

# УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 15  
2019  
№ 12 (180)  
декабрь

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.  
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.  
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.В. СЛЕПЦОВ, 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:**

О.С. ЛУКАШЕНКО  
А.В. ОРЛОВА  
Е.А. СЕРИКОВА

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" 39269) или в издательстве.  
Тел.: (499) 269-52-98,  
268-47-19.  
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



### МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

- Безъязычный В.Ф., Фоменко Р.Н.** Расчетное определение остаточных напряжений в поверхностном слое детали от теплового воздействия при механической обработке с учетом упрочнения обрабатываемого материала ..... 531
- Лебедев В.А., Санамян Г.В., Белозёров М.А., Эль Дакдуки Ахмад.** Технологическое обеспечение и оценка качества коленчатых валов, упрочненных виброударным методом ..... 536
- Толкачев А.В., Волков Д.И.** Параметры процесса дробеструйного упрочнения, определяющие результат обработки и требующие обязательного контроля ..... 542



### ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

- Чекалова Е.А., Журавлев А.В.** Дискретное окисдирование сложнопрофильного инструмента из быстрорежущих сталей ..... 546



### ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

- Сариллов М.Ю., Решетник У.Е.** Исследование процессов в межэлектродном промежутке при электроэрозионной обработке алюминиевых и титановых сплавов ..... 550



### ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

- Сокольников В.Н., Сухочев Г.А., Усов С.В., Точилин И.П.** Исследование поверхностного слоя детали после комбинированного механоэлектрохимического процесса упрочнения ..... 555



### КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

- Романов И.О., Перваков Д.Г.** Формирование системы оценки качества и надежности упрочняющих материалов и технологий ..... 561



### УПРОЧНЯЮЩИЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ

- Белоцерковский М.А., Яловик А.П., Жорник В.И., Кукареко В.А.** Разработка технологии восстановления штоков гидроцилиндров гиперзвуковой электрометаллизацией с последующим трибомодифицированием ..... 565



### ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ

- Митрофанова К.С.** Исследование патентной активности в области технологий отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием ..... 572

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 по группам научных специальностей: 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки; 05.02.08 – Технология машиностроения; 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины; 05.05.06 – Горные машины; 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; 05.16.05 – Обработка металлов давлением; 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы, в базу данных Chemical Abstracts, в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science

# STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

Vol. 15  
2019  
№ 12 (180)  
December

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  
V.P. BALKOV  
V.M. BASHKOV  
A.I. BELIKOV  
A.I. BOLDYREV  
S.N. GRIGORIEV  
V.E. GROMOV  
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. RAKHIMYANOV  
B.P. SAUSHKIN  
V.V. SLEPTSOV  
V.P. SMOLENTSEV  
A.M. SMYSLOV  
G.A. SUKHOCHEV  
V.P. TABAKOV  
V.A. SHULOV  
M.L. KHEIFETS

**Edition:**

O.S. LUKASHENKO  
A.V. ORLOVA  
E.A. SERIKOVA

## CONTENTS

➔	<b>MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING</b>	
	<b>Bez'yazychny V.F., Fomenko R.N.</b> Designed determination of residual stresses in surface layer of part from thermal effect during machining taking into account hardening of processed material .....	531
	<b>Lebedev V.A., Sanamyan G.V., Belozero M.A., El Dakduki Ahmad.</b> Technological quality maintenance and qualification of crankshafts hardened by shock-vibrating technology .....	536
	<b>Tolkachev A.V., Volkov D.I.</b> Parameters of shot peening process, determining processing effect and require mandatory control .....	542
➔	<b>PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY</b>	
	<b>Chekalova E.A., Zhuravlev A.V.</b> Discrete oxidation of complex profile tool from high-speed steels .....	546
➔	<b>CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING</b>	
	<b>Sarilov M.Yu., Reshetnik U.E.</b> Study of processes in interelectrode gap during electric discharge machining of aluminum and titanium alloys .....	550
➔	<b>PROCESSING BY COMBINED METHODS</b>	
	<b>Sokol'nikov V.N., Sukhochev G.A., Usov S.V., Tochilin I.P.</b> Study of surface layer of part after combined mechanical and electrochemical hardening .....	555
➔	<b>QUALITY CONTROL OF STRENGTHENING PROCESSING</b>	
	<b>Romanov I.O., Pervakov D.G.</b> Formation of system for assessment of quality and reliability of strengthening materials and technologies .....	561
➔	<b>STRENGTHENING NANOTECHNOLOGY</b>	
	<b>Belotserkovsky M.A., Yalovik A.P., Zhornik V.I., Kukareko V.A.</b> Development of technology for restoration of hydraulic cylinder rods by hypersonic electrometallization with followed tribomodification .....	565
➔	<b>INFORMATION. PRODUCTION EXPERIENCE</b>	
	<b>Mitrofanova K.S.</b> Study of patent activity in field of finishing and strengthening treatment technologies by surface plastic deformation .....	572

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 according to groups of science specialty: 05.02.07 – Technology and equipment of mechanical and physical-technique processing; 05.02.08 – Mechanical-engineering technology; 05.05.03 – Wheeled and crawler machines; 05.05.06 – Mining machines; 05.16.01 – Metal science and heat treatment of metals and alloys; 05.16.05 – Metal pressure treatment; 05.16.06 – Powder metallurgy and composite materials,  
Chemical Abstracts database, Russian Science Citation Index on Web of Science platform

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

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



УДК 621.9.01

В.Ф. Безъязычный, Р.Н. Фоменко

(Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева)

E-mail: technology@rsatu.ru

## Расчетное определение остаточных напряжений в поверхностном слое детали от теплового воздействия при механической обработке с учетом упрочнения обрабатываемого материала

Приведена методика расчетного определения технологических остаточных напряжений в поверхностном слое материала обрабатываемой детали, обусловленных технологическими условиями обработки с учетом упрочнения обрабатываемого материала при охлаждении.

**Ключевые слова:** поверхностный слой детали, обработка лезвийным инструментом, упрочнение, остаточные напряжения.

The calculating technique of the technological residual stresses in the surface layer of the material of the workpiece due to the technological conditions of processing taking into account the hardening of the processed material during cooling is presented.

**Keywords:** part surface layer, blade tool processing, hardening, residual stresses.

При изучении процесса обработки деталей лезвийным инструментом необходимо учитывать возникающие в зоне обработки тепловые явления. В поверхностном слое детали, подвергаемой механической обработке, при охлаждении возникают пластические деформации, и он упрочняется. Известные расчетные методики определения остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое детали, обработанной точением, не учитывают упрочнение материала от воздействия теплового фактора. Учет упрочнения материала

обрабатываемой детали точением позволит повысить точность расчетов остаточных напряжений.

За пределом текучести любая деформация состоит из двух частей: пластической (она же остаточная), которая сохраняется в теле после снятия нагрузки, и упругой, которая исчезает при разгрузке. Расчетное определение остаточных напряжений с учетом упрочнения материала от действия теплового фактора при токарной обработке в данной работе произведено с использованием зависимостей, представленных в интегральном виде [1].

### При нагревании:

— осевые напряжения в поверхностном слое детали (область упругих деформаций):

$$\sigma_{o.n}^y = \left[ -\delta + \frac{\int_{r_b}^{r_{o.n}} \delta E r dr + \int_{r_{o.n}}^{r_H} D \delta r dr - \int_{r_{o.n}}^{r_H} \sigma_T \left(1 - \frac{D}{E}\right) r dr}{\int_{r_b}^{r_{o.n}} E r dr + \int_{r_{o.n}}^{r_H} D r dr} \right] \frac{E}{1 - \mu};$$

— осевые напряжения в поверхностном слое (область пластических деформаций):

$$\sigma_{o.n}^n = -\sigma_T \left(1 - \frac{D}{E}\right) + \left[ -\delta + \frac{\int_{r_b}^{r_{o.n}} \delta E r dr + \int_{r_{o.n}}^{r_H} D \delta r dr - \int_{r_{o.n}}^{r_H} \sigma_T \left(1 - \frac{D}{E}\right) r dr}{\int_{r_b}^{r_{o.n}} E r dr + \int_{r_{o.n}}^{r_H} D r dr} \right] \frac{1}{1 - \mu};$$

— тангенциальные напряжения (область упругих деформаций):

$$\sigma_{\tau H}^y = \left[ -\delta + \frac{\int_{r_b}^{r_{\tau H}} \delta E dr + \int_{r_{\tau H}}^{r_H} D \delta dr - \int_{r_{\tau H}}^{r_H} \sigma_T \left(1 - \frac{D}{E}\right) dr}{\int_{r_b}^{r_{\tau H}} E dr + \int_{r_{\tau H}}^{r_H} D dr} \right] \frac{E}{1 - \mu};$$

— тангенциальные напряжения (область пластических деформаций):

$$\sigma_{\tau H}^n = -\sigma_T \left(1 - \frac{D}{E}\right) + \left[ -\delta + \frac{\int_{r_b}^{r_{\tau H}} E dr + \int_{r_{\tau H}}^{r_H} D \delta dr - \int_{r_{\tau H}}^{r_H} \sigma_T \left(1 - \frac{D}{E}\right) dr}{\int_{r_b}^{r_{\tau H}} E dr + \int_{r_{\tau H}}^{r_H} D dr} \right] \frac{1}{1 - \mu},$$

где  $D$  — модуль упрочнения материала обрабатываемой детали, МПа;

$E$  — модуль упругости материала обрабатываемой детали, МПа;

$r_b$  — радиус отверстия в детали, м;

$r_H$  — наружный радиус детали, м;

$r_{o,H}$  — граница раздела пластических и упругих деформаций в осевом направлении, м;

$r$  — рассматриваемый радиус детали, в котором определяются напряжения, м;

$r_{\tau H}$  — граница раздела пластических и упругих деформаций в тангенциальном направлении, м;

$\sigma_T$  — предел текучести материала детали, Па;

$\mu$  — коэффициент Пуассона материала детали;

$\delta = \alpha_1 \cdot \theta$  — относительное температурное линейное расширение материала детали;

$\theta$  — температура в рассматриваемом слое обрабатываемой детали, °С;

$\alpha_1$  — коэффициент температурного линейного расширения обрабатываемого материала, °С<sup>-1</sup>.

Значение модуля упрочнения обрабатываемого материала следует определять экспериментально и считать его постоянной характеристикой. При этом следует иметь в виду, что для одного и того же материала в зависимости от его термической обработки модуль упрочнения может быть различным (табл. 1) [2].

Если по каким-либо причинам невозможно определить модуль упрочнения, то на этапе конструкторско-технологической подготовки производства можно определить ориентировочное зна-

Таблица 1

Данные по линеаризованной диаграмме деформирования конструкционных сталей и сплавов [2]

Материал, режим обработки	$\sigma_b$ , МПа	$\frac{D}{E}$	$\sigma_T$ , МПа	$E$ , 10 <sup>5</sup> , МПа
Сталь 40Х, отжиг	700	0,069	400	2,05
Сталь 40Х, закалка, отпуск 600 °С	1000	0,028	780	2,10
Сталь 40Х, закалка, отпуск 500 °С	1200	0,022	1100	2,08
Сталь 40ХНМ, закалка, отпуск 560 °С	1100	0,0285	940	2,00
Сталь 30ХГС, закалка, отпуск 600 °С	1000	0,018	800	2,05
Сталь 30ХГС, закалка, отпуск 500 °С	1200	0,035	1040	2,05
Сталь 18ХНВ, закалка, отпуск 525 °С	1150	0,0545	770	1,95
Сталь 12Х2МФ8ФБ (ЭИ503)	1050	0,104	600	2,00
Сталь 12Х18Н9Т, закалка 1050 °С	600	0,117	188	1,88
Сталь 1Х14Н14В2МТ (ЭИ257), закалка, отпуск 650 °С	300	0,131	160	1,70
Сплав В95, закалка, искусственное старение	650	0,0285	550	0,72
Сплав В95Т, закалка, искусственное старение	600	0,0353	460	0,70
Сплав Д16, закалка, естественное старение	500	0,0625	300	0,75
Сплав Д16Т, закалка, естественное старение	500	0,0445	340	0,72
Сплав АК4, закалка, искусственное старение	400	0,126	200	0,72
Сплав ВТ1, отжиг 700 °С	600	0,079	330	1,17

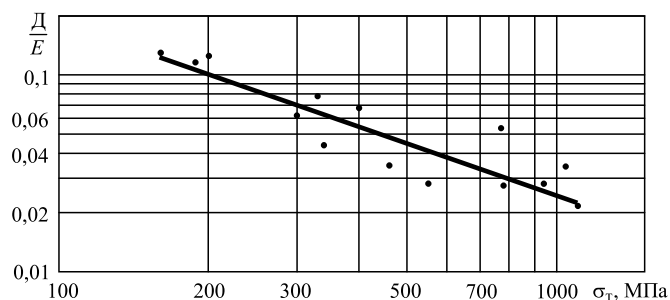


Рис. 1. Зависимость модуля упрочнения материала поверхностного слоя от предела текучести материала детали

чение модуля упрочнения по формуле (1), полученной на основе табл. 1 и рис. 1,

$$\frac{D}{E} = 10,8\sigma_T^{0,88}. \quad (1)$$

Однако следует иметь в виду, что модуль упрочнения материала зависит также от температуры материала  $\theta$  (табл. 2 и формула (2)) [2]. Поэтому для большей точности расчетов следует определять значение  $D$  при температуре в зоне резания по формуле

$$\frac{D}{E} = C\theta^x. \quad (2)$$

Таблица 2

Параметры линейного упрочнения при повышенной температуре [2]

Материал, режим обработки	Температура, °С	Основные механические характеристики				Линейное упрочнение
		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$E$ , $10^5$ , МПа	$\delta$ , %	$\frac{D}{E}$
Сталь 30ХГСА, закалка, отпуск 510 °С	20	1300	1040	2,00	8	0,0350
	300	1210	572	1,83	11	0,1936
	400	1060	530	1,65	9	0,1870
	500	780	100	1,35	11	0,6670
Сталь 40ХН2МА, закалка, отпуск 560 °С	20	1110	940	2,00	10	0,0285
	300	1010	559	1,83	15	0,0268
	400	930	526	1,68	12	0,1050
	500	690	365	1,48	12	0,0857
Сталь 18Х2Н4МА (18ХНВА), закалка 525 °С	20	1150	770	1,94	9	0,0545
	300	1130	552	1,86	9	0,1406
	400	1050	480	1,76	8	0,0540
	500	900	352	1,42	8	0,3254
Сталь 30ХГСНА, изотермическая закалка 330 °С	20	1600	720	1,95	8	0,224
	300	1500	359	1,80	11	0,426
	400	1330	346	1,68	7	0,402
	500	850	188	1,35	9	0,538
Сталь 12Х18Н9Т, закалка 1050 °С в воде	20	620	188	1,88	49	0,117
	300	460	109	1,65	33	0,154
	350	460	80	1,56	32	0,208
	400	450	88	1,49	32	0,194
Сталь 15Х18Н12С4ТЮ (ЭИ654), закалка 950 °С	20	800	220	1,80	33	0,327
	300	640	190	1,70	28	0,195
	400	620	160	1,60	26	0,157
Сталь 1Х14Н18В2Б (ЭИ659)	20	1300	520	1,94	11	0,226
	300	1270	510	1,86	8	0,248
	400	1210	488	1,73	10	0,252
	500	1060	359	1,68	7	0,348
Сплав Д16Т, закалка, естественное старение	20	530	340	0,72	9,5	0,0445
	200	410	241	0,61	11	0,0784
	250	260	149	0,59	10	0,1550
	300	170	69	0,52	10	0,2270
Сплав ВТ1, отжиг	20	600	330	1,17	15,8	0,0790
	250	300	119	0,96	24,4	0,1860
	350	240	89	0,91	20,0	0,2949
	450	200	58	0,80	13,0	0,3960

Таблица 3

Значения  $C$  и  $x$  в формуле (2)

Материал, режим обработки	$C$	$x$
Сталь 30ХГСА, закалка, отпуск	0,006	0,590
Сталь 40ХН2МА, закалка, отпуск	0,009	0,382
Сталь 18Х2Н4МА, закалка	0,012	0,487
Сталь 30ХГСНА, изотермическая закалка	0,108	0,240
Сталь 12Х18Н9Т, закалка	0,071	0,163
Сталь 1Х14Н182Б	0,173	0,081
Алюминиевый сплав Д16Т, закалка, естественное старение	0,009	0,495
Титановый сплав ВТ1, отжиг	0,018	0,470

Значения  $C$  и  $x$  для конкретных материалов приведены в табл. 3.

Расчеты по приведенным выше зависимостям позволяют повысить точность определения напряжений, обусловленных тепловым воздействием на поверхностный слой детали, из-за учета упрочнения обрабатываемого материала.

**Напряжения при охлаждении** определяются по формулам, аналогичным представленным выше, только границы  $r_{o,n}$  и  $r_{тн}$  заменяются на  $r_{o,o}$  и  $r_{то}$  соответственно. Кроме того, значение напряжения принимается с отрицательным знаком:

— осевые напряжения при охлаждении (область упругих деформаций):

$$\sigma_{o,o}^y = - \left[ -\delta + \frac{\int_{r_b}^{r_{o,o}} \delta E r dr + \int_{r_{o,o}}^{r_H} D \delta r dr - \int_{r_{o,o}}^{r_H} \sigma_T \left(1 - \frac{D}{E}\right) r dr}{\int_{r_b}^{r_{o,o}} E r dr + \int_{r_{o,o}}^{r_H} D r dr} \right] \frac{E}{1 - \mu};$$

— осевые напряжения при охлаждении (область пластических деформаций):

$$\sigma_{o,o}^n = \sigma_T \left(1 - \frac{D}{E}\right) - \left\{ -\sigma_T \left(1 - \frac{D}{E}\right) + D \left[ -\delta + \frac{\int_{r_b}^{r_{o,o}} \delta E r dr + \int_{r_{o,o}}^{r_H} D \delta r dr - \int_{r_{o,o}}^{r_H} \sigma_T \left(1 - \frac{D}{E}\right) r dr}{\int_{r_b}^{r_{o,o}} E r dr + \int_{r_{o,o}}^{r_H} D r dr} \right] \frac{1}{1 - \mu} \right\};$$

— тангенциальные напряжения при охлаждении (область упругих деформаций):

$$\sigma_{то}^y = - \left[ -\delta + \frac{\int_{r_b}^{r_{то}} \delta E dr + \int_{r_{то}}^{r_H} D \delta dr - \int_{r_{то}}^{r_H} \sigma_T \left(1 - \frac{D}{E}\right) dr}{\int_{r_b}^{r_{то}} E dr + \int_{r_{то}}^{r_H} D dr} \right] \frac{E}{1 - \mu};$$

— тангенциальные напряжения при охлаждении (область пластических деформаций):

$$\sigma_{то}^n = \sigma_T \left(1 - \frac{D}{E}\right) - \left\{ -\sigma_T \left(1 - \frac{D}{E}\right) + D \left[ -\delta + \frac{\int_{r_b}^{r_{то}} E dr + \int_{r_{то}}^{r_H} D \delta dr - \int_{r_{то}}^{r_H} \sigma_T \left(1 - \frac{D}{E}\right) dr}{\int_{r_b}^{r_{то}} E dr + \int_{r_{то}}^{r_H} D dr} \right] \frac{1}{1 - \mu} \right\}.$$

При обработке цилиндрических деталей возможны схемы, объясняющие механизм образования остаточных напряжений, приведенные на рис. 2:

рис. 2, *a* — напряжения при нагревании достигают предела текучести, но ниже предела прочности, напряжения при охлаждении ниже предела текучести;

рис. 2, *b* — напряжения при нагревании достигают предела прочности, при охлаждении меньше предела текучести;

рис. 2, *в* — напряжения при нагревании достигают предела прочности, при охлаждении превосходят предел текучести, но ниже предела прочности;

рис. 2, *г* — напряжения при нагревании и охлаждении достигают предела прочности.

Осевые остаточные напряжения в поверхностном слое детали от воздействия теплового фактора при принятии линейного закона упрочнения материала определяются зависимостями:

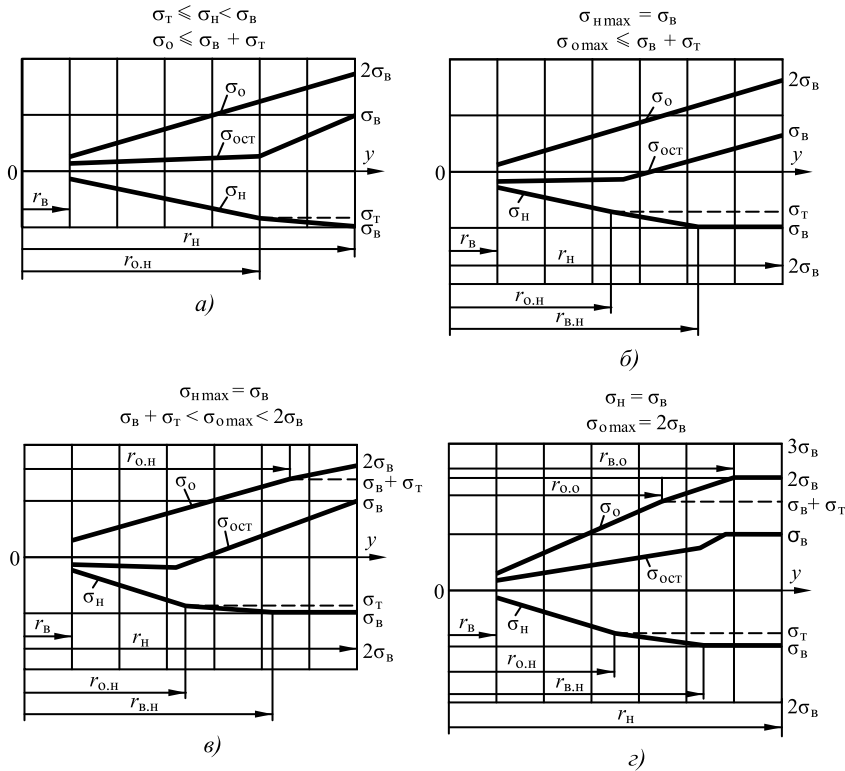


Рис. 2. Схемы, объясняющие механизм образования температурных остаточных напряжений при учете упрочнения обрабатываемого материала

- при  $\sigma_T \leq \sigma_H < \sigma_B$ ;  $\sigma_0 \leq \sigma_B + \sigma_T$ 

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ост.о} &= \sigma_{о.н}^y + \sigma_T && \text{при } r < r_{о.н} \\ \sigma_{ост.о} &= \sigma_{о.н}^n + \sigma_T && \text{при } r \geq r_{о.н} \end{aligned} \right\};$$
- при  $\sigma_{H \max} = \sigma_B$ ;  $\sigma_{о \max} \leq \sigma_B + \sigma_T$ 

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ост.о} &= -\sigma_B + \sigma_T && \text{при } r \geq r_{в.н} \\ \sigma_{ост.о} &= \sigma_{о.н}^n + \sigma_T && \text{при } r_{о.н} \leq r < r_{в.н} \\ \sigma_{ост.о} &= \sigma_{о.н}^y + \sigma_T && \text{при } r < r_{о.н} \end{aligned} \right\};$$
- при  $\sigma_{H \max} = \sigma_B$ ;  $\sigma_B + \sigma_T \leq \sigma_{о \max} < 2\sigma_B$ 

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ост.о} &= -\sigma_B + \sigma_{о.о}^n && \text{при } r \geq r_{о.о} \\ \sigma_{ост.о} &= -\sigma_B + \sigma_{о.о}^y && \text{при } r_{в.н} \leq r < r_{о.о} \\ \sigma_{ост.о} &= \sigma_{о.н}^n + \sigma_{о.о}^y && \text{при } r_{о.н} \leq r < r_{в.н} \\ \sigma_{ост.о} &= \sigma_{о.н}^y + \sigma_{о.о}^y && \text{при } r < r_{о.н} \end{aligned} \right\};$$
- при  $\sigma_H = \sigma_B$ ;  $\sigma_{о \max} = 2\sigma_B$ 

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ост.о} &= \sigma_B && \text{при } r \geq r_{в.о} \\ \sigma_{ост.о} &= -\sigma_B + \sigma_{о.о}^n && \text{при } r_{в.о} > r \geq r_{в.н} \\ \sigma_{ост.о} &= \sigma_{о.н}^y + \sigma_{о.о}^y && \text{при } r_{в.н} > r \geq r_{о.н} \\ \sigma_{ост.о} &= \sigma_{о.н}^n + \sigma_{о.о}^y && \text{при } r_{о.о} > r \geq r_{о.н} \\ \sigma_{ост.о} &= \sigma_{о.н}^y + \sigma_{о.о}^y && \text{при } r < r_{о.н} \end{aligned} \right\}.$$

Расчет тангенциальных остаточных напряжений в поверхностном слое детали от воздействия теплового фактора производится таким же образом.

Особенность приведенной выше методики для расчета тепловых остаточных напряжений в поверхностном слое детали заключается в возможности учета упрочнения обрабатываемого материала в процессе токарной обработки.

В формулах для определения остаточных напряжений  $r_{о.н}$ ,  $r_{в.н}$ ,  $r_{о.о}$  и  $r_{в.о}$  — радиусы слоев материала детали, в которых значения упругих и пластических деформаций равны (см. рис. 2). В области упругих деформаций граница раздела пластических и упругих деформаций при нагревании  $r_{о.н}$  определяется из условия равенства осевых напряжений пределу текучести. В области пластических деформаций граница раздела деформации разрушения и пластических деформаций при нагревании  $r_{в.н}$  определяется из условия равенства осевых напряжений пределу прочности. Из-за возможности возникновения вторичных пластических деформаций граница раздела пластических и упругих де-

формаций при охлаждении  $r_{о.о}$  определяется из условия равенства осевых напряжений в области при охлаждении удвоенному пределу текучести. В области пластических деформаций граница раздела пластических деформаций и деформаций разрушения при охлаждении  $r_{в.о}$  определяется из условия равенства осевых напряжений удвоенному пределу прочности. При расчете тангенциальных остаточных напряжений границы раздела определяются таким же образом [1].

Суммарные остаточные напряжения в поверхностном слое детали после механической обработки определяли по методике, изложенной в работе [1]. Были выполнены расчеты остаточных напряжений в поверхностном слое детали из жаропрочного сплава ЭИ437 (ХН77ТЮР) при следующих условиях обработки: скорость резания  $v = 36$  м/мин; подача  $S = 0,1$  мм/об; глубина резания  $t = 1$  мм резцом из сплава ВК8 с геометрией режущей части:  $\alpha = 12^\circ$ ,  $\gamma = 10^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 15^\circ$ ,  $r = 1$  мм.

Сопоставление результатов расчета представлено на рис. 3 [3]. Рассматривали два варианта расчета — с учетом упрочнения обрабатываемого материала от теплового воздействия и без его учета. В результате учета упрочнения материала от действия теплового фактора происходит коррекция их значений. Остаточные напряжения

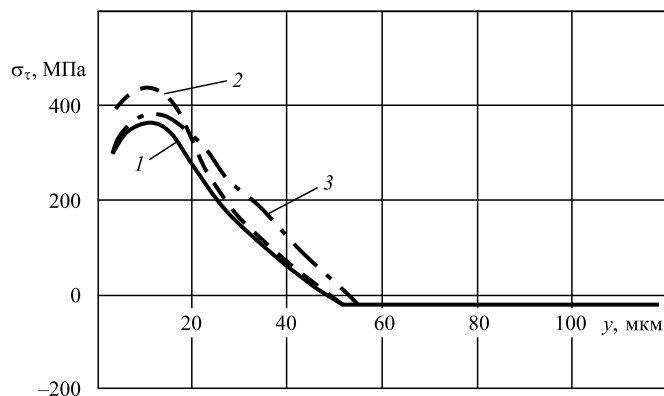


Рис. 3. Эпюры остаточных напряжений, определенных с учетом упрочнения обрабатываемого материала (1) и без упрочнения (2) в сравнении с экспериментальными данными (3) [3]

становятся меньше на 15 % при глубине от 0 до 20 мкм. На рис. 3 представлены также значения остаточных напряжений, определенных экспериментально.

Результаты расчетов показали большую корреляцию с экспериментальными данными значений, полученных при моделировании токарной обработки с учетом упрочнения материала поверхностного слоя детали, по сравнению с вариантом, не учитывающим упрочнение, что подтверждает целесообразность учета при выполнении расчетов остаточных напряжений упрочнения материала от действия теплового воздействия на поверхностный слой детали.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2012. 320 с.
2. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1968. 400 с.
3. Учет упрочнения материала поверхностного слоя детали, обрабатываемой точением, при расчете остаточных напряжений, обусловленных тепловым фактором / В.Ф. Безъязычный, А.С. Матвеев, А.Н. Семёнов, М.В. Басков // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Том 13. № 2. С. 51–53.

УДК 621

<sup>1</sup>В.А. Лебедев, <sup>2</sup>Г.В. Санамян, <sup>1</sup>М.А. Белозёров, <sup>1</sup>Эль Дакдуки Ахмад  
(<sup>1</sup>Донской государственный технический университет,  
<sup>2</sup>Ростовский государственный университет путей сообщения)  
E-mail: va.lebidev@yandex.ru

## Технологическое обеспечение и оценка качества коленчатых валов, упрочненных виброударным методом

Предложены технологические схемы виброударной обработки коленчатых валов, обеспечивающие эффективное упрочнение поверхностного слоя коренных и шатунных шеек, а также стабилизацию напряженного состояния вала. Установлена аналитическая модель, позволяющая оценить влияние виброударного упрочнения на коробление коленчатых валов. Представлены результаты экспериментальных исследований напряженного состояния поверхностных слоев шатунных и коренных шеек.

**Ключевые слова:** коленчатый вал, виброударная обработка, упрочнение, качество поверхностного слоя, коробление.

*Technological schemes of shock-vibrating treatment of crankshafts, which ensure the effective hardening of the surface layer of the main journals and crank pins, as well as the stabilization of the stressed state of the shaft are proposed. Analytical model which makes it possible to evaluate the effect of shock-vibrating hardening on the distortion of crankshafts is established. The results of experimental studies of the stressed state of the surface layers of the crank pins and main journals are presented.*

**Keywords:** crankshaft, shock-vibrating treatment, hardening, surface layer quality, distortion.

### Введение

Один из эффективных методов повышения эксплуатационных свойств коленчатых валов — виброударная упрочняющая обработка. Примене-

ние операций обработки коленчатых валов методами поверхностно-пластического деформирования (ППД) позволяет решить ряд задач: упрочнение поверхности детали при условии получения минимальной шероховатости или заданного микро-



рельефа; упрочнение детали с обеспечением максимального приращения предела выносливости, износостойкости и других эксплуатационных свойств.

Виброударная обработка (ВиУО) — это обработка рабочими телами деталей в замкнутом объеме при их вибрации. Виброударное упрочнение — универсальный метод упрочняющей обработки. Наиболее наглядно его преимущества проявляются при обработке деталей сложной формы, а также при упрочнении крупной партии деталей небольших размеров. Экспериментально установлено [1], что применение именно виброударной обработки позволяет достичь равномерного упрочнения поверхностного слоя всех элементов детали, отделки и скругления острых кромок, плавности переходов, исключения поводки нежестких валов, имеющей место при избирательной обработке обкатыванием галтелей крупногабаритных деталей.

### Технологическая схема виброударной обработки коленчатых валов

Технологическая схема ВиУО коленчатых валов, должна обеспечивать эффективное упрочнение поверхностного слоя коренных и шатунных шеек, а также стабилизацию напряженного состояния вала. Эффективность виброобработки зависит от правильного выбора и обоснования конструктивных параметров рабочих органов вибростанка, вида загрузки и установки коленчатого вала в процессе обработки.

Основополагающие принципы ВиУО деталей следующие.

1. Схема установки должна обеспечивать доступ частиц рабочей среды ко всем поверхностям, требующим обработки.

2. Обрабатываемые поверхности детали не должны находиться в течение всего цикла обработки стационарно в разных по интенсивности обработки зонах рабочей камеры, а иметь возможность перемещаться из одной зоны в другую для равномерности обработки. Исследованиями [1–3] определены зоны различной интенсивности динамического воздействия среды на деталь (рис. 1).

3. Условия обработки должны обеспечивать возникновение и поддержание устойчивого движения рабочей среды в камере. Это одна из основных задач, возникающих при проектировании технологических процессов виброобработки. На основе большого числа экспериментальных исследований авторами работы [3] установлены следующие безразмерные параметры подобия, определяющие и обеспечивающие установившееся

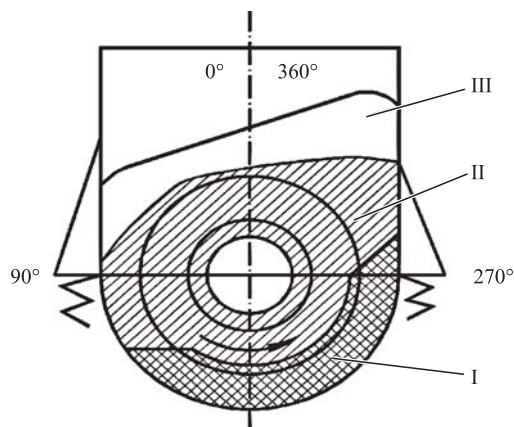


Рис. 1. Зоны динамического воздействия среды в рабочей камере [1]:

I — максимального; II — среднего; III — минимального

циркуляционное движение обрабатываемых сред в вибрационных технологических системах:

$H/d$  — параметр, характеризующий потери энергии при движении потока среды вдоль камеры;

$H/L$  — параметр, характеризующий круговое движение обрабатываемой среды;

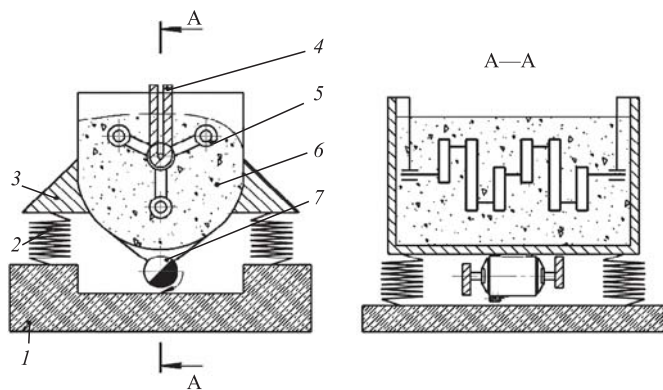
$(A_y \omega)^2 / gH$  — параметр, характеризующий отношение инерции и тяготения, известный в гидродинамике как число Фруда.

Здесь  $H$  — высота рабочей камеры;  $L$  — длина рабочей камеры;  $d$  — диаметр частиц обрабатываемой среды;  $A_y$  — амплитуда колебаний;  $\omega$  — частота колебаний.

Данные параметры позволяют с учетом вида рабочих сред дать качественную характеристику процессу виброобработки в зависимости от технологического назначения, а также оптимизировать компоновку рабочих камер вибростанков.

4. Существует оптимальная масса загрузки рабочей камеры рабочей средой, при которой обеспечивается ее эффективное циркуляционное движение, превышение которой при постоянных параметрах вибрации приводит к снижению скорости потока. Согласно работам [2, 3], с уменьшением размера частиц коэффициент трения увеличивается и скорость циркуляции при постоянной массе загрузки и параметрах вибрации возрастает.

5. Так как технологическая виброударная система помимо сосредоточенных колеблющихся масс содержит обрабатываемую среду, состоящую из отдельных частиц, лишенных кинематической связи между собой, стенками рабочей камеры и обрабатываемыми деталями, то в разработке и практическом применении вибрационных процессов необходимо учитывать как массу отдельных частиц, так и эквивалентную массу среды с учетом



**Рис. 2. Технологическая схема обработки № 1:**  
1 — станина; 2 — пружины; 3 — рабочая камера; 4 — ложемент; 5 — коленчатый вал; 6 — рабочая среда; 7 — вибратор

динамического разрыхления, одновременности соударений групп (столбиков) ее частиц.

6. Установлено [1—3], что технологический эффект виброобработки, обеспечивающий упрочнение, достигается при жестком закреплении деталей по сравнению с деталями, свободно загружаемыми в рабочую камеру.

Учитывая конструктивные особенности коленчатых валов и исходя из основополагающих принципов, обеспечивающих эффективность процесса ВиУО, в качестве базовой схемы объемной виброударной отделочно-упрочняющей обработки коленчатых валов предложена схема № 1, представленная на рис. 2. Эта технологическая схема предусматривает для обработки вибростанок с U-образной рабочей камерой, габаритные размеры которой соизмеримы или превышают габаритные размеры подвергаемого обработке коленчатого вала.

Вал устанавливают таким образом, чтобы его основная ось, совпадающая с осью коренных шеек коленчатых валов, находилась в зоне расположения условной оси вращения массы рабочей среды (см. рис. 1). В результате такого расположения вала исключается центральная зона малой активности, а смещенные относительно основной оси вала цилиндрические поверхности коренных и шатунных шеек подвергаются обработке в зонах среднего и максимального воздействия.

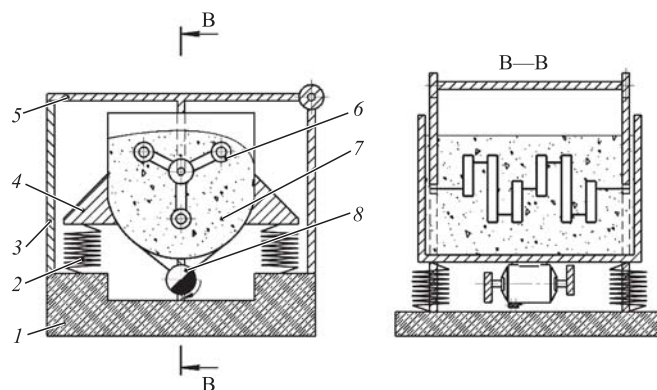
Коленчатый вал устанавливают в ложемент по направляющим пазам и удерживают на опорах, которые позволяют валу самопроизвольно прокручиваться вокруг своей оси под динамическим воздействием рабочей среды и равномерно упрочняться. Ложемент с коленчатым валом погружают в камеру с рабочей средой и жестко фиксируют. С помощью вибратора создают дополнительные колебания вала в поперечном к оси направлении

с одновременным ударным воздействием рабочих тел на всю обрабатываемую поверхность.

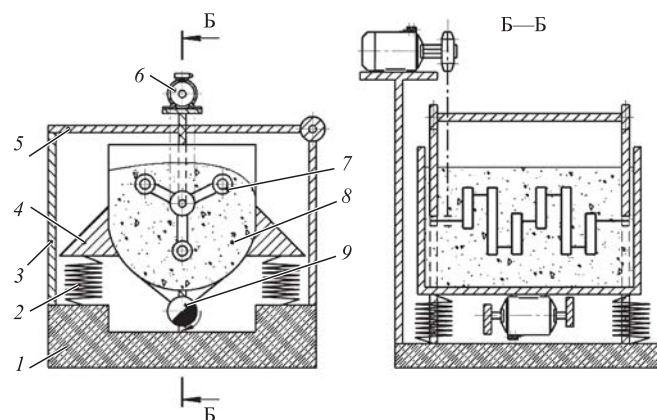
В технологической схеме № 2 (рис. 3) эффект наложения вибраций на фиксированный коленчатый вал исключен за счет его крепления в ложементе, прикрепленном к манипулятору, который не взаимодействует с рабочей камерой и, не нагружая ее и не создавая дополнительных сил и моментов, позволяет поднимать и опускать коленчатый вал, закрепленный на нем.

Так же, как и в технологической схеме № 1, коленчатый вал устанавливается в ложемент по направляющим пазам и удерживается на прикрепленных к нему опорах, которые позволяют валу самопроизвольно прокручиваться вокруг своей оси под динамическим воздействием рабочей среды и равномерно упрочняться.

Технологическая схема № 3 (рис. 4) представляет собой рабочую камеру с погруженным в нее коленчатым валом. Вал закреплен на специальном



**Рис. 3. Технологическая схема обработки № 2:**  
1 — станина; 2 — пружины; 3 — опора; 4 — рабочая камера; 5 — манипулятор; 6 — коленчатый вал; 7 — рабочая среда; 8 — вибратор



**Рис. 4. Технологическая схема обработки № 3:**  
1 — станина; 2 — пружины; 3 — опора; 4 — рабочая камера; 5 — манипулятор; 6 — привод вращения коленчатого вала; 7 — коленчатый вал; 8 — рабочая среда; 9 — вибратор

манипуляторе, не контактирующем с камерой, который может опускать (поднимать) коленчатый вал в рабочую среду. Кроме того, коленчатому валу сообщается дополнительное вращательное (встречное или попутное) движение, обеспечивающее интенсификацию процесса обработки.

Предложенные технологические схемы ВиУО позволяют осуществить упрочнение коленчатого вала путем равномерного и одновременного наклепа всей поверхности (включая щеки), с совмещением стабилизирующего эффекта.

Обработка коленчатого вала согласно схемам № 2 и 3 (см. рис. 3, 4) наиболее оптимальна в качестве окончательной. ВиУО улучшает качество поверхности, упрочняя поверхностный слой. При обработке по схеме № 1 (см. рис. 2) одновременно с упрочнением поверхностного слоя вала создается определенный стабилизирующий эффект, который существенно влияет на повышение сопротивления усталости детали.

### Влияние виброударной обработки на коробление коленчатых валов

В современном машиностроении требования к точности геометрической формы коленчатых валов непрерывно возрастают. В частности, биение коренных шеек коленчатых валов автомобильных и тракторных двигателей не должно превышать 0,01...0,06 мм. Основная причина коробления коленчатых валов — возникновение в поверхностных слоях упрочненной галтели остаточных напряжений сжатия.

Комплекс теоретических исследований, представленных в работе [4], позволил раскрыть механизм процесса коробления коленчатых валов при упрочнении галтелей ППД (рис. 5).

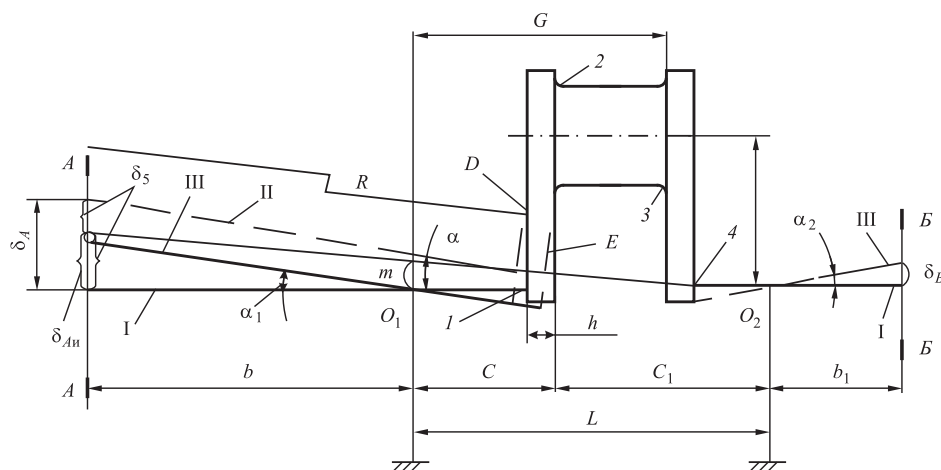


Рис. 5. Схема к расчету коробления КВ

До упрочнения коренные шейки коленчатых валов занимают горизонтальное положение I. После ППД галтели 2 шатунной шейки щека изогнется выпуклостью в сторону упрочненной галтели и должна переместить связанную с ней левую коренную шейку в новое положение II. Однако, так как коленчатый вал свободно лежит на опорах  $O_1$  и  $O_2$ , то под действием силы тяжести он повернется вокруг точки  $O_1$  против часовой стрелки на угол  $\alpha_2$  до соприкосновения левой коренной шейки с опорой  $O_1$ . При этом в сечении опоры  $O_1$  левая коренная шейка опустится на величину  $m$  (в сечении А—А на величины  $\delta_5$ ) и займет новое положение III. При вращении коленчатых валов на опорах индикатор в сечении А—А покажет не полную (фактическую) величину коробления  $\delta_A$ , а некоторую (измеряемую) ее часть  $\delta_{An}$ .

Для определения коробления коленчатых валов в сечении А—А от одновременного упрочнения галтелей 1 и 2 в работе [4] предложена следующая зависимость:

$$\delta_{An\ 1,2} = 6 \frac{(1-\nu)}{E} \frac{r}{h^2} \frac{b}{L} \times [-\sigma_{ост1} \delta_{\sigma1} (L+h-C) + \sigma_{ост2} \delta_{\sigma2} (L-C)] \Psi, \quad (1)$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона;

$E$  — модуль упругости первого рода;

$r$  — расстояние от оси коренной шейки (КШ) до оси шатунной шейки (ШШ);

$h$  — общая толщина щеки кривошипа коленчатого вала;

$b$  — расстояние от КШ до конца коленчатого вала;

$L$  — расстояние между КШ одного кривошипа;

$C$  — расстояние от щеки (со стороны ШШ) до КШ;

$\sigma_{ост}$  — средняя величина остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое после ППД;

$\delta_{\sigma}$  — глубина залегания остаточных напряжений сжатия;

$\Psi$  — коэффициент, учитывающий неполную обработку щеки ППД.

Из формулы (1) следует, что величина коробления зависит от материала коленчатого вала (первый множитель), жесткости щеки (второй множитель), передаточного соотношения (третий множитель), величины и глубины залегания остаточных сжимающих напряжений, формируемых в поверхностном слое

КШ и ШШ в процессе упрочнения ППД (четвертый множитель), и площади поверхности щеки, обработанной ППД (пятый множитель). Первые три множителя обусловлены конструктивными параметрами коленчатых валов и являются основополагающими при оценке величины коробления валов. Два других позволяют оценить степень влияния на коробление технологических методов ППД, выбранных для повышения эксплуатационных свойств коленчатых валов.

Рассмотрим зависимость величины коробления коленчатых валов от упрочнения их в условиях ВиУО, при полном погружении коленчатых валов в рабочую среду, находящуюся под воздействием низкочастотных колебаний. При этом обработке подвергаются все поверхности, доступные для энергосилового воздействия частиц рабочей среды. Следовательно, коэффициент  $\Psi$ , учитывающий неполную обработку щеки, можно приравнять единице.

Для определения остаточных напряжений в галтелях КШ и ШШ используем выражение [5]

$$\sigma_{\text{ост}} = \sigma_{\text{ост max}} = \frac{\sigma_{\text{дт}}}{h_y} K_{\text{ко}}, \quad (2)$$

где  $K_{\text{ко}}$  — коэффициент корректировки остаточных сжимающих напряжений, который зависит от диаметра шеек коленчатых валов и деформационных параметров энергосилового воздействия части рабочей среды;

$$K_{\text{ко}} = \left[ \frac{4}{3} R - 2(R - Ra) - \frac{1}{2} (R - h_y) \times \right. \\ \left. \times \left( 2 \ln \frac{R}{(R - Ra)} \right) - \frac{(R - h_y)^2}{3R^2} - 1 \right], \quad (3)$$

где  $R$  — радиус цилиндрической поверхности шеек;

$Ra$  — среднеарифметическое отклонение профиля поверхности шеек;

$h_y$  — глубина упрочненного слоя;

$\sigma_{\text{дт}}$  — динамический предел текучести.

Глубина залегания остаточных напряжений сжатия, как правило, превышает глубину упрочненного слоя и составляет

$$\delta_{\sigma_2} \approx K_y - h_y, \quad (4)$$

где  $K_y$  — коэффициент превышения глубины залегания остаточных напряжений. По различным источникам его значение колеблется в пределах  $K_y = 1,1 \dots 2,0$  [6].

С учетом (3), (4) выражение (1) преобразуется к виду

$$\delta_{\text{Аи1,2}} = 6 \frac{(1-\nu)}{E} \frac{r}{h^2} \frac{b}{L} K_y \sigma_{\text{дт}} \times \\ \times [-K_{\text{ко1}}(L+h-C) + K_{\text{ко2}}(L-C)], \quad (5)$$

где  $K_{\text{ко1}}$ ,  $K_{\text{ко2}}$  — коэффициенты корректировки остаточных сжимающих напряжений соответственно КШ и ШШ.

При равенстве напряженного состояния галтелей КШ и ШШ, т.е. когда  $K_{\text{ко1}} = K_{\text{ко2}}$ , величина коробления будет зависеть только от конструктивных параметров коленчатых валов и определяться по формуле

$$\delta_{\text{Аи1,2}} = 6 \frac{(1-\nu)}{E} \frac{r}{h} \frac{b}{L} K_y \sigma_{\text{дт}} K_{\text{ко}}. \quad (6)$$

Формула (6) справедлива для случая, когда диаметры всех КШ и ШШ равны между собой и степень их деформационного упрочнения одинакова, при этом отсутствуют остаточные напряжения от предшествующей обработки. В реальных коленчатых валах диаметры КШ и ШШ, как правило, отличаются. Кроме того, при ВиУО их упрочнение происходит в разных по интенсивности обработки зонах рабочей камеры, что обуславливает формирование поверхностных слоев с различным напряженным состоянием, причем изменение напряженного состояния поверхностного слоя шеек будет зависеть от их удаленности от стенок рабочей камеры [2]. Этот экспериментально установленный факт можно оценить соотношением

$$K_{\text{д}} = \frac{K_{\text{ко1}}}{K_{\text{ко2}}}, \quad (7)$$

где  $K_{\text{д}} < 1$  — коэффициент диссипации.

С учетом (7) выражение для расчета суммарного коробления коленчатых валов, упрочненного в процессе ВиУО, будет иметь вид

$$\delta_{\text{Аи1,2}} = 6 \frac{(1-\nu)}{E} \frac{r}{h^2} \frac{b}{L} K_y \sigma_{\text{дт}} K_{\text{ко2}} \times \\ \times [-K_{\text{д}}(L+h-C) + (L-C)]. \quad (8)$$

Для снижения влияния ППД на коробление необходимо, чтобы выполнялось условие

$$R_{\text{к}} - R_{\text{ш}} \cong 3(h_{\text{уш}} - h_{\text{ук}}), \quad (9)$$

где  $R_{\text{к}}$ ,  $R_{\text{ш}}$  — радиусы цилиндрической поверхности соответственно коренной и шатунной шеек;

$h_{\text{ук}}$ ,  $h_{\text{уш}}$  — глубина упрочненного слоя коренной и шатунной шеек.

В процессе ВиУО обеспечить это условие практически невозможно.

### Результаты экспериментальных исследований влияния ВиУО на напряженное состояние поверхностного слоя

Исследования предусматривали определение закономерностей изменения остаточных сжимаю-



щих напряжений I рода в поверхностном слое материала при виброупрочнении в зависимости от режимов обработки. Для исследований использовали образцы в виде колец (рис. 6).

Кольца устанавливали на оправку, имитирующую коленчатый вал. Собранную воедино конструкцию, состоящую из вала, с надетыми на него кольцами, имитирующего коренную шейку, а также втулок с кольцами, имитирующими шатунные шейки, погружали в активную рабочую зону камеры на подвесных опорах, обеспечиваю-

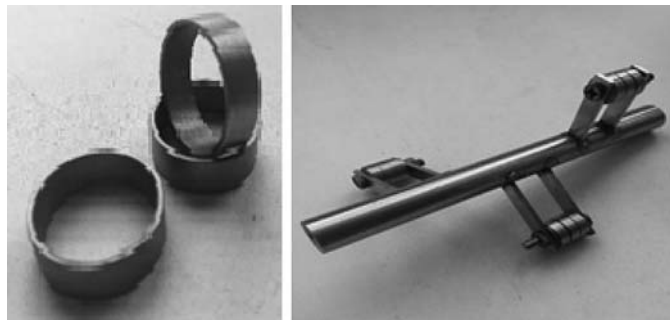


Рис. 6. Вид колец и оправки, применяемых для исследований

**Экспериментальные и расчетные значения остаточных напряжений в поверхностном слое образцов, обработанных при  $A = 3$  мм,  $f = 25$  Гц**

Время обработки, мин	Остаточные напряжения, МПа, в образцах, установленных					
	на валу			на втулке		
	Расчет	Эксперимент	$\delta$ , %	Расчет	Эксперимент	$\delta$ , %
0	9,64	9,64	—	9,64	9,64	—
10	75	80	6,2	93,2	110	6,2
20	107	97	10,2	141	128	10,2
40	102	99	3,1	141	137	3,1
60	101	95	5,8	133	126	5,8

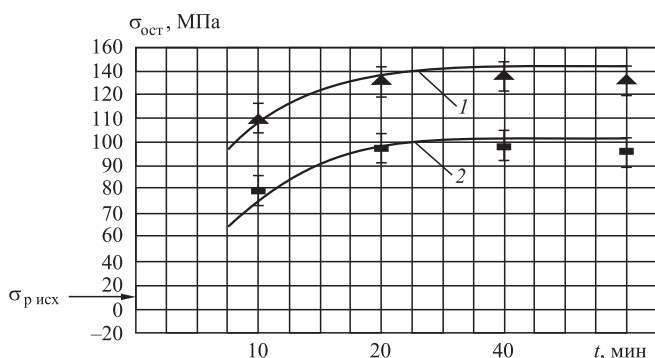


Рис. 7. Зависимость остаточных сжимающих напряжений от продолжительности ВиУО образцов, установленных: 1 — на втулках, 2 — на валу;  $A = 3$  мм,  $f = 25$  Гц

щих ей свободное вращение вокруг оси во время обработки. Виброударную обработку образцов проводили в среде шаров ( $d = 8$  мм) на установке УВГ-4×10, со следующими режимами: амплитуда вибраций  $A = 2,5...3,0$  мм, частота вибрации  $f = 25$  Гц, время обработки — 20, 40 мин. После обработки кольца разрезали на электроэрозионном станке DIPOL 600Ф03.

В таблице и на рис. 7 приведено сравнение расчетных и экспериментальных значений остаточных сжимающих напряжений.

Исследованиями установлено, что ВиУО сопровождается изменением напряженного состояния поверхностного слоя. При этом наибольшее изменение наблюдается при продолжительности обработки в пределах 20 мин. Дальнейшая обработка не приводит к существенному изменению.

При закреплении образцов на втулках (имитирующих шатунные шейки) остаточные напряжения образцов при обработке выше (на 35 %), чем при закреплении на валу (имитирующих коренные шейки), за счет большей интенсивности воздействия обрабатывающей среды на обрабатываемую поверхность (см. рис. 1). Эти исследования позволили обосновать коэффициент диссипации, введенный в выражение (8) для расчета суммарного коробления коленчатых валов, упрочненного в процессе ВиУО, для оценки разной напряженности поверхностных слоев коренных и шатунных шеек коленчатого вала на уровне  $K_d = 0,6$ .

Полученные в результате исследований аналитические зависимости дают возможность на стадии конструкторско-технологической подготовки производства прогнозировать влияние виброударного упрочнения на качество коленчатых валов и на этой основе выбирать оптимальные режимы обработки.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. **Бабичев А.П., Бабичев И.А.** Основы вибрационной технологии. Ростов н/Д.: ДГТУ, 1999. 620 с.
2. **Копылов Ю.Р.** Виброударное упрочнение. Воронеж: ВИВД, 1999. 386 с.
3. **Шевцов С.Н.** Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных технологических машинах. Ростов н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ, 2001. 194 с.
4. **Зайцев С.А., Емельянов В.Н.** Влияние поверхностного пластического деформирования на качество валов. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2017. 380 с.
5. **Лебедев В.А.** Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования. Ростов н/Д.: Издательский центр ДГТУ, 2006. 183 с.
6. **Мищенко Р.А.** Прогнозирование влияния динамических методов поверхностного пластического деформирования на повышение эксплуатационных свойств деталей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 10. С. 53–55.

А.В. Толкачев

(ПАО "ОДК — Сатурн", г. Рыбинск),

Д.И. Волков

(Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева)

E-mail: d\_i\_volkov@rsatu.ru

## Параметры процесса дробеструйного упрочнения, определяющие результат обработки и требующие обязательного контроля

Описан подход к формированию технических требований конструкторской документации с точки зрения обеспечения их технологичности. Определен наиболее важный результат упрочнения, который должен быть проконтролирован, приведен способ контроля стабильности процесса упрочнения.

**Ключевые слова:** упрочнение, сжимающие напряжения, контрольная пластина Almen, контроль результатов упрочнения.

The approach to formation of technical requirements for design documentation from the point of view of ensuring their manufacturability is described. The most important result of hardening, which should be monitored, is identified and method for controlling of the stability of the hardening process is presented.

**Keywords:** hardening, compressive stresses, Almen strip, hardening result monitoring.

### Введение

Растягивающие напряжения, возникающие в поверхностном слое деталей при воздействии эксплуатационной нагрузки, отрицательно влияют на сопротивление усталости детали и как следствие на ресурс изделия в целом. Особенно это важно для деталей авиационных газотурбинных двигателей, к эксплуатационной безопасности которых предъявляются особенно высокие требования.

Сжимающие напряжения, создаваемые в поверхностном слое деталей при проведении дробеструйного упрочнения, значительно снижают воздействие эксплуатационного напряжения на поверхностный слой детали (рис. 1).

Необходимый уровень сжимающих напряжений зависит от большого числа факторов, таких как материал детали, величина и цикличность эксплуатационных нагрузок и т.п. Поэтому величина остаточных напряжений прямо или косвенно должна быть указана в конструкторской документации на детали, подвергаемые дробеструйной обработке. Косвенно напряжения могут быть заданы через величину прогиба контрольной пластины, который требуется обеспечить и контролировать перед упрочнением детали. Также для определения основных параметров дробеструйной обработки в конструкторской документации должны быть указаны зоны детали, которые требуется упрочнить и дана инструкция, накладывающая другие важные ограничения на процесс дробеструйного упрочнения, а именно на технологические параметры, критерии оценки результатов и требования к их регистрации.

Кроме того, желательно указывать в конструкторской документации ряд технологических параметров процесса: тип дробеструйной обработки (сухая или влажная); тип и размер используемой дроби.

Государственный стандарт [1] запрещает включать технологические параметры в конструктор-

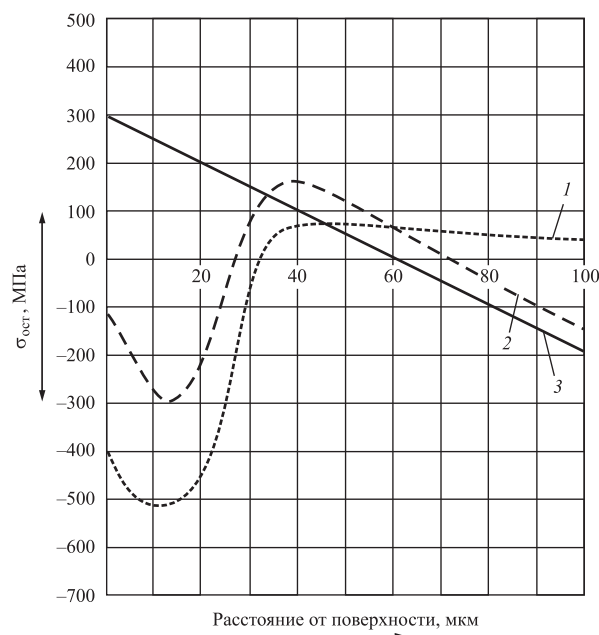


Рис. 1. Зависимости напряжений от эксплуатационной нагрузки в предварительно упрочненном поверхностном слое детали:

1 — остаточные напряжения после упрочнения; 2 — результирующие напряжения; 3 — эксплуатационная нагрузка

скую документацию, но данные параметры определяют состояние микрорельефа упрочненной поверхности и форму эпюры остаточных напряжений [2—11], а это значит, что целесообразно при формировании технических требований чертежа рассмотреть внесение туда указанных параметров. Наличие величины остаточных напряжений в технических требованиях чертежа влечет за собой необходимость контроля данного параметра.

### Назначение параметров дробеструйного упрочнения

Замер остаточных напряжений в производственных условиях — затратный и нетехнологичный способ контроля результата дробеструйного упрочнения. Наиболее удобный и технологичный способ контроля стабильности процесса упрочнения — использование контрольных пластин. Наилучшим вариантом с точки зрения технологичности является прямое указание в конструкторской документации требуемого прогиба контрольной пластины вместо величины сжимающих остаточных напряжений. При этом величина прогиба контрольной пластины должна гарантировать формирование необходимого напряженного состояния в поверхностном слое упрочненной детали. Для каждого типа материала определение соответствия напряженного состояния и прогиба контрольной пластины является темой отдельного изучения. В мировой практике наиболее распространены контрольные пластины Almen [12—14]. Поэтому рационально использовать именно данные пластины при указании требуемого прогиба в конструкторской документации. Документация на пластины Almen [12] находится в открытом доступе, а пластины массово производятся и продаются без каких-либо ограничений. Таким образом, любое предприятие, имеющее компетенции в области дробеструйного упрочнения, получив конструкторскую документацию с указанным прогибом контрольной пластины Almen, сможет обеспечить требуемый уровень сжимающих напряжений и повторяемость результата дробеструйной обработки.

Назначение такого важного параметра процесса дробеструйного упрочнения, как диаметр дробы, определяется следующими граничными условиями:

— верхняя граница диаметра дробы ограничивается радиусом галтелей на обрабатываемой детали (рис. 2);

— нижняя граница диаметра дробы ограничивается возможностью достижения требуемого прогиба контрольной пластины (рис. 3);

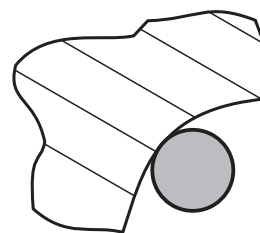


Рис. 2. Требуемый диаметр дробы для упрочнения галтели  
 $D_{\text{дробы}} < R_{\text{галтели}}/2$

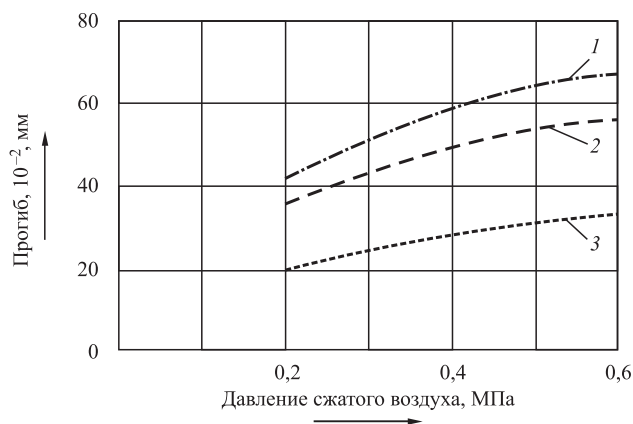


Рис. 3. Зависимости прогиба контрольной пластины Almen, тип А, от давления сжатого воздуха для различных фракций дробы (твердость дробы 41...52 HRC, расход дробы 8 кг/мин, диаметр сопла 8 мм, расстояние от сопла 130 мм, угол между соплом и поверхностью 90°):  
 1 — S330; 2 — S230; 3 — S110

— возможностью дробы деформировать микрорельеф, сформированный перед операцией дробеструйного упрочнения (рис. 4);

— требованиями к шероховатости поверхности после дробеструйного упрочнения.

Ограничение на размер дробы исходя из ее способности полностью деформировать микрорельеф

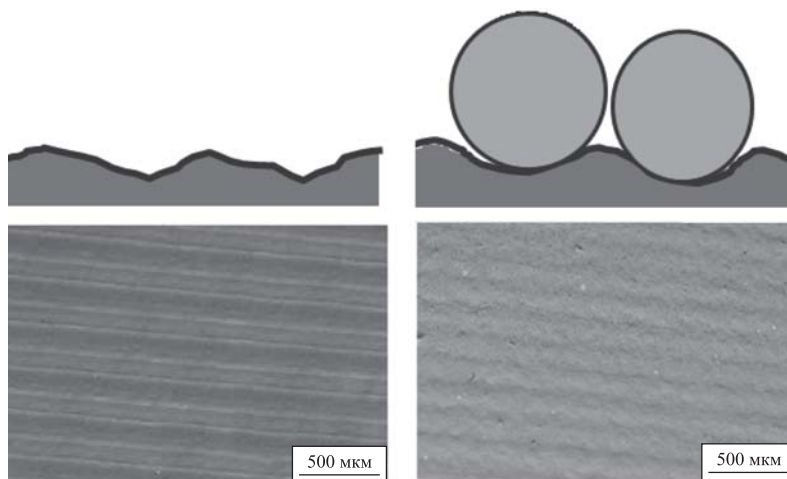


Рис. 4. Микрорельеф поверхности до и после дробеструйной обработки. ×50

от предшествующей обработки, включая впадины, связано с тем, что в случае приложения растягивающих сил к реальной детали наибольший риск образования трещин существует во впадинах, полученных в результате механической обработки, как это показано на рис. 5 (см. обложку).

В случае, если не все следы от предшествующей механической обработки полностью деформированы, возникнет ситуация, при которой упругодеформированный материал, лежащий под слоем пластически деформированного, создаст дополнительную растягивающую нагрузку на концентраторы напряжений, которыми являются впадины после механической обработки. Таким образом, если не упрочнить полностью все следы от предшествующей механической обработки, то эффект упрочнения вместо положительного будет отрицательным и эксплуатационные характеристики детали могут значительно снизиться. Проведенные исследования показали, что при контроле упрочненной поверхности только с помощью лупы с увеличением  $\times 10$ , в 80 % случаев контролеры не смогли выявить наличие неполного охвата поверхности отпечатками от ударов дробы. Для примера на рис. 6 представлена поверхность детали после дробеструйной обработки, признанная годной контролерами, исследовавшими ее с использованием лупы  $\times 10$ . На данном изображении видно большое число следов от предшествующей лезвийной обработки, которые не были полностью деформированы.

Таким образом, наиболее важный фактор, который должен быть проконтролирован, — отсутствие после упрочнения следов от предшествующей механической обработки. Предлагаем проводить выборочный контроль с увеличением  $\times 100$  упрочненных поверхностей деталей, обработанных в течение одной смены. Для этого требуется

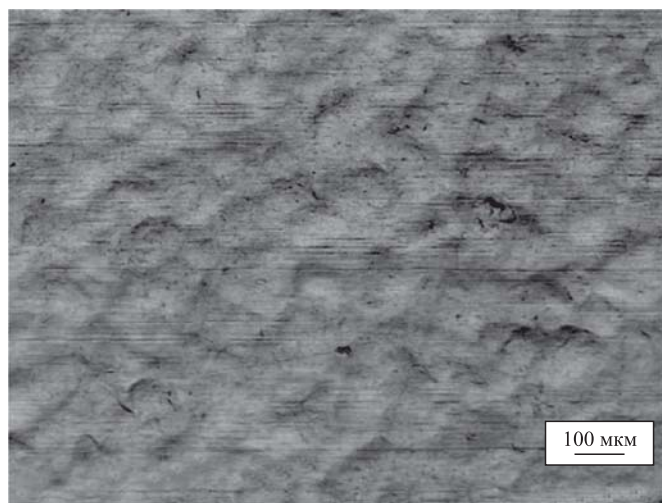


Рис. 6. Упрочненная поверхность детали.  $\times 100$

произвести соответствующее оснащение участков контроля требующимся увеличительным оборудованием.

### Условие обеспечения повторяемости результатов упрочнения

Другой важный аспект дробеструйной обработки — обеспечение повторяемости результатов обработки. Решению данной задачи служит кривая насыщения [13—16], которая строится как график, иллюстрирующий зависимость величины прогиба контрольной пластины от времени обработки.

На кривой обязательно должны присутствовать:

- точка насыщения;
- точка выбранного времени обработки;
- точка двойного времени обработки;
- одна точка левее точки насыщения;
- общее число точек должно быть не менее четырех, за исключением нуля.

Точка насыщения строится так, чтобы при увеличении времени обработки в 2 раза прирост прогиба контрольной пластины составлял 10 % или менее, при этом прогиб контрольной пластины при времени обработки меньшем в 2 раза, чем точка насыщения, должен отличаться более чем на 10 % от прогиба контрольной пластины в точке насыщения.

Точка выбранного времени обработки должна совпадать с точкой насыщения или находиться правее. Вправо точку выбранного времени обработки смещают в следующих случаях: округление времени обработки до ровного числа циклов, необходимость дополнительных циклов обработки для обеспечения охвата поверхности следами от ударов дробы.

Точка двойного времени обработки строится при удвоении времени обработки по сравнению с точкой выбранного времени обработки. Прогиб контрольной пластины при двойном времени обработки не должен увеличиться более чем на 10 % по сравнению с прогибом контрольной пластины при выбранном времени обработки.

Пример кривой насыщения представлен на рис. 7.

Наличие точки/точек левее точки насыщения позволяет подтвердить, что насыщение не наступает при меньшем времени обработки.

Важно после построения кривой насыщения назначить технологический допуск на отклонения прогиба контрольной пластины от прогиба при выбранном времени обработки. Исследования показали, что целесообразным является допуск  $\pm 10$  %. Наличие такого поля допуска позволяет компенсировать незначительные отклонения условий обработки и выявлять отклонения, способные повлиять на стабильность результата обработки.



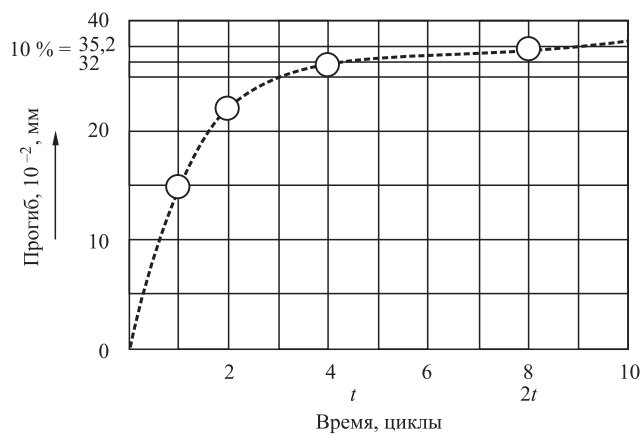


Рис. 7. Пример кривой насыщения

Во всех случаях появления отклонений прогиба более  $\pm 10\%$  выявлялись неполадки с оборудованием, оснасткой, дефекты контрольных пластин или несоответствующее состояние дробы, что подтверждает обоснованность указанного допуска. Форма кривой насыщения и допуск прогиба  $\pm 10\%$  в большей степени приспособлены для отслеживания уменьшения прогиба контрольной пластины. К уменьшению прогиба контрольной пластины может привести значительное снижение одного или нескольких параметров обработки, таких как давление воздуха, расход дробы, время обработки, также на величину прогиба контрольной пластины может оказать влияние изменение и других параметров дробеструйного упрочнения.

### Выводы

1. Наиболее важно после проведения процесса дробеструйного упрочнения проконтролировать не остаточные напряжения, а полноту деформации всех следов от предшествующей лезвийной обработки.

2. Уровень сжимающих напряжений в конструкторской документации целесообразно указывать опосредованно через величину прогиба контрольной пластины.

3. Для контроля стабильности процесса упрочнения целесообразно применять такой инструмент, как кривая насыщения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **ГОСТ 2.109–73.** Единая система конструкторской документации. Основные требования к чертежам. М.: Стандартинформ, 2004. 41 с.

2. **Петросов В.В.** Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента. М.: Машиностроение, 1977. 168 с.

3. **Блурция Р.Ш., Блурция Д.Р., Блурция И.Р.** Формирование технологических остаточных напряжений

торсионных валов, подвергнутых дробеметной и дробеструйной обработке // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2006. № 5. С. 18–21.

4. **Методика** исследования остаточных напряжений в поверхностном слое лопаток ГТД после дробеструйного упрочнения / В.Ф. Безъязычный, А.Н. Рябов, А.Н. Сутягин, А.В. Толкачев // Вестник Рыбинского государственного авиационного технологического университета имени П.А. Соловьева. 2015. № 1 (32). С. 104–108.

5. **Круцило В.Г.** Упрочнение лопаток ГТД смесью шариков и микрошариков с подогревом // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. № 5 (36). С. 136–139.

6. **Кирпичев В.А., Вакулюк В.С., Букатый А.С. и др.** Зависимость предела выносливости от характера распределения остаточных напряжений в поверхностном слое упрочненных деталей // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2014. № 5 (47). С. 180–187.

7. **Сазонов М.Б., Соловацкая Л.В.** Оценка напряженности поверхностного слоя деталей после упрочнения различными методами поверхностного пластического деформирования // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. Т. 14. № 3. Ч. 2. С. 467–473.

8. **Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Чанышев А.П.** К определению величины припуска при зачистке поверхности панелей и обшивок лепестковым кругом после дробеструйного формообразования // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2017. Т. 73. № 1. С. 25–30.

9. **Катаев Ю.П.** Напряженно-деформированное состояние в плоской заготовке в процессе дробеударной обработки // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2011. № 3. С. 22–25.

10. **Оценка** влияния гидродробеструйной обработки на предел выносливости полых цилиндрических образцов по первоначальным деформациям образца-свидетеля / В.А. Кирпичев, В.П. Сазонов, В.С. Вакулюк, О.Ю. Семенова // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2015. № 1. С. 61–62.

11. **Влияние** поверхностного упрочнения на предел выносливости цилиндрических деталей различного диаметра / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичев, В.С. Вакулюк, В.П. Сазонов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2014. № 3. С. 79–80.

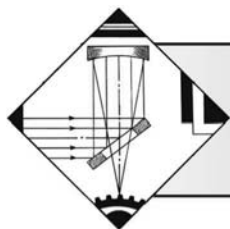
12. **SAE J442.** Контрольная пластина, держатель контрольной пластины и измеритель для дробеструйной обработки. <http://www.sae.org>, 2013. 5 с.

13. **SAE J443.** Процедуры использования стандартной пластины Альмена в дробеструйной обработке. <http://www.sae.org>, 2010. 6 с.

14. **MIL-S-13165C.** Дробеструйное упрочнение стальной дробью. <http://www.shotpeener.com>, 1989. 26 с.

15. **SAE J2277.** Дробеструйное упрочнение. Кривая насыщения. <http://www.sae.org>, 2010. 7 с.

16. **SAE AMS2430.** Дробеструйная обработка, автоматическая. <http://www.sae.org>, 2010. 20 с.



УДК 621.9.02.079

Е.А. Чекалова, А.В. Журавлев  
(Московский политехнический университет)  
E-mail: alenka.2019@inbox.ru

## Дискретное оксидирование сложнопрофильного инструмента из быстрорежущих сталей

*Проведены сравнительные исследования влияния дискретного поверхностного упрочнения по стандартной ионно-плазменной технологии и технологии дискретного оксидирования на структуру и твердость быстрорежущих сталей. Установлено, что после упрочнения в ионно-плазменной установке на поверхности и по толщине слоя образуются дефекты каплевидной формы, кратеры и расслоения. Металлографические исследования показали, что упрочненный слой после дискретного оксидирования имеет плотное, однородное строение в ячейках и на границах между ними, причем при переходе от ячейки к границе толщина слоя изменяется от 1,5...2,0 до 0,1 мкм. Технология дискретного оксидирования позволяет повысить износостойкость сложнопрофильного режущего инструмента в 1,5—1,7 раза по сравнению с необработанным инструментом.*

**Ключевые слова:** сложнопрофильный инструмент, быстрорежущая сталь, оксидирование, микроструктура, твердость, износостойкость.

*Comparative studies of the effect of discrete surface hardening by standard ion-plasma technology and discrete oxidation technology on the structure and hardness of high-speed steels are carried out. It is established that after hardening in the ion-plasma installation on the surface and in the thickness of the layer, droplet-shaped defects, craters and bundles are formed. Metallographic studies showed that the hardened layer after discrete oxidation has dense, homogeneous structure in the cells and at the boundaries between them, and the transition from cell to boundary layer thickness varies from 1.5...2.0 to 0.1  $\mu\text{m}$ . The discrete technology oxidation allows to increase the wear resistance of the complex-profile cutting tool by 1.5—1.7 times compared to the untreated tool.*

**Keywords:** complex-profile tool, high-speed steel, oxidation, microstructure, hardness, wear resistance.

### Введение

Работоспособность сложнопрофильного инструмента определяется сложными, стохастично протекающими процессами контактного взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов и может быть повышена за счет изменения поверхностных свойств инструментального материала, при которых контактные площадки инструментального материала будут наиболее эффективно сопротивляться адгезионно-усталостному изнашиванию. При этом инструмент должен обладать достаточным запасом прочности при сжатии и твердостью.

Возможности традиционных методов нанесения покрытий на режущий инструмент в значительной степени уже исчерпаны. Это связано со сложностью сбалансирования твердости и теплостойкости материалов инструмента и покрытия, с одной стороны, и вязкости и прочности — с другой, поскольку

причинами разрушения являются высокие контактные силовые и температурные нагрузки. Одна из причин преждевременного разрушения покрытия — возникновение критических напряжений на границе раздела покрытие—основной материал при термомеханическом нагружении контактных площадок инструмента. Эти напряжения зависят от разницы теплофизических и физико-механических свойств материалов износостойкого покрытия и инструмента, а также собственных микронапряжений в инструментальном материале [1, 2].

В процессе механической обработки на начальной стадии происходит накопление упругих искажений кристаллической решетки, которые приводят к разрушению покрытия в микроскопическом объеме, т.е. квазихрупкому разрушению материала с образованием микротрещин, которые далее развиваются до макротрещин, приводя к разрушению материала, характерного для циклического нагружения.

Одной из мотиваций создания дискретных покрытий является возможность использования эффекта торможения и даже остановки образовавшейся в процессе эксплуатации локальной трещины.

Сетчатая структура препятствует распространению трещин, снижает концентрацию напряжений на границе покрытие—инструментальный материал, компенсируя разницу коэффициентов термического расширения и снижая модули упругости покрытия и материала инструмента [3].

Таким образом, режущий инструмент с дискретным диффузионным сетчатым покрытием способствует увеличению запаса пластичности при сохранении прочности и твердости, что снижает склонность к потере формоустойчивости и упругим прогибам при приложении термомеханических нагрузок.

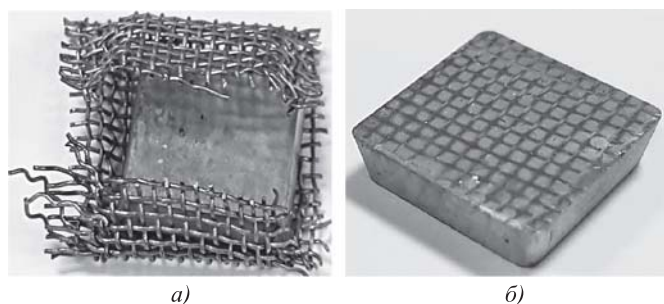
**Цель работы** — исследование влияния дискретного оксидирования на износостойкость быстрорежущего сложнопрофильного инструмента.

### Методика проведения исследований

Исследования проводили на пластинах из быстрорежущих сталей Р9М4К8 и Р18.

Для создания дискретного, т.е. прерывистого по толщине диффузионного покрытия использовали сетку из коррозионно-стойкой стали для обжатия пластин (рис. 1).

Нанесение диффузионного TiN-покрытия по стандартной технологии осуществляли на модернизированной установке ННВ 6.6-И4 методом комбинированной ионно-плазменной обработки. Установка оснащена устройством для инъекции в камеру электронной составляющей, что позволяет разделить процессы очистки и термоактивации режущего инструмента, проводить их в оптимальных условиях независимо от массы загрузки инструмента в камеру установки. Установка снаб-



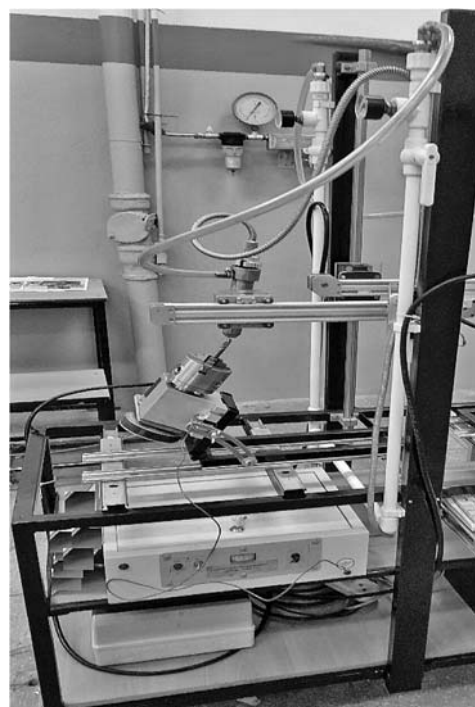
**Рис. 1. Поверхность быстрорежущей пластины из стали Р9М4К8:**

*а* — расположение пластины в сетке из коррозионно-стойкой стали; *б* — пластина после нанесения покрытия

жена высоковольтным импульсным источником ионов и динамическим смесителем газов, что позволяет, эффективно ионизируя газ, интенсифицировать процесс формирования покрытия.

Дискретное диффузионное оксидное покрытие наносили на установке с униполярной положительной короной (рис. 2) [3]. Металлографические исследования проводили на электронном микроскопе JSM-5610 LV. Определение механических свойств покрытия выполняли кинетическим индентированием согласно ГОСТ 9450—76 на микротвердомере ПМТ-3М.

Кинетику и механизм изнашивания исследовали на зубодолбежном станке КСМ-SN5F3. Объектами исследований служили быстрорежущие долбяки из стали Р18 с геометрией:  $m = 1,25$  мм;  $z_0 = 60$ ;  $z = 30$ ;  $d_0 = 80$ ;  $\alpha = 6^\circ$ ;  $\gamma = 5^\circ$  (рис. 3).



**Рис. 2. Установка для диффузионного оксидирования**



**Рис. 3. Долбяк из стали Р18**



В качестве обрабатываемой заготовки использовали шестерню из стали 16ХЗНВФБМ-Ш. Критерием затупления служил износ по задней поверхности зуба инструмента.

### Результаты исследований и их обсуждение

В результате обработки по стандартной технологии на поверхности пластины из стали Р9М4К8 образуются ячейки одинаковых размеров, твердость которых составляет 1250...1300 НВ (рис. 4).

Металлографические исследования показали, что после упрочнения в ионно-плазменной установке на поверхности (рис. 5) и по толщине слоя

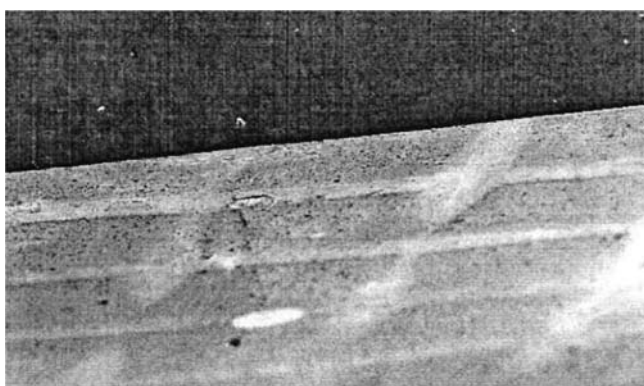


Рис. 4. Поверхность пластины с дискретным покрытием после ионно-плазменной обработки.  $\times 500$

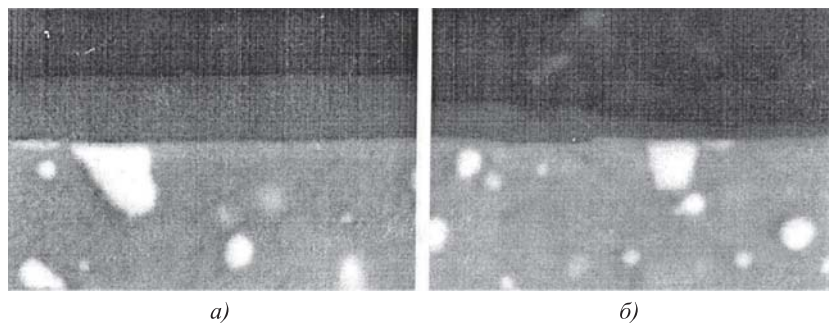


Рис. 5. Микроструктура стали Р9М4К8 с покрытием TiN ( $\times 10\ 000$ ): а — в ячейке; б — на границе между ячейками

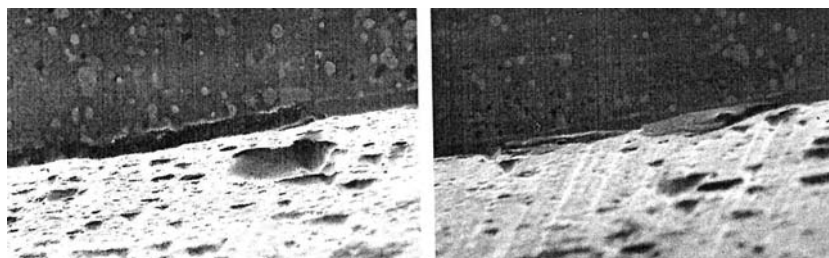


Рис. 6. Микроструктуры стали Р9М4К8 после ионно-плазменной обработки.  $\times 2000$

(рис. 6) образуются дефекты каплевидной формы, кратеры и расслоения.

Кроме того, нанесение диффузионного сетчатого покрытия в вакуумных установках по стандартной технологии наиболее приемлемо для образцов плоской формы, а не для сложнопровильного инструмента, поскольку при обжиге стальной сеткой нарушается геометрия инструмента.

Дискретное оксидирование быстрорежущих сталей позволяет устранить недостатки стандартной технологии, получить покрытие с релаксацией напряжений [4, 5]. При нанесении оксидного покрытия происходят химические и физические процессы гидролиза и диффузии атомов кислорода вглубь обрабатываемого металла.

В результате дискретного оксидирования быстрорежущих сталей на поверхности формируется тонкая оксидная пленка поликристаллической структуры (рис. 7).

Металлографические исследования показали, что упрочненный слой после дискретного оксидирования имеет плотное, однородное строение как в ячейках, так и на границах между ними, причем при переходе от ячейки к границе толщина слоя изменяется от 1,5...2,0 до 0,1 мкм.

Микрорентгеноспектральным анализом установлено существенное уменьшение содержания Fe в поверхностном слое, что обусловлено протеканием процесса окисления и образования оксидов FeO и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

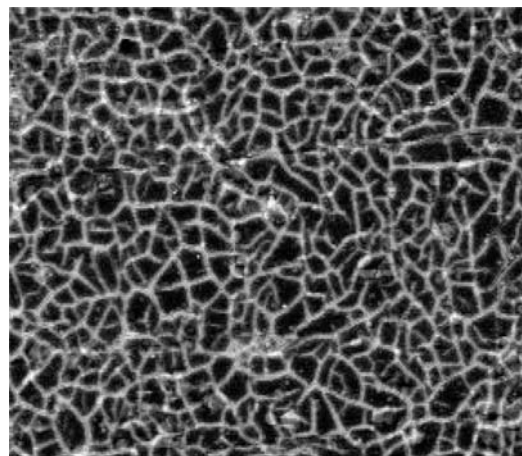
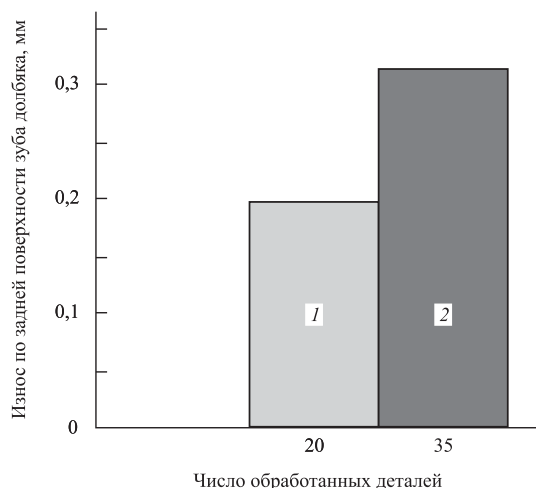


Рис. 7. Макроструктура поверхности образца из стали Р18 после дискретного оксидирования при  $I = 400$  мкА,  $p = 0,2$  МПа



**Рис. 8. Работоспособность быстрорежущих долбяков из стали Р18 при черновом зубодолблении детали из стали 16ХЗНВФБМ-Ш:**

1 — долбяк без покрытия; 2 — долбяк с покрытием;  $v = 140$  дв. х./мин;  $t = 1,5$  мм;  $s_{кр} = 0,080$  мм/дв. х.

Для исследования кинетики изнашивания сложнопрофильного инструмента из быстрорежущей стали с диффузионным дискретным покрытием в сравнении с контрольным инструментом были проведены испытания долбяков из стали Р18

при черновом зубодолблении шестерни из стали 16ХЗНВФБМ-Ш.

Сравнительный анализ результатов испытаний на износ долбяков с покрытием и без него показал повышение износостойкости инструмента с покрытием в 1,5—1,7 раза выше по сравнению с необработанным инструментом (рис. 8).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н.** Химико-термическая обработка металлов: учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1985. 256 с.
2. **Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б.Н. Арзамасов, А.Г. Братухин, Ю.С. Елисеев, Т.А. Панайоти.** М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 400 с.
3. **Чекалова Е.А.** Повышение долговечности режущего инструмента и тяжело нагруженных деталей методом нанесения диффузионного сетчатого покрытия: монография. М.: Изд-во Университет машиностроения, 2014. 127 с.
4. **Чекалова Е.А., Абраимов Н.В.** Повышение износостойкости быстрорежущего инструмента путем нанесения локального диффузионного сетчатого покрытия // *Электротехнология*. 2015. № 8. С. 36—42.
5. **Пат. 2548835 РФ, МПК С23С8/36.** Способ формирования износостойкого покрытия на поверхности металлической детали / Е.А. Чекалова, П.Д. Чекалов, Р.Д. Соломатина. Патентообладатель: Е.А. Чекалова. Оpubл. 20.04.2015.



**3 октября 2019 г.** исполнилось **75 лет** доктору технических наук, профессору, заслуженному деятелю науки РФ, заведующему кафедрой электро- и нанотехнологий Тульского государственного университета

### Виктору Васильевичу ЛЮБИМОВУ

Кафедра электро- и нанотехнологий (бывшая кафедра физико-химических процессов и технологий) является ведущим научно-образовательным подразделением Тулы и Тульской области в сфере высокоэффективных процессов обработки материалов (электроэрозионной, электрохимической, лазерной, вакуумных методов и т.п.).

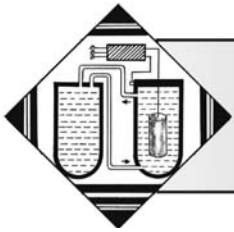
В.В. Любимов с 1979 г. является бессменным заведующим кафедрой, сменив на этом посту основоположника школы электротехнологии в Туле Ф.В. Седыкина. За эти годы В.В. Любимов создал и возглавил многие научные направления в области электротехнологий.

В последние годы под руководством В.В. Любимова развивается применение электротехнологических методов в нанотехнологиях, а также ведется поиск новых комбинаций электротехнологических воздействий на традиционные и нетрадиционные материалы.

За годы работы им опубликовано более 10 монографий, свыше 300 научно-технических статей, получено свыше 40 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

Профессор В.В. Любимов активно занимается подготовкой научных кадров. Им подготовлено 6 докторов технических наук и свыше 40 кандидатов технических наук.

*Коллектив редакции и редакционный совет журнала  
поздравляют Виктора Васильевича Любимова с юбилеем!  
Желаем крепкого здоровья, благополучия и дальнейшей плодотворной деятельности!*



М.Ю. Сарилов, У.Е. Решетник  
(Комсомольский-на-Амуре государственный университет)  
E-mail: sarilov@knastu.ru

## Исследование процессов в межэлектродном промежутке при электроэрозионной обработке алюминиевых и титановых сплавов

*Исследованы процессы электроэрозионной обработки в межэлектродном промежутке. Рассмотрены особенности электроэрозионной обработки алюминиевых и титановых сплавов. Выдвинута гипотеза о возможном возникновении оксидных образований (усов) при обработке алюминиевых и титановых сплавов и их влиянии на процесс обработки. Экспериментальными исследованиями доказана возможность образования нитевидных образований при электроэрозионной обработке алюминиевых сплавов и их влияние на точность и эффективность обработки. Для титановых сплавов гипотеза не подтверждена.*

**Ключевые слова:** электроэрозионная обработка, электрический пробой, алюминиевые сплавы, титановые сплавы, межэлектродный промежуток, частота импульсов, скважность, оксидные усы, электрод-инструмент, электрод-заготовка.

*The electric discharge machining processes in the interelectrode gap are studied. The features of electric discharge machining of aluminum and titanium alloys are considered. Hypothesis about possible occurrence of oxide formations (whiskers) in the processing of aluminum and titanium alloys and their influence on the treatment process is advanced. The possibility of formation of filamentous formations during the electric discharge machining of aluminum alloys and their influence on the accuracy and efficiency of processing is proved by experimental studies. For titanium alloys, the hypothesis is not confirmed.*

**Keywords:** electric discharge machining, electrical breakdown, aluminum alloys, titanium alloys, interelectrode gap, pulse frequency, duty cycle, oxide whiskers, electrode-tool, electrode-blank.

### Введение

Частичное или полное разрушение поверхности под влиянием внешнего воздействия называется эрозией. Под электрической эрозией токопроводящих материалов понимается разрушение поверхности материала под воздействием импульсов электрического тока. Процесс электроэрозионной обработки (ЭЭО) представляет собой разрушение металла или иного токопроводящего материала в результате локального воздействия кратковременных электрических разрядов между двумя электродами, один из которых является обрабатываемой деталью, а другой — электродом-инструментом [1].

Электроэрозионная обработка применяется во многих отраслях промышленности: станкостроение, судо-, вертолето-, самолетостроение и др. Однако наибольшее распространение этот вид

обработки получил в наукоемких областях машиностроения — производстве двигателей и прогрессивном самолетостроении. Постоянный рост одного из основных показателей уровня качества двигателей — удельной тяги, обеспечивается, в том числе, и за счет применения все более ажурных маложестких пространственно-сложных элементов конструкций, обработка которых резанием затруднена, а в некоторых случаях и невозможна [2]. На деталях авиационной техники имеются поверхности, расположенные в труднодоступных местах, которые можно обработать только с применением операций ЭЭО.

Производительность в данном методе повышается из-за регулирования параметров обработки, т.е. подачи импульсов между электродами с высокой частотой, при том же значении энергии импульса. Из-за этого обработка улучшит свои

качественные показатели, в частности параметр шероховатости обработанной поверхности за счет влияния уменьшенного расстояния между электродами при снижении энергии для подобранных сплавов.

### Гипотеза

На основе теоретических и экспериментальных исследований было сделано предположение, что из-за высоких химической (окислительной) активности и теплопроводности, низких теплоемкости и тугоплавкости при обработке алюминия электроэрозионным способом могут существовать оксидные образования (усы), получившиеся из металла, испаренного, расплавленного, выброшенного из лунки электрода-заготовки. Данные усы являются оксидом алюминия — токопроводящим материалом, а значит, сокращается фактический межэлектродный промежуток. Таким образом, повышается доля рабочих импульсов при тех же режимах обработки, что увеличивает интенсивность процесса эрозии с одновременным повышением температуры электродов. Также данная гипотеза была предложена для титановых сплавов ввиду того, что титан имеет близкие значения химической активности (особенно при высоких температурах, которые могут быть при разрушении токопроводящего канала) и высокую теплопроводность. Гипотеза может быть перенесена на титановые сплавы с допущениями, так как теплоемкость и тугоплавкость титана значительно выше алюминия.

Наличие подобной особенности при обработке алюминиевых и титановых сплавов косвенно подтверждается результатами ранее выполненных работ, так как температура при обработке этих материалов неоправданно велика по сравнению с обработкой различных видов стали.

В свою очередь изменение параметров обработки с учетом данного явления позволит обрабатывать материалы на основе алюминия и титана более эффективно, т.е. повысить производительность за счет подачи на межэлектродный промежуток оптимального количества энергии, которое не будет приводить к ухудшению точности обработки и увеличению шероховатости.

### Теоретическое обоснование и методика исследования

Основные материалы, применяемые в конструкциях изделий авиационной области — титановые и алюминиевые сплавы. Легкие и прочные, они становятся незаменимыми материалами ответственных деталей, к которым предъявляются жесткие требования как по качеству самого материала, так и по качеству их обработки. В работе [3] исследованы тепловые явления как показатель интенсивности происходящих в межэлектродном пространстве процессов. На рис. 1 (см. обложку) показаны изменения температуры заготовки в процессе обработки в зависимости от основных параметров процесса обработки (скважности и частоты следования импульсов).

Как видно из графиков, изменение концентрации тепловой энергии в алюминиевом сплаве аналогично титановому сплаву. Это явление парадоксально ввиду того, что коэффициент удельной теплопроводности у алюминия на порядок больше, чем у титана, и почти в 3 раза больше, чем у стали. Для сравнения теплового воздействия на эти материалы в таблице приведены некоторые константы, полученные экспериментально и взятые из справочников [2].

Как видно из таблицы, у алюминиевого сплава очень высокий коэффициент удельной теплоемкости, который свидетельствует о том количестве тепловой энергии, которое нужно сообщить 1 г (кг) вещества для того, чтобы он изменил свою температуру на 1 °С (К). Все это свидетельствует о том, что процесс пробоя на алюминий и его сплавы имеет характерные особенности, вызывающие концентрацию тепловой энергии в зоне обработки. Логично предположить, что данный факт вызван влиянием материалов электрода на процесс пробоя, так как иные условия процесса обработки остаются постоянными для всех рассмотренных случаев.

Наиболее вероятная причина этой аномалии — искажение поля в промежутке "усами", образующимися из окисной пленки при разрушении ее во время разряда. Появление этих оксидных усов обосновано высокой химической активностью материала, а с учетом высокой температуры рас-

Теплофизические характеристики

Металл	$T_{пл}, °C$	$T_{исп}, °C$	$q_{пл}, Дж/г$	$q_{исп}, Дж/г$	$\lambda, Вт/(см \cdot К)$	$c, Дж/(г \cdot К)$	$\rho, г/см^3$
Al	660	2450...2494	396...400	10 850...10 900	2,09...2,20	0,90...0,94	2,7
Fe	1535	2735...2750	247...277	6265...6340	0,75	0,46	7,87
Ti	1660...1668	3260...3287	358...392	8970...9227	0,19...0,22	0,52...0,54	4,5

плавленного металла в зоне лунки, процесс образования уса из оксида алюминия занимает крайне малое время, что укладывается во временную картину всего пробоя. Предполагаемый период образования данного явления происходит во время релаксации межэлектродного промежутка (МЭП), который занимает достаточно большой период времени по меркам времени протекания самого разряда, порядка  $10^{-2}$  с.

В подтверждение этой теории также служит тот факт, что удельная теплота испарения у алюминия в 1,7 раза больше, чем у железа (стали). То есть при подаче в МЭП одинакового количества энергии за один импульс (например 1 Дж), в лунке на поверхности алюминия окажется большая доля расплавленного материала и меньшая в виде паров, чем в лунке на поверхности сплава, основой которого будет железо. А значит, при схлопывании газового пузыря, образованного в процессе разряда, и выбрасывании материала электрода в МЭП алюминий в жидкой фазе будет быстрее остывать благодаря своей высокой удельной теплопроводности и успеет создать оксидное образование.

Сходной окислительной способностью обладает и титан, однако из-за большого значения коэффициента удельной теплоемкости и низкого коэффициента теплопередачи количество разогретого, химически активного титана меньше, и размеры оксидного уса меньше. Соответственно, и вероятность оксидного образования значительно ниже, чем у пробоя на алюминиевый сплав.

Существование возможности подобного эффекта было предложено и рассмотрено в работе [4]. Исследованы многочисленные эффекты при пробое в жидких диэлектриках, в том числе и тех, что применяются в ЭЭО. В результате наблюдения за случаями пробоя при различных параметрах был сделан вывод, что образование оксидных усов предполагает наличие химически активного металла, типа жидкого диэлектрика, расстояния между электродами, диаметра канала, высокой напряженности приложенного внешнего поля при создании пробоя, достаточно высокой энергии импульса, реализованной в МЭП и др. При наличии этих условий образуются оксидные усы.

Анализ состояния электродов в процессе измерений показывает, что на алюминиевых и титановых электродах последующие разряды осуществляются, как правило, с кромок кратера, образующегося от первого пробоя. Образование кратеров на электродах из других материалов не вызывает образования усов и практически каждый последующий пробой происходит с нового участка поверхности электродов. Это явление наблюдалось

во всех экспериментах в условиях однородного или слабо неоднородного поля. С помощью экспериментов было выявлено, что от одного пробоя образуются кромки кратера, и на алюминиевых электродах осуществляются разряды с последующим образованием усов.

Для подтверждения данного предположения были проведены экспериментальные исследования на копировально-прошивочном электроэрозионном станке с адаптивным управлением модели 4Л721Ф1 с генератором импульсов ШГИ 40-440М (рис. 2, см. обложку). В качестве материала электрода использованы электрод из меди М1, а в качестве обрабатываемых материалов титановый сплав ОТ4 и алюминиевый сплав АК4, что и в работе [3].

В результате исследования было получено несколько закономерностей. Во-первых, при увеличении энергии импульса повышение тепловыделения на поверхности алюминиевого сплава происходит опережающими темпами, в то время как на рассматриваемом диапазоне энергий импульса при стальном электроде-заготовке наблюдалась зависимость практически линейного характера. Для титанового сплава наблюдалось опережение роста температуры над ростом энергии импульса только в самом конце доступного на станке диапазона мощности. Данный вывод практически полностью укладывается в предложенную теорию.

Во-вторых, частота следования импульсов, как правило, не оказывает ярко выраженного влияния на концентрацию тепловых явлений на электродах. Однако при любых значениях частоты следования импульсов температура на алюминиевом и титановом электродах была всегда выше в процессе обработки, чем на стальном. Предположительно частота следования импульса принципиально не влияет на образование оксидных усов, так как процесс их образования значительно меньше доступного на оборудовании времени между разрядами.

Дальнейшее исследование описанного явления возможно путем записи происходящего в межэлектродном пространстве с помощью высокоскоростной камеры высокого разрешения (до 100 000 кадров/с).

Исследования единичного импульса также проводили с использованием настольного прецизионного электроэрозионного копировально-прошивочного комплекса ДГТ-ЭП-03 и микроскопа Neophot 2 с максимальным увеличением  $\times 1000$ .

Данный вид исследований позволил удостоверить в наличии оксидных усов и определить



условия их возникновения и развития. Установлено, что расширение и сужение канала зависят от напряжения, а также временного интервала, т.е. при прекращении подачи напряжения расширение канала заметно уменьшается, и по истечении времени сужается из-за давления от жидкости, окружающей канал. Когда происходит охлаждение металла из-за высокой пластичности и химической активности, маленькие частички материала, особенно алюминия, окисляются и расплавляются в оксидные усы (рис. 3) [4]. По приближенным подсчетам длина усов может достигать нескольких миллиметров.

В результате исследований характеристик алюминия и титана можно сделать вывод о схожести процессов пробоя этих сплавов. Данные сплавы имеют отличия, так как при таких параметрах титана, как повышенная удельная теплота плавления и пониженная теплопроводность, не сможет нагреться большая поверхность материала, следовательно, оксидные усы не будут расти. Было выявлено, что незначительное изменение межэлектродного промежутка может существ-

венно повлиять на процесс обработки и конечный результат.

Расчет теплопроводности подтверждает, что обработка исследуемых материалов не совсем соответствует представленной выше теории. Тогда была выдвинута гипотеза о некоторых особенностях, сопутствующих процессу ЭЭО данных материалов. Предположительно сами усы содействуют последующему пробое за счет сокращения межэлектродного промежутка.

Температура алюминия и титана превышает температуру стали при обработке на тех же режимах. Такое явление для титана можно объяснить повышенными плотностью и теплоемкостью, пониженной теплопроводностью, которые приводят к образованию тепловой энергии в месте контакта материала с каналом разряда. А для алюминия данное явление не объяснено из-за того, что этот сплав имеет повышенную теплопроводность и пониженную теплоемкость, что должно способствовать теплоотводу от области обработки. Таким образом, механизм пробоя алюминия должен значительно отличаться от механизма пробоя титана.

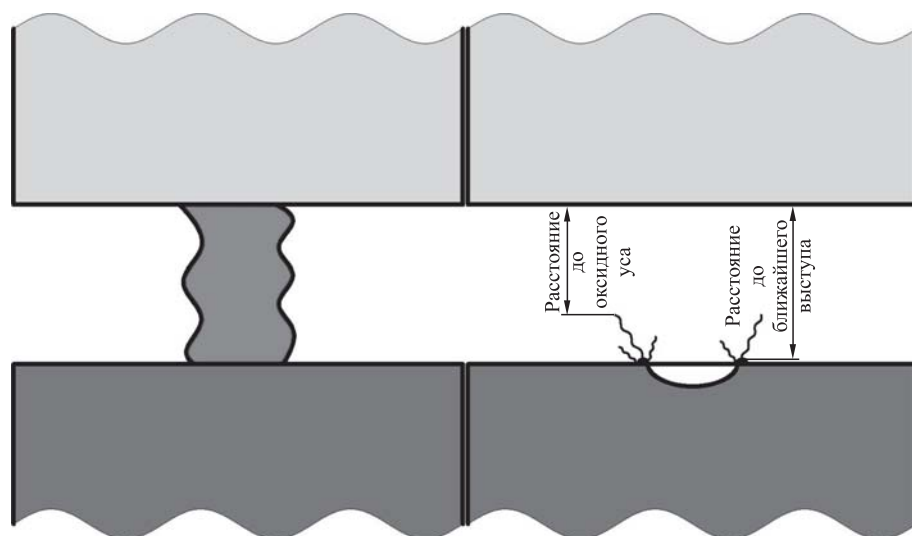


Рис. 3. Упрощенное представление пробоя на алюминиевый сплав

### Результаты исследования и их обсуждение

После того, как были получены и обработаны результаты обработки стали, алюминия и титана, авторами проведены исследования гипотезы на единичном импульсе. Пробой возникал между электродами с минимальной обработкой, но приближенной к условиям обработки.

На рис. 4 представлены фотографии с микроскопа при одном пробое из множества полученных на воздухе. Видно, что на краях лунки отсутствуют образования, которые влияют на процесс пробоя.

Были проведены исследования, в результате которых можно утверждать, что лунка в жидком диэлектрике имеет большее значение, чем на воздухе, при одних и тех же материалах. Рисунок 5 показывает результат пробоя алюминия, где в качестве диэлектрической

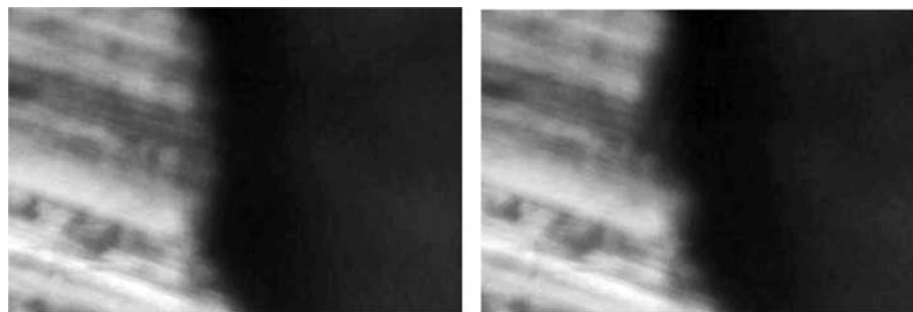
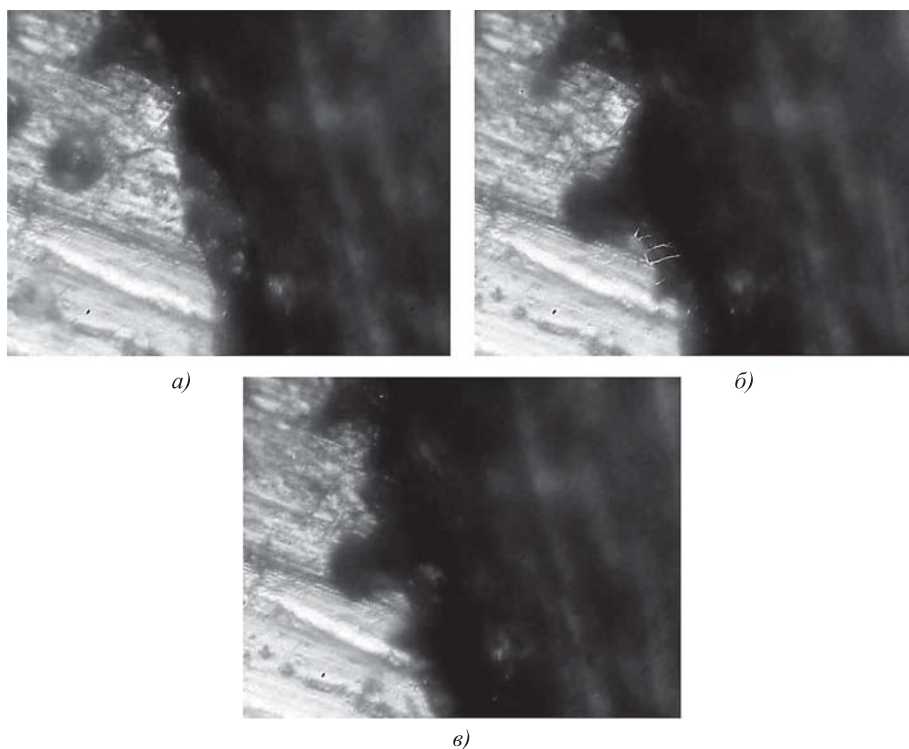


Рис. 4. Прохождение импульса между медным электродом-инструментом и алюминиевым электродом-заготовкой.  $\times 1000$



**Рис. 5. Пробой в жидком диэлектрике (электрод-инструмент — медь, электрод-заготовка — алюминий) ( $\times 1000$ ):**

*a* — до первого пробоя; *b* — после первого пробоя; *v* — после второго пробоя

жидкости использовали дистиллированную воду. На рис. 5, *b* заметны нитевидные образования, вероятно, что это и есть те самые усы.

По мнению авторов статьи, усы зависят от энергии импульсов, когда расстояние между электродами сокращается, и холостые импульсы переносятся в рабочий вид, зависят от объема возникающей лунки, от жидкости в межэлектродном пространстве, а также от электродов после пробоя. Однако на данный момент времени не получается выявить закономерности образования усов, так как на это образование влияет слишком много факторов.

### Выводы

1. Экспериментально доказано, что при обработке стали усы не образовались, так как пробой не провоцирует отклонения из-за низкой химической активности.

2. Обоснована возможность существования оксидных образований усов алюминия и титана,

также было сделано обоснование влияния единичного пробоя на весь процесс обработки целиком. Усы при обработке алюминия образовывались гораздо чаще, чем при обработке титана, так как химическая активность у титана ниже, хотя использовали одни и те же значения температуры, а также частички титана должны быть тяжелее у такого материала, как титан, следовательно, усы образуются реже.

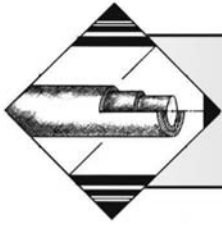
3. Образования из оксида алюминия получаются разной длины при разных режимах обработки. Экспериментально доказана малая вероятность появления оксидных образований при обработке титана.

4. В процессе эксперимента выявлены условия тепловых явлений на электродах-заготовках из трех материалов и разных режимах.

5. Выдвинута гипотеза об образовании нитевидных образований после пробоя, имеющих влияние на последующий пробой.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сарилов М.Ю., Линев А.С. Механизм электроэрозионного пробоя в воде на алюминиевые и титановые сплавы // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 6. Часть 6. С. 1349—1353.
2. Сарилов М.Ю., Линев А.С. Исследование процесса межэлектродного пробоя в жидком диэлектрике с целью повышения эффективности электроэрозионной обработки // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2013. № 2. С. 55—63.
3. Сарилов М.Ю., Линев А.С. Влияние процесса электроискрового разряда на эффективность электроэрозионной обработки алюминиевых и титановых сплавов // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2015. № 2. С. 57—65.
4. Сарилов М.Ю., Линев А.С. Повышение эффективности электроэрозионной обработки алюминиевых и титановых сплавов // *Металлургия машиностроения*. 2016. № 3. С. 52—59.



# ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

УДК 621.048.7

**В.Н. Сокольников, Г.А. Сухочев**

(Воронежский государственный технический университет),

**С.В. Усов**

(ООО "Технологические системы защитных покрытий", г. Москва),

**И.П. Точилин**

(Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, г. Москва)

E-mail: sokolnikovv@inbox.ru

## Исследование поверхностного слоя детали после комбинированного механоэлектрохимического процесса упрочнения

*Исследование посвящено разработке комбинированного метода механического и электрохимического упрочнения заготовок, анализу параметров поверхностного слоя деталей, обработанных предложенным способом, стендовым испытаниям образцов и определению оптимальных условий эксплуатации этого метода.*

**Ключевые слова:** зоны разупрочнения, лопаточная деталь, ресурс, комбинированное упрочнение микрошариками.

*The study is devoted to the development of combined method of mechanical and electrochemical hardening of workpieces, analysis of the parameters of the surface layer of parts processed by the proposed method, bench testing of samples and determination of optimal operating conditions for this method.*

**Keywords:** softening zones, blade part, service life, combined hardening by microspheres.

Специфика работы деталей, выполненных из конструкционных сталей типа 30ХН2МФА, 65С2ВА, 30ХГСА в условиях циклического усталостного изнашивания, требует применения мер, препятствующих зарождению поверхностных трещин, являющихся инициаторами разрушения [1—3]. Один из традиционных методов, препятствующих возникновению усталостных трещин, — дробеструйный обдув [3, 4]. Применение дробеструйного упрочнения связано со значительными деформациями поверхностей нежестких деталей сложной формы и значительным повышением шероховатости поверхности с увеличением времени обработки.

Для повышения долговечности деталей процесс упрочнения должен включать операцию удаления верхнего дефектного слоя при обеспечении максимального наклепа непосредственно в зоне вероятного усталостного разрушения. Для этого используют методы, обеспечивающие бесконтактное

удаление определенных объемов металла [5—8], в частности электрохимическое полирование (ЭХП).

Разработка комбинированного процесса упрочнения связана с исследованием механических свойств и параметров субструктуры, микротвердости, фазового состава материала по глубине упрочненного слоя. Кинетику дробеструйного упрочнения изучали путем оценки энергий деформации при фиксированной длительности обработки. Выбор дробеструйного упрочнения в сочетании с электрохимическим полированием основан на результатах проведенных механических испытаний.

Расчет объемной плотности накопленной энергии пластической деформации проводили на основании экспериментального определения плотности дислокаций методом рентгеноструктурного анализа субструктуры. Параметры субструктуры рассчитывали путем анализа физических уширений рентгеновских дифракционных линий (110) и (220) ОЦК-железа (табл. 1). Образ-

**Параметры субструктуры и остаточные напряжения в поверхностном слое образцов после различных видов обработки**

Вид обработки	Длительность обработки, с	Размеры блоков субструктуры, нм	Микроискажения, $10^{-4}$	Плотность дислокаций, $10^{12}$ , $\text{мм}^{-2}$	Остаточные зональные напряжения, МПа
<b>Сталь 30ХН2МФА, закалка и высокий отпуск</b>					
Дробеструйная обработка	—	60	19	4,0	–800
	240	70	31	5,4	–960
	300	83	33	6,5	–950
	360	68	35	5,5	–970
Дробеструйная обработка + ЭХП (пост.)	300 + 60	140	17	3,7	–1200
Дробеструйная обработка + ЭХП (имп.)	120 + 60	50	7,0	5,6	270
ЭХП (имп.)	120	200	25	0,4	0
Шлифование	—	18	30	4,0	–250
<b>Сталь 30ХН2МФА отожженная</b>					
Дробеструйная обработка	180	200	1,6	2,6	–387
	300	103	1,7	3,8	–390
Дробеструйная обработка + ЭХП (пост.)	300 + 180	295	1,6	2,5	–488
Дробеструйная обработка + ЭХП (имп.)	300 + 270	500	1,5	2,0	–488
	90 + 72	130	1,3	2,6	–485
ЭХП (пост.)	120	175	0,6	0,9	0
ЭХП (имп.)	120	85	0,4	1,4	0
Шлифование	—	65	1,0	1,4	–44
Обозначения: пост. — постоянный ток, имп. — импульсный.					

цы из закаленной и отожженной после прокатки стали 30ХН2МФА подвергали обработке стальной закаленной дробью и электрохимическому полированию. Рентгеновскую съемку осуществляли на дифрактометре УРС-50 со сцинтилляционной регистрацией дифрагированного монохроматизированного кобальтового излучения. При этом определяли зональные остаточные напряжения по относительному смещению линии (220) при нормальной и наклонной съемках [8].

Для оценки механических свойств в микрообъемах применяли метод измерения микротвердости вдавливанием алмазной пирамиды при нагрузке 1,9 Н на приборе ПМТ-3, обрабатывали данные по стандартной схеме (ГОСТ 9450—76). Также проводили испытания на ограниченную долговечность в условиях знакопеременного нагружения на копре повторного удара при энергиях 1,6; 2,2; 2,6 и 3,1 Дж. Испытания осуществляли на образцах прямоугольной формы размерами 10×10×55 мм с полукруглым надрезом в центральной части образца радиусом 2 мм, глубиной 2 мм из стали 30ХН2МФА, прошедших нормализацию (44...48 HRC). Длительность дробеструйного упрочнения и электрохимического полирования на импульсном и по-

стоянном токе изменялась от 60 до 500 с [8]. Для определения фрикционных свойств образцов, прошедших упрочнение различными методами (табл. 2), на машине трения проведены испытания с общим числом оборотов кольца 72 800 рад.

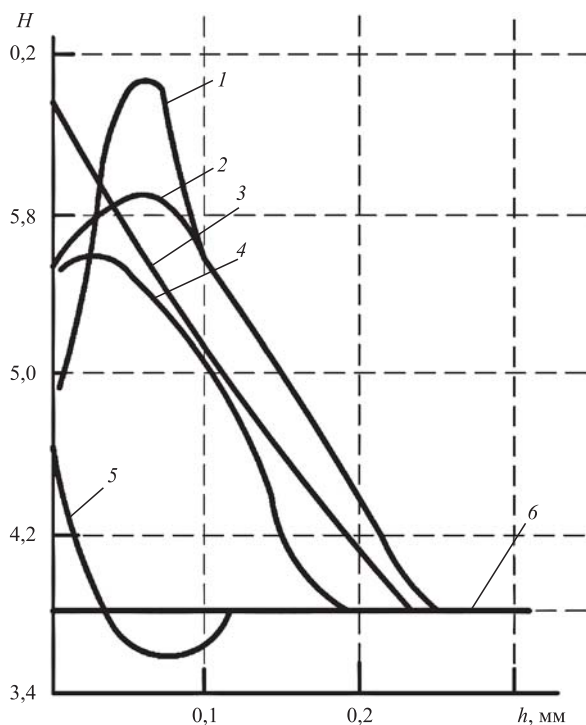
Таблица 2

**Значения абсолютного и относительного износа стали 30ХН2МФА**

Поверхностная обработка	Длительность обработки, с	Масса снятого металла $m_i \cdot 10^5$ , кг	$K = \frac{m_i}{m_{\text{эталон}}}$
Термообработка и шлифование (эталон)	—	24,23	1 (эталон)
Дробеструйная обработка	120	2,489	0,103
Электрохимическое полирование (пост.)	60	2,351	0,1405
Электрохимическое полирование (имп.)	60	25,39	0,9543
Дробеструйная обработка + ЭХП (пост.)	120 + 60	3,045	0,097

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что при обработке плотность дефектов кристаллической решетки в поверхностном слое возрастает. При этом происходит монотонное снижение размеров блоков, т.е. уменьшение доли объема бездефектных областей кристалла и увеличение упругих микроискажений в этих областях. В поверхностном слое формируются сжимающие остаточные напряжения, абсолютная величина которых растет со временем обработки до определенного предела (960 МПа), а затем начинает снижаться. Глубина слоя пластической деформации, определяемая по результатам измерения микротвердости, составляет для отожженной стали ~0,3 мм, а подслоный максимум располагается на глубине 0,1 мм от поверхности. У закаленных сталей глубина упрочнения не превышает 0,15...0,2 мм, а подслоный максимум твердости залегает на глубине 0,05 мм.

При меньших значениях припуска на операцию электрохимического полирования наблюдается снижение глубины залегания подслоного максимума твердости без ее существенного увеличения на поверхности (рис. 1). Максимальные значения



**Рис. 1. Распределение микротвердости по глубине слоя для стали 30ХН2МФА после закалки и отпуска:**

1, 2 — дробеструйная обработка; 3 — дробеструйная обработка + ЭХП (пост.); 4 — дробеструйная обработка + ЭХП (имп.); 5 — шлифование (эталон); 6 — ЭХП (пост.).  
Время обработки, с: 1 — 300; 2 — 180; 3 — 300 + 180; 4 — 120 + 90; 6 — 60

твердости после дробеструйного упрочнения на 50 % превышают значения в неупрочненной матрице. Наибольшие значения микротвердости в подслоном максимуме наблюдаются при дробеструйной обработке в течение 300...500 с. Уменьшение времени обработки дробью сопровождается снижением высоты подслоного максимума и приближением его к поверхности.

Комбинирование с электрохимическим полированием сопровождается повышением поверхностной твердости даже при снижении времени дробеструйной обработки до 90 с. Длительности дробеструйной обработки 90 с соответствуют максимальные значения поверхностной твердости при электрохимическом съеме поверхностного слоя в течение 72 с. Механическая обработка сопровождается наклепом, глубина которого не превышает 0,05 мм.

Результаты исследований показывают, что электрохимическое полирование отожженных образцов после дробеструйного упрочнения, независимо от толщины снимаемого слоя, сопровождается снижением плотности дислокаций и энергии деформации, ростом блоков и уменьшением микроискажений. Следовательно, подслоный максимум прочности не совпадает с положением максимума субструктурного упрочнения, расположенного около поверхности. Дробеструйное упрочнение сопровождается формированием блоков мозаичной структуры, размеры которых зависят от вида предшествующей обработки, марки стали и параметров режима упрочнения. Минимальный размер блоков в закаленных сталях 35...50 нм (для стали 30ХН2МФА после закалки и высокого отпуска — 180 нм), что в 2—3 раза превышает значения, соответствующие предельному измельчению 15 нм. С точки зрения повышения ограниченной долговечности — это благоприятный фактор, так как достижение максимального упрочнения сопровождается локальным превышением этого уровня с образованием микротрещин. При трении для отожженной стали значения предельного измельчения блоков составляют 75...100 нм (для отожженной стали 30ХН2МФА — 65 нм), т.е. уровень упрочнения поверхности ниже, чем после закалки и отпуска.

Уровень микроискажений  $(7,0...35,0) \cdot 10^{-4}$  для закаленной стали приближается к макроскопическим значениям прочности материала  $(50...55) \cdot 10^{-4}$ , но не превышает их. Для отожженной стали микроискажения не превышают  $3,4 \cdot 10^{-4}$  и находятся в упругой области. Следовательно, формируемые при упрочнении микроискажения не являются потенциальными источниками деструкции



материала в процессе эксплуатации. Значения плотности дислокаций имеют большой разброс  $(0,4...6,5) \cdot 10^{-12} \text{ мм}^{-2}$ . Максимальные значения наблюдаются на закаленной стали после упрочнения. Они близки к предельным значениям ( $\sim 10^{-12} \text{ мм}^{-2}$ ), соответствующим достижению энергии плавления  $Q_{\text{пл}}$  или разрушения решетки. По этому параметру субструктуры рассчитывается накопленная энергия деформации, которая достигает при оптимальной степени упрочнения  $0,4 Q_{\text{пл}}$ .

Электрохимическое полирование сопровождается увеличением размеров блоков, уменьшением микроискажений и плотности дислокации. Сжимающие остаточные напряжения как для закаленных, так и для отожженных образцов остаются на уровне достигаемых при упрочнении или возрастают на 25...30 %. Неизменность напряжений наблюдается при малом времени полирова-

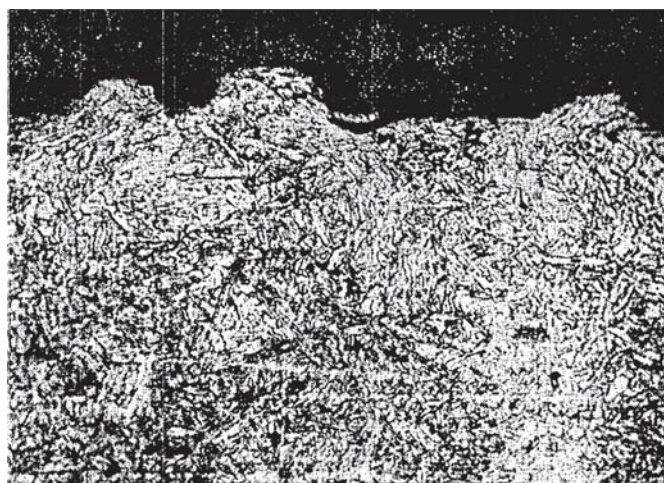
ния, до 120 с. Значения плотности дислокаций при этом укладываются в оптимальный интервал  $(4,5...5,5) \cdot 10^{-12} \text{ мм}^{-2}$  [9]. Размеры блоков примерно соответствуют формируемым при дробеструйной обработке, так же как и значения микроискажений и плотности дислокаций.

По параметрам субструктуры упрочнение, вызываемое шлифованием, несколько больше, чем после комбинированного процесса дробеструйной обработки с электрохимическим полированием, но отличается существенным снижением уровня сжимающих напряжений. В отдельных случаях наблюдаются неблагоприятные с точки зрения эксплуатационных характеристик растягивающие напряжения, которые формируются на образцах после закалки и отпуска. Шлифование после термообработки отрицательно сказывается на долговечности деталей. Электрохимическое полирование не вносит искажений в поверхностный слой. Остаточные напряжения близки к нулю и их наличие является результатом предшествующих операций. По параметрам субструктуры процессы на постоянном и импульсном токе равноценны.

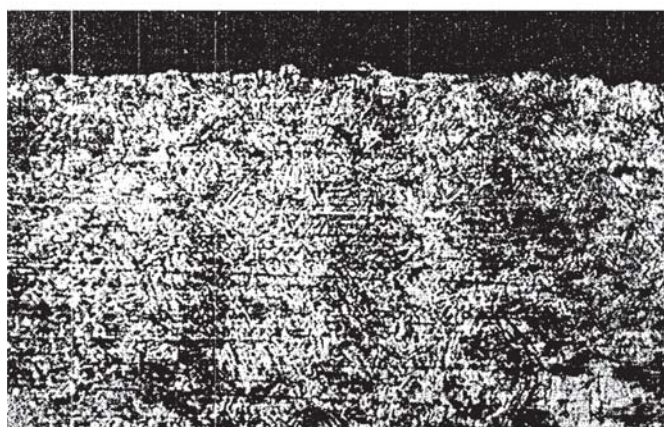
Тенденция к снижению энергии деформации после упрочнения и ЭХП наблюдается и на закаленных образцах, но она менее четко выражена. Причина заключается в меньшем влиянии дробеструйного упрочнения на субструктуру закаленной стали. В связи с этим неоднородности структуры, формируемые при термообработке, искажают распределение энергии, характерное для механического упрочнения. В отожженном состоянии структура представляет собой ферритоперлитную смесь: чередование светлых участков феррита с пониженной твердостью и темных, более твердых включений эвтектоидной смеси перлита.

После термообработки наблюдается мелкоструктурный мартенсит и продукты его распада: троостосорбит с размерами зерен менее 1 мкм. Поверхность после дробеструйной обработки имеет волнистый характер. На ней наблюдаются отдельные наплывы материала, представляющие собой расплюснутые заусенцы. Эти дефекты полностью устраняются ЭХП.

Наблюдаемые на фоне структуры матрицы следы поверхностной деформации (рис. 2, а) не превышают по глубине 0,02...0,3 мм. Следовательно, упрочнение за счет дробеструйной обработки распространяется глубже зоны выраженной текстуры и за счет последующей ЭХП может быть получено упрочнение без изменения структуры поверхностного слоя (рис. 2, б). Микропластическая деформация происходит в масштабе зерен без значительного течения материала в макрообъемах.



а)



б)

**Рис. 2. Микроструктура поверхностного слоя образцов из стали 30XН2МФА после закалки и высокого отпуска:** а — дробеструйная обработка; б — дробеструйная обработка + ЭХП (имп.). Время обработки, с: а — 300; б — 360 + 180

Отсутствие структурных изменений благоприятно сказывается на усталостных характеристиках материала [9–10]. Комплексный процесс упрочнения формирует изоструктурный поверхностный слой, положительно влияющий на долговечность деталей в условиях циклического нагружения. Результаты ударно-циклических испытаний свидетельствуют о благоприятном воздействии режимов поверхностного упрочнения на ограниченную долговечность.

Значение коэффициента живучести непосредственно связано с количеством запасаемой за один цикл нагружения энергии пластической деформации  $\Delta \epsilon_p$  и определяется из выражения:

$$\Delta \epsilon_p N^k = C,$$

где  $N$  — число циклов до разрушения;

$k$  — коэффициент живучести;

$C$  — величина деформирования (изменение линейного размера) для данного материала.

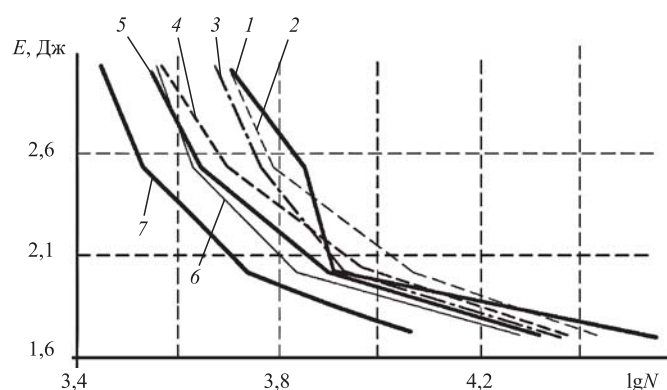
Если построить зависимость долговечности от энергии единичного удара в координатах  $E - \lg N$ , то ее можно аппроксимировать ломаной линией. Тангенс угла наклона прямой к оси ординат представляет собой живучесть образцов, %. Приведенные кривые свидетельствуют о том, что при энергии удара, равной 1,75...2,1 Дж, коэффициент живучести в несколько раз превышает соответствующие значения при энергии удара 2,5...3,0 Дж. При дробеструйном упрочнении коэффициент живучести в области малых энергий удара не зависит от длительности обработки и превышает соответствующее значение для процессов механической обработки с последующими термообработкой и шлифованием.

В области высоких нагрузок повышение длительности дробеструйного упрочнения свыше 360 с отрицательно сказывается на коэффициенте живучести. Зародыши микротрещин, возникающие при этом, являясь концентраторами напряжений, стимулируют процесс разрушения. В результате энергия пластической деформации, запасаемая материалом за один цикл нагружения, увеличивается, а коэффициент живучести снижается (рис. 3 и 4). Комбинированный процесс упрочнения практически не отражается на значении коэффициента живучести в области низких нагрузок по сравнению с дробеструйной обработкой без ЭХП, но существенно повышает его в диапазоне 2,5...3,0 Дж. В результате долговечность по сравнению с дробеструйным упрочнением увеличивается.

Повышение коэффициента живучести в области больших нагрузок свидетельствует об удалении

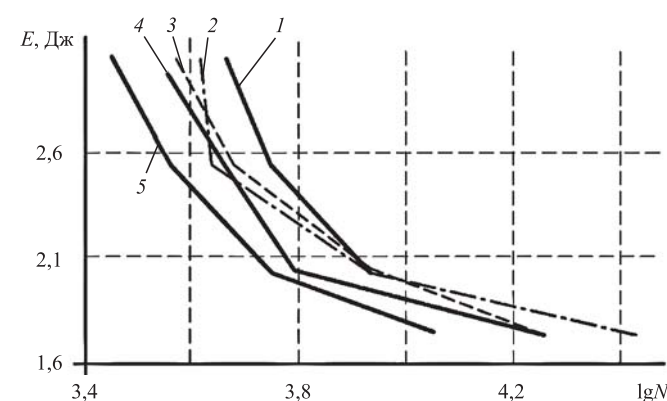
слоя деструктивной деформации, формируемого при дробеструйной обработке и, следовательно, об увеличении надежности деталей в ходе эксплуатации. Снижение уровня запасенной энергии пластической деформации в ходе ЭХП не сопровождается снижением коэффициента живучести в диапазоне энергий единичного удара 1,75...2,0 Дж. Наилучшие результаты по повышению коэффициента живучести и долговечности при малоцикловых нагрузках после ЭХП получены при обработке на постоянном токе. При равных средних уровнях долговечности минимальный уровень при комбинированном способе упрочнения на 15 % выше, чем при дробеструйном упрочнении.

Максимальная долговечность образцов достигается при комбинированных режимах упрочнения, когда длительность дробеструйной обработ-



**Рис. 3. Кривые Веллера для ударно-циклических испытаний образцов из стали 30XN2MFA (закалка и высокий отпуск):**

1, 2, 5 — дробеструйная обработка + ЭХП (пост.); 3, 4, 6 — дробеструйная обработка + ЭХП (имп.); 7 — шлифование. Время обработки, с: 1, 6 — 120 + 90; 2, 4 — 140 + 120; 3 — 360 + 120; 5 — 360 + 180



**Рис. 4. Кривые Веллера для ударно-циклических испытаний образцов из стали 30XN2MFA (закалка и высокий отпуск):**

1–4 — дробеструйная обработка; 5 — шлифование. Время обработки, с: 1, 3 — 240; 2 — 120; 4 — 360

ки в пределах 240...360 с, а электрохимического полирования 120...160 с. В случае дробеструйной обработки и электрохимического полирования в течение 120 и 72 с соответственно также достигается повышение долговечности образцов, значение которой лишь на 10...15 % уступает характеристикам, полученным при оптимальном режиме обработки. Однако снижение толщины наклепанного слоя ставит более жесткие ограничения на время ЭХП. В результате процесс упрочнения становится нестабильным, т.е. наблюдается большой разброс по долговечности образцов. Увеличение длительности электрополировки свыше 130 с во всех случаях значительно снижает эффект упрочнения, достигнутый при дробеструйной обработке.

Применение метода электрохимического полирования в сочетании с дробеструйным обдувом обеспечивает существенное увеличение надежности работы деталей машин в условиях циклического нагружения, износостойкость образцов после дробеструйного упрочнения выше, чем у шлифованных. Это объясняется более значительным искажением кристаллической решетки поверхностного слоя, оцениваемым по результатам измерений микротвердости и рентгеноструктурного анализа субструктуры. Положительный эффект достигается и в случае электрохимического полирования, так как при этом происходят сглаживание поверхности и снижение давлений, приводящих к смятию заусенцев и образованию контактных пятен схватывания. Сложение эффектов выглаживания поверхности и субструктурного упрочнения, а также повышение поверхностной твердости при комбинированном процессе обработки позволяют увеличить износостойкость образцов по сравнению со шлифованием и результативным применением операций дробеструйного упрочнения и электрохимического полирования.

### Заключение

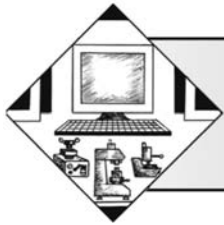
Сочетание дробеструйной обработки с последующим электрохимическим полированием дает возможность регулировать степень упрочнения поверхностного слоя, достигать максимальных значений твердости и сжимающих остаточных напряжений непосредственно на поверхности в активном слое. Результаты ударно-усталостных испытаний свидетельствуют о повышении надежности и долговечности образцов после дробеструйного упрочнения и электрохимического полирования как на импульсном токе, так и на постоянном. Износостойкость образцов после комбинированного упрочнения несколько уве-

личивается по сравнению со шлифованной поверхностью образцов и поверхностью образцов, подвергнутых дробеструйному обдуву. Длительность процесса электрохимического полирования выбирается в соответствии с условиями выравнивания микронеровностей и приближения к поверхности зоны наибольших значений твердости и остаточных напряжений. Комбинированный процесс создает благоприятный с точки зрения сопротивления материала усталостному разрушению поверхностный слой.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сухочев Г.А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях. Воронеж: ВГУ, 2003. 286 с.
2. Сухочев Г.А. Технологические методы повышения эксплуатационных показателей транспортных машин в экстремальных условиях // Техника машиностроения. 2005. № 3. С. 52—54.
3. Сухочев Г.А., Сокольников В.Н., Коденцев С.Н. Технологические аспекты балансировки высокооборотных роторов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. № 2 (316). С. 99—105.
4. Повышение усталостной прочности поверхностей сложного профиля / Г.А. Сухочев, В.П. Смоленцев, Н.К. Мешков, В.А. Пожидаев // Наука производству. 1999. № 10. С. 47—48.
5. Технологическое обеспечение качества лопаточных деталей с использованием наукоемких нетрадиционных методов обработки / Г.А. Сухочев, А.В. Капустин, Е.Г. Смольяникова, Д.М. Небольсин // Насосы. Турбины. Системы. 2011. № 1. С. 34—42.
6. Комбинированная обработка узких каналов деталей высоконапорных систем подачи / А.О. Родионов, Г.А. Сухочев, Д.В. Силаев, В.Н. Сокольников // Обеспечение качества продукции на этапах конструкторской и технологической подготовки производства: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ, 2014. Вып. 14. С. 87—92.
7. Сухочев Г.А., Силаев Д.В., Сокольников В.Н. Доводка узких каналов комбинированными методами // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр. 2015. Вып. 9. С. 4—14.
8. Сухочев Г.А., Сокольников В.Н., Коденцев С.Н. Технологические вопросы обеспечения качества динамической балансировки роторов // Воронежский научно-технический вестник. 2016. № 2 (16). С. 66—73. Режим доступа: [http://vestnikvgtu.ru/arhiv/2016/2/10\\_2\\_16\\_2016.pdf](http://vestnikvgtu.ru/arhiv/2016/2/10_2_16_2016.pdf) 9.
9. Сокольников В.Н., Сухочев Г.А., Коденцев С.Н. Технологические вопросы обеспечения качества динамической балансировки роторов // Проблемы и перспективы развития машиностроения: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф., посвященной 60-летию ЛГТУ: Липецк, 17—18 ноября 2016 г. Т. 1. Ч. 1. С. 238—244.
10. Сухочев Г.А., Сокольников В.Н. Технология балансировки высокооборотных роторов ЖРД // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр. 2016. Вып. 10. С. 27—39.





УДК 621.7-4; 62-192

**И.О. Романов**

(Министерство промышленности Хабаровского края, г. Хабаровск),

**Д.Г. Перваков**

(Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск)

E-mail: 8096472@mail.ru

## Формирование системы оценки качества и надежности упрочняющих материалов и технологий

*Предложен методологический подход к количественной оценке качества и надежности упрочняющих материалов и технологий.*

**Ключевые слова:** качество, надежность, материал, технологии.

*Methodological approach to quantitative assessment of the quality and reliability of strengthening materials and technologies is proposed.*

**Keywords:** quality, reliability, material, technologies.

Анализ литературных источников показывает, что техническая сторона работ по обеспечению качества и надежности выпускаемой продукции основывается на модернизации самого производства. При этом в работе [1] отмечено, что проблемы модернизации основных фондов предприятий напрямую связаны с вопросами производственной экономики. Основными затратами, по-прежнему, остаются расходы на поддержание оборудования и техники в исправном и рабочем состоянии за счет восстановления функционального назначения изношенных деталей, зависящего от степени организации ремонтного производства, используемых технологий, которые определяются из логических и эвристических представлений о различных способах преобразования энергии и материи, различных физических эффектов и их сочетаний, а также использования новых материалов.

Кроме того, оптимизация ремонтных воздействий в настоящее время связана с методологическими и методическими подходами к выбору технологий восстановления изношенных поверхностей.

Таким образом, при разработке новых материалов и технологий, а также при совершенствовании существующих, авторы стремятся обеспечить необходимые свойства детали для выполнения требуемых функций. При этом многие отмечают, что материалы и технологии для восстановления

изделий должны обладать высоким качеством и надежностью, определение которых носит субъективный характер.

В "классической теории" выбора материалов основным направлением считается определение долговечности детали как основного показателя надежности. Долговечность детали — продолжительность работы детали (узла) до полного разрушения.

Один из ведущих специалистов по теории надежности А.С. Проников говорит: "Надежность — это один из основных показателей качества изделий, проявляющийся во времени и отражающий изменения, происходящие в машине на протяжении всего времени ее эксплуатации". Сложившиеся к настоящему времени системы обеспечения надежности полное обоснование получили в работах Р.В. Кугеля, Д.Н. Решетова, Б.В. Гольда. Основу этих систем составляют физические исследования, лабораторные и эксплуатационные испытания материалов, деталей, узлов машин и механизмов. В качестве оптимальных принимаются решения, обеспечивающие максимальные физические показатели при приемлемых экономических затратах.

Профессор В.Г. Дажин отмечает, что надежность деталей, узлов и агрегатов реализуется за счет выбранных материалов. Соответственно, если надежность детали определяется надежно-

стью материала, следовательно, надежность материала должна определяться надежностью детали.

К сожалению, в настоящее время документы, регламентирующие определения и показатели надежности в области техники ГОСТ 27.002—2015, справочная и научно-техническая литература не дают четких математических определений показателей надежности деталей машин на стадиях изготовления и восстановления. При этом надежность в соответствии с ГОСТ 27.002—2015 — это комплексное свойство, которое в зависимости от назначения объекта или области его применения может включать в себя безотказность, ремонтпригодность, долговечность, сохраняемость или определенные сочетания этих свойств. Соответственно, говоря про надежность и качество материалов и технологий, необходимо рассматривать комплекс указанных выше свойств.

Наиболее полное описание формирования математических зависимостей единичных показателей надежности (безотказности, ремонтпригодности, сохраняемости, долговечности) отражено в работах [2, 3]. В статье приведена формула коэффициента сохранения эффективности как комплексного показателя надежности материала и технологий.

С экономической точки зрения коэффициент сохранения эффективности как показатель надежности оценивается затратами на замену отказавших деталей в процессе эксплуатации при реализации ресурса машины.

В связи с этим коэффициент сохранения эффективности детали определяется отношением

$$K_H = \frac{C_H}{C_H + N_{H.Э}(C_H + C_Э) + N_B(C_B + C_Э)}, \quad (1)$$

где  $K_H$  — коэффициент сохранения эффективности детали;

$C_H$  — стоимость новой детали;

$C_B$  — стоимость восстановленной детали;

$C_Э$  — стоимость замены детали в эксплуатации и убытки от простоя машины;

$N_{H.Э}$  — число новых деталей, заменяемых в эксплуатации;

$N_B$  — число восстановленных деталей, заменяемых в эксплуатации.

Введем понятие относительных затрат:

$$\alpha = \frac{C_B}{C_H}; \beta = \frac{C_Э}{C_H}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — относительная стоимость восстановления детали;  $\beta$  — относительные затраты на замену отказавшей детали в эксплуатации.

После преобразований с учетом [2, 3] окончательно имеем

$$K_H = \frac{1}{1 + \frac{(1 - K_{61})}{K_{6.Э}}(1 + \beta) \left\{ 1 + K_p K_c \left[ \frac{(\alpha + \beta)}{K_B(1 + \beta)} - 1 \right] \right\}}, \quad (3)$$

где  $K_{61}$  — показатель безотказности первоначально установленного элемента (детали);

$K_{6.Э}$  — средний показатель безотказности деталей, заменяемых в эксплуатации;

$K_B$  — коэффициент восстановления безотказности;

$K_p$  — показатель ремонтпригодности детали;

$K_c$  — показатель сохраняемости детали.

Одним из основных свойств материалов, определяющих ресурс детали, работающей в условиях ударно-абразивного трения (в качестве примера), является износостойкость. При этом, используя метод "сопоставления", определено, что износостойкость является частным случаем безотказности детали, соответственно, для определения данного единичного показателя надежности возможно использование подходов, определенных в работах [2, 3]. В то же время свойств, соответствующих другим единичным показателям надежности высокомарганцовистых деталей (ремонтпригодности, сохраняемости и долговечности), в нормативно-технической, научной и справочной литературе не приводится.

Таким образом, в дальнейшей работе для определения комплексного показателя надежности материала возможно и целесообразно использовать средние справочные значения единичных показателей ремонтпригодности и сохраняемости, а в качестве показателя безотказности применять значения коэффициента износостойкости детали.

При этом показатель безотказности первоначально установленной детали с учетом упрочнения износостойким материалом можно выразить, как

$$K_{61} = \frac{\bar{L}_1 K_{и}}{L_M}, \quad (4)$$

где  $\bar{L}_1$  — средняя наработка до отказа первоначально установленной детали;

$L_M$  — средний ресурс машины;

$K_{и}$  — коэффициент износостойкости материала, определяемый как отношение масс материала и эталона (в данном случае эталон из стали 110Г13Л) после испытаний за равный промежуток времени при равной нагрузке

$$K_{и} = \frac{M_M}{M_Э}. \quad (5)$$

В целях проведения оценки комплексного показателя надежности материала значения единичных показателей надежности представлены

в табличном виде (табл. 1). При этом в качестве исследуемого элемента выбраны коронки ковшей экскаватора, изготовленные из стали 110Г13Л методом литья массой 10 кг и при упрочнении рабочей поверхности в среднем 4 кг, производится замена 5 единиц комплекта до тех пор, пока адаптер ковша не выработает свой ресурс, который определяется его износом.

Анализ табл. 1 показывает, что для реализации ресурса адаптера ковша необходимо дважды менять коронку, что связано с затратами в эксплуатации.

Расчетные значения единичных показателей надежности с учетом повышения износостойкости представлены в табл. 2.

Таблица 1

**Расчет единичных показателей надежности коронки ковша экскаватора**

Единичный показатель надежности	Значение
$K_{б1}$	0,30
$\overline{K_{бэ}}$	0,23
$K_{в}$	1,00
$K_{р}$	0,38
$K_{с}$	0,89
$K_{д}$	0,54
Исходные данные: $\overline{L_{м}} = 120$ ч; $\overline{L_{н1}} = 36$ ч; $\overline{L_{нэ1}} = 32$ ч.	

Таблица 2

**Расчетные значения коэффициента надежности материала**

$K_{и}$	$\alpha$	$\beta$	$K_{б1}$	$\overline{K_{бэ}}$	$K_{р}$	$K_{с}$	$K_{в}$	$K_{н}$
—	—	—	0,3	0,23	0,38	0,89	1,0	0,196
0,50	0,5	0,5	0,15	0,13	0,09		0,56	0,090
1,10			0,33	0,223	0,263		1,24	0,224
1,15			0,345	0,218	0,352		1,292	0,230
1,20			0,36	0,213	0,679		1,348	0,244
1,25			0,375	0,208	0,756		1,4	0,254
1,30			0,39	0,203	0,76			0,260
1,35			0,4	0,2	0,88		1,49	0,270
1,40			0,42	0,373	1,02		1,57	0,470
1,45			0,435	0,382	1,11		1,629	0,530
1,50			0,45	0,4	1,23		1,68	0,595
1,55			0,465	0,41	1,34		1,74	0,670

Примечание. Значения  $\alpha$  и  $\beta$  выбраны с учетом практического опыта.

Анализ табл. 2 определяет увеличение надежности материала, обусловленную повышением его износостойкости. При этом до значения  $K_{и} = 1,4$  показатели надежности равнозначны, далее наблюдается их скачкообразное увеличение. Однако, учитывая, что показатели надежности определяются исходя из ресурса адаптера, соответственно, превышение значения  $K_{р}$  больше 1,0 нецелесообразно, поскольку его ресурс будет выработан на 100 % и, соответственно, потребуется замена адаптера. Таким образом, наиболее целесообразен с точки зрения надежности выбор материала, обеспечивающий повышение износостойкости детали в 1,4 раза.

Учитывая, что повышение износостойкости возможно и обусловлено дополнительными технологическими воздействиями, определяющими растворимость легирующих элементов (термообработка, электромагнитное и ультразвуковое перемешивание и т.п.) целесообразно провести оценку влияния технологии нанесения покрытия на надежность материала. В качестве технологии восстановления поверхности предложено использовать формирование покрытия при введении вспомогательной дуги косвенного действия (ВДКД) в качестве источника теплового и электромагнитного воздействий. При этом необходимо отметить, что основные этапы разработки указанной выше технологии отражены в работах [4, 5], обсуждены на различных конференциях, а в рамках данной работы будет проведена оценка влияния изменения технологии нанесения покрытия на надежность наносимого материала.

В процессе экспериментов установлено повышение износостойкости покрытия до 30 % по сравнению с исходным наплавочным материалом, увеличение твердости от 40 до 60 НRC в зависимости от режимов ВДКД без охрупчивания металла (ударная вязкость составляет 34...38 Дж/см<sup>2</sup>). Характер излома сформированного слоя во всех образцах мелкозернистый с преобладающей вязкой составляющей.

Используя результаты проведенных экспериментов, а также полученные значения износостойкости формируемых поверхностей, было принято решение о проведении анализа надежности разрабатываемого материала при изменении технологии его нанесения. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Увеличение значения  $\alpha$  с 0,5 до 0,7 обусловлено повышением стоимости восстановления в связи с дополнительными затратами на электроэнергию, вспомогательное оборудование и материалы (графитовые электроды). Ограничение значения  $K_{и}$  до 1,4 объясняется целесообразностью упрочнения первоначально установленной детали (коронки) по отношению к ресурсу машины (адаптера).

Таблица 3

**Расчетные значения коэффициента надежности материала с изменением технологии его нанесения**

$K_{и}$	$K_{и,дв}$	$\alpha$	$\beta$	$K_{б1}$	$\overline{K_{б,э}}$	$K_p$	$K_c$	$K_v$	$K_{н,дв}$
1,10	1,27	0,7	0,5	0,381	0,339	0,78	0,89	1,43	0,346
1,15	1,32			0,396	0,352	0,86		1,48	0,375
1,20	1,39			0,417	0,371	0,99		1,56	0,461
1,25	1,45			0,435	0,387	1,11		1,62	0,518
1,30	1,51			0,453	0,403	1,25		1,7	0,606
1,35	1,57			0,471	0,419	1,39		1,76	0,62
1,40	1,68			0,504	0,449	1,70		1,89	0,83
Примечание. Индекс "дв" — дополнительное воздействие.									

Изменение показателя износостойкости в пределах 16 %.

Анализ табл. 3 показывает, что при использовании дополнительного технологического воздействия при формировании покрытия, обусловленного повышением стоимости восстановления в пределах 20 % от стоимости без его применения, коэффициент надежности упрочняющего материала  $K_{н,дв}$ , соответствующий коэффициенту износостойкости  $K_{и} = 1,2$ , сопоставим с уровнем надежности материала с износостойкостью —  $K_{и} = 1,4$  (см. табл. 2) без дополнительного технологического воздействия. Кроме того, при данном уровне надежности и использовании указанной технологии ресурс адаптера реализуется на 99 %.

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет определить численное значение надежности упрочняющих материалов и технологий, учи-

тывать ресурс изделия в системе деталь—машина, а также сформулировать определение "надежность материала" — это комплекс свойств и характеристик, позволяющих обеспечить реализацию единичных показателей надежности изделия (безотказность, ремонтпригодность, сохраняемость, долговечность или их различные комбинации) при заданных режимах или определенных условиях эксплуатации.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Тимохова О.М. Анализ методов поверхностного упрочнения деталей лесных машин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2. № 2-2 (7-2). С. 89—93.
2. Стрельцов А.С., Романов И.О. Система оценок показателей надежности машин и диагностики экономической целесообразности восстановления и упрочнения деталей машины // Сварка и диагностика. 2016. № 5 (59). С. 30—35.
3. Романов И.О., Стрельцов А.С. Функционально математическое определение показателей надежности и установление зависимости комплексного показателя от единичных на стадиях изготовления и восстановления деталей, определяющих безотказность машины // Надежность. 2018. Т. 18. № 2. С. 10—16.
4. Повышение физико-механических свойств покрытий, формируемых при электротермических процессах за счет дополнительных технологических воздействий / И.О. Романов, В.М. Макиенко, Д.Г. Перваков и др. // Сварка и диагностика. 2017. № 3. С. 46—50.
5. Формирование износостойких поверхностей рабочих органов путевых машин / Д.Г. Перваков, Е.М. Баранов, И.О. Романов и др. // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2017. № 3. С. 21—25.



УДК 621.793

**М.А. Белоцерковский, А.П. Яловик, В.И. Жорник, В.А. Кукареко**  
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск)  
E-mail: mbelotser@gmail.com

## Разработка технологии восстановления штоков гидроцилиндров гиперзвуковой электрометаллизацией с последующим трибомодифицированием

*Исследована возможность повышения триботехнических характеристик покрытий, полученных гиперзвуковой металлизацией для восстановления штоков, за счет приработки покрытий в присутствии смазки с наноразмерными наполнителями.*

**Ключевые слова:** гиперзвуковая металлизация, псевдосплавные покрытия, смазки с наноразмерными наполнителями.

*The possibility for increasing of the tribotechnical characteristics of coatings obtained by hypersonic metallization for the restoration of rods due to the run-in of coatings with nanoscale fillers lubricant is studied.*

**Keywords:** hypersonic metallization, pseudoalloy coatings, nanoscale fillers lubricants.

### Введение

Анализ изнашивания элементов гидропривода строительного-дорожных машин показывает, что на его долю приходится около 45 % отказов от общего числа агрегатов, на долю гидроцилиндров — до 28 % от общего числа отказов. Одной из наиболее интенсивно изнашивающихся деталей гидроцилиндра является шток, по этой причине происходит около 31 % отказов [1].

Для восстановления штоков используются технологии гальванического хромирования, наплавки, плазменного и газопламенного напыления, электроискрового легирования. Авторами данной работы показана целесообразность и эффективность использования для этих целей процесса гиперзвуковой металлизации (ГМ) [2], определены режимы формирования покрытий распылением проволок из высокохромистых сталей [3, 4]. Расчеты прочностной надежности наносимых на шток покрытий по критерию прочности сцепления с деталью показали [5], что процесс гиперзвуковой металлизации полностью удовлетворяет условиям работы штоков.

**Цель работы** — изучение возможности повышения износостойкости наносимых на штоки стальных покрытий методом ГМ с использова-

нием приемов инженерии поверхности, таких как формирование псевдосплавов с повышенным количеством аустенитной фазы, а также трибомодифицирование, проходящее за счет приработки покрытий в присутствии пластичного смазочного материала с наноразмерными наполнителями.

### Свойства стальных покрытий после приработки в жидкой смазке с наноразмерным наполнителем

Покрытия наносили на установке гиперзвуковой металлизации АДМ-10, напыляемый материал — проволоки из сталей 06X19N9T, 40X13, 95X18, 12X18N10T. Для повышения прочности сцепления покрытий с основой наносили промежуточный слой напылением проволоки из сплава X20N80.

Как было отмечено в работах [6, 7], повышенная задиростойкость трибосопряжения, содержащего деталь с нанесенным распылением стальной легированной проволоки покрытием, обуславливается, в первую очередь, пластичностью материала покрытия в начальный период трения на стадии приработки и высокой износостойкостью, твердостью, маслоудерживающей способностью на стадии дальнейшей эксплуатации узла трения. Ре-

ализация подобного "эффекта самоупрочнения" в ходе приработки возможна, в частности, в случае формирования в сталях двухфазной структуры, содержащей метастабильный аустенит твердостью  $HV = 2000...3000$  МПа, а также при наличии определенного количества оксидов. В процессе приработки вследствие интенсивной пластической деформации метастабильный аустенит трансформируется в износостойкий и твердый мартенсит ( $HV = 7000...8000$  МПа) за счет протекания деформационного  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения [6, 7].

Для активации процесса приработки используют смазочные материалы, содержащие наноразмерные сверхтвердые добавки (например, нанораз-

мерные частицы алмаза или алмазно-графитовой шихты ША-А), которые в процессе трения, попадая в зону трибоконтакта, инициируют эффект трибомеханического модифицирования поверхностей трения [8]. Основными механизмами трибомеханического модифицирования являются: фазовые превращения (требуют наличия в поверхностных слоях метастабильных фаз); диспергирование зеренного строения поверхностного слоя вследствие интенсивной пластической деформации под воздействием сверхтвердых наноконструктивных компонентов смазочного материала и, как следствие, формирования в поверхностном слое наноразмерной ячеистой субзеренной структуры, характеризующейся повышенной износостойкостью [9].

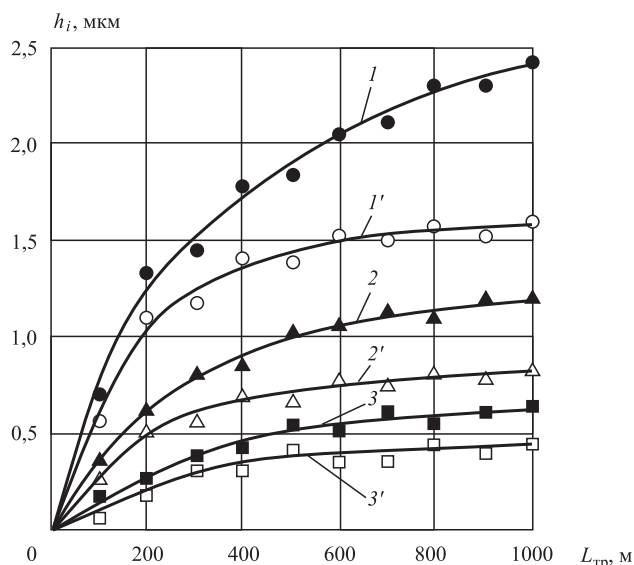
Учитывая большое содержание остаточного аустенита в напыленных покрытиях, были проведены исследования влияния процесса трибомеханического модифицирования на их износостойкость и структуру поверхностного слоя.

Исследовали зависимость линейного износа  $h_i$  от пути трения  $L_{тр}$  для покрытий из сталей 06X19H9T, 40X13, 95X18, испытанных в условиях граничного трения со смазками И-20А и И-20А + 1,0 % мас. ША-А при удельной нагрузке 5 МПа (рис. 1).

Установлено, что испытываемые покрытия характеризуются при выбранных условиях испытаний в смазке И-20А достаточно длительным периодом приработки, и стадия установившегося трения наступает после пути трения  $L_{тр} \approx 250...450$  м. На стадии установившегося трения интенсивность изнашивания покрытия из стали 06X19H9T составляет  $I_h = 3,7 \cdot 10^{-9}$ , из стали 40X13 —  $I_h = 1,82 \cdot 10^{-9}$ , из стали 95X18 —  $I_h = 1,53 \cdot 10^{-9}$ .

Добавка в смазку 1,0 % мас. алмазографитовой шихты ША-А ускоряет процесс приработки и снижает интенсивность изнашивания покрытий. Причем для выбранных условий испытаний оказалось, что чем тверже покрытие, тем меньше влияние на износостойкость оказывает добавка наноразмерных частиц.

Последующие триботехнические исследования были проведены при удельной нагрузке 30 МПа. В табл. 1 приведены результаты структурных исследований и измерения микротвердости поверхностей трения образцов газотермических покрытий после трения при удельной нагрузке  $p = 30$  МПа в среде немодифицированного и модифицированного добавками ША-А смазочного материала И-20А. В исходном состоянии (после механической шлифовки) параметр шероховатости поверхностного слоя покрытия из стали 95X18 составлял  $Ra = 39,8$  нм. Трение в стандартной смазке И-20А при высоком номинальном давлении (30 МПа) приводит к некоторому снижению количества



**Рис. 1.** Зависимости линейного износа от пути трения покрытий из сталей (граничное трение,  $p = 5$  МПа,  $v = 0,1$  м/с): 1, 1' — 06X19H9T; 2, 2' — 40X13; 3, 3' — 95X18; 1, 2, 3 — смазка И-20А; 1', 2', 3' — смазка И-20А + ША-А

Таблица 1

**Содержание остаточного аустенита  $V_\gamma$  и микротвердость  $HV_{0,01}$  поверхностного слоя покрытий из высокохромистых сталей после различных условий трения**

Материал покрытия	Условия испытаний	$V_\gamma$ , % об.	$HV_{0,01}$
06X19H9T	Исходное состояние	66	370
	Трение в смазке И-20А	65	530
	Трение в смазке И-20А + 1,0 % мас. ША-А	57	620
95X18	Исходное состояние	55	500
	Трение в смазке И-20А	47	650
	Трение в смазке И-20А + 1,0 % мас. ША-А	40	960

метастабильного аустенита ( $V_\gamma$ ) в поверхностном слое покрытий 06X19H9T и 95X18 и возрастанию их микротвердости. В процессе трения покрытия из мартенситной стали 95X18 регистрируется более интенсивное снижение в нем количества метастабильного аустенита, сопровождающееся более сильным возрастанием микротвердости поверхности по сравнению с покрытием из аустенитной стали 06X19H9T.

В покрытии из аустенитной стали 06X19H9T деформационно-активированное  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение при трении протекает менее глубоко вследствие повышенной стабильности легированного никелем аустенита, что приводит к менее существенному возрастанию микротвердости поверхностных слоев шлифованного покрытия.

В случае трения покрытия из стали 95X18 процессы фазового  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения при высокой удельной нагрузке в смазке с наноразмерным наполнителем ША-А протекают существенно интенсивнее, чем для покрытия из стали 06X19H9T. Пониженная устойчивость метастабильного аустенита в безникелевом высокохромистом покрытии приводит к заметному снижению содержания  $\gamma$ -фазы при трении. При этом существенно возрастает микротвердость поверхностного слоя покрытия, которая в случае испытаний в среде смазки И-20А + 1,0 % мас. ША-А составляет 960 HV 0,01. Высокое значение микротвердости поверхности трения покрытия связано, по-видимому, как с деформационно-активированным мартенситным превращением, так и с накоплением дефектов кристаллической решетки в  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фазах покрытия. Кроме этого, нельзя исключать, как и в случае стали 06X19H9T, возможность шаржирования при трении поверхностного слоя покрытия наноразмерными частицами ША-А.

Таким образом, при трении с относительно высокими удельными нагрузками ( $p = 30$  МПа) в смазке, модифицированной добавками ША-А, регистрируется возрастание диаметрических характеристик покрытия из стали 95X18 на 90 %.

Установлено, что при удельных нагрузках  $p > 40$  МПа смазочная композиция выдавливается из зоны трения, что приводит к резкому увеличению интенсивности изнашивания покрытия и появлению задиров.

### Свойства стальных покрытий после приработки в модифицированной наноразмерными наполнителями пластичной смазке

Для предотвращения выдавливания модифицированной наноразмерным наполнителем смазки из зоны трения было предложено использовать

пластичную смазку ИТМОЛ-150Н с алмазосодержащим пакетом добавок [10]. При этом наблюдался устойчивый процесс приработки напыленного покрытия, и в его поверхностном слое вследствие трибомеханического модифицирования формировалась, подобно описанной в работе [9], наноразмерная субструктура, характеризующаяся размером субзерен  $a_3 \leq 100$  нм. Далее представлены результаты отработки режимов трибомеханического модифицирования покрытий из стали 40X13 в присутствии пластичной смазки ИТМОЛ-150Н с алмазосодержащим пакетом присадок.

Исследование влияния длительности процесса трибовзаимодействия исследуемой пары трения на кинетику измельчения структуры поверхностных слоев покрытия показывает, что длительность периода стабилизации структурного состояния зависит от удельной нагрузки в трибоконтате. В частности, у покрытия из стали 40X13 при удельной нагрузке  $p = 50$  МПа замедление процесса измельчения субзерен происходит после  $L_{тр} = 200...300$  м пути трения, при удельной нагрузке  $p = 30$  МПа эта стадия наступает после пути трения  $L_{тр} = 800...1000$  м. При этом размер субзерен на стадии приработки для обоих случаев уменьшается от  $a_3 = 0,17...0,18$  мкм до  $a_3 = 0,06...0,07$  мкм (рис. 2).

Установлено, что при удельной нагрузке  $p = 10$  МПа окончание стадии приработки, фиксируемое до наступления стабилизации коэффициента трения, во всем исследованном диапазоне параметров шероховатости наблюдается после пути трения  $L_{тр} = 880...980$  м. При этом наблюдается слабая зависимость продолжительности приработки от исходной шероховатости поверхности, и значения пути приработки в этом случае мини-

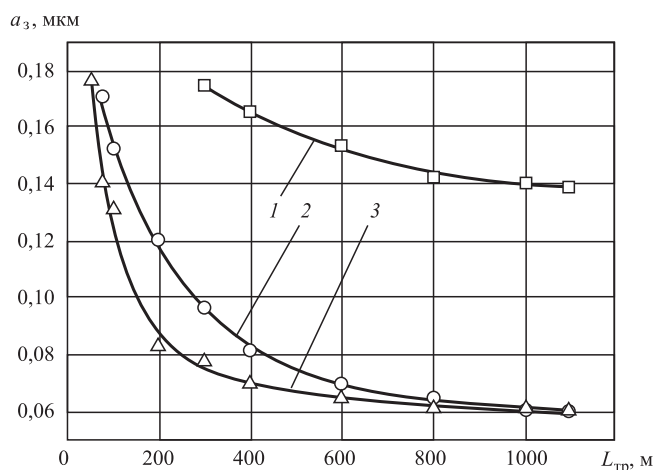


Рис. 2. Зависимости размера зерна  $a_3$  в поверхностном слое покрытия из стали 40X13 от пути трения  $L_{тр}$  при различных удельных нагрузках ( $C_a = 1,0$  % мас.,  $Ra = 1,25$  мкм) 1 —  $p = 10$  МПа; 2 —  $p = 30$  МПа; 3 —  $p = 50$  МПа



мальны при исходных параметрах шероховатости  $Ra = 2,5...5,0$  мкм. При повышении удельной нагрузки в зоне контакта до  $p = 30...50$  МПа длительность приработки существенно сокращается, и роль исходной шероховатости поверхности в процессах приработки резко возрастает.

Увеличение продолжительности приработки при большой исходной шероховатости поверхности и повышенных давлениях в зоне контакта обусловлено появлением разрывов в масляной пленке и возможностью металлического контакта, сопровождающихся явлениями схватывания, вырывов на поверхности покрытия, что дестабилизирует протекание процессов приработки пары трения.

Результаты проведенных испытаний пары трения покрытие—сталь У8 в среде смазки ИТМОЛ-150Н с различным содержанием ультрадисперсной алмазно-графитовой добавки ША-А (изменение концентрации в диапазоне  $C_a = 0,25...2,0$  % мас.) с оценкой интенсивности изнашивания за цикл испытаний ( $L_{тр} = 10\ 000$  м) и продолжительности стадии приработки, фиксируемой по моменту стабилизации коэффициента трения, представлены в табл. 2.

Анализ результатов, приведенных в табл. 2, показывает, что при удельной нагрузке в зоне трибоконтакта  $p = 10$  МПа интенсивность изнашивания несущественно зависит от количества модифицирующей алмазно-графитовой добавки в исследованном диапазоне ее концентраций. При этом наиболее высокие значения по износостойкости покрытия зафиксированы при концентрации ША-А, равной  $C_a = 1,50...1,75$  % мас., и интенсивность изнашивания в данном случае составляет  $I_h = (4,7...4,9) \cdot 10^{-9}$ .

Для удельной нагрузки  $p = 30$  МПа интенсивность изнашивания в большей степени зависит от концентрации шихты ША-А в смазочной композиции, а ее минимальное значение ниже, чем для случая удельной нагрузки  $p = 10$  МПа, и соответствует значениям  $I_h = (3,5...3,7) \cdot 10^{-9}$  при

$C_a = 0,75...1,0$  % мас. Для варианта приработки с  $p = 50$  МПа износостойкость ГМ-покрытия также существенно изменяется при варьировании концентрации модификатора при минимуме, равном  $I_h = (4,3...4,6) \cdot 10^{-9}$  при  $C_a = 0,50...0,75$  % мас.

Таким образом, по мере повышения удельной нагрузки при приработке от 10 до 50 МПа оптимальное содержание модифицирующей добавки в приработочной композиции снижается от  $C_a = 1,50...1,75$  % мас. до  $C_a = 0,50...0,75$  % мас. Введенная в состав смазочного материала наноразмерная алмазно-графитовая добавка способствует не только протеканию процесса трибомеханического модифицирования поверхности трения, но и повышает реологические свойства (несущую способность, коллоидную стабильность, температуру каплепадения и др.) самого смазочного материала [9, 10]. При этом относительно низкая износостойкость покрытия при удельной нагрузке  $p = 10$  МПа, вероятно, обусловлена недостаточным уровнем контактных напряжений в поверхностных слоях покрытия для полного протекания в них процесса трибомодифицирования. Для удельных нагрузок в диапазоне  $p = 30...50$  МПа повышенный износ в области концентраций модификатора ниже оптимального значения может быть связан с недостаточно высоким уровнем реологических характеристик смазочного материала для такого уровня нагрузок, что обуславливает выдавливание смазочного слоя из зоны трения и возникновение металлического контакта. Другой причиной увеличенного износа в этом случае может также быть незавершенность процесса трибомеханического модифицирования поверхности.

#### Разработка способа восстановления штоков модифицированными покрытиями из стальных псевдосплавов

В настоящее время широкое распространение получили технологии формирования материалов и покрытий из псевдосплавов (металлов с ограниченной взаимной растворимостью или вообще не образующих растворов), например, сталь—алюминий, сталь—бронза, молибден—графит. Подобным образом получают изделия с уникальными свойствами, а именно — высокой твердостью, износостойкостью и теплостойкостью, а также повышенным или пониженным значением коэффициента трения и т.д. [11].

Одним из возможных подходов к формированию композиционных газотермических покрытий, отвечающих принципу Шарпи (материал, отвечающий высоким требованиям по износостойкости, должен состоять из сплошной вязкой матрицы, в которой расположены твердые струк-

Таблица 2

#### Интенсивность изнашивания покрытия из стали 40X13 в присутствии смазки ИТМОЛ-150Н с различным содержанием шихты ША-А

Удельная нагрузка, МПа	Интенсивность изнашивания $I_h$ , $10^{-9}$ , при концентрации ША-А, % мас.							
	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
10	5,9	5,6	5,4	5,2	5,1	4,9	4,7	5,0
30	4,7	4,2	3,7	3,5	4,3	5,1	6,3	7,4
50	5,6	4,3	4,6	6,0	6,9	7,7	8,2	9,4



турные составляющие), может быть одновременное распыление стальных проволок аустенитного и мартенситного классов с получением стального псевдосплава. В предлагаемом к реализации технологическом варианте формирования стального псевдосплава частицы аустенитной стали будут образовывать вязкую коррозионно-стойкую матрицу, в которой на стадии приработки узла трения может быть реализован эффект трибомеханического модифицирования с формированием наноразмерной субзеренной ячеистой структуры, а частицы мартенситной стали образуют дисперсные включения с повышенным содержанием остаточного аустенита, в котором на начальной стадии эксплуатации будут протекать деформационно активируемые  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения с образованием твердых включений мартенсита деформации.

Исследовали структуру и свойства псевдосплава с повышенной коррозионной стойкостью, полученного гиперзвуковой металлизацией проволок из высокохромистых сталей мартенситного и аустенитного классов. Псевдосплав из проволочных сталей мартенситного класса 40X13 ( $d = 2,0$  мм) и аустенитного класса 12X18H10T ( $d = 1,6$  мм), наносился методом гиперзвуковой металлизации на режимах, определенных в работе [4]. Пористость псевдосплава, напыленного на пластины ( $50 \times 50 \times 5$  мм) из стали 45, составляла  $\approx 2...4$  % об. Химический состав распыляемых проволок и усредненный состав полученного покрытия представлены в табл. 3.

При гиперзвуковой металлизации проволок различного химического состава (40X13 и 12X18H10T) образуется покрытие, состоящее из напыленных частиц (отдельных частиц из мартенситной и аустенитной сталей, а также сплавленных частиц), имеющих разный химический состав. В частности, напыленные частицы псевдосплава могут иметь различное содержание углерода, хрома, никеля, железа и других легирующих элементов, что будет приводить к отличиям в их физико-механических свойствах. Фазовый состав псевдосплава включает в себя:  $\gamma$ -Fe (60 % об.),  $\alpha$ -Fe (15 % об.), оксиды  $Fe_3O_4$  и FeO (25 % об.). Повышенное количество аустенита в газотермическом псевдосплаве связано с особыми условиями формирования покрытий при напылении, в результате которых протекает изотермическая выдержка напыляемых слоев при температурах, превышающих интервал мартенситного превращения. Кроме этого, дополнительная термическая стабилизация аустенитной фазы в псевдосплаве обеспечивается высоким содержанием в нем никеля. Твердость напыленного псевдосплава составляет 370...380 HV 10, что близко к твер-

дости газотермического покрытия из аустенитной стали 06X19H9T.

Результаты триботехнических испытаний псевдосплава из высокохромистых сталей в условиях трения без смазочного материала представлены на рис. 3. Там же, для сравнения, приведены зависимости массового износа от пути трения для газотермических покрытий из сталей 40X13 и 06X19H9T.

Из графиков, представленных на рис. 3, следует, что износостойкость при сухом трении псевдосплава из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18H10T соответственно в  $\approx 3,8$  раза и в  $\approx 12,0$  раза выше, чем у покрытий из сталей 40X13 и 06X19H9T. При этом интенсивность массового изнашивания полученного гиперзвуковой металлизацией псевдосплава составляет  $\approx 1,2 \cdot 10^{-3}$  мг/м. В процессе фрикционного взаимодействия снижается содержание аустенитной фазы в поверхностных слоях псевдосплава до  $\approx 45$  % об., а его микротвердость возрастает до  $\approx 850$  HV 0,01. Высокая износостойкость псевдосплава из двух сталей 40X13 и 12X18H10T достигается за счет дефор-

Таблица 3

Химический состав напыляемых проволок и напыленного покрытия

Марка стали, покрытие	Содержание элементов, % мас.						Основа
	C	Cr	Ni	Ti	Mn	Si	
40X13	0,42	13,2	0,60	0,35	0,40	0,42	Основа
12X18H10T	0,12	18,3	10,1	0,80	2,00	0,80	
Покрытие	0,2...0,3	15,7	3,97	—	0,75	0,44	

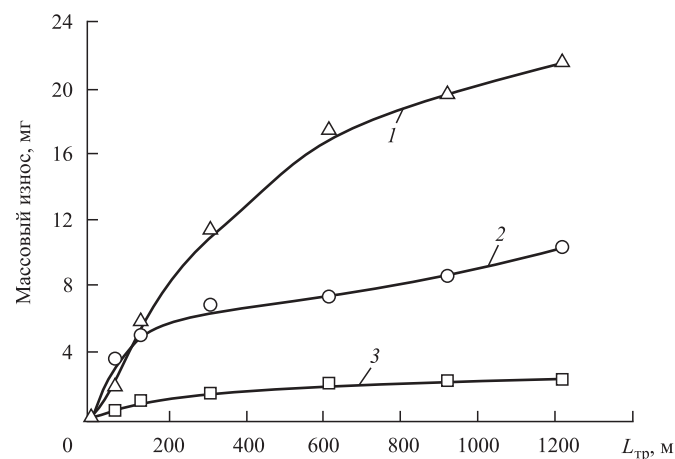


Рис. 3. Зависимости массового износа от пути трения для газотермических покрытий из сталей различных классов, а также псевдосплава из высокохромистых сталей: 1 — 06X19H9T; 2 — 40X13; 3 — псевдосплав 40X13 + 12X18H10T

мационно-активированного  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, протекающего в процессе трения в поверхностных слоях покрытия, а также за счет деформационного упрочнения  $\gamma$ -фазы и возможного ее насыщения азотом в процессе напыления. Кроме этого, повышенные триботехнические свойства псевдосплава обеспечиваются наличием в нем частиц из мартенситной стали 40X13, которые обуславливают более высокую прочность покрытия. В частности, для случая трения без смазочного материала покрытия из аустенитной стали 06X19H9T, содержащего близкое количество  $\gamma$ -фазы ( $\approx 68\%$  об.), регистрируется повышенный износ, обусловленный низкими прочностными свойствами напыленных частиц.

Анализ результатов многочисленных экспериментов показал, что для формирования покрытий с количеством остаточного аустенита 45...60 % необходимо чтобы в качестве материала одной из проволок использовалась высокохромистая сталь аустенитного класса с содержанием никеля не менее 10 %, в качестве другой проволоки — высокохромистая сталь мартенситного класса с содержанием углерода более 0,4 %, причем ее диаметр должен быть в 1,12—1,20 раза больше диаметра проволоки аустенитного класса [12].

Диапазон оптимальных значений концентрации наноразмерной алмазно-графитовой добавки и режимов приработки (удельная нагрузка, скорость скольжения, продолжительность) в присутствии наноконпозиционной смазки определяли на основе экспериментальных исследований. На рис. 4 представлены зависимости коэффициента трения от продолжительности приработки (пути трения) для газотермического покрытия 40X13 + 12X18H10T при скорости скольжения  $v = 0,25$  м/с и удельных нагрузках  $p = 40$  МПа

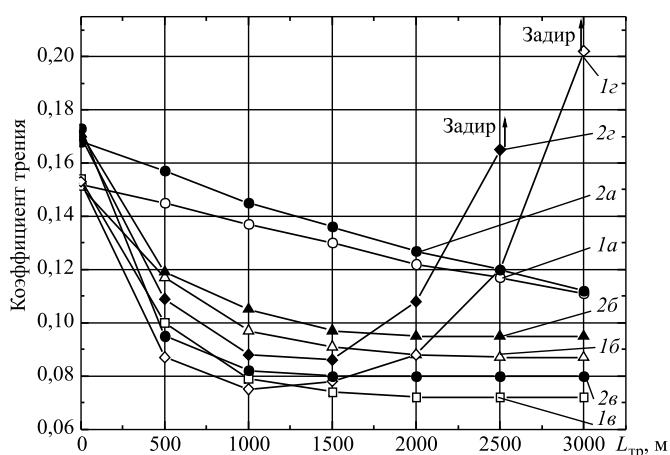


Рис. 4. Зависимости коэффициента трения от продолжительности приработки (пути трения) для покрытия 40X13 + 12X18H10T

(кривые 1а, 1б, 1в, 1г) и  $p = 50$  МПа (кривые 2а, 2б, 2в, 2г) с использованием пластичной смазки Литол-24, модифицированной алмазно-графитовой шихтой ША-А (размер частиц  $d_{\text{ч}} = 10...50$  нм) с различной концентрацией добавки:  $C_{\text{ША-А}} = 0,20\%$  мас. (кривые 1а, 2а),  $C_{\text{ША-А}} = 0,25\%$  мас. (кривые 1б, 2б),  $C_{\text{ША-А}} = 0,50\%$  мас. (кривые 1в, 2в),  $C_{\text{ША-А}} = 0,60\%$  мас. (кривые 1г, 2г).

Исследование влияния режимов трибомодифицирования на характер изменения свойств поверхности газотермического покрытия (твёрдость, коэффициент трения), а также продолжительность эволюции свойств поверхностного слоя покрытия (по пути трения) показало, что наиболее эффективно процесс трибомеханического модифицирования поверхности трения для исследованных газотермических покрытий проявляется в диапазоне удельных нагрузок  $p = 40...50$  МПа при скорости скольжения  $v = 0,2...0,3$  м/с. При этих режимах стабилизация коэффициента трения на уровне 0,07...0,09 наступает после приработки на пути трения  $L_{\text{тр}} = 1580...1860$  м, а твёрдость поверхностного слоя при этом увеличивается на 50...70 %.

В результате проведенных исследований предложен способ восстановления штоков гидроцилиндров [13], включающий гиперзвуковую металлизацию покрытий с последующим трибомодифицированием. Металлизацию осуществляют распылением двух стальных проволок, причем в качестве материала одной из проволок используют высокохромистую сталь аустенитного класса с содержанием никеля не менее 10 %, в качестве другой проволоки применяют высокохромистую сталь мартенситного класса с содержанием углерода более 0,4 %, причем ее диаметр в 1,12—1,20 раза больше диаметра проволоки аустенитного класса. В качестве смазочного материала выбирают пластичную смазку с числом пенетрации от 265 до 340, с содержанием алмазно-графитовой шихты  $C_{\text{ША-А}} = 0,25...0,50\%$  мас., имеющей размер частиц  $d_{\text{ч}} = 10...50$  нм, а приработку осуществляют при удельной нагрузке  $p = 40...50$  МПа и скорости скольжения  $v = 0,20...0,30$  м/с.

## Выводы

1. Исследования зависимости линейного износа от пути трения для покрытий из сталей 06X19H9T, 40X13, 95X18 в условиях граничного трения, со смазкой И-20А + 1,0 % мас. наноразмерных алмазно-графитовых частиц показали, что в процессе испытаний в поверхностном слое покрытий происходит деформационно-активированное фазовое  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение метастабильного аустенита в мартенсит. При этом регистрируется существенное возрастание дюрOMETрических

свойств поверхностных слоев покрытий из высокохромистых сталей (для стали 06X19H9T от 370 до 620 HV 0,01). Установлено, что добавка в жидкую смазку наноразмерной алмазграфитовой шихты ША-А ускоряет процесс приработки и снижает интенсивность изнашивания покрытий на 40...65 %.

2. При приработке стальных покрытий в присутствии пластичной смазки ИТМОЛ-150Н с алмазосодержащим пакетом добавок в поверхностном слое вследствие трибомеханического модифицирования формируется наноразмерная субструктура, характеризующаяся размером субзерен  $a_3 \leq 180$  нм, а длительность периода стабилизации структурного состояния и размер субзерен обратно пропорциональны удельной нагрузке в трибоконтакте. Введенная в состав смазочного материала наноразмерная алмазно-графитовая добавка ША-А способствует не только протеканию процесса трибомеханического модифицирования поверхности трения, но и повышает реологические свойства смазочного материала

3. Показана возможность получения псевдосплавных покрытий методом гиперзвуковой металлизации при одновременном распылении проволок из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18H10T. Установлено, что износостойкость псевдосплавных покрытий при сухом трении в 3,8 раза и в 12,0 раза выше, чем у покрытий из сталей 40X13 и 06X19H9T соответственно.

4. Для формирования покрытий с количеством остаточного аустенита 45...60 % необходимо, чтобы в качестве материала одной из проволок использовалась высокохромистая сталь аустенитного класса с содержанием никеля не менее 10 %, в качестве другой проволоки — высокохромистая сталь мартенситного класса с содержанием углерода более 0,4 %, причем ее диаметр должен быть в 1,12—1,20 раза больше диаметра проволоки аустенитного класса.

5. Предложен способ восстановления штоков, включающий гиперзвуковую металлизацию покрытий с последующим трибомеханическим модифицированием.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Шестопалов К.К.** Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. 8-е изд., стер. М.: Издательский центр "Академия", 2014. 320 с.
2. **Способ** гиперзвуковой металлизации и устройство для его осуществления: Евразийский патент № 024778, МПК В05В 7/18 / М.А. Белоцерковский, А.А. Дюжев, А.С. Прядко и др.
3. **Белоцерковский М.А.** Совершенствование оборудования и технологий высокоскоростной электро-

дуговой металлизации // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 11. С. 500—506.

4. **Белоцерковский М.А., Яловик А.П.** Использование гиперзвуковой металлизации при ремонте штоков гидроцилиндров // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. научных трудов. В 3 кн. Кн. 2. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки / редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) и др. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2016. С. 29—33.

5. **Белоцерковский М.А., Гоман А.М., Яловик А.П.** Оценка применимости газотермического напыления при восстановлении штоков гидроцилиндров по критерию адгезионной прочности покрытий при эксплуатационных нагрузках // Механика машин, механизмов и материалов. 2018. № 2. С. 48—54.

6. **Филиппов М.А., Гервасьев М.А., Никифорова С.М.** Использование остаточного аустенита для повышения абразивной износостойкости высокохромистых сталей // Актуальные проблемы в машиностроении. № 3. 2016. С. 434—439.

7. **О природе** формирования метастабильной аустенитной структуры при газотермическом напылении высокохромистой стали мартенситного класса 95X18 / В.А. Кукарко, А.Н. Григорчик, М.А. Белоцерковский, А.В. Сосновский // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 7. С. 318—322.

8. **Формирование** износостойких поверхностных структур и механизм их разрушения при трении в среде смазочного материала, модифицированного ультрасперсными алмазграфитовыми добавками. Ч. 2. Модель разрушения / П.А. Витязь, В.И. Жорник, В.А. Кукарко, А.И. Камко А.И. // Трение и износ. 2006. Т. 27. № 2. С. 196—200.

9. **Модифицирование** материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П.А. Витязь, В.И. Жорник, В.А. Кукарко, А.И. Комаров, В.Т. Сенють. Минск: Беларуская наука, 2011. 527 с.

10. **Химический принцип** модифицирования пластичных смазочных материалов наноразмерными добавками / В.И. Жорник, А.В. Ивахник, В.П. Ивахник, М.А. Бухтилова // Актуальные вопросы машиноведения: сб. научных трудов. Вып. 3. Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; С.Н. Поддубко и др. Минск, 2014. С. 282—284.

11. **Структурно-фазовое состояние** и триботехнические свойства псевдосплавов, напыленных из высокохромистых сталей и цветных металлов / В.А. Кукарко, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик, Е.В. Астрашаб, А.В. Сосновский // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Т. 15. № 8. С. 355—359.

12. **Особенности получения** покрытий из псевдосплавов методом гиперзвуковой металлизации / М.А. Белоцерковский, А.В. Сосновский, А.Н. Григорчик, А.П. Яловик, А.В. Дудан // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. 2018. № 11. С. 95—100.

13. **Евразийский патент № 032173.** Способ изготовления детали узла трения скольжения / М.А. Белоцерковский, В.И. Жорник, А.П. Яловик и др.



УДК 621.787

**К.С. Митрофанова**

(Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово)

E-mail: ks\_mitrofanova@inbox.ru

## Исследование патентной активности в области технологий отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием

*Представлены актуальные отечественные и зарубежные разработки в области технологий отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ОУО ППД). Приведены наиболее перспективные направления в области ОУО ППД.*

**Ключевые слова:** патентный анализ, интеллектуальная собственность, отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием, совмещение и комбинирование процессов обработки, сложнопрофильные инструменты.

*Actual domestic and foreign developments in the field of finishing and hardening treatment technologies by surface plastic deformation are presented. The actual methods and schemes of hardening are considered. The most promising areas in the field of surface plastic deformation are presented.*

**Keywords:** patent analysis, intellectual property, finishing and strengthening treatment by surface plastic deformation, combination and combination of machining processes, complex tools.

### Введение

В настоящее время среди методов отделочно-упрочняющей обработки (ОУО) широкое применение во многих отраслях промышленности имеет метод поверхностного пластического деформирования (ППД) шариками или роликами. Сущность метода заключается во взаимодействии деформирующего элемента (ДЭ) (ролика или шарика) с обрабатываемой поверхностью [1]. Методы ППД обладают рядом достоинств: отсутствуют термические дефекты в поверхностном слое деталей; возможность достижения минимального параметра шероховатости поверхности до  $Ra\ 0,1...0,05$ ; создание благоприятной формы микронеровностей с большей долей опорной площади; деформационное упрочнение поверхностного слоя; плавное и стабильное повышение микротвердости поверхности; возможность механизации и автоматизации процесса; сохранение целостности волокон металла и образование мелкозернистой структуры — текстуры металла поверхностного слоя [2].

Известно, что большинство автопроизводителей, включая General Motors LLC, Ford Motor

Company и Fiat Chrysler Automobiles (FCA), используют обкатывание, в том числе, для обработки коленчатых валов. Данная технология нашла применение в таких областях, как медицина (для упрочнения искусственных тазобедренных суставов, хирургических инструментов), в горношахтном машиностроении (упрочнение штоков и гильз силовых гидроцилиндров), в авиационной и аэрокосмической промышленности (например, поверхности лопаток турбины). Появилась необходимость в инструментах, позволяющих обрабатывать поверхности нестандартной формы, например, гидростатические упрочняющие инструменты для станков с ЧПУ. На сегодняшний день Ecoroll, Hegenscheidt-MFD, Ingersoll CM Systems of Midland, SPMS Supramatic, Yamato Machine & Tool, Cogsdill-Nuneaton, Yamasa Yazici Mac. являются крупными производителями станков и оснастки для ОУ ППД, поставляют узкоспециализированную продукцию во все глобальные производственные секторы и вкладывают значительные средства в развитие данной технологии.

Для исследования рынка разработок, оценки патентной активности и выявления тенден-

ций развития ОУО ППД проведен патентный анализ.

В предыдущие годы обзоры в данной области выполняли ведущие отечественные и зарубежные ученые: И.В. Кудрявцев [3], А.В. Киричек [4], В.Ю. Блюменштейн [5], В.М. Смелянский [6], С.А. Зайдес [7], I. Altenberger [8] и др.

Материалы статьи основаны на анализе доступных для автора источников — изобретений, представленных в базах данных патентной информации: ФИПС (Федеральный институт промышленной собственности); WIPO (World Intellectual Property Organization); EPO (European Patent Office); USPTO (United States Patent and Trademark Office).

### Патентный анализ изобретений в области отделочно-упрочняющей обработки ППД

Патентный поиск проводился в соответствии с Международной патентной классификацией (МПК) по следующим рубрикам: B21H3/04, B21H3/04, B21D22/16, B24H9/04, B24B39/00, B24B39/02, B24B39/04, B24B39/06, B24B1, B24D17, B24B31, B23P9/00 и др.; по ключевым терминам — поверхностное пластическое деформирование, выглаживание, совмещенное ППД, комбинированное ППД, обкатной ролик, устройство для выглаживания, deep rolling, burnishing, roller burnishing tool, burnishing head; по авторам, названиям учреждений и организаций. Глубина патентного поиска составила 10 лет (2009—2019 гг.).

Выявлено, что наибольшее число патентов в анализируемой области имеется в Китае. На рис. 1 приведена диаграмма распределения патентной документации в области ОУО ППД, построенная на основании 250 документов по базе данных WIPO. Несколько меньше патентов и заявок в данной области имеется в США. По количеству выданных патентов для ОУО ППД Россия зани-

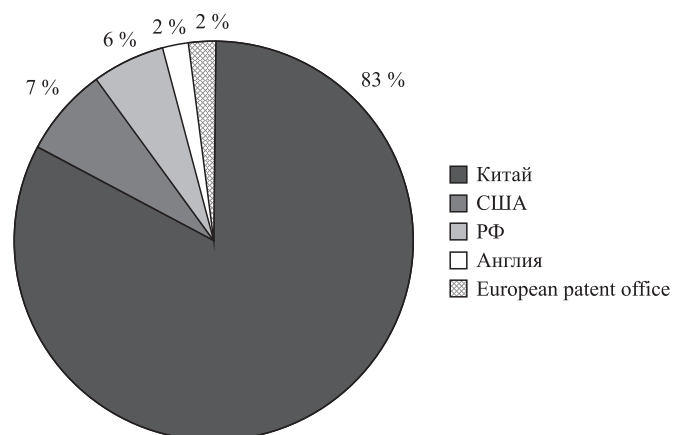


Рис. 1. Диаграмма распределения патентной документации в области ОУО ППД по странам (включая ЕРО)

мает 3-е место. Среди патентов ЕРО число заявок незначительно.

В табл. 1 представлено распределение патентной документации в области методов ППД по патентообладателям. Лидерами по числу патентов в области ОУО ППД являются: китайский технологический университет Zhejiang university of technology, китайское предприятие Shenzhen sapphire automation equipment Co. Ltd и китайская компания, занимающаяся исследованиями, разработками, производством и продажей защитных

Таблица 1

Распределение патентной документации по патентообладателям

Наименование патентообладателя	Число опубликованных патентов в области ОУО ППД
<b>Китай</b>	
Dongguan saide electromechanical equipment Co. Ltd	7
Henan moxi machinery manufacturing Co. Ltd	7
Chengdu ruikun technology Co. Ltd	8
Guangdong lxd robotics Co. Ltd	9
Shaoxingzhongya capsules industry Co. Ltd	11
Wenzhou longjia automation equipment Co. Ltd	11
Juhua machinery making Co. Ltd	13
Lens technology Changsha Co. Ltd	16
Shenzhen sapphire automation equipment Co. Ltd	16
Zhejiang university of technology	16
<b>США</b>	
General electric company	4
Hako Minuteman, Inc.	4
Natacme Co.	4
Sugino machine limited	5
Dickinson lawrence Co.	6
Hegenscheidt-MFD Gmbh & Co. KG	6
Hitachi global storage technologies Netherlands b.v.	6
Seagate Technology LLC	8
<b>Россия и страны СНГ</b>	
Хабаровский политехнический институт	6
Предприятие п/я р-6753	9
Могилевский машиностроительный институт	10
Предприятие п/я р-6930	13
Тольяттинский политехнический институт	15
<b>European patent office</b>	
3m innovative properties Co.	2
Alcantech & man Ltd	2
Wilhelm Hegenscheidt GmbH	3
Sugino mach	3
Surface technology holdings	3
Wilhelm Hegenscheidt Gesellschaft mbH	4
Genelectric	7
Hegenscheidt-MFD Gmbh & Co. KG	8
Ball burnishing mach tools	15

панелей для электронных продуктов Lens technology Changsha Co. Ltd.

Далее по числу патентов в заданной области идут Aluminum Company of America, Ball burnishing machtools (RBT), Hegenscheidt MFD GMBH & CO KG, Seagate Technology LLC, Тольяттинский политехнический институт.

Также имеется ряд российских и зарубежных патентообладателей, не приведенных в табл. 1, с относительно небольшим числом патентов, таких как The Boeing Company, Honda motor Co., Mitsubishi hitachi power sys., United Technologies Corporation, ALCOA INC., Ingersoll milling machine Co., Continental can Co., Nipponsteel & Sumitomo metal Corp., Kawasaki Steel Corporation, Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала, Московский государственный машиностроительный университет (ныне Московский политехнический университет), Иркутский национальный исследовательский технический университет, Самарский государственный аэрокосмический университет, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, АО "Элком-Нефтемаш", ФГУП "ФНПЦ "Прибор" и др.

Согласно основной группе МПК — В24В39/00 (Станки или устройства, в том числе вспомогательные, для обкатки в целях уплотнения поверхностного слоя) изобретения в области ОУО ППД можно разделить на следующие подгруппы: В24В39/02 — для обработки внутренних поверх-

ностей вращения; В24В39/04 — для обработки наружных поверхностей вращения; В24В39/06 — для обработки плоских поверхностей. Данные табл. 2 свидетельствуют о том, что 42 % изобретений основной группы МПК В24В39/00 принадлежит Китаю, на втором месте Россия — 35 % и оставшиеся 23 % принадлежат США.

На рис. 2 представлены распределения патентов ОУО ППД за 2009—2019 гг. Анализ рис. 2 и

Таблица 2

Динамика выдачи патентов ОУО ППД согласно основной группе МПК В24В39/00

МПК подгруппа	Год выдачи патента										
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
<b>Китай</b>											
В24В39/02	1	4	3	2	8	5	0	2	3	6	2
В24В39/04	4	8	6	7	2	2	6	9	17	7	1
В24В39/06	2	4	9	5	13	10	5	6	12	5	2
Всего											178
<b>Россия</b>											
В24В39/02	1	3	6	16	14	5	2	3	5	1	3
В24В39/04	3	9	15	19	5	8	5	0	5	4	0
В24В39/06	1	0	8	2	1	0	2	2	0	0	1
Всего											149
<b>США</b>											
В24В39/02	1	1	2	4	4	3	2	3	4	6	5
В24В39/04	1	2	4	4	5	3	8	7	6	1	3
В24В39/06	0	1	0	3	4	1	1	0	5	3	1
Всего											98

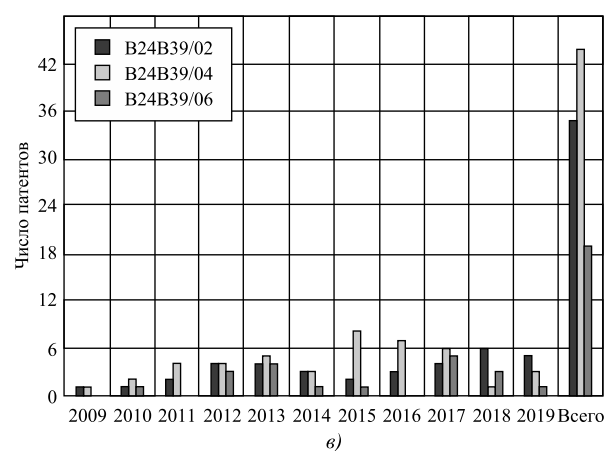
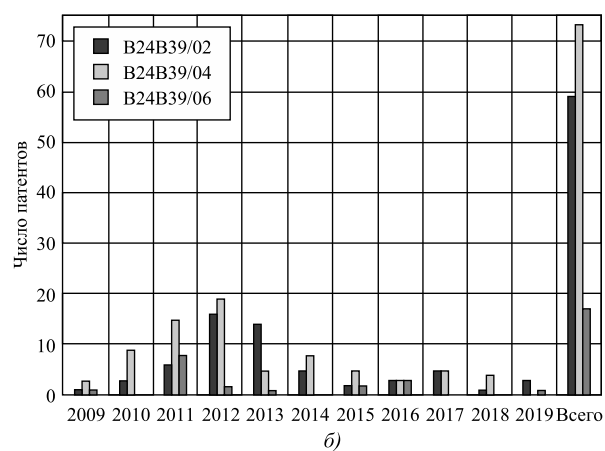
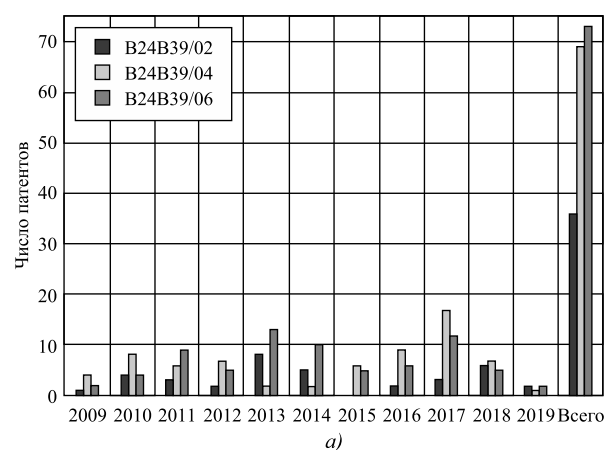


Рис. 2. Графики распределения числа патентов ОУО ППД по странам с 2009 по 2019 г.: а — Китай; б — Россия; в — США

табл. 2 показал, что наибольшее число выданных патентов (186) относится к подгруппе B24B39/04 (Станки или устройства, в том числе вспомогательные, для обкатки в целях уплотнения поверхностного слоя для обработки наружных поверхностей вращения).

Так, в России в период с 2009 по 2012 г. было выдано наибольшее число патентов на данную подгруппу. В Китае и США наибольшее число патентов, относящихся к подгруппе B24B39/04 (Китай — 69, США — 44), выдано в период с 2015 по 2017 г.

Средние количественные показатели (130 патентов) принадлежат подгруппе B24B39/02 (Станки или устройства, в том числе вспомогательные, для обкатки в целях уплотнения поверхностного слоя для обработки внутренних поверхностей вращения). Наибольшее число патентов в данной подгруппе выдано в России (59) в период с 2011 по 2013 г. В Китае и США в общей сложности выдан 71 патент.

Наименьшее число патентов (109) относится к подгруппе B24B39/06 (Станки или устройства, в том числе вспомогательные, для обкатки в целях уплотнения поверхностного слоя для обработки плоских поверхностей). Лучшие количественные показатели — 73 патента устройств для обработки плоских поверхностей принадлежат Китаю. В России и США в период с 2009 по 2019 г. в общей сложности выдано 36 патентов.

Наиболее часто патенты на изобретения в области ОУО ППД получали: проф. А.П. Бабичев и М.А. Тамаркин (ДГТУ, г. Ростов-на-Дону), проф. Ю.С. Степанов и А.В. Киричек (ОрелГТУ, г. Орел), проф. В.П. Смоленцев (ВГТУ, г. Воронеж), проф. А.Г. Суслов (БГТУ, г. Брянск), проф. С.А. Зайдес (ИрГТУ, г. Иркутск).

Также проведен анализ изобретений в области ОУО ППД по следующим подгруппам МПК:

— B21H1/22 изготовление изделий, имеющих форму тел вращения, с использованием фасонных роликов;

— B21H3/04 изготовление изделий винтовой формы или изделий, имеющих элементы винтовой формы, с помощью профилированных роликов;

— B23P9/02 механическая обработка или отделка поверхностей с калибровкой или без нее, главным образом, в целях повышения сопротивления износу или ударам, например выглаживание или придание шероховатости поверхностям турбинных лопаток или подшипников, обработка или отделка приложением давления, например накаткой;

— B23P9/04 механическая обработка или отделка поверхностей с калибровкой или без нее, главным образом, в целях повышения сопротивления износу или ударам, например выглаживание или придание шероховатости поверхностям

турбинных лопаток или подшипников, обработка или отделка ковкой или с использованием повторного давления.

Согласно данным ФИПС в России за последние 10 лет (2009—2019 гг.) общее число патентов по приведенным выше подгруппам составило 22. Наименьшее число патентов (4) принадлежит подгруппе B23P9/04. Среди остальных подгрупп число патентов также невелико и распределено равномерно.

По данным WIPO в Китае в подгруппе B21H1/22 выдано 117 патентов, наибольшее число патентов принадлежит Zhangjiagang hailuannular forgings Co. Ltd. 580 патентов находятся в подгруппе B21H3/04. Лидером среди патентообладателей является Wu Zhengwei. В подгруппе B23P9/02 зарегистрировано 1297 патентов. Наибольшее число патентов (28) принадлежит Shaoyang Geyi Precision Industry Technology Co. Ltd. 172 патента в подгруппе B23P9/04, лидером среди патентообладателей является Huawin electrical and mechanical technology Co. Ltd.

По данным WIPO в США наибольшее число патентов (232) находятся в подгруппе B21H3/04, среди патентообладателей 21 патент принадлежит Landis machineco. На втором месте следует подгруппа B23P9/02 (230 патентов), из них 20 принадлежат Fatigue Technology, Inc. Далее идут подгруппы B21H1/22 (91) наибольшее число патентов (8) принадлежит Republic steel corp. и Witherow steel company, а также B23P9/04 (77 патентов), лидером среди патентообладателей является Stresswave, Inc.

## Выводы

По мнению автора, метод ОУ ППД развивается в ряде таких направлений, как:

— разработка комбинированных и совмещенных технологий ОУО ППД, основанных на использовании различных по физической сущности методов упрочнения [9—13];

— расширение сфер применения и создание новых конструкций деформирующих инструментов и устройств [14—16];

— внедрение новых схем технологического управления напряженно-деформированным состоянием поверхностного слоя обрабатываемых деталей в целях достижения определенного эффекта, в том числе, интенсификации напряженно-деформированного состояния с помощью специальных сложнопрофильных инструментов [17—21].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 18296—72. Обработка поверхностным пластическим деформированием. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1973. 10 с.



2. **Энциклопедия** поверхностного пластического деформирования / под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во Иркутского нац. исследовательского технического ун-та, 2015. 395 с.
3. **Кудрявцев И.В.** Современное состояние и перспектива развития методов повышения прочности и долговечности деталей машин поверхностным пластическим деформированием (ППД) // Повышение прочности и долговечности деталей машин ППД. 1970. № 90. С. 5—14.
4. **Киричек А.В., Бабичев А.П., Блюменштейн В.Ю.** Современные конкурентоспособные технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием // Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 5. С. 47—52.
5. **Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А., Махалов М.С.** Современные конкурентоспособные технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием // Фундаментальные проблемы техники и технологии. 2012. № 2 (3). С. 9—16.
6. **Смелянский В.М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 299 с.
7. **Зайдес С.А.** Новые способы поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей машин // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 3. С. 129—139.
8. **Altenberger I.** Deep Rolling — the Past, the Present and the Future // 9<sup>th</sup> International Conference on Shot Peening (ICSP 9). 2005. P. 144—155.
9. **Довгалев А.М., Близинок С.Н.** Комбинированная обработка резанием и поверхностным пластическим деформированием шеек валов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. 2009. № 8. С. 154—159.
10. **Ярославцев В.М.** Резание с опережающим пластическим деформированием в технологиях утилизации металлической стружки // Наука и образование. Научное издание МГТУ имени Н.Э. Баумана. 2013. № 7. С. 79—90.
11. **Ярославцев В.М., Ярославцева Н.А.** Способ исследования больших пластических деформаций // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2016. № 4 (109). С. 71—80.
12. **Егорушкин Е.А., Беспалов Р.А.** Повышение износостойкости деталей квазикристаллическим покрытием и поверхностным пластическим деформированием // Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике: сборник научных трудов международной научно-технической конференции. Московский технологический университет, Физико-технологический институт, 2016. С. 253—255.
13. **Пат. 2355826 РФ, МПК C25D5/22.** Способ комбинированной обработки деталей / В.Н. Беляев, Е.Н. Беляев; патентообладатель ЗАО "Алтайгражданпроект". № 2007118315/02; заявл. 16.05.2007; опубл. 20.05.2009, Бюл. № 14. 8 с.
14. **Пат. 2240196 РФ, МПК 7B21H5/00.** Способ продольного многопроходного накатывания профилей на валах / Г.Д. Федотов, Ю.Б. Дриз, М.М. Бадыков, В.Н. Желнов; заявитель и патентообладатель Ульяновская ГСХА. № 2003107068; заявл. 14.03.2003; опубл. 20.11.2004, Бюл. № 32. 5 с.
15. **Трегубов В.И., Ларин С.Н., Ремнев К.С., Осипова Е.В.** Силовые режимы операции ротационной вытяжки трубных заготовок по трехроликовой схеме пластического деформирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 5. С. 44—51.
16. **Пат. 2354715 РФ, МПК C21D7/06, B23P9/00.** Способ упрочнения деталей из конструкционных материалов / В.А. Клименов, Ж.Г. Ковалевская, К.В. Зайцев и др.; патентообладатель ГОУ ВПО ТПУ. № 2007148749/02. Заявл. 24.12.2007; опубл. 10.05.2009, Бюл. № 13. 10 с.
17. **Пат. 2673896 РФ.** Ролик обкатной / С.А. Зайдес, А.В. Колесник. Заявл. 16.03.2017; опубл. 03.12.2018, Бюл. № 34. 9 с.
18. **Пат. 530600 РФ.** Ролик обкатной двухрадиусный / В.Ю. Блюменштейн, А.А. Кречетов, М.С. Махалов, О.А. Останин; № 2013135794/02. Заявл. 30.07.2013; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 28 (II ч.). 7 с.
19. **Пат. 2529335 РФ.** Ролик обкатной комбинированный / В.Ю. Блюменштейн, А.А. Кречетов, М.С. Махалов, О.А. Останин; № 2013135796/02. Заявл. 30.07.2013; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27. 6 с.
20. **Пат. 2557377 РФ.** Ролик обкатной мультирадиусный / В.Ю. Блюменштейн, А.А. Кречетов, М.С. Махалов, О.А. Останин. Заявл. 20.07.2015; опубл. 27.05.2016, Бюл. № 27. 6 с.
21. **Пат. 76462 UA, МПК B24B39/00.** Ролик для обкатывания металлических деталей / О.В. Сердюк, Т.В. Ярошенко. Заявл. 14.05.2012; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1. 4 с.

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

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

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

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

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

Сдано в набор 01.10.2019 г. Подписано в печать 28.11.2019 г. Формат 60×88 1/8.

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

Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49

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

Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)