхность искровых разрядов. Но с повышением шероховатости обрабатываемой поверхности рост толщины образцов снижается и наблюдается ее уменьшение, что можно объяснить ухудшением теплоотвода из зоны искрового воздействия, оплавлением вершин рельефа поверхности и распылением оплавленного материала катода.

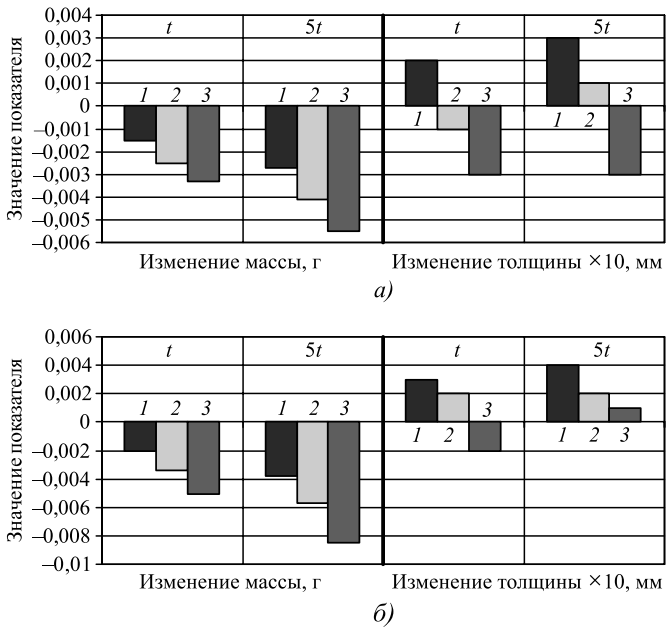


Рис. 1. Изменение массы стального образца и его толщины при ЭИЛ графитовым электродом МПГ-6 на 1-м (*а*) и 48-м (*б*) электрических режимах установки БИГ-5:
1 — *Ra* = 3,3 мкм; *2* — *Ra* = 5,9 мкм; *3* — *Ra* = 7,4 мкм

Таблица 1

Физические свойства некоторых металлов и сплавов [4]

Металл или сплав	Плотность γ, г/см^3	Температура плавления $T_{пл}$, °С	Теплопроводность λ, Вт/(м · К)	
			300 К	800...900 К
Сталь Ст3 (железо)	7,87	1538	80	43...35
Алюминий	2,69	660,2	237	220...110
Медь	8,96	1083	401	366...360
Титан	4,51	1608	22	20
Т15К6	11,1...11,6	—	27	—
ВК8	14,4...14,8	—	77	—
Компоненты твердых сплавов				
Кобальт	8,90	1492	100	58...54
WC	15,65	2785	29	—
TiC	4,82	3257	40	13...11

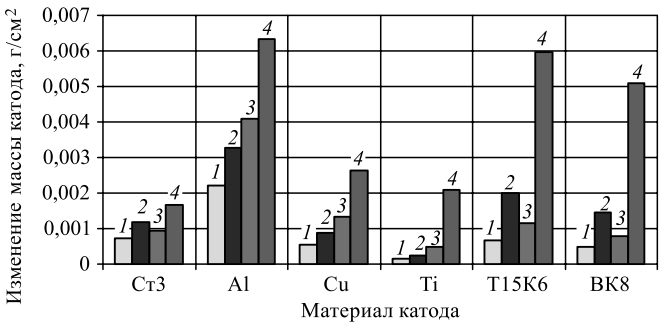


Рис. 2. Изменение массы катода из разных металлов и сплавов при ЭИЛ графитовым электродом МПГ-6 на установке БИГ-5: *1* — 1-й режим, $t = 24$ с/см^2; *2* — 1-й режим, $t = 20$ с/см^2; *3* — 48-й режим, $t = 10$ с/см^2; *4* — 48-й режим, $t = 50$ с/см^2

Таблица 2

Изменение массы катода при ЭИЛ графитовым электродом МПГ-6

Материал катода	Номер участка	Режим обработки	Удельное время обработки, с/см^2	Изменение массы катода, мг/см^2
Сталь Ст3	1	1	24	0,72
	2		120	1,17
	3	48	10	0,93
	4		50	1,66
Алюминий	1	1	24	2,21
	2		120	3,26
	3	48	10	4,09
	4		50	6,34
Медь	1	1	24	0,56
	2		120	0,89
	3	48	10	1,34
	4		50	2,64
Титан	1	1	24	0,16
	2		120	0,25
	3	48	10	0,49
	4		50	2,10
T15K6	1	1	24	0,68
	2		120	2,00
	3	48	10	1,16
	4		50	5,96
ВК8	1	1	24	0,48
	2		120	1,44
	3	48	10	0,80
	4		50	5,08

Таким образом, подтверждено эрозионное разрушение поверхности стального катода в результате обработки ЭИЛ при разных значениях энергии искровых разрядов и установлено, что уменьшение шероховатости поверхности способствует снижению этого отрицательного эффекта при формировании покрытий. Целесообразным представляется изучение указанного эффекта на других токопроводящих материалах с отличными от стали физическими свойствами, что отражено ниже.

Задача 2. Для последующего анализа в табл. 1 приведены справочные данные о физических свойствах выбранных материалов катода, отличных от свойств стали Ст3, а также компонентов, входящих в состав твердых сплавов.

Поверхности этих металлов и сплавов были обработаны методом ЭИЛ аналогично стали Ст3, что рассмотрено выше. Полученные результаты определения изменения массы катода отражены в табл. 2 и на рис. 2.

Отметим, что во всех случаях воздействие на поверхность катода искровыми разрядами привело к уменьшению его массы. Видно влияние как электрического режима обработки (здесь энергии импульсов), так и ее удельной длительности. Проанализируем последовательно изменения массы катода из металлов и твердых сплавов.

Как видно на рис. 2, наибольшему эрозионному воздействию в испытанном технологическом диапазоне подвержен алюминий, что можно объяснить его низкой температурой плавления. А наиболее стойким среди приведенного ряда материалов показал себя титан, исключая вариант длительной обработки на мощном электрическом режиме. Среднее положение по степени теплового разрушения занимают железо (сталь Ст3) и медь, причем последняя в сравнении с железом более склонна к разрушению и потере массы с увеличением энергии импульсов; это также можно отнести, несмотря на значительно лучшую теплопроводность меди, на счет существенно более низкой температуры ее плавления.

Изменение масс катодов из твердых сплавов имеет одинаковый характер. Ввиду того, что их основными компонентами являются карбиды TiC и WC, связанные кобальтом, причину разрушения на первых этапах обработки можно связать именно с кобальтом, имеющим физические свойства, относительно близкие к свойствам железа, но значительно более низкую температуру плавления, чем у карбидов W и Ti. По мере увеличения длительности обработки и выгорания кобальтовой связки идет выкрашивание карбидных зерен, интенсифицируется разрушение твердого сплава, что заметно отражается на изменении массы катода.

Как видно на рис. 2, технологические условия ЭИЛ по-разному влияют на разрушение поверхности катодов из выбранных материалов. Для определения значимости этого влияния предлагаем использовать соответствующие коэффициенты:

$$K_E = \Delta m_{k\,E\max}/\Delta m_{k\,E\min},$$

где $\Delta m_{k\,E\max}$, $\Delta m_{k\,E\min}$ — изменения массы катода при ЭИЛ на режимах с большей и меньшей энергиями импульсов соответственно;

$$K_t = \Delta m_{k\,t\max}/\Delta m_{k\,t\min},$$

где $\Delta m_{k\,t\max}$, $\Delta m_{k\,t\min}$ — изменения массы катода при ЭИЛ с большей и меньшей удельными длительностями соответственно.

В табл. 3 приведены расчетные значения этих коэффициентов в зависимости от материала катода, полученные на основе экспериментальных данных, а на рис. 3 — их графическое отображение.

Анализ кривых рис. 3 показывает относительную стабильность эрозионного и теплового разрушения стального и алюминиевого катодов, относительный разброс значений коэффициентов влияния составляет 27,5 и 24,2 % соответственно. На разрушение стального катода более заметное влияние оказывает увеличение удельной длительности обработки, а катода из алюминия — увеличение энергии импульсов. В большей степени оказывает влияние изменение условий ЭИЛ на эрозию меди (относительный разброс 46,5 %), причем превалирует влияние энергии импульсов. Наиболее зависим в этом плане титан (разброс 80,6 %), и в первую очередь от энергии импульсов. Очевидно, последнее связано со склонностью титана к высокотемпературному окислению.

На рис. 3 видна также нестабильность эрозионного процесса разрушения твердых сплавов Т15К6 и ВК8 (разброс 66,9 и 73,7 % соответственно), хотя характер зависимостей близкий. Более значительное влияние на эрозионное разрушение оказывает длительность обработки.

Из полученных данных следует, что при ЭИЛ эрозия токопроводящих материалов, используемых в качестве катода, различна и зависит от физических свойств материалов, а также в разной степени от электрических режимов и длительности обработки.

По результатам определения изменения массы образцов и числа рабочих импульсов за время обработки (использованы данные [5]) выполнен расчет импульсных значений эрозионного действия искрового разряда на катод. Полученные данные представлены в табл. 4, в которой также содержатся для сравнения аналогичные сведения по ЭИЛ с использованием других электродных материалов, обладающих более высокой плотностью и иными теплофизическими свойствами. Отметим при этом, что фактические импульсные значения изменения массы катода для сравниваемых электродов из меди, никеля и твердого сплава Т15К6 имеют, оче-

Таблица 3

Значения коэффициентов влияния условий ЭИЛ на эрозию катода

Условия ЭИЛ	Материал катода					
	Ст3	Al	Cu	Ti	Т15К6	ВК8
Коэффициент влияния энергии импульсов K_E						
t	1,29	1,85	2,39	3,06	1,70	1,67
$5t$	1,42	1,94	2,97	8,40	2,98	3,53
Коэффициент влияния удельной длительности ЭИЛ K_t						
E_1 = 0,11 Дж	1,62	1,47	1,59	1,63	2,94	3,00
E_{48} = 1,8 Дж	1,78	1,55	1,97	4,29	5,14	6,35

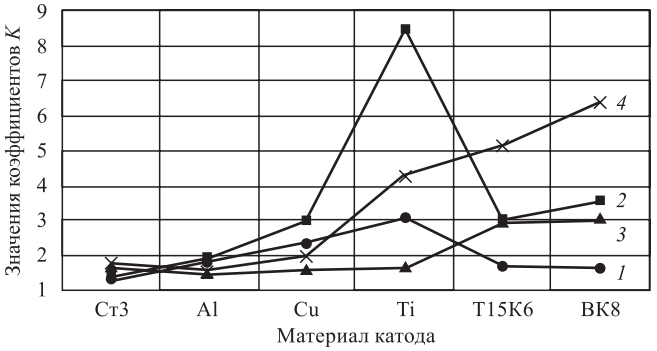


Рис. 3. Зависимость коэффициентов влияния на эрозию энергии импульсов (*1*, *2*) и удельной длительности (*3*, *4*) при ЭИЛ графитом разных материалов:
1 — при t; *2* — при $5t$; *3* — при $E_{\min}$; *4* — при $E_{\max}$

Таблица 4

Импульсные значения изменения массы стальных образцов при ЭИЛ на установке БИГ-5 × 10^7, г/имп.

Электрод	Режим 1 (E = 0,11 Дж)		Режим 48 (E = 1,8 Дж)	
	t_1	$5t_1$	t_{48}	$5t_{48}$
Графит	–2,74	–1,05	–14,53	–7,26
Медь	2,30	4,87	19,66	78,63
Т15К6	–0,12	—	176	—
Никель	4,82	4,87	648	586

видно, бóльшие значения по сравнению с указанными в табл. 4 для обработки графитом (массоперенос элементов графита условно принят нулевым).

Выполненные экспериментальные исследования подтверждают факт заметного разрушающего воздействия искрового разряда на металлическую поверхность. И поэтому, говоря о механизме формирования ИПС, необходимо учитывать этот значимый эффект. То есть каждый акт искрового воздействия на токопроводящую поверхность включает два процесса: 1) термомеханического разрушения основы, связанного с действием локальных высоких температур и давления; 2) переноса элементов материала анода на катод. При этом высокая локальная температура создает условия для образования микрованны расплава на поверхности катода и протекания в ней краткосрочных микрометаллургических процессов с участием элементов материалов анода, катода, межэлектродной среды и продуктов взаимодействия вторичных структур анода и катода, образовавшихся во время предыдущих этапов искрового процесса.

Как следует из табл. 4, эрозионная составляющая (–), снижающая привес катода, может варьироваться для разных электродных материалов в широких пределах, в частности для приведенных — от 1...2 % (никель) до 120 % (медь). Это можно объяснить большим различием физических свойств использованных в данной работе электродных материалов (плотности, температур плавления и испарения, теплопроводности и др.) и тепловым состоянием электрода в зоне обработки. Очевидно, при создании покрытий специального назначения эта характеристика имеет существенное значение.

Отметим также, что эрозионное разрушение катода, непосредственно связанное с тепловым импульсным воздействием на него искровыми разрядами, является одной из причин существования барьера, препятствующего росту толщины электроискровых покрытий, так как на первом этапе формируется новый рельеф поверхности из совокупности выступов и впадин. Выступы нового рельефа подвергаются разрушающему воздействию последующих искровых разрядов. Это особенно заметно при ЭИЛ электродными материалами, склонными к окислообразованию.

Исходя из изложенного для получения достоверной информации о фактическом переносе электродного материала целесообразно определять и учитывать эрозионную составляющую изменения массы катода (детали). Это особенно актуально при создании новой техники ЭИЛ (технологии, материалы, оборудование).

Заключение

1. Результаты выполненной работы дополняют и уточняют существующие сведения о разрушающем воздействии искровых разрядов на катод при формировании на нем в процессе ЭИЛ измененных поверхностных слоев.

2. Эрозионная составляющая изменения массы катода при ЭИЛ зависит от физических свойств материала катода, шероховатости обрабатываемой поверхности, электрических параметров обработки и ее удельной длительности. Ее величина может достигать 120 % от прироста массы катода, что, предположительно, также не является пределом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Лазаренко Н.И.** Изменение исходных свойств поверхности катода под действием искровых электрических импульсов, протекающих в газовой среде // Электроискровая обработка материалов. М.: Изд-во АН СССР, 1957. Вып. 1. С. 70—94.

2. **Иванов В.И., Гришко А.А.** Электроискровая установка БИГ-5 для универсального применения при упрочнении и восстановлении деталей и инструментов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 6. С. 20—23.

3. **Веселовский В.С.** Графит. М.: Металлургия, 1960. 180 с.

4. **Физические** величины: справочник / А.П. Бабичев, И.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

5. **Иванов В.И., Соловьев С.А., Величко С.А., Игнатьков Д.А.** Анализ электроимпульсных процессов при электроискровой обработке металлических поверхностей в газовой среде // Сварочное производство. 2016. № 4. С. 25—33.

УДК 621.9.047

Д.В. Силаев, Г.А. Сухочев, С.Н. Коденцев
(Воронежский государственный технический университет)
E-mail: suhotchev@mail.ru

Комбинированная обработка поверхностей сложного профиля под покрытие

Приведены результаты исследования комбинированной обработки поверхностей деталей лопаточных машин сложного профиля в целях активации под напыление защитных покрытий. Представлены результаты экспериментальных исследований, технологические методы и схемы комбинированной обработки.

Ключевые слова: *комбинированная обработка, газовая и жидкостная среда, микрогранулы, микровыступы, токопроводящая среда, анодное растворение, активация.*

The work is devoted to search and experimental research of combined surface treatment of parts of complex profile turbomachinery to activate a spray coatings. Presented the results of experimental research, technological methods and combined processing circuit.

Keywords: *combined treatment, gas and liquid medium, micro-pellets, micro-protrusions, conductive medium, anodic dissolution, activation.*

Объектом исследования являлись детали лопаточных машин типа турбин и крыльчаток. Такие детали имеют наружные поверхности сложной формы и каналы переменного сечения. На рабочие поверхности таких деталей часто требуется наносить износостойкие и защитные покрытия. При этом нередко возникает вопрос адгезии покрытия с основным материалом. Решить этот вопрос предполагается активацией поверхности под напыление газоплазменного покрытия, используя процесс комбинированной обработки. Множество ответственных лопаточных деталей в настоящее время изготавливают с использованием электроэрозионной обработки [1]. Традиционно перед покрытием наследованный от электроискровой обработки измененный поверхностный слой подвергают механической зачистке с помощью электрокорунда, что не исключает внедрения частиц абразива в поверхностный слой детали, появления приповерхностных внутренних микротрещин и растягивающих напряжений, а последующее химическое травление слабо активирует поверхность, а дефекты только усугубляет. Все это приводит к нарушению адгезии покрытия с основным материалом, что сводит на нет всю предыдущую трудоемкую работу. Тем не менее основная цель, которая преследуется в настоящее время при подготовке для нанесения покрытия, — придание поверхности заданной шероховатости путем рифления токарной или пескоструйной обработкой. Также практикуется черновое шлифование абразивным инструментом на режимах обдирочного шлифования.

Такая подготовка вполне может использоваться также для плазменного напыления, в том числе на прерывистые поверхности. Основной ее недостаток заключается в том, что шлифовальная пыль остается в порах и оказывает решающее влияние на сцепление напыленных покрытий с основой. Для неответственных деталей из конструкционных и даже легированных сталей такая технология подготовки используется в настоящее время, но в случае нагруженных вязких жаропрочных никелевых сплавов, легко жаржируемых абразивом, она неэффективна.

Для обеспечения надежного защитного действия покрытия при повышенных температурах и больших знакопеременных нагружениях следует уменьшить

влияние кислорода, остаточных напряжений и дефектов в покрытии. Для повышения адгезионных свойств надо усиливать переходный слой, придавая ему большую равнопрочность, сплошность и стабильность. В основе этих требований лежат исходные условия, установленные для контактной зоны при формировании слоев покрытия. Необходимо стремиться к расширению фактической площади контакта, чему при имеющихся возможностях прежде всего мешают оксидные пленки. Одним из решений данной задачи повышения технологических показателей качества может стать определенный переходный слой, который должен в основном удовлетворять следующим требованиям: обеспечить наличие оксидов на поверхности, которые должны быть легкоплавкими и настолько тонкими, чтобы не являться препятствием для соударяющихся с поверхностью детали частиц напыляемого материала и не оказывать значимого воздействия на процессы в зоне покрытие—подложка при экстремальных эксплуатационных условиях. Процесс активации поверхности термоактивной эрозией с созданием такого промежуточного слоя при условии минимального перерыва по времени между операциями прошивания и напыления позволит значительно повысить сцепляемость материала покрытия с основой.

Для решения этой задачи предлагается технология подготовки и активации поверхности сложного профиля для высокоскоростного нанесения газоплазменных покрытий, исходно формируемой с использованием электроэрозионной (электроискровой) обработки. Это достигается тем, что окончательную эрозионно-термическую обработку поверхности сложного профиля под газоплазменное напыление проводят электродом-инструментом с покрытием из материала, обеспечивающего концентрированное термическое воздействие на зону обработки при действии электроэрозионного разряда [2]. Такую обработку проводят до достижения значения параметра шероховатости поверхности *Ra* не менее 60 мкм, требуемого для надежной адгезии с основным материалом покрытия конкретного состава и способа его покрытия. При этом за счет слабой проводимости технической воды, используемой в процессе обработки, происходит локальное анодное растворение материала в зоне термического воздействия и частично удаляется дефектный слой от интенсивной эрозионно-термической обработки. Затем проводят комбинированную обработку поверхности сложного профиля в газожидкостной токопроводящей среде микрошариками для удаления оставшегося на микровыступах дефектного слоя и активации поверхности для нанесения покрытия [3].

Сначала электрод с термоактивным покрытием цинком устанавливают на копировально-прошивочный станок с ЧПУ, на котором стоит заготовка турбины. Каналы в заготовке предварительно сформированы электроэрозионной обработкой по существующей технологии на черновых режимах при максимально достижимой для данного материала производительности с припуском под эрозионно-термическую обработку в пределах 0,1...0,2 мм на сторону. Далее проводят эрозионно-термическую обработку при напряжении 90 В и силе тока около 8 А, оставляя припуск под комбинированную обработку микрошариками в пределах допуска на изготовление [4]. На рис. 1...3 приведены основные этапы формирования микропрофиля при эрозионно-термической обработке электродом-инструментом *1* с термоактивным покрытием *2*.

В момент разряда между покрытием *2* и заготовкой *4* (см. рис. 1) образуется канал повышенной проводимости в среде *5* и возникает поток электронов *3*, под воз-

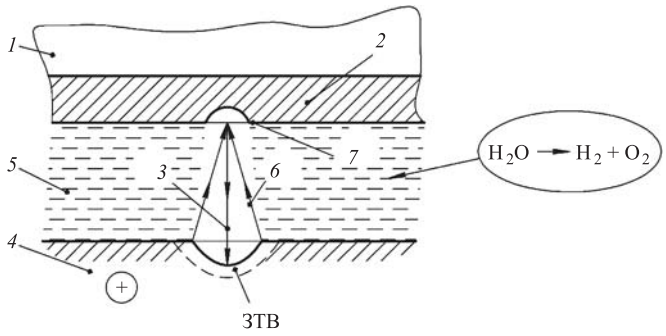


Рис. 1. Образование первичной лунки и зоны термического влияния

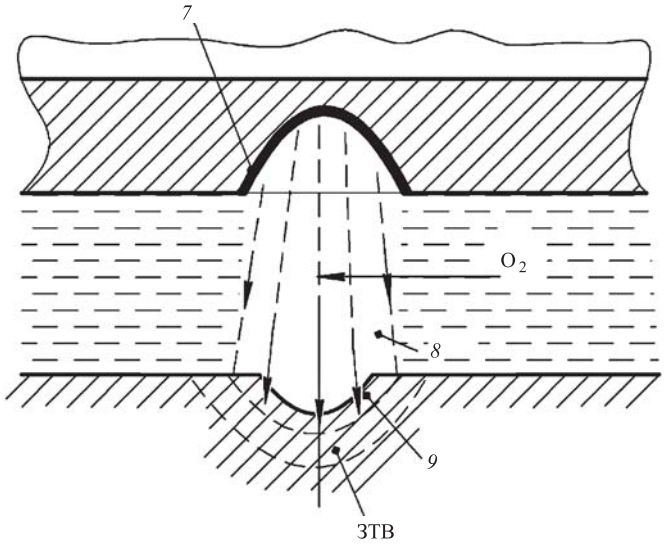


Рис. 2. Формирование кумулятивного потока

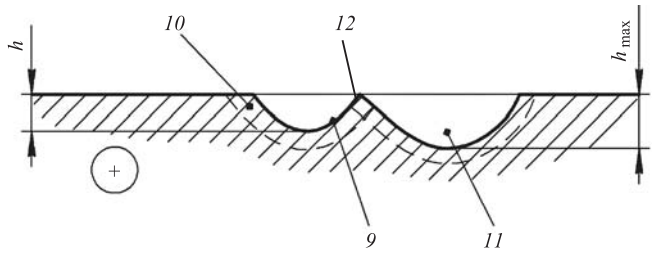


Рис. 3. Формирование увеличенных лунок и микровыступов

действием которого на заготовке *4* образуется лунка с зоной термического влияния (ЗТВ) около лунки.

Экранированная поверхностью заготовки *4* часть потока электронов *6* образует лунку *7* на поверхности покрытия *2*. В качестве рабочей среды используют техническую воду *5*, которая в зоне плазмы диссоциирует на водород и кислород. Кислород способствует развитию кумулятивного эффекта и образованию струи с высокой плотностью тепловой энергии. Плазменная струя *8* (см. рис. 2) с плотностью мощности излучения более 10^7 Вт/см^2 с большой скоростью перемещается к заготовке *4*.

Повышению мощности излучения способствует форма лунки *7* на покрытии *2*, которая концентрирует поток *8* тепловой энергии в ЗТВ, где уже имеется нагрев от первичного импульса (см. рис. 1). В результате образуется глубокая (*h* на рис. 3) лунка *9* уже со своей ЗТВ *10*.

Последующие импульсы тока происходят по мере подготовки зоны обработки к появлению разряда (деионизация среды, местное сопротивление и др.). Через некоторый период такой разряд возникает, и к этому моменту в ЗТВ имеется остаточный нагрев и интенсивность воздействия последующего разряда с термическим влиянием струи обеспечивает повышенные глубину h_{max} и радиус лунки *11* (см. рис. 3). Величина *h* характеризует показатель шероховатости через радиус лунки *r*, так как глубина лунки *h* и величина *r* связаны соотношением $r/h \approx 1{,}5$. Одновременно с эрозионно-термическим воздействием за счет слабой проводимости технической воды происходит анодное растворение материала в зоне термического воздействия и частично удаляется измененный дефектный слой от интенсивной эрозионно-термической обработки.

Сформированные регулярные микровыступы величиной 40...80 мкм и дефектный слой, оставшийся от предыдущей обработки, не удаляют, как в традиционной технологии, значительно сокращая время всего технологического цикла.

Вместо этого проводят комбинированную обработку микрошариками по схеме, показанной на рис. 4. Оставшийся на микровыступах поверхности измененный слой материала удаляют комбинированной обработкой микрошариками.

Для этого на поверхность *4* (см. рис. 1) с дефектами на микровыступах *12* (см. рис. 3) с направлением под углом 90° к ней подают микрошарики *13* (см. рис. 4) диаметром до 50 мкм, которые за счет деформационного сдвига разрушают на вершинах выступов измененный дефектный слой материала. Наличие газожидкостной токопроводящей среды *14* препятствует перегреву мест соударений гранул с поверхностью и образованию остаточных напряжений растяжения, а также ускоряет процесс за счет явления анодного растворения материала. Удаление дефектного слоя в значительной степени зависит от скорости анодного растворения в месте микровыступа *15*, которая в момент контакта шарика с деталью через жидкостную токопроводящую пленку *16* резко увеличивается из-за повышения удельной проводимости в месте соударения (до двух раз) и составляет не более 15...20 с на участок пятна распыла [5].

Малая кинетическая энергия микрошариков позволяет снижать параметр шероховатости не более чем на 10...20 мкм даже в условиях анодного растворения вершин микровыступов, а малое время воздействия дает возможность токопроводящей среде только активировать поверхность, а не разрушать ее. При обоснованных режимах обработки под покрытия микрошарики создают активированный микрорельеф без микротрещин и микродефектов, формируют стабильную шероховатость, создавая остаточные напряжения сжатия при минимальной степени наклепа.

В нашем случае обработку лопаток проводили на установках эжекторного типа микрошариками диаметром (50 ± 20) мкм с наложением тока низкого напряжения при следующем режиме: расстояние от оси сопла между его срезом и поверхностью образца L = 150×15 мм на диаметре вращения $D_{вр}$ = 200 мм;

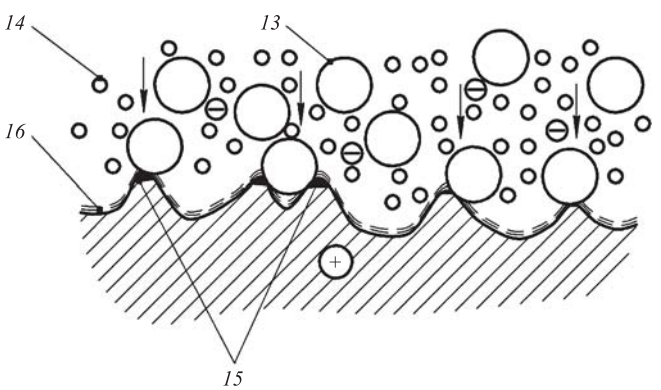


Рис. 4. Схема комбинированной обработки микрошариками

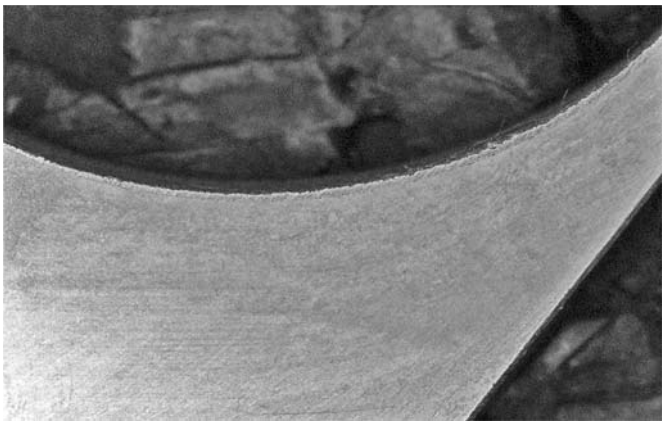


Рис. 5. Вогнутая поверхность

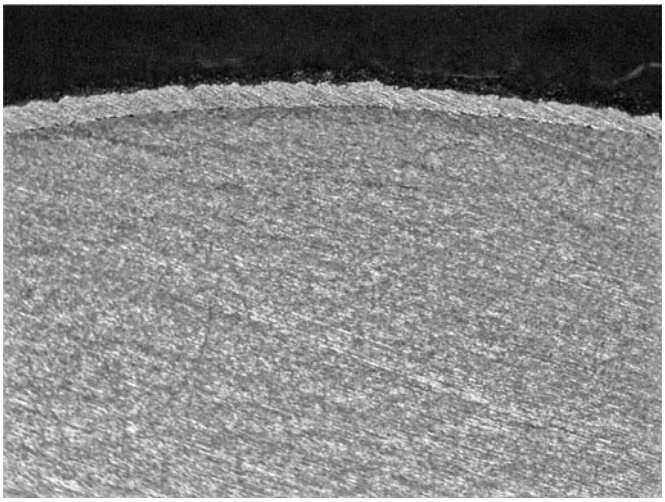


Рис. 6. Выпуклая поверхность

время обработки каждого соседнего участка поверхности — 20 с; угол соударения потока микрошариков с поверхностью — 90°; частота вращения шпинделя установки — 30 мин$^{-1}$; давление подаваемого сжатого воздуха — 0,2 МПа; напряжение — 4...8 В; расход газожидкостной слабопроводящей среды — 2 м^3/мин.

Газожидкостная слабопроводящая среда состояла из воздуха и распыленной до капельной фракции технической воды, являющейся слабым проводником. Токопроводящая рабочая жидкость — техническая вода распылялась через форсунку в направлении подачи шариков под давлением на входе 0,2 МПа. В качестве микрошариков использовали сферические гранулы из жаропрочного сплава одного химического состава с материалом детали. Это исключает появление в переходной зоне подложка—покрытие нежелательных примесей, снижающих адгезию.

Снижение шероховатости в этом случае в большей мере зависело от скорости анодного растворения дефектного слоя в месте микровыступа, которая в момент контакта шарика с деталью резко увеличивалась из-за повышения удельной проводимости в месте соударения в 2...3 раза в зависимости от свойств материала детали [1]. После обработки всех поверхностей в течение 10 мин их параметр шероховатости *Ra* составил 50...60 мкм, измененный слой отсутствовал, степень наклепа поверхностного слоя находилась в интервале 1,4...2,45 %, что отвечает заданным техническим условиям.

В результате обеспечен регулярный микрорельеф и достигнут параметр шероховатости *Ra* активированной поверхности без оксидной пленки не менее 40 мкм, что и требуется для нанесения высокоскоростного газоплазменного покрытия. На рис. 5, 6 приведены примеры нанесения покрытий на активированную комбинированной обработкой поверхность.

Изложенное свидетельствует о возможности управления или повышения производительности и качества поверхностей, обработанных электроэрозионным способом, за счет стабилизации микрорельефа и активации поверхностного слоя материала [4].

Применение эрозионно-термической обработки в комплексе с отделочным и упрочняющим воздействиями позволит решить ряд технологических проблем, возникающих в процессе запуска в производство новой наукоемкой техники и в процессе выпуска серийных транспортных систем различного назначения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Сухочев Г.А.** Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2003. 287 с.

2. **Коденцев С.Н., Сухочев Г.А., Смольянникова Е.Г.** Технология комбинированной электроэрозионной обработки полостей и каналов сложного профиля // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2012. № 5. С. 31—35.

3. **Сухочев Г.А., Небольсин Д.М., Смольянникова Е.Г.** Способ упрочняющей обработки внутренних поверхностей деталей: Пат. 2491155. 2013.

4. **Сухочев Г.А., Силаев Д.В.** Интенсификация электроэрозионной обработки поверхностей гидрооборудования под напыление покрытий // Насосы. Турбины. Системы. 2016. № 1 (18). С. 33—40.

5. **Сухочев Г.А., Силаев Д.В.** Процесс отделочно-упрочняющей обработки поверхностей лопаточных деталей с учетом технологической наследственности // Насосы. Турбины. Системы. 2015. № 2 (15). С. 22—33.

УДК 621.9.047

В.П. Смоленцев, М.В. Кондратьев, В.В. Иванов
(Воронежский государственный технический университет)
E-mail: vsmolen@inbox.ru

Проектирование технологических процессов получения высокоресурсных комбинированных покрытий

Приведены научные основы методологии построения технологических процессов комбинированного химико-механического получения высокоресурсных покрытий. Показано, что они базируются на классических закономерностях, описывающих процессы одновременных химического и механического воздействий. Показана возможность создания технологических процессов с учетом системного подхода к управлению воздействиями, усиливая взаимное положительное влияние каждого из воздействий на комбинированный процесс.

Ключевые слова: *комбинированные методы, химико-механические покрытия, ресурс, технологические процессы, методология, воздействия.*

Scientific fundamentals of methodology of creation of technological processes of the combined chemical and mechanical receiving high-resource coverings are given in work. It is shown that they are based on the classical regularities describing processes of simultaneous chemical and mechanical influence. The possibility of creation of technological processes taking into account system approach to management of influences is shown, strengthening mutual positive influence of each of impacts on the combined process.

Keywords: *combined methods, chemical and mechanical coverings, resource, technological processes, methodology, influences.*

Введение

Многолетний опыт ростовской научной школы однозначно показал, что волновые процессы виброударного метода упрочняющей обработки дают возможность существенно улучшить технологические показатели, получаемые при последовательном использовании химических и механических воздействий, но наиболее полное использование потенциала этих воздействий возможно только при их комбинации в едином методе обработки, который получил название химико-механического [1]. Приведенная в [1] методология проектирования для такого метода комбинированных технологических процессов позволила создать механизм технологического повышения ресурса изделий, что востребовано промышленностью и актуально для современного отечественного и зарубежного машиностроения.

Методология построения комбинированных технологических процессов

В общем случае технологический процесс комбинированной обработки [2] включает несколько этапов, которые формируются на базе энергетических уровней каждого воздействия [3].

На первом этапе устанавливают нижний предел энергии активации, характеризующий минимальное количество энергии, необходимой для начала химической реакции. Далее устанавливают необходимое количество компонентов, участвующих в реакции:

$$\sum_{1}^{i} K_1 \rightarrow \sum_{1}^{j} K_2, \qquad (1)$$

где $\sum_{1}^{i} K_1$ — сумма i химических компонентов, участвующих в химической реакции; $\sum_{1}^{j} K_2$ — сумма j компонентов после прохождения химической реакции.

Энергетические показатели реакции (1) имеют вид

$$U_{\text{а}} = U_{\text{м.д}} \pm U_{\text{х.д}} < U_{\text{м max}} \pm U_{\text{х.д}}, \qquad (2)$$

где $U_{\text{а}}$ — энергия, требуемая для протекания химической реакции; $U_{\text{м.д}}$ — механическая энергия, подаваемая извне; $U_{\text{х.д}}$ — дополнительная энергия, подводимая для ускорения химической реакции (знак "плюс") или затрачиваемая (знак "минус") на компенсацию потерь при прохождении химической реакции; $U_{\text{м max}}$ — предельные энергетические возможности механической составляющей процесса.

Далее по формуле химической реакции рассчитываются энергии $U_{\text{а}}$ и $U_{\text{х.д}}$ в (2), которые уточняются по справочным материалам для аналогичных операций. Если $+U_{\text{х.д}} > U_{\text{а}}$, то проводится корректировка величи-

ны $U_{м.д}$. В случае отрицательной величины $U_{х.д}$ изменяют значение $U_{м.д}$ механической составляющей энергии.

Величина $U_{х.д}$ оценивается для принятых технологических режимов обработки, что открывает возможность правильного назначения или расчета этих параметров процесса.

Для обеспечения повышенного ресурса работоспособности объекта с исследуемым покрытием по заявленному заказчиком и заложенному в проекте разработчиком уровню этого показателя устанавливаются в пределах достигнутых диапазонов или создаются возможные режимы, в основном механического воздействия, комбинированного процесса, по которым при необходимости корректируются параметры химического воздействия.

Базой для построения методологии является уровень достигнутых технологических показателей, обеспечивающих получение заданных эксплуатационных характеристик изделия, в первую очередь по надежности, долговечности и ресурсу безотказной работы.

Применение методологии дает возможность ограничить зону поиска оптимального варианта из перечня известных воздействий в комбинированном процессе

Рис. 1. Построение технологических процессов комбинированных ВиХМП

и научно обосновать направление работ по созданию новых способов с комбинацией химических и механических воздействий, наиболее полно реализующих положительные стороны комбинированного процесса получения высокоресурсных покрытий, что может служить базой для создания и развития нового научного направления по комбинированным технологиям получения высокоресурсных покрытий.

Сравнение достоинств вариантов проектируемых комбинированных процессов проводится по укрупненным технико-экономическим показателям, подтвержденным опытом применения аналогичных технологий с последовательными химическим и механическим (в частности, вибрационным) воздействиями.

Представленная методология позволяет ускоренно спроектировать рациональный технологический процесс для получения высокоресурсных покрытий типовых деталей, обоснованно выбрать технологические режимы, оборудование и средства технологического оснащения, источники информации для экономического обоснования эффективности комбинированного процесса для конкретного изделия.

На рис. 1 приведена последовательность проектирования типовых комбинированных виброволновых химико-механических покрытий (ВиХМП).

Приведенная методология позволяет по имеющемуся алгоритму научно обоснованно автоматически проектировать методики построения технологических процессов комбинированной обработки с химическим и виброволновым механическим воздействиями и с учетом достигнутых возможностей повышать ресурс покрытий до уровня не ниже заявленного ресурса всего изделия. Использование алгоритма позволяет автоматизировать процесс технологической подготовки производства и расширить область использования комбинированных химико-механических высокоресурсных покрытий в различных отраслях машиностроения, особенно при создании образцов летательных аппаратов новых поколений, где рассматриваемые покрытия находят наибольшее применение.

Проектирование технологических процессов для типовых химико-механических высокоресурсных покрытий

Формирование вибрационного химико-механического твердосмазочного покрытия. Приведенный на рис. 2 процесс формирования покрытий дает возможность визуально оценить технологические взаимосвязи в замкнутом объеме камеры для виброударнрго воздействия. Анализируя комбинированный механизм образования слоя твердой смазки слоистой структуры при трении и

особенности процесса вибрационной обработки в среде металлических шаров, можно поэтапно представить порядок формирования твердосмазочного покрытия дисульфид молибдена следующим образом (рис. 2, *б*, *в*).

Этап 1. Механический контакт и адсорбция частиц MoS_2. Здесь требуется рассчитать или назначить режимы механических и химических процессов, чтобы в момент приложения внешней механической нагрузки благодаря силе соударения шара с поверхностью обрабатываемого материала происходила расчетная упругая, пластическая и упругопластическая деформация в зоне контакта. Одновременно за счет сближения наносимого дисульфида молибдена с деталью происходит адсорбция частиц порошка на поверхности металла (рис. 2, *а*).

Этап 2. Активизация поверхностного слоя металла. Активизация поверхности осуществляется виброударным методом в результате пластического деформирования и увеличения плотности дислокаций, разрушения оксидных пленок и образования ювенильных участков поверхности, увеличения площади контакта (рис. 2, *б*). Здесь требуются технологические режимы, совместимые с первым этапом расчета.

Этап 3. Образование граничного слоя. Этот этап требует обоснования энергии, направляемой на размельчение кристаллитов MoS_2, разрушение механическим действием рабочей среды химических оксидных пленок металла во впадинах микрорельефа, внедрение частиц порошка и адсорбцию их к поверхностному слою активизированного металла (рис. 2, *в*).

Этап 4. Образование слоя смазки. Этот этап требует режимов, вытекающих из затрат энергии на уплотнение частиц нанесенного покрытия, размельчение кристаллитов, химическое и диффузионное слипание их друг с другом, образование сложного слоя смазки (рис. 2, *г*). При этом параметры режимов должны быть совместимы.

Этап 5. Формирование поверхностного слоя покрытия. В результате скольжения, реализации внутренней и внешней энергии комбинированного процесса частицы рабочей среды ориентируются относительно обрабатываемой поверхности, частицы порошка базовыми плоскостями укладываются параллельно поверхности трения (рис. 2, *г*) и формируется профиль, приведенный на рис. 2, *в*, *г*.

Формирование вибрационного химико-механического цинкового покрытия (ВиХМЦП). Этапы формирова-

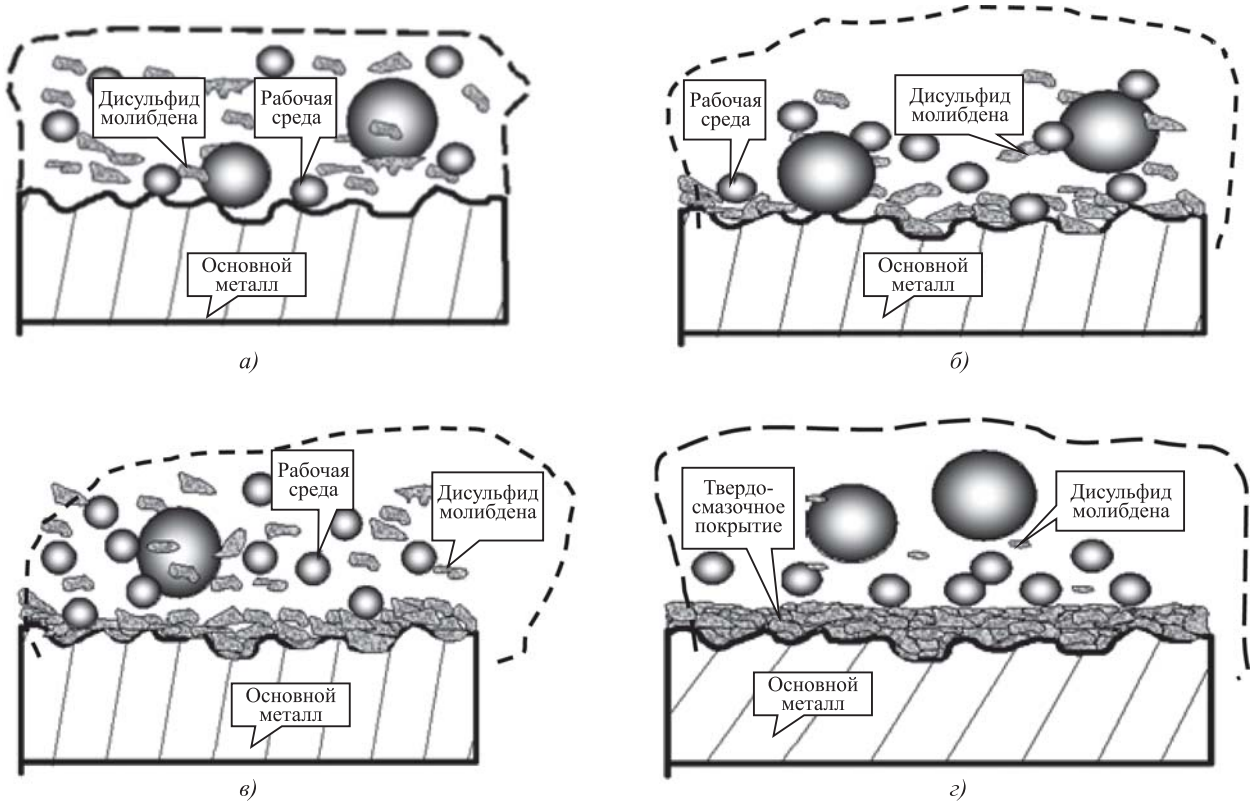


Рис. 2. Этапы образования высокоресурсного твердосмазочного покрытия MoS_2:
а — механический контакт и адсорбция материала покрытия; *б* — активация поверхностного слоя; *в* — образование граничного слоя; *г* — образование слоя смазки и формирование покрытия

ния ВиХМЦП, определяющие порядок расчета режимов и проектирования технологического процесса и его особенности, можно представить следующим образом (рис. 3):

Этап 1. Химико-механический — до контакта деталей с рабочей средой. В результате подвода внешней энергии в момент приложения механической нагрузки вследствие соударения шаров с поверхностью обрабатываемого материала происходит разрушение поверхностного слоя в зоне контакта, в результате чего на поверхности металла адсорбируются ионы, молекулы из раствора, что открывает возможность протекания химических процессов (рис. 3, *а*). Здесь энергетические параметры химического воздействия определяются режимами механической составляющей комбинированного процесса.

Этап 2. Активация. Активация поверхности происходит в результате механического воздействия рабочей среды (например, фарфоровых шаров). В зависимости от используемых режимов может увеличиваться плотность дислокаций и активных центров с одновременной активацией ионов и молекул раствора (Zn^{++}, Zn), что должно учитываться при назначении химических режимов преобразования поверхностного слоя.

В результате динамического воздействия и перемешивания рабочей среды происходят подача свежего раствора и отвод отработанного. Вместе с отработанным раствором с поверхности металла удаляются жировые загрязнения, таким образом, осуществляются совмещение процессов очистки от загрязнений и улучшение качества поверхностного слоя (рис. 3, *б*), что также требует затрат энергии и должно учитываться

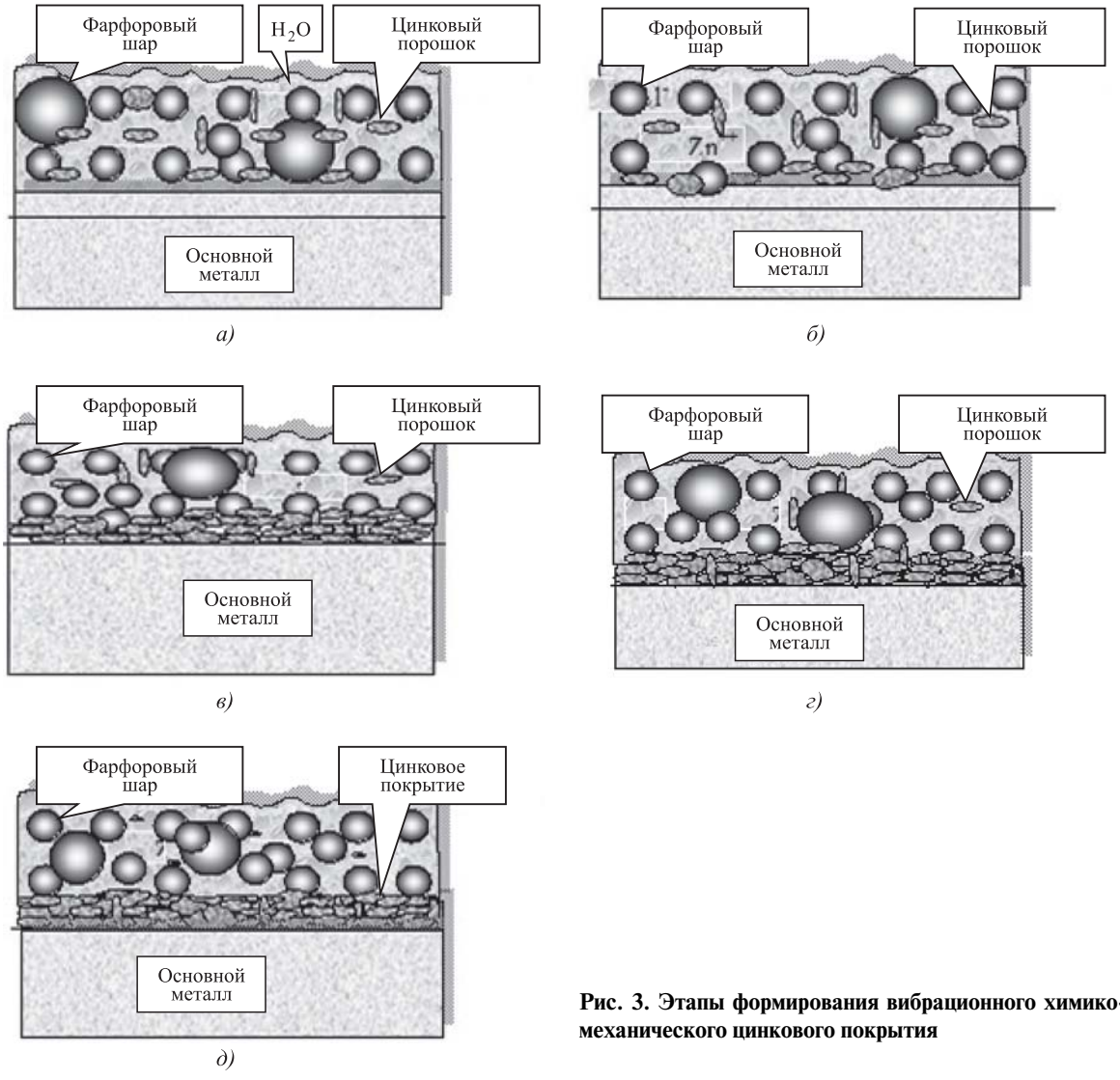


Рис. 3. Этапы формирования вибрационного химико-механического цинкового покрытия

при назначении режимов при проектировании технологических процессов для конкретных деталей с использованием предложенной методологии.

Этап 3. Формирование покрытия. Здесь следует учитывать, что участки поверхности металла с высокой активностью адсорбируют ионы Zn^{++}, которые, разряжаясь, осаждаются в виде цинкового покрытия. Это определяет энергозатраты на химическую составляющую и должно быть учтено при проектировании технологического процесса.

Для расчета механического воздействия необходимо учесть, что часть энергии вибрирующей среды тратится на подвод к поверхности металла цинкового порошка, который адсорбируется и под действием механических усилий закрепляется на поверхности металла (рис. 3, *в*).

Этап 4. Формирование заданной толщины комбинированного покрытия. В условиях виброволнового воздействия и активации составляющих процесса цинкования происходит рост цинкового покрытия. В этом участвуют химическая и механическая составляющие, для которых требуется спроектировать режимы и технологический процесс, учесть энергию, которую необходимо затратить на создание постоянного притока свежего раствора (суспензии) цинкового порошка к поверхности металла, что, в свою очередь, обеспечивает концентрационное равновесие, от которого зависит скорость формирования покрытия. Процесс сопровождается некоторым разрыхлением и растворением цинкового покрытия под влиянием активных ионов хлора и движущихся фарфоровых шаров. Интенсивное движение рабочей среды вызывает уплотнение цинкового порошка, что показано на рис. 3, *г*.

Этап 5. Получение требуемых показателей поверхностных слоев ВиХМЦП. Под влиянием вибрационного воздействия и увеличения толщины покрытия снижаются активность роста и производительность операции. При этом могут происходить сопутствующие процессы, в частности частицы цинка, имеющие слабое сцепление с основным покрытием, сминаются, деформируются, удаляется часть неровности, как показано на рис. 3, *д*, в результате могут изменяться шероховатость обрабатываемой поверхности и увеличиваться ее блеск.

Формирование вибрационного химико-механического оксидного покрытия (ВиХМОП). Анализ механизма образования высокоресурсной гидрооксидной пленки в среде полимерных рабочих тел позволяет выделить такие же этапы в процессе формирования ВиХМОП, что и для приведенных выше покрытий, которые, в свою очередь, определяют этапы расчета режимов и построения технологического процесса (рис. 4). Эти этапы аналогичны рассмотренным выше.

Этап 1. Выбор и расчет режимов технологического процесса для этапа обеспечения контакта деталей с рабочей средой. В момент приложения нагрузки вследствие соударения шаров с поверхностью обрабатываемого материала происходит упругопластическая деформация естественной оксидной пленки на микро-/наноуровне в зоне контакта. Химическое воздействие включает адсорбцию на поверхности металла ионов, молекул оксидирующего раствора (рис. 4, *а*), требующую затрат внешней энергии. Это должно учитываться при расчете технологических режимов.

Этап 2. Расчет режимов, обеспечивающих компенсацию затрат на активацию и очистку поверхностного слоя металла. Здесь следует принимать во внимание, что активация поверхности происходит в результате разрушения естественной оксидной пленки, увеличения плотности дислокаций и образования активных центров ювенильных участков поверхности. Одновременно осуществляются активация ионов раствора (Na^+, SiF_6^{2-}, H^+, OH^-, CrO_4^{2-}), их адсорбция на поверхности металла и взаимодействие с жировыми загрязнениями и оксидами.

В результате уточнения режимов и учета динамического воздействия, перемещения рабочей среды обеспечиваются требуемая для протекания процесса подача свежего оксидирующего раствора к поверхности металла и отвод отработанного, ослабленного после реакции. Вместе с отработанным раствором с поверхности металла удаляются оксиды, жировые загрязнения и продукты химической реакции, что требует затрат внешней энергии.

Таким образом рассчитываются режимы и проектируется этап технологического процесса, совмещающий очистку от загрязнений, оксидов и подготовку поверхности под оксидирование с улучшенным качеством и ресурсом поверхностного слоя (рис. 4, *б*, *в*).

Этап 3. Расчет энергетических затрат и режимов образования гидрооксидной пленки. При расчете затрат и режимов, обеспечивающих протекание процессов данного этапа, следует учитывать, что участки поверхности обрабатываемого металла с высокой активностью адсорбируют гидроксил-ион OH^-, взаимодействуют с ним с образованием гидроксида алюминия по реакции

$$2Al^{3+} + 8OH^- \rightarrow 2Al(OH)_3 + H_2\uparrow + O_2\uparrow. \qquad (3)$$

Эта реакция протекает с выделением водорода, удалению которого способствует вибрирующая среда. Одновременно с образованием гидроксида алюминия в растворе могут протекать побочные реакции. В результате взаимодействия анионов SiF_6^{2-}, OH^- и CrO_4^{2-} с

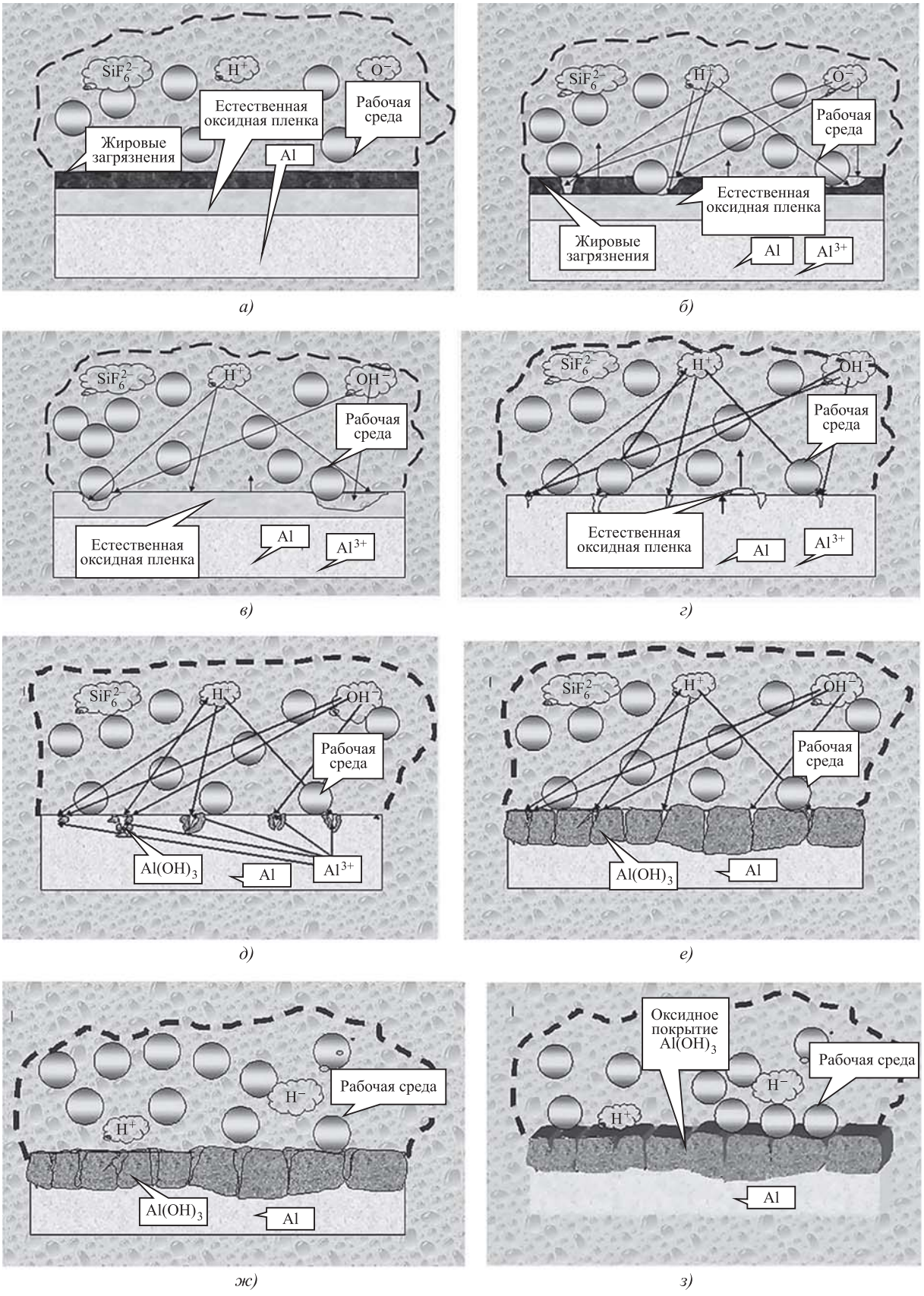
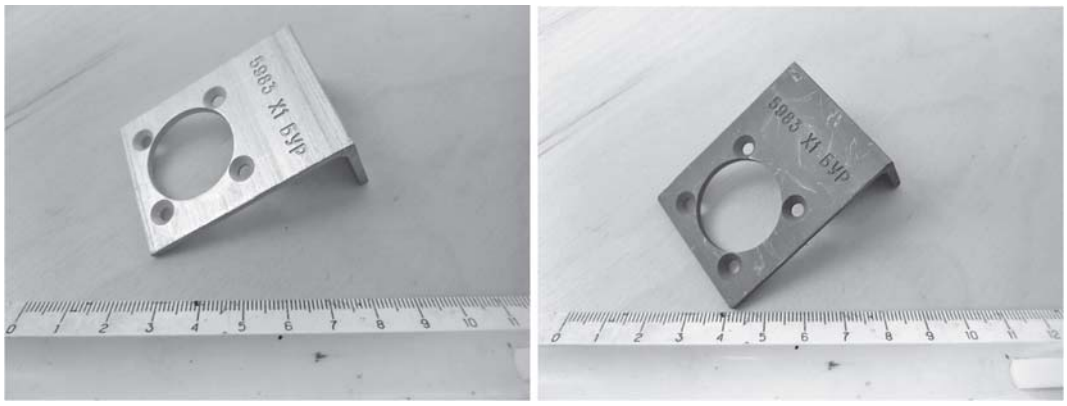


Рис. 4. Этапы формирования оксидного покрытия в процессе вибрационной обработки



а) *б)*

Рис. 5. Детали с ВиХМОП:
а — без покрытия; *б* — с покрытием

растворяющимся алюминием могут образовываться нерастворимые соединения типа $Al_2(SiF_6)_3$, Cr(OH), $Al(CrO_4)_3$, $Al_2Cr_2O_7$ и более сложные с присутствующим в кислой среде гексааквааалюминий-ионом $Al(H_2O)_6^{3+}$ (рис. 4, *г*, *д*).

Этап 4. Расчет технологических режимов получения заданной толщины оксидной пленки. Целью этого этапа является обеспечение требуемого качества (в том числе ресурса работы) поверхностного слоя, где под влиянием механических виброусилий и химической активации всех составляющих процесса оксидирования происходят формирование и рост оксидной пленки.

При расчете режимов следует иметь в виду, что образовавшаяся на поверхности оксидная пленка увеличивается за счет самого металла, что может изменять размеры детали и нарушать ее точность. Управляемый постоянный приток свежего раствора к поверхности металла через поры в оксидной пленке обеспечивает ее рост. При этом могут образовываться ячейки неправильной формы и формируется новый рельеф поверхности, определяющий ее качество, имеет место разрыхление покрытия под вибрационным воздействием (рис. 4, *д*, *е*).

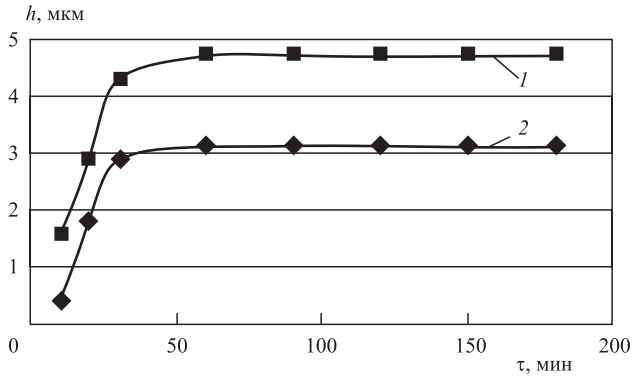


Рис. 6. Зависимость толщины ВиХМТП от времени нанесения. Покрытие MoS_2 на стали 45:
1 — отожженный образец; *2* — закаленный образец

Этап 5. Расчет режимов, обеспечивающих заданные технологические показатели изделия на заключительном этапе формирования поверхностного слоя ВиХМОП. На последнем этапе формирования покрытия внутренней энергии активности рабочего раствора недостаточно для преодоления расстояния от поверхности оксидной пленки до ее основания и требуется внешний подвод энергии, что должно учитываться при проектировании технологического процесса.

Применение химико-механических покрытий в машиностроении

На рис. 5 приведены детали с оксидным покрытием. Обработку деталей проводили следующим образом: очищали по предложенной технологии, перегружали в вибрационную камеру, где в качестве рабочей среды использовали полиэтиленовые шары диаметром 3 мм и оксидирующий раствор, содержащий 2,5 г кремнефторида натрия и 3,5 г хромового ангидрида на 1 л воды. Виброобработку и оксидирование проводили при разработанных режимах: амплитуда колебаний 2 мм, частота колебаний 25 Гц, продолжительность обработки 20 мин. Получили качественное покрытие толщиной 4...5 мкм.

На узлы трения наносили твердые смазочные покрытия (ВиХМТП), в основном дисульфид молибдена. Как показано на рис. 6, стабильные качественные ВиХМТП могут быть получены при длительности процесса 50...60 мин. В этом случае режим нанесения ВиХМТП должен быть следующим: скорость перемещения камеры 0,2...1,3 м/с; температура в зоне обработки 293...420 К; время обработки 50...60 мин.

Рис. 7. Деталь с многослойным покрытием

На рис. 7 показана деталь с многослойным покрытием: ВиХМОП с последующей окраской слоем толщиной около 0,3 мм. Испытания детали на коррозионную стойкость и адгезию покрытия показали, что при всех условиях эксплуатации результаты значительно превышают достигнутый ранее уровень.

Заключение

Создан единый алгоритм для автоматизированного проектирования технологических процессов нанесения высокоресурсных комбинированных покрытий, что позволило разработать методы проектирования типовых технологических процессов нанесения вибрационных химико-механических твердосмазочных покрытий, подтвердить положительные результаты использования новых покрытий, полнее использовать имеющийся информационный материал и до 4...5 раз ускорить проектирование технологических процессов нанесения новых видов высокоресурсных покрытий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Вибрационная** механохимия в процессах отделочно-упрочняющей обработки и покрытий деталей машин / А.П. Бабичев, В.В. Иванов, С.Н. Шудалей и др. Ростов н/Д: Изд. центр ДГТУ, 2012. 204 с.

2. **Смоленцев Е.В.** Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М.: Машиностроение, 2005. 511 с.

3. **Электрофизические** и электрохимические методы обработки материалов. В 2 т. Т. 1 / под ред. В.П. Смоленцева. М.: Высш. шк., 1983. 247 с.

III МЕЖРЕГИОНАЛЬНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

г. Севастополь, 19—23 сентября 2017 г.

Приглашаем руководителей, ученых, специалистов, преподавателей вузов, сотрудников IT-, машино- и приборостроительных предприятий, аспирантов и студентов принять участие в **III Межрегиональной научно-практической конференции «Перспективные направления развития отечественных информационных технологий».**

Одно из основных направлений работы конференции связано с использованием современных информационных технологий **в машиностроении, приборостроении.**

Конференция состоится на базе Севастопольского государственного университета при поддержке Законодательного Собрания и Правительства Севастополя, Правительства Санкт-Петербурга, Крымского IT-кластера.

В программе конференции пленарные и секционные доклады, открытые лекции, выступления экспертов IT-отрасли, представителей органов власти, науки, образования, бизнеса, круглые столы, дискуссии, учебные семинары, молодежный IT-фестиваль.

Сроки подачи заявок: 10 сентября 2017 г., для включения в сборник материалов конференции 15 апреля 2017 г. (продлен до 1 мая 2017 г.).

Информация о конференции — на сайте:
http://pnroit.code-bit.com/
Контакты: e-mail: ANIST017@mail.ru, pervukhina14@mail.ru,
раб. тел.: +7 (8692) 43-52-90, моб. тел.: +7 (978) 730-10-78, +7 (978) 739-07-78

УДК 620.179.14

С.В. Абышев
(АО "НПЦ газотурбостроения "Салют")
E-mail: svabyshev@gmail.com

Способы магнитопорошкового контроля

Рассмотрено несколько способов магнитопорошкового контроля, применяемых сегодня на крупных предприятиях. Приведены основные достоинства этих способов и процедуры определения значений величин, необходимых для их выбора и реализации для контроля конкретной детали.

Ключевые слова: *магнитопорошковый контроль, циркулярное намагничивание, продольное намагничивание, полюсное намагничивание, комбинированное намагничивание, способ приложенного поля, способ остаточной намагниченности, коэрцитивная сила, прижоги, дефектоскоп, суспензия, магнитный индикатор.*

Several methods of magnetic particle inspection, applied today at large enterprises, are considered. The main advantages of these methods, procedures for determining the values of the quantities necessary for their selection and implementation for the control of a particular part are given.

Keywords: *magnetic powder inspection, circular magnetization, longitudinal magnetization, pole magnetization, combined magnetization, method of the applied field, method of residual magnetization, coercive force, burn marks, flaw, suspension, magnetic indicator.*

Магнитопорошковый контроль позволяет выявить такие дефекты, как волосовины, трещины, усталостные трещины, закаты и др. Наиболее эффективное обнаружение дефектов обеспечивает перпендикулярное к направлению дефекта намагничивание контролируемой детали. Намагничивание происходит в двух направлениях, а если деталь сложной конструкции, то в нескольких направлениях. Выбор способа намагничивания в основном зависит от магнитных свойств материала детали. При этом важную роль играют ее форма и габариты, а также наличие на детали немагнитного покрытия.

Существует несколько способов намагничивания: циркулярное, продольное (полюсное) и комбинированное.

При *циркулярном намагничивании* магнитный поток весь свой путь проходит в проверяемой детали [1]. Намагничивание происходит при пропускании тока по стержню, помещенному в отверстие детали, и по детали. При этом направление магнитного потока перпендикулярно к направлению тока, из чего следует, что для оптимального обнаружения дефектов их направление должно совпадать с направлением тока.

При *продольном намагничивании* магнитный поток одну часть пути проходит в детали, а другую — по воздуху [2]. Этот способ позволяет намагничивать детали при помощи электромагнитов, постоянных магнитов или соленоидов. На краях детали образуются полюсы, создающие поле обратного направления.

Способ комбинированного намагничивания заключается в одновременном действии на проверяемую деталь двух или трех полей: продольного поля электромагнита или соленоида и одного или двух циркулярных магнитных полей. Комбинированное намагничивание применяют для выявления разноориентированных дефектов за одну операцию намагничивания [2].

Контроль деталей осуществляется двумя способами: способом приложенного поля (СПП) и способом остаточной намагниченности (СОН).

Способ приложенного поля. При контроле способом приложенного магнитного поля операции технологического процесса, такие как намагничивание, нанесение на поверхность детали магнитного индикатора (суспензии или сухого порошка) и ее осмотр проводят одновременно.

При циркулярном намагничивании для определения силы тока, пропускаемого по детали или по центральному проводнику (стержню), применяется формула [3]

$$I = 3Hd,$$

где H — напряженность магнитного поля, в данном случае $H = H_c$, H_c — коэрцитивная сила, А/см; d — диаметр детали, см. Значение H_c определяют следующим образом. Из таблицы магнитных характеристик сталей

Магнитные характеристики сталей

Марка стали	Термическая обработка	Остаточная индукция B_r, Тл	Коэрцитивная сила H_c, А/см	Напряженность поля насыщения $H_н$, А/см
У7А	В состоянии поставки	0,85	9,0	130
	Закалка с 780 °С, отпуск при 260...300 °С	1,00	15,2	160
	Закалка с 810 °С, отпуск при 320...340 °С	1,18	20,0	120
	Закалка с 810 °С, отпуск при 350...380 °С	1,30	16,0	120
У8А	В состоянии поставки	0,67	9,0	80
	Закалка с 780 °С, отпуск при 360 °С	0,75	18,0	240
У9А	Закалка с 810 °С, отпуск при 240 °С	0,81	22,0	100
	Закалка с 810 °С, отпуск при 400 °С	1,07	16,0	100
У12	В состоянии поставки	0,64	8,0	240
	Закалка с 760 °С, отпуск при 150...180 °С	0,71	19,2	230
ХВГ	Закалка с 830 °С, отпуск при 160 °С	0,85	9,0	130
	Закалка с 830 °С, отпуск при 250 °С	1,18	20,8	120
	Закалка	0,93	18,8	100

Рис. 1. Фрагмент таблицы магнитных характеристик сталей

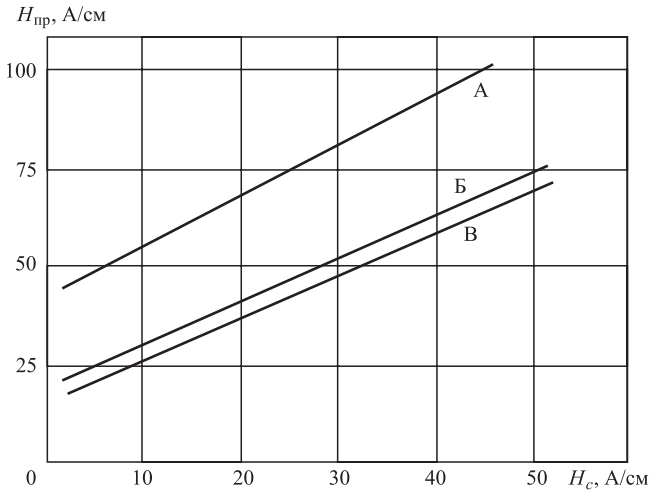


Рис. 2. График для определения магнитного поля в целях достижения уровня чувствительности А, Б или В при контроле с применением СПП

(рис. 1) на основании режима термической обработки выбирают значение H_c. По этому значению на графике, приведенном на рис. 2, находят необходимое для достижения требуемой чувствительности (А, Б, В) значение напряженности приложенного поля $H_{пр}$, которое подставляют в расчетную формулу в качестве H_c.

При определении силы тока I в соленоиде применяется формула

$$I = \frac{H_c}{K},$$

где K — коэффициент соленоида, замеряемый магнитометром.

Способ остаточной намагниченности. Суть контролирования детали СОН заключается в последовательном выполнении технологических операций. В первую очередь деталь подготавливают к контролю (осматривают ее визуально, убирают загрязнение), после чего ее помещают в установку для намагничивания и выполняют операцию намагничивания. Затем на поверхность детали наносят магнитный индикатор (суспензию или сухой порошок) и проводят ее осмотр. На тех участках детали, где есть дефект, наблюдается скопление магнитного порошка. После осмотра определяют соответствие детали техническим условиям или нормам на отбраковку. Далее выполняют процесс и контроль размагничивания.

СОН имеет следующие преимущества. Он позволяет контролировать всю деталь (включая торцы). Тем самым уменьшается возможность прижогов на деталях в местах их зажима между дисками дефектоскопа. В основном это связано с режимом намагничивания (в данном случае это импульсный режим). Можно устанавливать деталь в любом положении для обеспечения оптимального освещения и осмотра невооруженным глазом или с использованием луп, микроскопов и других оптических приборов. СОН позволяет наносить суспензию на деталь как путем полива, так и погружением нескольких деталей в ванну с суспензией. Еще один важный фактор — простота расшифровки картины осаждений порошка. Так, при контроле с помощью СОН порошок меньше оседает по рискам, наклепу, местам грубой обработки поверхности, что позволяет уменьшить выявление ложных дефектов.

При использовании СОН в расчетах для определения силы тока применяется та же формула, что и для СПП:

$$I = 3Hd,$$

где $H = H_н$, $H_н$ — напряженность поля насыщения, А/см, ее значение также выбирают из таблицы магнитных характеристик сталей, основываясь на термической обработке (см. рис. 1); d — диаметр детали, см.

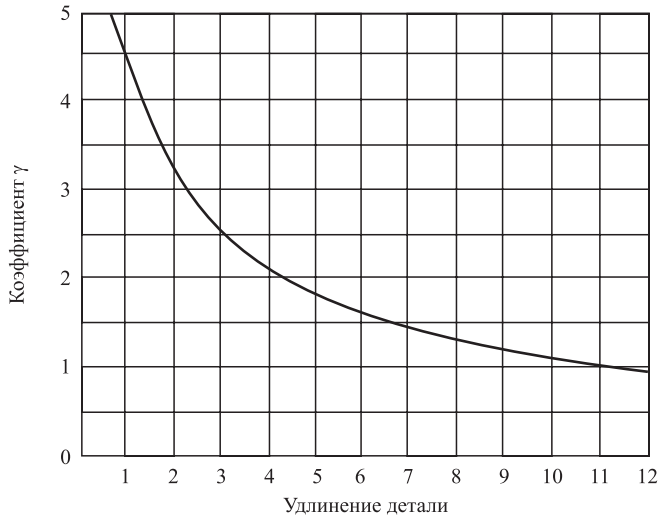


Рис. 3. График для определения коэффициента γ

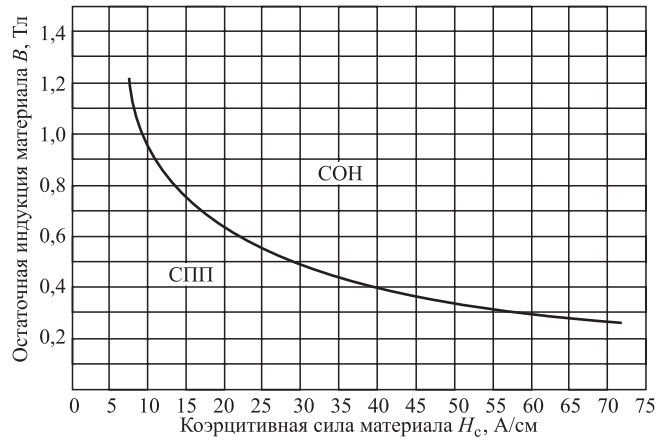


Рис. 4. График для определения способа магнитопорошкового контроля

При определении силы тока в соленоиде применяется формула

$$I = \frac{H_{\text{н}}}{K}\gamma,$$

где K — коэффициент соленоида, замеряемый магнитометром; γ — поправочный коэффициент, выбираемый по графику, приведенному на рис. 3, при найденном удлинении детали.

Выбрать способ контроля детали можно также используя график, приведенный на рис. 4. Для этого при определении марки материала выбирают коэрцитивную силу H_c и остаточную индукцию B_r. Данные значения переносят на график и определяют соответствующую им точку. Если эта точка выше кривой, то объект следует контролировать способом остаточной намагниченности, если же ниже — то способом приложенного поля.

Таким образом, рассмотрено несколько способов магнитопорошкового контроля. Значения величин, необходимые для выбора способа контроля и его проведения, определяются исключительно с помощью таблиц и графиков. Приведенные расчетные формулы позволяют повысить точность контроля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Шелихов Г.С.** Магнитопорошковая дефектоскопия деталей и узлов. М., ГП НТЦ "Эксперт", 1995. 224 с.

2. **Шелихов Г.С.** Магнитопорошковая дефектоскопия в рисунках и фотографиях. М., Диагностический научно-технический центр "Дефектоскопия", 2002. 324 с.

3. **Неразрушающий** контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов и др.; под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 488 с.

УДК 620.17:621.791

С.В. Райков, В.Е. Кормышев, В.Е. Громов, О.А. Кондратова, Е.Н. Никитина
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Технология футеровки поверхностей большеобъемных ковшей экскаваторов*

Описана технология защиты рабочих поверхностей ковша экскаватора объемом 33 м^3 в полевых условиях без снятия ковша при использовании футеровочных пластин из низколегированной стали Hardox 400 с наплавкой бронирующей сетки порошковыми проволоками различного химического состава. Приведены результаты измерения механических и трибологических свойств наплавок. Отмечено, что выявленное более чем двукратное увеличение износостойкости и микротвердости обусловлено формированием субмикро- и наноразмерной структуры кристаллизации α-фазы с выделением большого объема высокопрочных частиц карбидных и боридных фаз.

Ключевые слова: *наплавка, износостойкость, ковш экскаваторов, структура.*

The technology of protection of 33 m^3 volume excavator bucket work surfaces in the field conditions without bucket removal with the armoring net surfaced by the powder wires of different chemical composition on the low alloyed steel Hardox 400 plates is described. The results of mechanical and tribological properties surfaces are presented. It is noted that the fold revealed of wear resistance and microhardness increase is caused by the formation of submicro and nanosize α-phase crystallization structure with the precipitation of large volume of high strength particles of carbides and borides.

Keywords: *surfacing, wear resistance, excavator buckets, structure.*

Большое число деталей машин и механизмов выходит из строя в процессе эксплуатации по причине истирания, ударных нагрузок, эрозии и т. д. Существуют различные методы восстановления и упрочнения деталей для повышения срока их службы [1, 2]. Наиболее перспективным методом упрочнения и восстановления, позволяющими радикально улучшить свойства поверхностей, является наплавка. Кроме того, упрочнение наплавкой экономически эффективно, поскольку ресурс работы деталей преимущественно определяется долговечностью покрытий, нанесенных данными методами, а не механическими свойствами деталей [3, 4].

Рабочие поверхности ковшей экскаваторов объемом свыше 10 м^3 защищают биметаллическими износостойкими пластинами, привариваемыми в заводских условиях. В зависимости от условий эксплуатации срок службы такой футеровки составляет 12...18 мес.

Ввиду того что износ по рабочей поверхности ковша экскаватора происходит неодинаково, а восстановление износившихся биметаллических пластин не представляется возможным, поскольку при тепловом воздействии бронирующий слой выкрашивается, то любое разрушение футеровочного слоя приводит к необходимости остановки эксплуатации экскаватора и проведения капитального ремонта ковша с полной заменой футеровки.

В настоящей статье предложена альтернативная технология защиты рабочих поверхностей ковша экскаватора Harnischfeger P&H-2800 (ковш вместимостью 33 м^3) в полевых условия без снятия ковша с экскаватора при использовании в качестве базовых футеровочных пластин листов стали HARDOX 400 толщиной 25 мм. Химический состав этой стали, % мас.: C — 0,18; Si — 0,7; Mn — 1,6; P — 0,01; N — 0,004; B — 0,025; S — 0,01; Mo — 0,25; Fe — остальное. Твердость стали в состоянии поставки составляет 370 *HB*.

Для дополнительной защиты рабочих поверхностей ковша футеровочные пластины забронированы сет-

* Работа выполнена при поддержке гранта РНФ, проект № 15-19-00065.

кой с ячейками 50×50 мм толщиной до 5...7 мм методом полуавтоматической наплавки порошковой проволокой в среде двухкомпонентных газов (Ar — 98 %, CO_2 — 2 %).

Параметры режима полуавтоматической наплавки бронирующих слоев футеровочных пластин

Диаметр порошковой проволоки, мм 1,2
Напряжение дуги, В ..... 28...30
Скорость подачи порошковой проволоки, м/мин ..... 9...11
Сила сварочного тока, А ..... 260...300
Тип тока, полярность ..... Постоянный, обратная

В качестве наплавочного материала использовали порошковую проволоку различного химического состава (табл. 1).

Мониторинг изнашивания рабочих поверхностей ковшей, подвергнутых альтернативой футеровке с нанесением бронирующей сетки, позволил выявить участки различной интенсивности абразивного воздействия. Наибольшая интенсивность абразивного изнашивания наблюдается на высыпе ковша и начинается с поверхности пяты ковша. К исходу 150 сут. эксплуатации (5...6 месяцев) сетка полностью исчезает. Дальнейшая эксплуатация ковша приводит к износу футеровочных пластин из стали Hardox 400, и они полностью изнашиваются примерно через 6...8 мес. после исчезновения бронирующей сетки. После этого необходим капитальный ремонт с полной заменой футеровочных пластин (период ремонта 8...10 сут).

Для выбора оптимального типа наплавочных материалов провели лабораторные и натурные испытания

Таблица 1

Химический состав наплавочных материалов

Материал	HRC	Содержание элементов*, % мас.						
		C	Si	Mn	P	B	Cr	Nb
Покрытие 1 — EnDOtec DO30	65	0,5	0,4	1,4	0,02	3,7	1	—
Покрытие 2 — EnDOtec DO33	67	2,06	0,65	2,51	0,03	—	13,5	6,4
Покрытие 3 — SK A70-G	68	2,6	0,6	1,7	—	2,2	14,8	4,7
*Fe — остальное								

покрытий, выполненных порошковыми проволоками (покрытие 1 — среднелегированная сталь, покрытие 2 — высоколегированная сталь, покрытие 3 — высокохромистый чугун), составы которых приведены в табл. 1.

Испытания показали, что микротвердость наплавленных покрытий остается неизменной по всей высоте валика (4...5 мм). Среднее значение микротвердости покрытия 1 составляет 700, а покрытий 2 и 3 — 900 HV, что больше микротвердости подложки (сталь Hardox 400) в 2,3 и 3 раза соответственно. При этом износостойкость покрытий также в 2 и более раз выше, чем у подложки.

Результаты механических испытаний обобщены в табл. 2. Видно, что покрытие 3 обладает большей износостойкостью, чем покрытия 1 и 2, однако оно обладает также и большим коэффициентом трения. Приведен-

Таблица 2

Микротвердость, износостойкость, коэффициент трения и времени эксплуатации, полученные при натурных испытаниях в ковше покрытий, наплавленных на сталь Hardox 400

Объект исследования	HRC (указанная в спецификации)	HV	$W \cdot 10^7$, $мм^3/(Н \cdot м)$	$\mu_{ср}$	Время эксплуатации ковша между ремонтами, мес.
Подложка Сталь Hardox 400	40	300	7,8	0,280	4
Покрытие 1 — ПП-EnDOtec DO30	63	700	4,0	0,235	4,5...5,5
Покрытие 2 — ПП-EnDOtec DO33	66	900	3,9	0,140	5...6
Покрытие 3 — ПП-SK A70-G	67	900	3,5	0,293	6

Примечания. 1. Трибологические характеристики определяли на триботестере TRIBOTECHNIC.

2. Фактор износа определяли при перемещении по поверхности образца шарика (ВК8) диаметром 3 мм вдоль окружности диаметром 4 мм с линейной скоростью 2 см/с при нормальной нагрузке 5 Н. Полное число оборотов — 5000.

3. Фактор износа $W = \dfrac{\text{Объем удаленного материала, мм}^3}{\text{Нагрузка, Н} \times \text{Путь трения, м}}$.

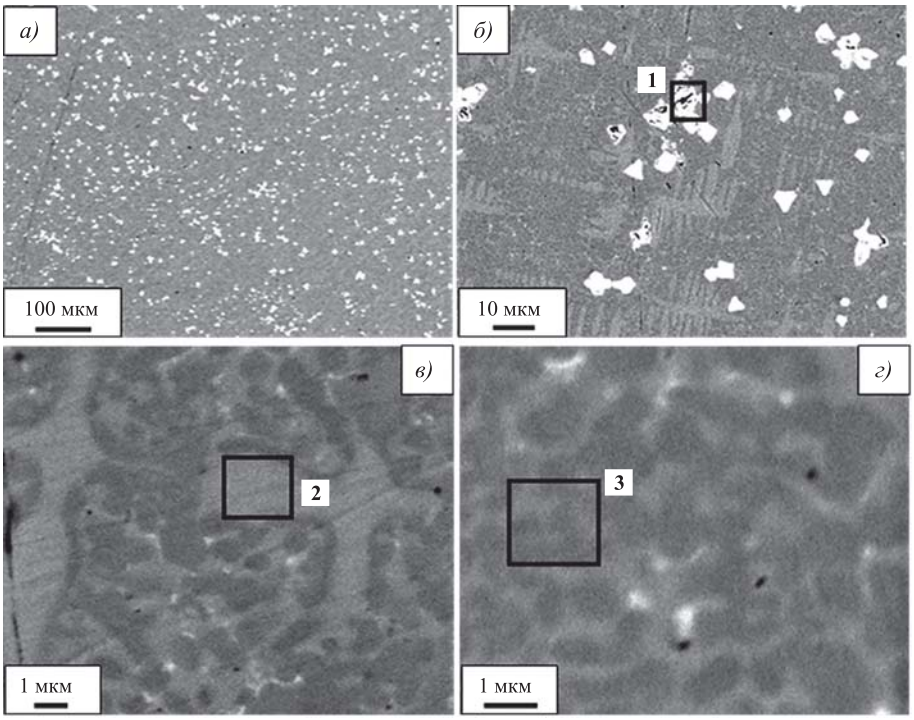


Рис. 1. Результаты рентгеноспектрального микроанализа покрытия 3:
а, *б* — частицы округлой ограненной формы (область 1); *в* — область 2 дендритной кристаллизации; *г* — область 3 ячеистой кристаллизации

ные данные коррелируют с результатами испытаний на долговечность образцов покрытий в условиях эксплуатации.

Особенностью структуры покрытий 2 и 3 является присутствие в них частиц округлой ограненной формы. Исследования химического состава покрытия 3 методом рентгеноспектрального микроанализа приведены на рис. 1 и в табл. 3. Видно, что частицы округлой ограненной формы (область 1) обогащены атомами ниобия. Области дендритной кристаллизации (область 2) обогащены атомами железа и углерода. Области ячеистой кристаллизации, также сформированной преимущественно атомами железа, обогащены атомами углерода и хрома (область 3). Это согласуется с данными электронно-микроскопических исследований, согласно

Таблица 3

Химический состав областей покрытия 3

Область	Легирующие элементы, % мас.						Всего, % мас.
	C	Si	Cr	Mn	Fe	Nb	
1	—	—	6,50	—	7,07	85,42	100
2	3,74	1,40	7,89	1,44	85,53	—	100
3	4,11	0,71	13,07	1,71	80,40	—	100

которым частицы упрочняющих фаз располагаются в промежутках между осями дендритов и в прослойках между ячейками [5].

Выявленное более чем двукратное увеличение износостойкости и микротвердости покрытий по отношению к этим параметрам подложки обусловлено формированием субмикро- и наноразмерной структуры кристаллизации α-фазы и выделением большого объема высокопрочных частиц карбидных и боридных фаз.

Поверхностный слой покрытия 3 (рис. 2) имеет структуру дендритной и ячеистой кристаллизации (рис. 2, *а*, *б*). Размеры ячеек кристаллизации изменяются в пределах от 0,3 до 1,0 мкм; толщина разделяющих их прослоек составляет 50...300 нм. В промежутках между дендритами располагаются включения частиц второй фазы округлой ограненной формы. Их размеры изменяются от 1 до 5 мкм. Промежуточный слой имеет структуру островкового типа. Островки размерами 5...10 мкм разделены протяженными прослойками, имеющими сложную субструктуру. Размеры ее элементов изменяются в пределах 300...600 нм (рис. 2, *в*). Переходный слой характеризуется дендритной структурой. Она формируется от границы раздела с подложкой (рис. 2, *г*).

Объем наплавки характеризуется наличием микропор, макро- и микротрещин, что указывает на упругонапряженное состояние материала. Источниками тре-

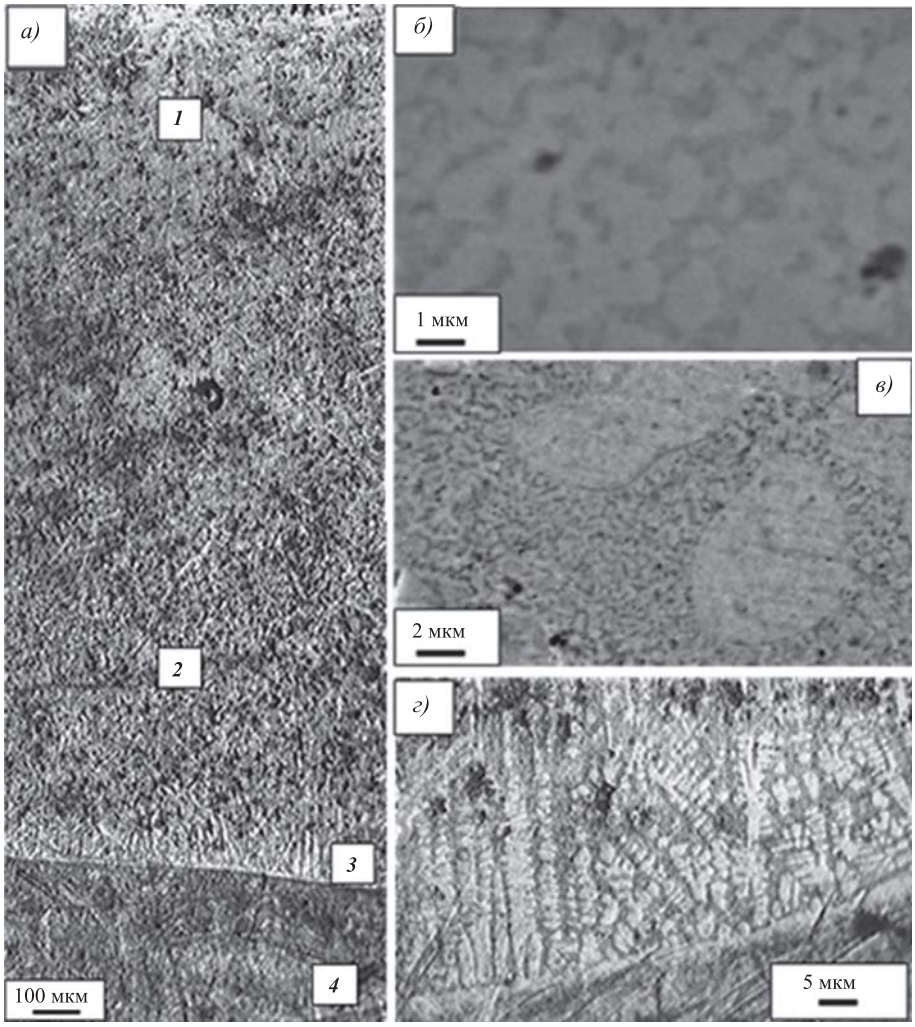


Рис. 2. Особенности слоистой структуры покрытия 3:
а — строение покрытия по глубине (*1* — поверхностный слой; *2* — промежуточный слой; *3* — переходный слой; *4* — подложка); *б* — поверхностный слой 1; *в* — промежуточный слой 2; *г* — переходный слой 3; *а*, *г* — оптическая микроскопия; *б*, *в* — СЭМ. Поперечный шлиф

щин являются крупные включения частиц вторых фаз и дендриты кристаллизации. Наплавка является многофазным материалом и представлена зернами твердого раствора на основе α-железа, субмикро- и наноразмерными частицами карбидов железа Fe_3C, ниобия NbC и хрома Cr_3C_2, Cr_7C_3, боридов железа FeB, Fe_3B, боросилицида железа $(FeSi)_3B$ и карбоборида хрома (Cr_7BC_4). Их суммарная объемная доля достигает 40 %.

Применение рассмотренной технологии футеровки рабочих поверхностей ковшей экскаватора Harnischfeger P&H-2800 объемом 33 м^3 позволило снизить затраты, связанные с капитальным ремонтом ковша, с 5 млн руб. при сроке эксплуатации заводской футеровки 12...18 мес. до 4,3 млн руб. при сроке эксплуатации 21 мес. При этом время межремонтного простоя снизилось на 6 сут.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Патон Б.Е.** Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций // Автомат. сварка. 2005. № 10. С. 7—13.

2. **Инструментальные** материалы / Г.А. Воробьева и др. СПб.: Политехника, 2005. 268 с.

3. **Молодых Н.В., Зенкин А.С.** Восстановление деталей машин. М.: Машиностроение, 1989. 480 с.

4. **Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А.** Плазменные технологии: руководство для инженеров. СПб.: Изд-во СПбПУ, 2008. 406 с.

5. **Структура** и свойства композиционных износостойких наплавок на сталь / Е.В. Капралов, Е.А. Будовских, В.Е. Громов и др. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. 116 с.

Министерство образования и науки РФ
Ассоциация технологов-машиностроителей
Международный союз машиностроителей
Российская академия наук
Волгоградский государственный технический университет

IX Международная научно-техническая конференция

"Инновационные технологии в машиностроении: от проектирования к производству конкурентоспособной продукции (ТМ-2017)"

Волгоград 19—22 сентября 2017 г.

Тематические секции конференции:
1. Проектирование изделий машиностроения
2. Технологии заготовительного производства
3. Технологии механической обработки деталей машин
4. Аддитивные технологии
5. Технологии электро-физико-химических и комбинированных методов обработки
6. Технологии абразивной обработки и производства абразивного инструмента
7. Автоматизированные технологии контроля и сборки машин; управление качеством изделий машиностроения

Сроки предоставления, правила оформления материалов, финансовые условия участия и порядок платежей для участников будут опубликованы на сайте Волгоградского государственного технического университета **http://www.vstu.ru**

Адреса для контактов:
Ученый секретарь конференции
д-р. техн. наук
Чигиринский Юлий Львович
E-mail: Julio-Tchigirmsky@yandex.ru
тел.: + 7-844-224-84-30; + 7-902-360-41-99

Организационный комитет ВолгГТУ
Волгоградский государственный технический университет
кафедра "Технология машиностроения"
Россия, 400005, Волгоград,
просп. им. Ленина, 28
E-mail: techmash@vstu.ru; тема: "ТМ-2017"
тел.: +7-844-224-84-38

ООО "Издательство **"Инновационное машиностроение"**, 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2.
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".
E-mail: utp@mashin.ru.
Web-site: www.mashin.ru.
Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96.
Технический редактор *Конова Е.В.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 29.03.2017 г. Подписано в печать 16.05.17 г. Формат 60×88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Отпечатано в ООО "Канцлер", 15008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49
Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1
Сайт: **www.aov.ru**