

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 2 (110)
Февраль
2014

Издается с января 2005 г.

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

Председатель редакционного совета

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

Заместитель главного редактора

д.ф.-м.н., проф.
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Заместители председателя редакционного совета:

д.т.н., проф.
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН

д.т.н., проф.
А.В. КИРИЧЕК

д.т.н., проф.
О.В. ЧУДИНА

Редакционный совет:

Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.

А.П. БАБИЧЕВ, д.т.н., проф.

В.П. БАЛКОВ, к.т.н.

В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.

А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.

А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.

С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.

В.А. ЗЕМСКОВ, к.т.н.

С.А. КЛИМЕНКО, д.т.н., проф.

Ю.Р. КОПЫЛОВ, д.т.н., проф.

В.А. ЛАШКО, д.т.н., проф.

В.А. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., проф.

В.В. ЛЮБИМОВ, д.т.н., проф.

Е.Д. МАКАРЕНКО

Б.Я. МОКРИЦКИЙ, д.т.н., проф.

Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д.т.н., проф.

Х.М. РАХИМЯНОВ, д.т.н., проф.

Б.П. САУШКИН, д.т.н., проф.

В.П. СМОЛЕНЦЕВ, д.т.н., проф.

А.М. СМЫСЛОВ, д.т.н., проф.

Г.А. СУХОЧЕВ, д.т.н., проф.

В.П. ТАБАКОВ, д.т.н., проф.

В.А. ШУЛОВ, д.ф.-м.н., проф.

М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

Редакция:

Л.П. ШЕСТОПАЛОВА

Т.В. ПАРАЙСКАЯ

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

E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

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

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Камалетдинова Р.Р., Мамлеев Рус.Ф., Мамлеев Раф.Ф., Чертовских С.В., Шустер Л.Ш. Вопросы применения керметов на основе карбида титана в трубопроводной запорной арматуре 3

Мозгов С.А., Саушкин Б.П., Моргунев Ю.А., Лобода А.А. Электрохимическая отделочная обработка изделий из сплава ЭП-741НП 6

МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Кузнецов В.А., Щедрин А.В., Гаврилов С.А., Воронков В.И., Мельников Э.Л. Теоретические и экспериментальные исследования охватывающего поверхностного пластического деформирования в условиях применения металлоплакирующих смазочных материалов. 11

Сорокин В.М., Танчук С.С., Михеев А.В., Зотова В.А., Тудакова Н.М., Берглезов В.В. Теоретико-экспериментальное обоснование нового совмещенного процесса комбинированной обработки поверхностей трения резанием, ППД и воздействием напорных струй технологических жидкостей. 18

ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Лялякин В.П., Аулов В.Ф., Иванайский В.В., Кривочуров Н.Т., Коваль Д.В., Ишков А.В. Особенности индукционной наплавки длинномерных почвообрабатывающих органов сельхозтехники 23

Макиенко В.М., Верхотуров А.Д., Романов И.О., Строителей Д.В. Исследование изменения фазового и химического составов концентратов минерального сырья при воздействии на них дуговых разрядов 27

ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Степанов И.Б., Прибытков Г.А., Фирсина И.А., Иванов Ю.Ф. Нитридные покрытия, полученные вакуумно-дуговым испарением порошковых катодов Ti-Al, Ti-Al-Si 33

ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ

Нафиков М.З., Сайфуллин Р.Н., Зайнуллин А.А. Свойства покрытий, полученных электроконтактной приваркой присадочного материала из стальных проволок 38

Хромов В.Н. Влияние упрочнения деталей на дорожно-транспортные происшествия транспортных средств при их эксплуатации на примере восстановления гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания 44

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

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

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 2 (110)
February
2014

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. BEZYZYCHNYI

Editorial Assistants

Dr of Phys. Math. Sci.
V.Yu. FOMINSKY

Chairman Assistants:

Dr of Eng. Sci.
V.Yu. BLUMENSTEIN

Dr of Eng. Sci.

A.V. KIRICHEK

Dr of Eng. Sci.

O.V. CHUDINA

Editorial council:

Yu.P. ANKUDIMOV

A.P. BABICHEV

V.P. BALKOV

V.M. BASHKOV

A.I. BELIKOV

A.I. BOLDYREV

S.N. GRIGORIEV

V.A. ZEMSKOV

S.A. KLIMENKO

Yu.R. KOPYLOV

V.A. LASHKO

V.A. LEBEDEV

V.V. LYUBIMOV

E.D. MAKARENKO

B.Ya. MOKRITSKY

F.I. PANTELEENKO

H.M. RAHIMYANOV

B.P. SAUSHKIN

V.P. SMOLENTSEV

A.M. SMYSLOV

V.A. SHULOV

G.A. SUHOCHEV

V.P. TABAKOV

M.L. KHEIFETS

Edition:

L.P. SHESTOPALOVA

T.V. PARAYSKAYA

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

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

CONTENTS

➔	GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING	
	Kamaletdinova R.R., Mamleyev Rus.F., Mamleyev Raf.F., Chertovskikh S.V., Shuster L.Sh. The application of cermets based on titanium carbide in the pipeline shut-off valves	3
	Mozgov S.A., Saushkin B.P., Morgunov Yu.A., Loboda A.A. Electrochemical finishing machining of products from alloy EP-741NP	6
➔	MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING	
	Kuznetsov V.A., Shchedrin A.V., Gavrilov S.A., Voronkov V.I., Mel'nikov E.L. Theoretical and experimental researches of encompassing superficial plastic deformation method in conditions of using of metal-cladding lubricants	11
	Sorokin V.M., Tanchuk S.S., Mischev A.V., Zotova V.A., Tudakova N.M., Berglezov V.V. Theoretic-experimental substantiation the new coincidence processing combination working surfaces friction cutting, ppd and to influence pressure streams technological fluids	18
➔	PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY	
	Ljaljakin V.P., Aulov V.F., Ivanajskij V.V., Krivochurov N.T., Koval D.V., Ishkov A.V. Habits of induction overlaying welding of lengthy soil-cultivating organs of agricultural machinery	23
	Makienko V.M., Verhoturov A.D., Romanov I.O., Stroitelev D.V. Study of the change of phase and chemical compositions of concentrates of mineral raw materials at influence on them of arc discharges.	27
➔	CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING	
	Stepanov I.B., Pribytkov G.A., Firsina I.A., Ivanov Yu.F. Nitride coatings received by vacuum-arc evaporation of powder cathodes Ti-Al, Ti-Al-Si	33
➔	INFORMATION. PRODUCTION EXPERIENCE	
	Nafikov M.Z., Saifullin R.N., Zainullin A.A. Properties of coatings produced electrocontact welding of filler material of steel wires	38
	Khromov V.N. Influence of hardening of details on road accidents of vehicles at their operation on the example of restoration of sleeves of cylinders of internal combustion engines	44

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



УДК 621.74: 621.763

Р.Р. Камалетдинов, Рус.Ф. Мамлеев, Раф.Ф. Мамлеев,
С.В. Чертовских, Л.Ш. Шустер

(Уфимский государственный авиационный технический университет)
E-mail: OKMiM@ugatu.az.ru

Вопросы применения керметов на основе карбида титана в трубопроводной запорной арматуре

Исследовано влияние температуры на важные механические и триботехнические характеристики керметов на основе карбида титана в экстремальных условиях нагружения.

Ключевые слова: керметы, прочность на сжатие, твердость, триботехнические характеристики, температура.

The effect of temperature on the important mechanical and tribological characteristics of cermets based on titanium carbide under extreme loading conditions.

Keywords: cermets, compressive strength, hardness, tribological characteristics and temperature.

Введение

Известно, что эксплуатационные характеристики и надежность трубопроводной запорной арматуры оказывают значительное влияние на эффективность технологических процессов в различных производствах. Например, в горной металлургии в технологических линиях по переработке руды и транспортировке абразивосодержащей пульпы затворы подвергаются интенсивному износу и быстро теряют работоспособность. В нефтехимпереработке при каталитическом крекинге углеводородного сырья запорная арматура эксплуатируется в более жестких условиях, связанных с дополнительным воздействием высоких (до 700 °С) температур и вибронрузок из-за больших скоростей газового потока, содержащего алюмосиликатные абразивные частицы, что предопределяет ее низкий ресурс.

Одним из важных параметров как задвижек, так и более современных шаровых кранов являются силы трения в элементах затворного узла, которые влияют на их износ и характеристики привода. Поэтому материалы элементов затвора должны выбираться исходя из минимизации коэффициентов трения и адгезии между ними.

Проблема работоспособности запорной арматуры, эксплуатируемой в горной металлургии и нефтехимпереработке, является актуальной. Решение ее воз-

можно путем применения материалов, позволяющих улучшить триботехнические характеристики в затворном узле.

Одним из наиболее перспективных материалов для работы в указанных условиях является *керамико-металлический композиционный материал* (кермет) на основе карбида титана с металлической связкой [1].

Цель работы – определение наиболее важных механических и триботехнических характеристик керметов на основе карбида титана в экстремальных условиях нагружения.

Методы проведения исследования

Изучали механические и триботехнические характеристики керметов: карбид титана – никелевый сплав ЖС6У (далее TiC–ЖС6У), карбид титана – ВЖЛ-14Н (далее TiC–ВЖЛ-14Н), а также (для сравнения) – никелевого сплава ЖС6У.

Образцы для исследований вырезали из керметной заготовки шарового затвора.

Для определения предела прочности при сжатии изготавливали прямоугольные образцы 5×5×7,5 мм. Испытания проводили на испытательной машине "RMS-100" фирмы Schenck в соответствии с ГОСТ 25503–80 с использованием универсального динамометра фирмы Instron модели T1185.

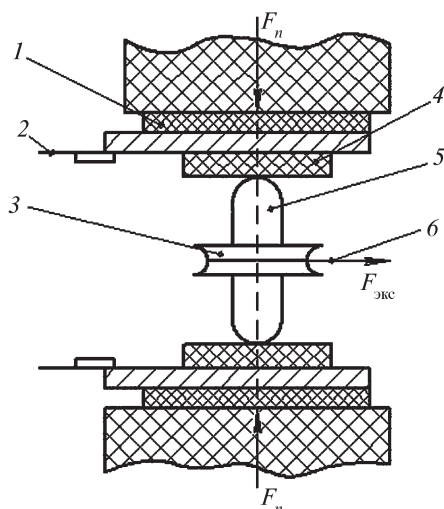


Рис. 1. Модель фрикционного контакта:

1 – изоляция; 2 – медные пластины; 3 – диски; 4 – образцы; 5 – индентор; 6 – тросики

Определение твердости производили на стационарном твердомере ТР-500, соответствующем требованиям ГОСТ 23677–79, методом вдавливания алмазного конуса в соответствии с ГОСТ 9013–59. Микротвердость определяли по общепринятой методике на твердомере ПМТ-5.

Высокотемпературные испытания проводили в электропечах, имеющих автоматическую регулировку температуры с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$. Каждая экспериментальная точка получена усреднением результатов испытания не менее трех образцов.

Для оценки триботехнических параметров использовали экспериментальный метод [2]. В основе этого метода принята физическая модель (рис. 1), которая в первом приближении отражает реальные условия трения и изнашивания на локальном контакте.

Согласно этой модели сферический индентор 5 (имитирующий единичную неровность пятна касания трущихся твердых тел), сдавленный двумя плоско-параллельными образцами 4 (с высокой точностью и чистотой контактирующих поверхностей), вращается под нагрузкой вокруг собственной оси. Сила $F_{\text{экс}}$, расходуемая на вращение индентора и приложенная к тросику 6, уложенному в паз диска 3, связана со сдвиговой прочностью τ_n адгезионных связей [2].

Прочность τ_n адгезионных связей на срез определяется из соотношения

$$\tau_n = \frac{3}{4} \frac{F_{\text{экс}}}{\pi} \frac{R_{\text{экс}}}{r_{\text{отп}}^3}, \quad (1)$$

где $F_{\text{экс}}$ – окружная сила на диске, вращающая индентор; $R_{\text{экс}}$ – радиус диска, в котором закрепляется ин-

дентор; $r_{\text{отп}}$ – радиус отпечатка (лунки) на испытуемых образцах.

Из-за малых размеров отпечатка предполагается, что нормальные напряжения, действующие на поверхность сферы, постоянны и равны в области всего отпечатка. Деформацией более твердого, по сравнению с плоским образцом, сферического образца пренебрегли. Нормальные напряжения на контакте p_r рассчитываются как

$$p_r = \frac{F_n}{\pi r_{\text{отп}}^3}, \quad (2)$$

где F_n – нормальная нагрузка.

Адгезионная (молекулярная) составляющая коэффициента трения равна

$$f_M = \frac{\tau_n}{p_r} = \frac{3}{4} \frac{F_{\text{экс}}}{F_n} \frac{R_{\text{экс}}}{r_{\text{отп}}}. \quad (3)$$

Пластины 2 (см. рис. 1) подключались к силовому трансформатору адгезиометра для осуществления электроконтактного нагрева зоны трения.

Исследовали инденторы из керметов TiC–ЖС6У и TiC–ВЖЛ-14Н, а также индентор из никелевого сплава ЖС6У. В качестве контртела использовали плоские образцы из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и никелевого сплава ЖС6У.

Особое внимание обращали на шероховатость, чистоту и точность поверхностей контактирующих тел. Нормальная нагрузка F_n подбиралась таким образом, чтобы в зоне касания средние напряжения на контакте равнялись твердости материала плоских образцов по Бринеллю. При этом обеспечивается высокая плотность соприкосновения индентора и образцов, что практически исключает проникновение кислорода воздуха на большую часть площади контакта.

Геометрические размеры образцов и время выдержки под нормальной нагрузкой определялись техническими требованиями, предъявляемыми к аналогичным образцам при испытании на твердость по Бринеллю (ГОСТ 9012–59). Для обеспечения однородности физико-механических свойств образцы изготавливались из одной партии материала.

Эксперименты, проведенные в условиях пластического контактирования (при $h/r \leq 0,2$, где h – глубина внедрения, r – радиус сферического индентора), показали, что тангенциальная прочность адгезионной связи и адгезионная составляющая коэффициента трения не зависят ни от нагрузки, ни от диаметра индентора.

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 1 и 2 приведены данные по механическим свойствам исследуемых материалов.

Как следует из таблиц, показатели предела прочности при сжатии в диапазоне температур исследования и твердости у кермета TiC–ЖС6У существенно выше, чем у сплава ЖС6У.

Полученные экспериментальные результаты по триботехническим характеристикам приведены на рис. 2, 3. Обращает на себя внимание факт влияния температуры и материала контртела на триботехнические характеристики изучаемых керметов. Зависимость прочности τ_n адгезионных связей на срез от температуры θ для всех пар трения носит экстремальный характер с максимумом при $\theta = 150...300$ °С. Причем для контртела из ЖС6У (рис. 3) экстремум более ярко выражен.

Зависимость адгезионной составляющей f_M коэффициента трения от температуры тоже немонотонная: с максимумом для контртела из 12Х18Н10Т при температуре около 450 °С, постоянной при контртеле из ЖС6У с увеличением температуры выше 200 °С.

Сопоставление влияния материала контртела на триботехнические характеристики показывает, что использование в качестве контртела стали 12Х18Н10Т в 2–3,5 раза уменьшает прочность τ_n адгезионных связей на срез и существенно снижает коэффициент трения

Таблица 1

Предел прочности материалов при сжатии (МПа)

Температура испытания, °С	Кермет TiC–ЖС6У	Сплав ЖС6У
20	2440	1500
300	2270	1200
600	2215	980
900	1100	750

Таблица 2

Твердость материалов

Материал	Твердость		
	HRA	HRC	HV0,1, МПа
Кермет TiC–ЖС6У	81	60	32000 – зерно TiC 300 – сплав ЖС6У
Сплав ЖС6У	–	30	–

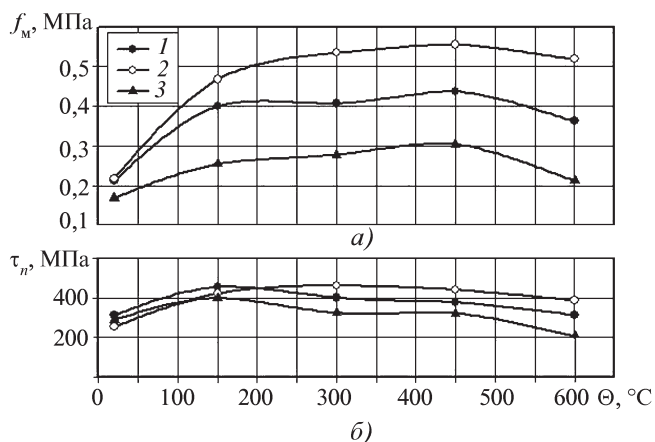


Рис. 2. Влияние температуры контакта на триботехнические характеристики фрикционного контакта: молекулярная составляющая коэффициента трения (а); прочность на срез адгезионных связей (б), где контртело из стали 12Х18Н10Т, индентор:

1 – TiC–ЖС6У; 2 – ЖС6У; 3 – TiC–ВЖЛ-14Н

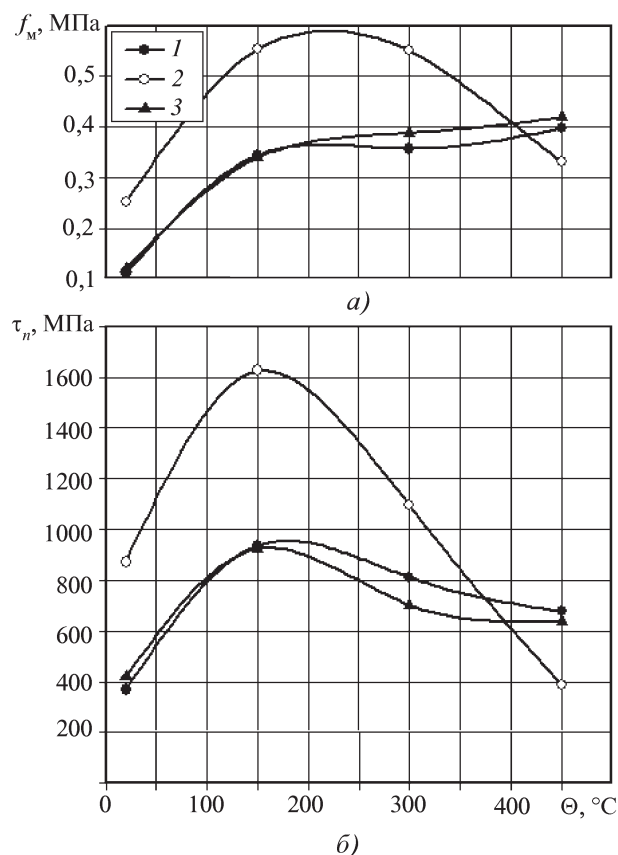


Рис. 3. Влияние температуры контакта на триботехнические характеристики фрикционного контакта: молекулярная составляющая коэффициента трения (а); прочность на срез адгезионных связей (б), где контртело из стали ЖС6У, индентор:

1 – TiC–ЖС6У; 2 – ЖС6У; 3 – TiC–ВЖЛ-14Н

f_M (например, для кермета TiC–ВЖЛ-14Н примерно в 1,5–2 раза).

Худшие триботехнические характеристики во всем исследованном диапазоне температур показывает пара трения ЖС6У–ЖС6У, наилучшие характеристики показывает пара [TiC – ВЖЛ-14Н] – 12Х18Н10Т.

Вывод

Установлено, что предел прочности на сжатие и твердость кермета TiC–ЖС6У существенно выше, чем у сплава ЖС6У. Практически во всем исследованном диапазоне температур при экстремально высоких давлениях исследованные керметы обеспечива-

ют более предпочтительные триботехнические характеристики, чем никелевый сплав ЖС6У, наилучшие показатели у пары [TiC – ВЖЛ-14Н] – 12Х18Н10Т.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мамлеев Р.Ф., Мамлеев Р.Ф., Науширванов Р.Г. Изделия из высокотемпературных керметов TiC–Me для нефтепереработки и нефтехимии // Нефтепереработка и нефтехимия. 2010. № 4. С. 33–38.

2. **Покрытия** и смазка в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке / Л.Ш. Шустер, Н.К. Криони, М.Ш. Мигранов, В.Ю. Шопом. М.: Машиностроение, 2008. 317 с.

УДК 621.9.047

С.А. Мозгов^{1,2}, Б.П. Саушкин¹, Ю.А. Моргунов², А.А. Лобода^{1,2}

(¹НПО "Техномаш", г. Москва;

²Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ))

E-mail: САМозг@yandex.ru

Электрохимическая отделочная обработка изделий из сплава ЭП-741НП

Проведен анализ возможности электрохимической обработки изделий из сплава ЭП-741НП с точки зрения получения поверхностей с низкой шероховатостью и гарантированного удаления дефектного слоя после операции электроэрозии. Исследована динамика выравнивания исходной микрогеометрии поверхности. Подобраны состав электролита и параметры режима для электрохимической отделочной обработки изделий из сплава ЭП-741НП.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, шероховатость поверхности, дефектный слой, состав электролита, параметры режима обработки.

The analysis of the possibility of electrochemical machining of products from alloy EP-741NP in terms of getting surfaces with low roughness and guarantee the removal of the defect layer after the operation electroerosion. Research dynamics of alignment the initial micro-geometry surface. Selected the electrolyte composition and mode settings for the electrochemical finishing machining products from alloy EP-741NP.

Keywords: electrochemical treatment, surface roughness, defect layer, the electrolyte composition, the processing mode parameters.

Введение

Никельхромовый сплав ЭП-741НП нашел широкое применение в авиационной и ракетно-космической отраслях промышленности благодаря высоким физико-механическим характеристикам, в частности возможности эксплуатации при высокотемпературных нагрузках. Его применяют для изготовления блисков турбин ТРД и рабочих колес ЖРД. Данный материал имеет низкий коэффициент обрабатываемости резанием. В связи с этим в качестве формообразующей операции, как правило, используется электроэрозионная прошивка межлопаточных пазов. При этом достигается шероховатость поверхности $Ra = 3,2...12,5$ мкм. В зависимости от параметров режима обработки формируется дефектный слой глубиной 10...30 мкм, представляющий собой материал с измененной структу-

рой, наличием трещин и остаточных напряжений [1]. Удаление дефектного слоя и снижение шероховатости поверхности позволят улучшить эксплуатационные характеристики реактивных двигателей и является актуальной проблемой современного авиационно-космического машиностроения.

Комплексное достижение оптимальных показателей качества поверхности – низкой шероховатости, отсутствия трещин и структурных изменений – возможно лишь у малого числа методов отделочной обработки. Как правило, это способы, основанные на химическом или электрохимическом воздействии на материал (ХО и ЭХО) – травление, полировка, размерная и химико-термическая обработка. При ЭХО достигаемая шероховатость и величина снимаемого припуска напрямую зависят от состава используемого электролита и параметров режима обработки. При

использовании традиционных электролитов – водных растворов солей (NaCl , NaNO_3) относительно низкая шероховатость поверхности ($Ra = 0,65 \dots 1,25$ мкм) достигается при высоких плотностях тока ($20 \dots 40$ А/см²), при этом величина снимаемого припуска значительна ($0,1 \dots 0,4$ мм).

Использование электрохимического полирования позволяет получить поверхности с низкой шероховатостью ($Ra = 0,16 \dots 0,32$ мкм). Однако производительность метода невысока, поскольку обработка ведется на плотностях тока $0,1 \dots 1,0$ А/см² и используются агрессивные рабочие среды. Таким образом, актуальной технологической задачей является разработка новых электролитов, позволяющих достигать низких значений шероховатости поверхности ($Ra = 0,16 \dots 0,32$ мкм) с достаточной производительностью при минимальных съемах припуска. При этом особое внимание должно уделяться экологической безопасности используемых рабочих сред.

Методика проведения исследований и материалы

Проведены экспериментальные работы по подбору состава электролита и параметров режима ЭХО образцов из сплава ЭП-741НП. Физическое моделирование процесса осуществлялось в электрохимической ячейке с прямооточным каналом (рис. 1, а), состоящей из двух изоляционных блоков 2. В нижний блок впрессован катод в виде цилиндрического стержня 4. В отверстие верхнего блока устанавливается образец – анод 1. Межэлектродный зазор создается прокладкой 5 заданной толщины, с вырезанным каналом для протока электролита. Подача рабочей жидкости в ячейку осуществляется через шланг 3.

В качестве образцов использовали цилиндрические прутки 10×55 мм (рис. 1, б), торцевую поверхность которых предварительно обрабатывали электроэрозией для создания необходимых величин шероховатости и глубины дефектного слоя (рис. 2).

До и после обработки профилометром модели 130 ("Протон–МИЭТ") определяли шероховатость поверхностей образцов; на весах модели "Ohaus PA214C", с точностью до 10^{-4} г, измеряли их массу, с последующим расчетом величины линейного съема:

$$h = 4(m_1 - m_2) / \rho \pi d^2,$$

где m_1, m_2 – массы образца до и после обработки соответственно; ρ – плотность обрабатываемого материала; d – диаметр образца.

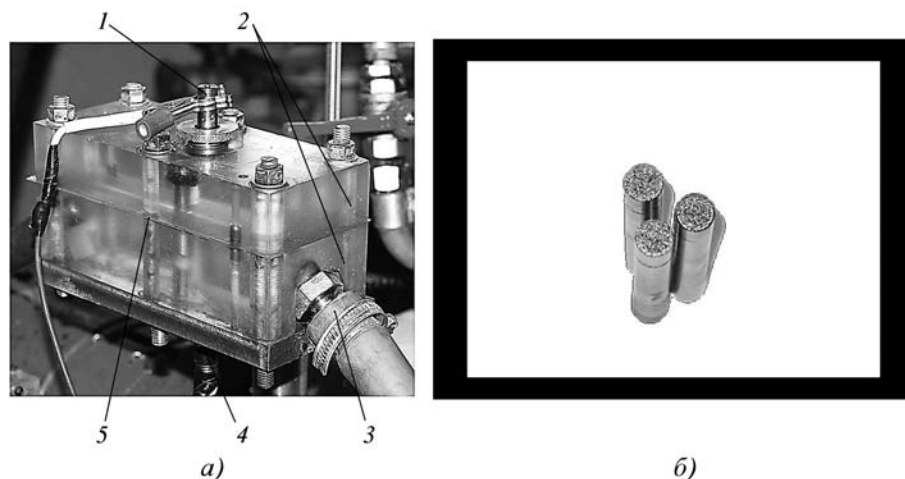


Рис. 1. Электрохимическая ячейка (а) и экспериментальные образцы (б)

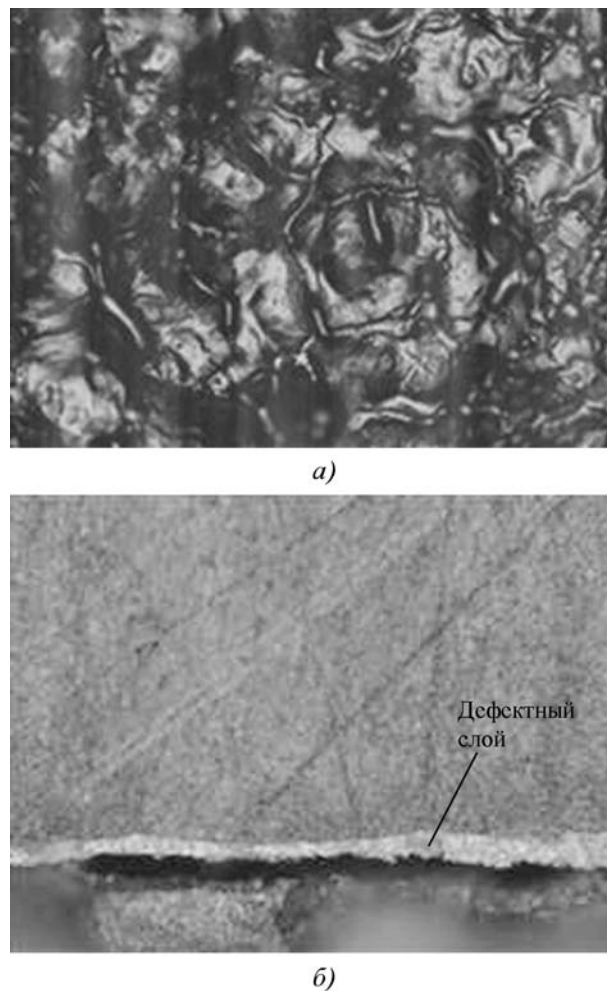


Рис. 2. Образец после ЭХО ($Ra = 12,5 \dots 15,0$ мкм): а – морфология поверхности ($\times 100$); б – микроструктура поперечного шлифа ($\times 1000$)

Морфологию полученной поверхности изучали на микроскопе "Olympus BX-51".

Эксперименты проводили в электролитах различного состава. Исследовали влияние на процесс выравнивания шероховатости поверхности таких параметров режима ЭХО, как плотность тока, скорость прокатки электролита, температура электролита, величина межэлектродного зазора. Обработку производили при постоянном токе.

Для получения базовых значений первую серию экспериментов проводили в водных растворах солей NaCl и NaNO₃, а также их смесей при различных концентрациях компонентов.

Вторую серию экспериментов проводили в электролитах на основе органических растворителей. Исследовали такие растворители, как этиленгликоль, ацетон, ацетонитрил, формамид, диметилформамид.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты по определению влияния состава водно-солевых электролитов на процесс ЭХО образцов из сплава ЭП-741НП отражены на графиках (рис. 3).

Обработку проводили при плотности тока 30 А/см², скорости прокатки электролита 8 м/с, температуре электролита 220 °С и рабочем зазоре 0,5 мм.

Наилучшие результаты получены в электролите состава (60 г/л NaCl + 40 г/л NaNO₃). За время 70 с удалось снизить шероховатость поверхности с $Ra = 13,4$ мкм до $Ra = 0,67$ мкм при скорости съема припуска 0,23 мм/мин.

Морфология полученных поверхностей представлена на рис. 4.

В электролите состава 124 г/л NaNO₃ наблюдалось растравливание обрабатываемой поверхности, возможно вызванное различной скоростью растворения компонентов сплава (рис. 4).

На микроструктуре образца после ЭХО в растворе (60 г/л NaCl + 40 г/л NaNO₃) (рис. 5) отсутствует дефектный слой.

Влияние плотности тока на процесс выравнивания шероховатости поверхности в электролите состава (60 г/л NaCl + 40 г/л NaNO₃) отражено на рис. 6.

Из графиков видно, что приемлемая плотность тока для отделочной электрохимической обработки

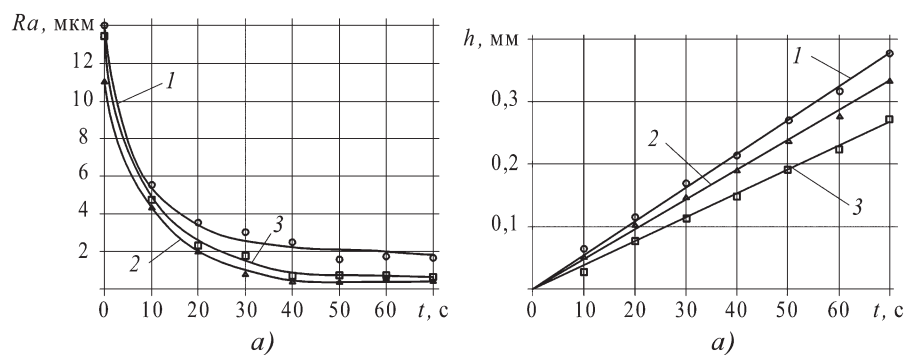


Рис. 3. Влияние состава электролита на процесс выравнивания шероховатости поверхности (а) и съема металла (б) в электролитах состава:

1 – 124 г/л NaNO₃; 2 – 60 г/л NaCl + 40 г/л NaNO₃; 3 – 80 г/л NaCl

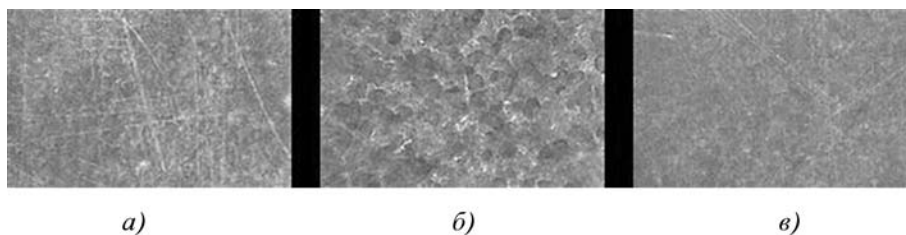


Рис. 4. Морфология поверхностей образцов после ЭХО ($\times 100$) при обработке в электролитах состава:

а – 80 г/л NaCl; б – 124 г/л NaNO₃; в – 60 г/л NaCl + 40 г/л NaNO₃

сплава ЭП-741 находится в диапазоне $i = 20 \dots 30$ А/см².

При плотностях тока менее 10 А/см² наблюдается растравливание поверхности, при увеличении плотности тока свыше 40 А/см² – ухудшение предельно достигаемой шероховатости.

Обработка при скоростях прокатки 4...12 м/с в электролите (60 г/л NaCl + 40 г/л NaNO₃) не выявила существенного влияния на процесс выравнивания шероховатости поверхности и величину съема металла данного параметра.

Основываясь на экспериментальных работах, обосновывающих целесообразность использования в практике ЭХО электролитов на основе неводных рабочих [1] сред, была проведена серия экспериментов.

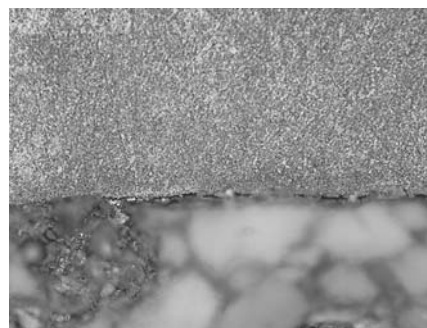


Рис. 5. Микроструктура поперечного шлифа образца после ЭХО в растворе 60 г/л NaCl + 40 г/л NaNO₃, $\times 500$

Обработку производили при плотностях тока 1...4 А/см² и скорости прокатки электролита 0,8...6,0 м/с. Производили апробацию электролитов на основе различных растворителей.

Результаты по определению влияния плотности тока на процесс выравнивания шероховатости поверхности и величину линейного съема в электролите состава (100 г/л соли в С₂Н₆О₂) отражены на рис. 7.

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы:

1. При работе с током плотностью 1 А/см² и ниже величина скорости линейного съема незначительна (около 0,007 мм/мин), однако поверхность анода остается шероховатой, при этом наблюдается ее потемнение и растравливание.

2. Обработка при плотностях тока 4 А/см² и выше позволяет сократить продолжительность процесса, при этом наблюдается локализация процесса и блеск обработанной поверхности, однако величина скорости съема металла высока (около 0,04 мм/мин).

3. Опытным путем установлено, что при $i = 1,2...1,3$ А/см² появляется блеск поверхности. Таким образом, рекомендуется производить обработку в диапазоне плотностей тока 1,4...1,8 А/см², что позволяет достичь шероховатости поверхности $Ra = 0,5...0,8$ мкм при величине скорости съема припуска 0,02 мм/мин.

Морфология обработанных поверхностей образцов представлена на рис. 8, на которых видно, что с увеличением плотности тока исчезают неравномер-

ность обработки и растравливание, улучшается качество обработанной поверхности.

Увеличение электропроводности раствора за счет увеличения концентрации соли до 15 % позволило сократить время на обработку до достижения предельной шероховатости, при этом скорость съема припуска увеличилась с 0,04 до 0,05 мм/мин. Эксперимент проводился при $i = 4$ А/см², $v = 1,5$ м/с. Полученные результаты представлены на графиках (рис. 9).

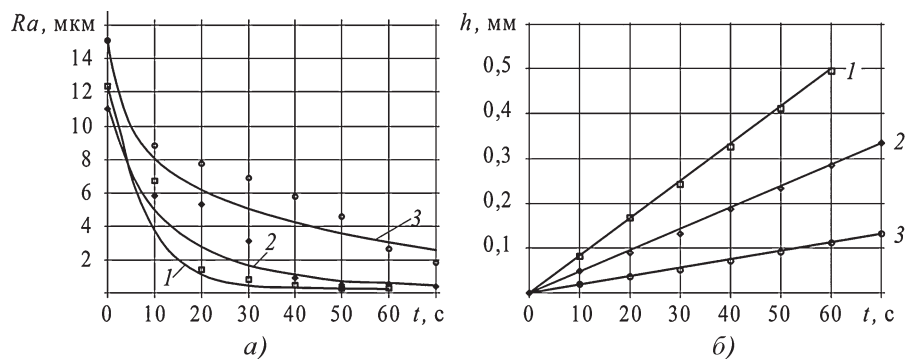


Рис. 6. Влияние плотности тока на процесс выравнивания шероховатости поверхности (а) и съем металла (б) в электролите состава 60 г/л NaCl + 40 г/л NaNO₃: 1 – 50 А/см²; 2 – 30 А/см²; 3 – 10 А/см²

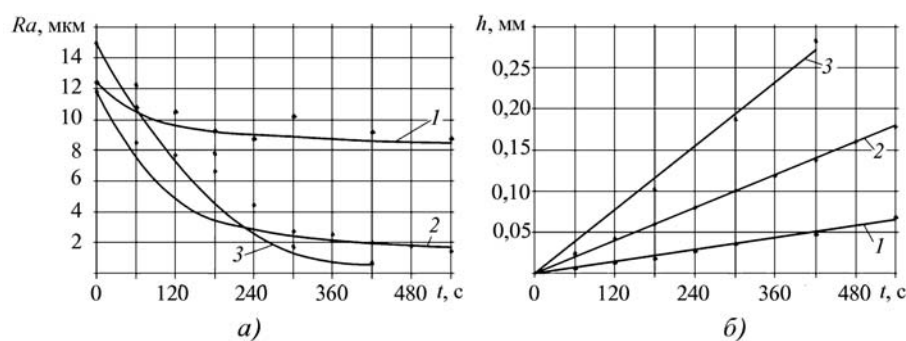


Рис. 7. Влияние плотности тока на процесс выравнивания шероховатости поверхности (а) и съем металла (б) в электролите состава 100 г/л соли в С₂Н₆О₂: 1 – 1 А/см²; 2 – 2 А/см²; 3 – 4 А/см²

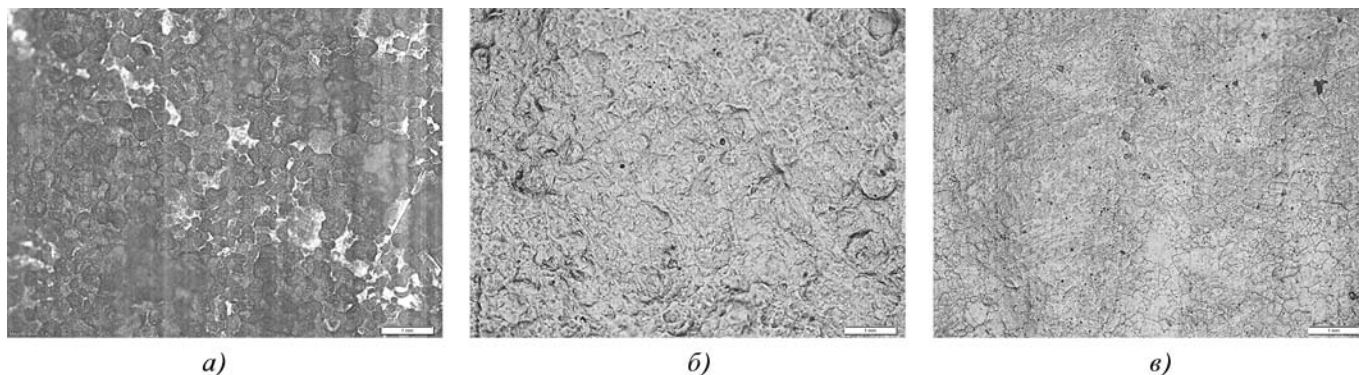


Рис. 8. Морфология поверхностей образцов после ЭХО (×100) при обработке в электролите состава 10 % соли в С₂Н₆О₂, и плотностях тока: а – 1 А/см²; б – 2 А/см²; в – 4 А/см²

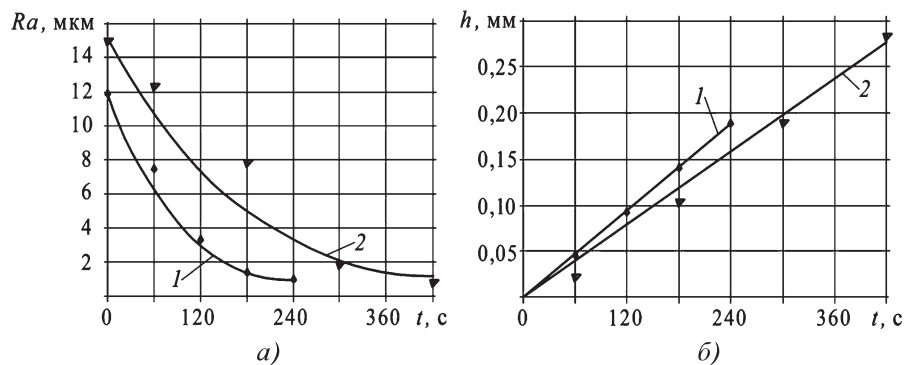


Рис. 9. Влияние концентрации соли на процесс выравнивания шероховатости поверхности (а) и величину съема припуска (б): 1 – 15 % соли; 2 – 10 % соли

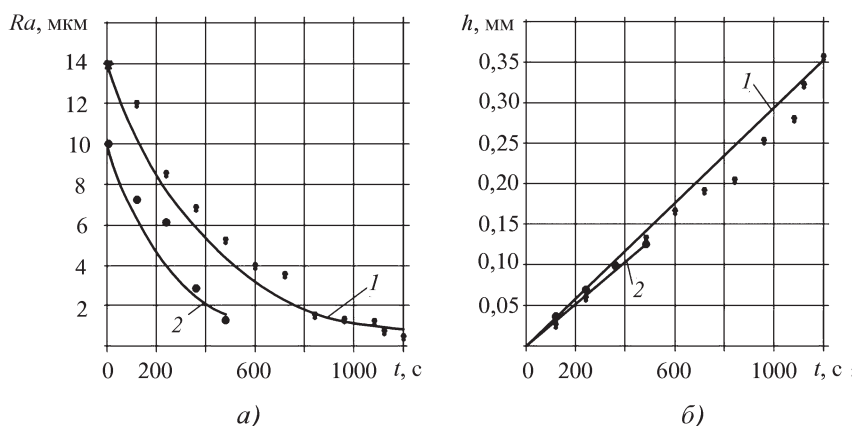


Рис. 10. Влияние скорости прокачки электролита на процесс выравнивания шероховатости поверхности (а) и величину съема припуска (б) в электролите 10 % соли в $C_2H_6O_2$: 1 – 5 м/с; 2 – 1 м/с

При обработке в органических растворителях на низких плотностях тока на качество получаемой поверхности сильное влияние оказывает гидродинамика потока электролита [2]. Обработка на различных скоростях прокачки подтвердила эти данные. Исследовали диапазон скоростей 0,8...6,0 м/с. Эксперименты проводили при концентрации соли 10 % и плотности тока 1,5 А/см². Полученные результаты отражены на рис. 10.

Из графиков видно, что при увеличении скорости потока снижается время обработки до получения предельной шероховатости, однако при этом усиливается влияние гидродинамики на обрабатываемую поверхность, что приводит к появлению струйности.

Таким образом, анализируя полученные данные, можно рекомендовать следующие параметры режима при обработке сплава ЭП-741НП в растворителе $C_2H_6O_2$:

- концентрация соли – 10...15 %;
- плотность тока – 1,4...1,8 А/см²;
- скорость прокачки электролита 0,4...0,6 м/с;
- температура электролита 20...25 °С.

Выводы

Исходя из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментально подтверждена возможность электрохимической отделочной обработки сплава ЭП-741НП.

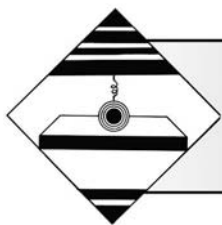
2. При обработке сплава ЭН-741НП в водных растворах солей удается достичь заданных величин шероховатости поверхности и гарантированно удалить дефектный слой, однако наблюдается большой съем припуска: 0,27...0,37 мм в зависимости от параметров режима.

3. В электролитах на основе органических растворителей при плотностях тока 1...4 А/см² удается достичь шероховатости обработанной поверхности до $Ra = 0,8$ мкм при съеме припуска 0,10...0,14 мм, при этом на качество получаемой поверхности сильное влияние оказывает гидродинамика.

4. Для отделочной ЭХО сплава ЭП-741НП рекомендуется использовать растворитель $C_2H_6O_2$. При параметрах режима обработки $i = 1,4...1,8$ А/см²; $v = 0,4...0,6$ м/с; $T = 22$ °С получаемая поверхность имеет блеск, шероховатость составляет 0,8...1,0 мкм, при этом струйность не наблюдается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Электрохимическая** обработка изделий авиационно-космической техники: учебное пособие / В.И. Ломаев, Ю.А. Моргунов, Б.П. Саушкин, Г.Б. Саушкин; под. ред. Б.П. Саушкина. М.: Форум, 2013. 480 с.
2. **Исследование** процесса улучшения качества поверхностей лопаток моноколес турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей / А.А. Лобода, С.А. Мозгов, Ю.А. Моргунов, Д.В. Панов, Б.П. Саушкин // Матер. III Всерос. науч.-техн. конф. "Актуальные проблемы ракетно-космической техники" (III Козловские чтения) (16–20 сентября 2013 г., г. Самара); под общ. ред. А.Н. Кирилина. Самара. 2013. С. 256–263.
3. **Саушкин Б.П.** Электрохимическая отделочная обработка материалов // Металлообработка. 2001. № 1. С. 27–30.
4. **Повышение** эффективности изготовления лопаток моноколес / Ю.П. Астахов, С.А. Кочергин, Ю.А. Моргунов, Б.П. Саушкин // Технология машиностроения. 2013. № 5. С. 14–18.
5. **Масликов С.В.** Разработка технологии отделочной ЭХО алюминия и его сплавов в органических и водно-органических средах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 1999. 16 с.
6. **Гриликес С.Я.** Электрохимическое и химическое полирование. Л.: Машиностроение, 1987. 232 с.



УДК 621.787.2

В.А. Кузнецов, А.В. Щедрин, С.А. Гаврилов, В.И. Воронков,
(Университет машиностроения ("МАМИ"), г. Москва),
Э.Л. Мельников (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)
E-mail: FUEL7@yandex.ru

Теоретические и экспериментальные исследования охватывающего поверхностного пластического деформирования в условиях применения металлоплакирующих смазочных материалов

Проведены теоретические и экспериментальные исследования охватывающего поверхностного пластического деформирования (ОППД) с применением инструмента с регулярным микрорельефом рабочей поверхности и металлоплакирующих смазочных материалов, реализующих фундаментальное научное открытие "эффект безызносности при трении Гаркунова–Крагельского". Выявлено формирование внеконтактных зон очага деформации при обработке различных материалов, а также проведено моделирование процесса ОППД в программном комплексе QForm 3D.

Ключевые слова: охватывающее деформирование, силовая динамика, очаг деформации, волна внеконтактной деформации, регулярный микрорельеф, металлоплакирующая смазка, избирательный перенос.

Theoretical and experimental researches of encompassing superficial plastic deformation method with the use of tool with regular microrelief and metal-cladding lubricants, realizing fundamental scientific discovery "Garkunov–Kragelsky zero-wear effect", were constructed. Forming outside of contact areas of deformation seat when machining different materials are revealed, including simulation of encompassing superficial plastic deformation with QForm 3D.

Keywords: encompassing deformation, force dynamic, deformation seat, wave of outside of contact deformation, regular microrelief, metal-cladding lubricant, wear-free transfer.

Введение

ОППД – высокоэффективный технологический метод размерной и отделочно-упрочняющей обработки профилей различной формы поперечного сечения и длины [1]. В настоящее время данные технологии совершенствуются [2] путем применения инструмента (фильеры) с регулярным микрорельефом поверхности и современных металлоплакирующих смазок [3].

В работе [4] выполнены адаптация и сравнение адекватности наиболее современных теоретических моделей усилия обработки (усилия деформирования)

рельефом поверхности в условиях применения традиционных технологических смазочных материалов. Однако адаптированные модели [4] не учитывают реальную геометрию очага деформации [5] и свойства металлоплакирующих смазок [3].

Теоретическая модель усилия обработки

Для исключения указанных несовершенств была выполнена адаптация теоретической модели суммарного усилия обработки [6], которая в конечном варианте удельного усилия q_d^T имеет вид, Н/мм:

$$q_d^T = 0,5D_d \tau_{т.з} \left\{ \frac{4}{3\sqrt{3} \operatorname{tg}^2 \alpha} \left[\sqrt{\left(1 + \frac{3 \operatorname{tg}^2 \alpha}{4}\right)^3} - 1 \right] \ln \frac{(R_3 \pm \Delta R_3)^2}{R_d^2} + \frac{2}{3} \operatorname{tg} \alpha + f \left(\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} \ln \frac{(R_3 \pm \Delta R_3)^2}{R_d^2} + 2 \frac{L_d}{R_d} \right) \right\}, \quad (1)$$

методом комбинированного волочения сплошных круглых профилей инструментом с регулярным мик-

где D_d – диаметр рабочего канала фильеры по калибрующей ленточке, мм;

$\tau_{т.з.}$ — напряжение пластического сдвига материала заготовки детали, МПа;

α — угол рабочего конуса фильеры, °;

$R_з, R_д$ — радиусы заготовки и детали, мм;

f — коэффициент трения скольжения;

$L_д$ — ширина калибрующей ленточки фильеры, мм.

Применение удельного усилия обработки $q_д^T$ позволяет учесть масштабный фактор (диаметр заготовки).

Коэффициент трения скольжения f определяли по обобщенной формуле [2], полученной на основе адгезионно-деформационной теории трения и износа И.В. Крагельского [7]:

$$f = f_a + f_d = \left(\frac{\pi K_1 K_2 (\chi_3 + 1,5)}{E_{пр} (\chi_3 + 1)} \tau_0 \sqrt{\frac{K_3 R_{пр}}{\varepsilon_3 H_{з\max}}} + \beta \right) + \left(0,28 \sqrt{\frac{\varepsilon_3 H_{з\max}}{R_{пр}}} \right), \quad (2)$$

где f_a и f_d — соответственно адгезионная и деформационная компоненты коэффициента трения скольжения;

K_1, K_2, K_3 — коэффициенты общего решения контактной задачи Герца–Беляева;

χ_3 — параметр закона высотного распределения микровыступов шероховатой поверхности заготовки детали;

$E_{пр}$ — приведенный модуль упругости, МПа;

$R_{пр}$ — приведенный радиус кривизны, мкм;

τ_0 — прочность адгезионной связи при отсутствии контактного давления, МПа;

ε_3 — относительная деформация максимального микровыступа шероховатой поверхности заготовки детали;

$H_{з\max}$ — высота максимального микровыступа шероховатой поверхности заготовки детали, мкм;

β — пьезокоэффициент влияния контактного давления на прочность адгезионной связи.

Вывод и определение вышеперечисленных параметров и коэффициентов частично рассмотрены в работе [2]. Качественные и количественные параметры геометрии очага деформации учитываются величиной и знаком волны внеконтактной деформации по рабочему конусу инструмента $\pm \Delta R_з$, которые определяются по профилограммам очагов; примеры данных очагов приведены в работе [5].

Экспериментальное моделирование ОППД

В качестве экспериментальной базы проверки теоретических моделей приняли метод ОППД сплошных круглых заготовок из отожженной стали 45 (174...187 НВ) через деформирующую фильеру из инструментальной стали марки 9ХС (58...61 HRC), аналогичную инструментам [3–5], рабочий канал которой также упрочнен регулярным микрорельефом в виде однозаходных винтовых канавок радиусом 1,5 мм, шагом 0,5 мм и первоначальной глубиной на

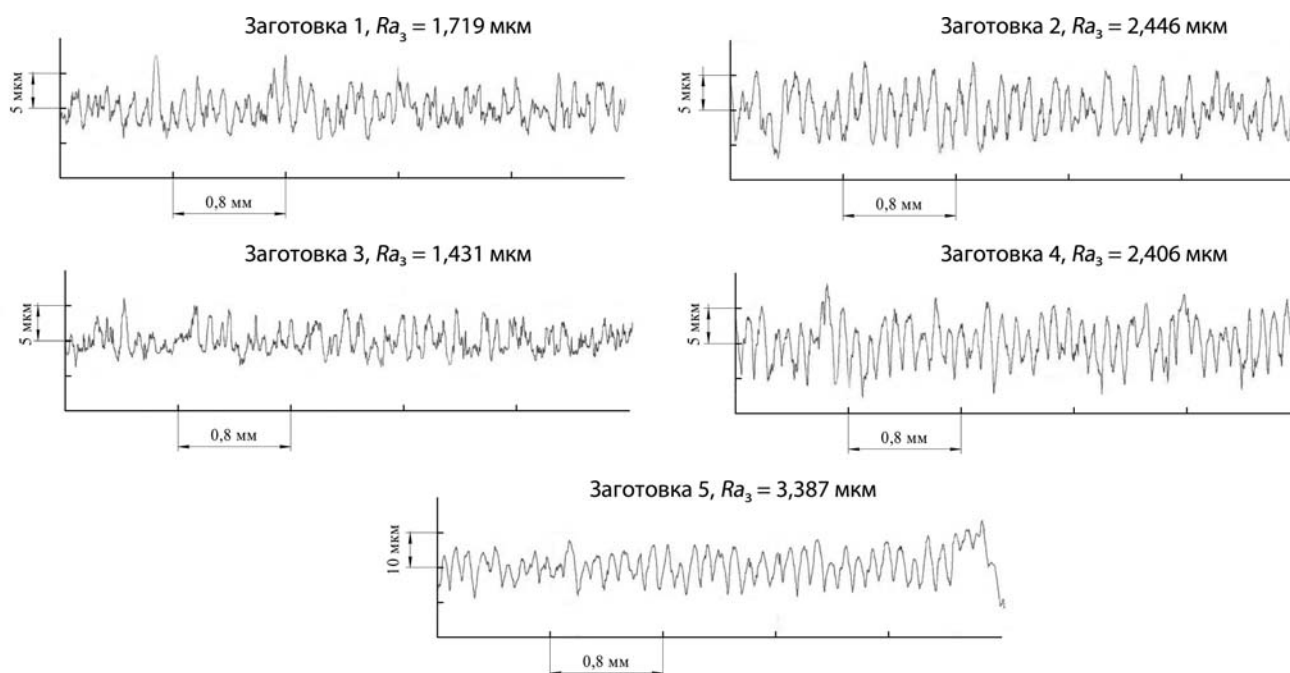


Рис. 1. Продольные профилограммы шероховатых поверхностей заготовок из стали 45

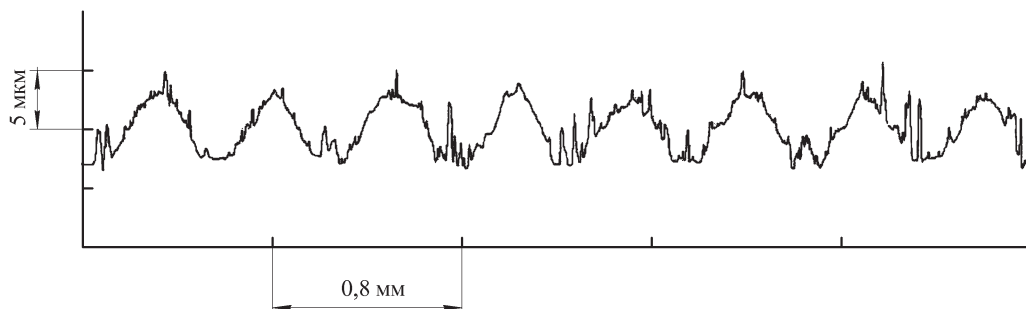


Рис. 2. Продольная профилограмма калибрующей ленточки деформирующей фильеры с регулярным микрорельефом: материал 9ХС, $\Gamma_k = 10$ мкм, $\text{Ш}_k = 0,5$ мм, $Ra = 1,791$ мкм, где Γ_k , Ш_k – соответственно глубина и ширина канавки

участке калибрующей ленточки 10 мкм. Длина обработки заготовок составляла 150 мм, предварительная механическая обработка – точение. Продольные профилограммы поверхности заготовок до обработки (после точения) представлены на рис. 1. Продольная профилограмма калибрующей ленточки деформирующей фильеры показана на рис. 2. Номинальная абсолютная деформация i_n на диаметр (абсолютное обжатие) варьировалась в диапазоне 0,1...0,5 мм через 0,1 мм. Скорость обработки составляла 1 м/мин. В качестве технологической смазки применялось минеральное масло марки "И-40" с добавкой 50 % об.

металлоплакирующей присадки "Валена" (пат. РФ № 2277579), реализующей "Эффект безыносного трения" по аналогии с работой [3].

На рис. 3 представлены продольные профилограммы очага деформации, по которым от максимального микровыступа исходной (до обработки ППД) шероховатой поверхности с соответствующим знаком можно определить величину ΔR_3 , зависимость которой от фактической абсолютной деформации для стали 45 приведена на рис. 4.

Для реального учета (в математической модели) упрочнения материала проводились испытания по

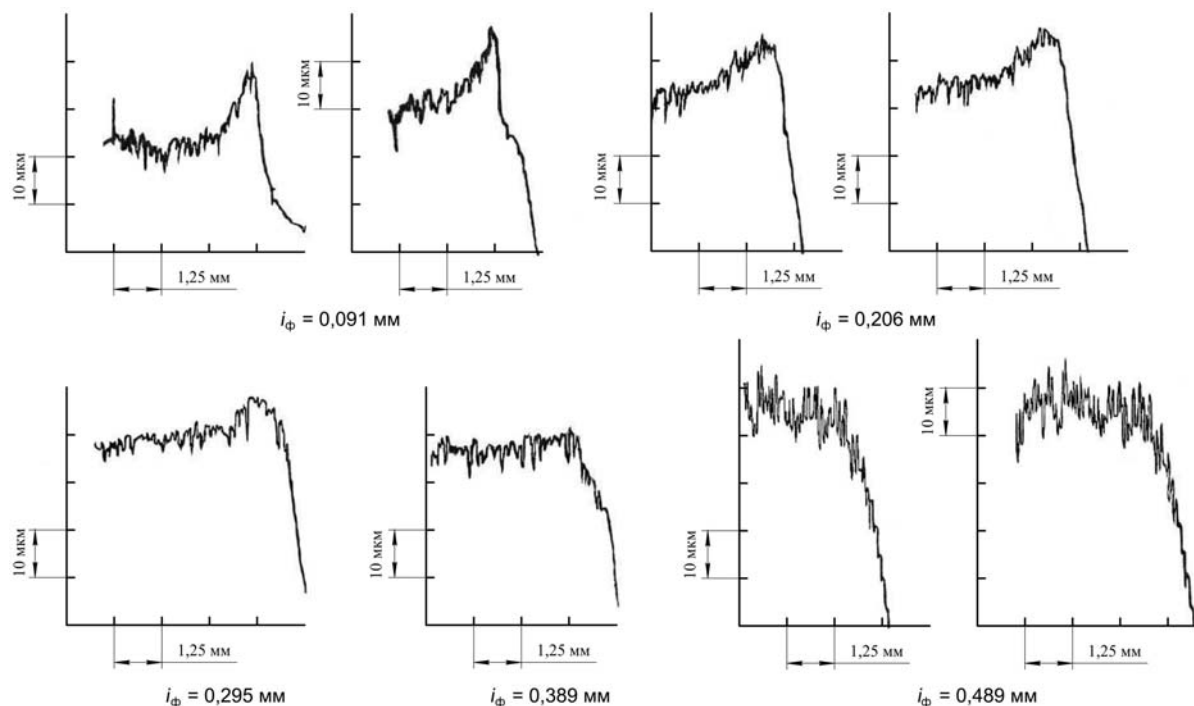


Рис. 3. Продольная профилограмма очага деформации на заготовках из стали 45:

$\Gamma_k = 10$ мкм, $\text{Ш}_k = 0,5$ мм; смазка "И-40" + 50 % металлоплакирующей присадки; горизонтальное увеличение $\times 8$; вертикальное увеличение $\times 1000$

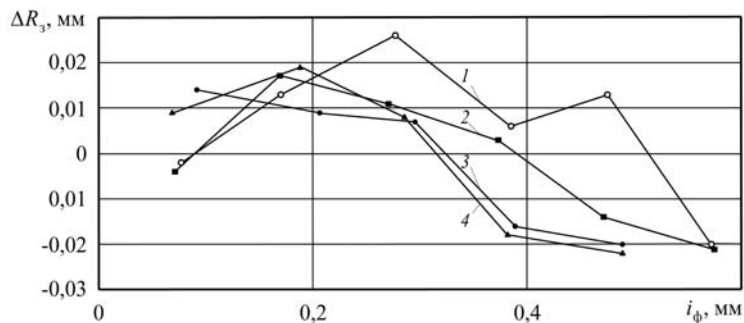
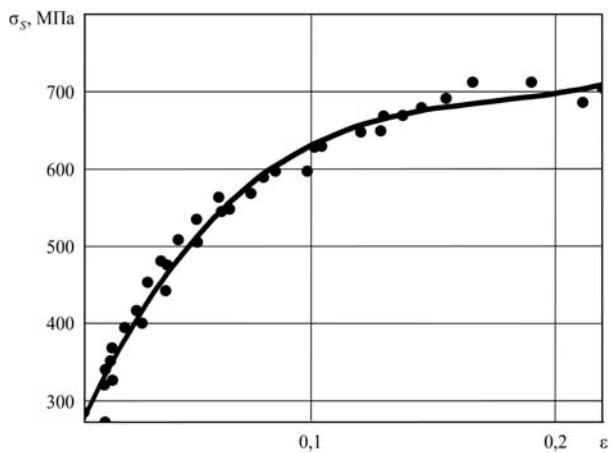
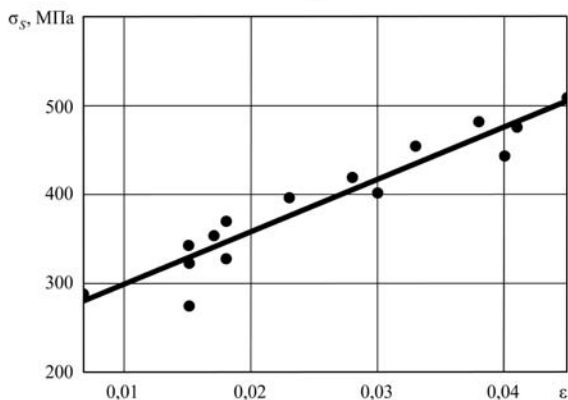


Рис. 4. Экспериментальные зависимости величины и знака внеконтактной деформации от фактической абсолютной деформации: 1 – Д1Т ("И-40" + 10 % присадки "Валена"); 2 – ЛС59 ("И-40" + 10 % присадки "Валена"); 3 – сталь 45 ("И-40" + 50 % присадки "Валена"); 4 – сталь 40Х (солидол + дисульфид молибдена MoS₂)

ГОСТ 25.503–97. Полученная кривая упрочнения стали 45 представлена на рис. 5, а. Рассматриваемый диапазон степеней деформации заготовки в экспериментальном исследовании находится в пределах



а)



б)

Рис. 5. Кривая упрочнения стали 45: а – экспериментальная; б – аппроксимированная

$\varepsilon = 0,012...0,044$, поэтому для получения уравнения кривой упрочнения ее аппроксимировали на участке $\varepsilon = 0,006675...0,045$. Кривая упрочнения, аппроксимированная на данном участке, представлена на рис. 5, б, а уравнение кривой упрочнения описывается выражением

$$\sigma_{\tau,3} = 241,061 + 5872 \varepsilon, \quad (3)$$

где $\sigma_{\tau,3}$ – предел текучести материала заготовки; ε – деформация образца [6].

Используя значение $\sigma_{\tau,3}$, по методике [6] определяли напряжение пластического сдвига материала заготовки $\tau_{\tau,3}$.

Исходная информация для расчета коэффициента трения скольжения и удельного усилия обработки приведена в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета коэффициента трения и усилия обработки

Параметр	Заготовка				
	1	2	3	4	5
i_{ϕ} , мм	0,091	0,206	0,295	0,389	0,489
ΔR_3 , мм	+0,014	+0,009	+0,007	-0,016	-0,020
$K_y (Ra)$	9,636	12,522	12,104	16,667	21,350
χ_3	1,367	0,345	1,132	1,340	1,441
$H_{3 \max}$, МКМ	11,5	13,0	9,0	15,5	21,0
$R_{пр}$, МКМ	–	–	8727	–	–
$E_{пр}$, МПа	–	–	300 660	–	–
K_1, K_2, K_3	–	–	3,778; 0,408; 1,220	–	–
τ_0 , МПа	–	–	9,873	–	–
ε_3	0,896	0,920	0,917	0,940	0,953
ε	0,012	0,022	0,03	0,035	0,044
$\tau_{\tau,3}$, МПа	158,215	172,483	183,099	189,432	200,327

Примечание. i_{ϕ} – фактическая абсолютная деформация

Таблица 2

Теоретические значения коэффициента трения скольжения и удельного усилия обработки

i_{ϕ} , мм	f	q_d^T , Н/мм
0,091	0,016	137,166
0,206	0,017	170,701
0,295	0,016	195,382
0,389	0,016	211,146
0,489	0,017	245,701

В упрощенном предположении считаем, что пьезокоэффициент $\beta = 0$. Коэффициент уточнения по параметру шероховатости поверхности определяется выражением

$$K_y(Ra) = \frac{Ra_3}{Ra_d}, \quad (4)$$

где Ra_3 и Ra_d – параметры шероховатости поверхности до и после обработки ОППД или, условно, заготовки и детали, мкм.

В табл. 2 представлены рассчитанные значения коэффициентов трения скольжения и удельных усилий обработки заготовок из стали 45 при содержании металлоплакирующей присадки 50 % в базовом масле "И-40".

Экспериментальное усилие обработки ОППД, Н/мм, в рассматриваемом случае определяется следующей зависимостью:

$$q_d^{\circ} = 49,363 + 364,31 i_{\phi}. \quad (5)$$

На рис. 6 представлено сопоставление теоретического (расчетного) 2 и экспериментального 3 удельных усилий обработки ППД. Теоретические значения удельного усилия, Н/мм, обработки после аппроксимации данных табл. 2, полученных расчетным путем, можно представить в виде выражения

$$q_d^T = 114,543 + 263,526 i_{\phi}. \quad (6)$$

Из полученных результатов можно сделать вывод о применимости теоретической модели для анализа динамики ОППД в области фактической абсолютной деформации $i_{\phi} > 0,3$ мм с приемлемой для инженерной практики точностью.

Для перспективных технологических расчетов и теоретического моделирования были проведены до-

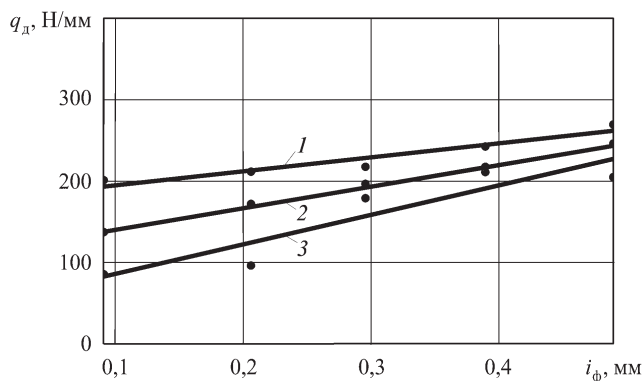


Рис. 6. Зависимость удельного усилия обработки от фактической абсолютной деформации:

1 – данные QForm 3D; 2 – расчетные данные с учетом реальных параметров очага деформации; 3 – экспериментальные данные ($\Gamma_k = 10$ мкм, $\text{Ш}_k = 0,5$ мм; сталь 45; смазка "И-40" + 50 % металлоплакирующей присадки)

полнительные экспериментальные исследования ОППД в условиях применения металлоплакирующей смазки.

В ходе данных исследований выявлены закономерности формирования очагов деформации при обработке аналогичных (как при обработке стали 45) по геометрии заготовок из латуни марки ЛС59 (126...129 НВ) и дюралюминия марки Д1Т (121 НВ). При этом обработка ОППД осуществлялась в обоих случаях при оптимальном содержании металлоплакирующей медьсодержащей присадки 10 % [8]. Продольные профилограммы очагов деформации приведены на рис. 7.

Моделирование ОППД в программном комплексе QForm 3D и окончательная проверка работоспособности теоретической модели

На следующем этапе теоретического исследования проведено моделирование ОППД в программном комплексе QForm 3D. Исходные данные для моделирования (геометрия заготовок и инструмента, их материалы, физико-механические свойства, коэффициенты трения и др.) задавались исходя из реальных условий проведения эксперимента (см. раздел "Экспериментальное моделирование ОППД").

С использованием возможностей данного приложения в процессе моделирования определены знак и величина внеконтактной деформации (рис. 8), а также удельное усилие обработки (см. рис. 6, зависимость 1). Их анализ свидетельствует о завышенных

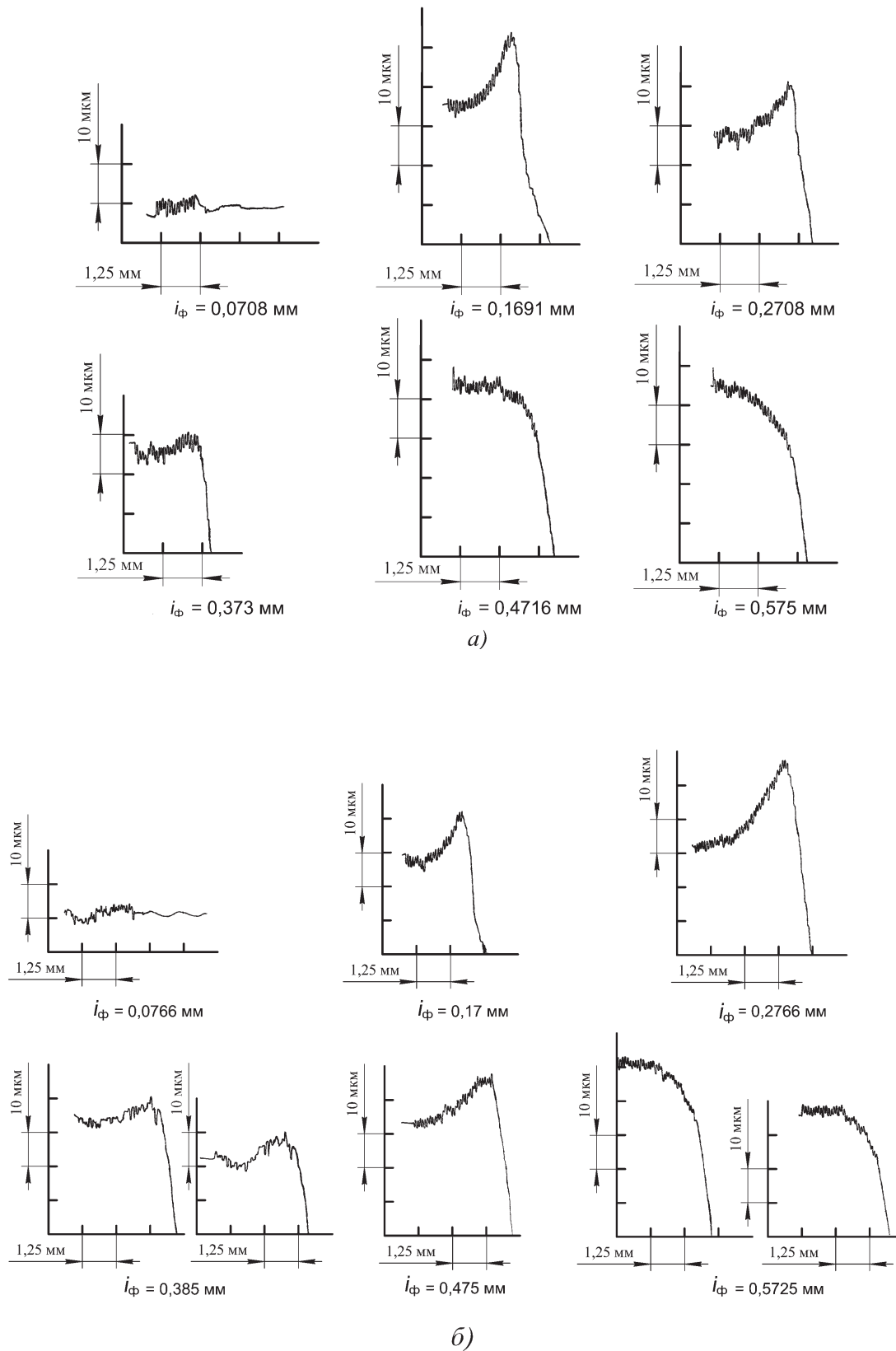


Рис. 7. Продольные профилограммы очага деформации на заготовках из латуни марки ЛС59 (а), дуралюминия марки Д1Т (б): $\Gamma_k = 10 \text{ мкм}$, $\text{Ш}_k = 0,5 \text{ мм}$; смазка "И-40" + 10 % металлоплакирующей присадки; горизонтальное увеличение $\times 8$; вертикальное увеличение $\times 1000$

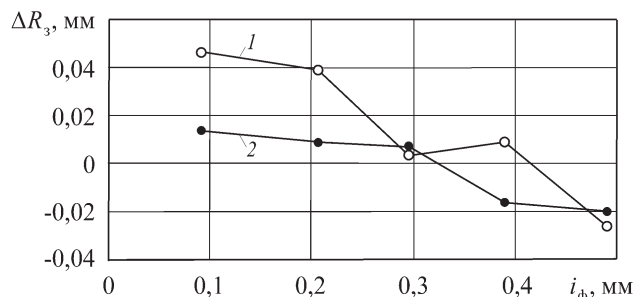


Рис. 8. Сопоставление величины и знака внеконтактной деформации при обработке стали 45:

1 – данные QForm 3D; 2 – экспериментальные данные

расчетных значениях параметров волны внеконтактной деформации и удельного усилия обработки, по сравнению с экспериментальными данными (см. рис. 6, зависимость 3). Причем удельное усилие обработки в приложении прогнозируется с большей погрешностью, по сравнению с разработанной теоретической моделью (см. рис. 6, зависимость 2), и может быть представлено по аналогии в виде выражения

$$q_d^T = 178,218 + 171,048 i_\phi. \quad (7)$$

На рис. 9 (см. стр. 2, 3, 4 обложки) представлены распределения интенсивности напряжений и деформаций при ОППД заготовок из стали 45. Анализ представленных распределений наглядно свидетельствует о существенном влиянии контактных процессов, комплексной характеристикой которых является коэффициент трения (см. табл. 2), на напряженно-деформированное состояние заготовки. В частности, уменьшение интенсивностей деформаций и напряжений при $i_\phi > 0,206$ мм убедительно свидетельствует об интенсификации "Эффекта Ребиндера", проявляющегося в виде пластифицирования материала заготовки в результате наличия в металлоплакирующей смазке *поверхностно-активных веществ* (ПАВ), и в первую очередь меди.

Дополнительно приложение QForm 3D позволяет точно анализировать краевые эффекты, например образование смятия фаски на переднем торце заготовки, по аналогии, форма которой представлена на объемных профилях в работе [3]. Это имеет практическое значение при получении прецизионных изделий и исключении дополнительных операций, например обработки торцов резанием.

Выводы

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований созданы основы для комплексного параметрического анализа и последующего синтеза высокоэффективных методов

ОППД в условиях применения металлоплакирующих смазочных материалов [3, 8–12]. Исследования волн внеконтактной деформации показало, что с увеличением степени обжатия заготовки внеконтактная зона значительно уменьшается и в дальнейшем не затрудняет подачу технологической смазки в очаг деформации на микроуровне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зайдес С.А., Исаев В.Н. Технологическая механика осесимметричного деформирования. Иркутск: ИрГТУ, 2007. 432 с.
2. Щедрин А.В., Ульянов В.В., Бекаев А.А. и др. Трибология как фундаментальная основа системного проектирования конкурентоспособных технологических объектов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 4. С. 15–20.
3. Щедрин А.В., Гаврилов С.А., Ерохин В.В. и др. Повышение качества и производительности методов комбинированной обработки инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности на основе применения металлоплакирующих смазок // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 8. С. 21–25.
4. Прогнозирование характеристик силовой динамики методов комбинированного волочения сплошных круглых профилей / А.В. Щедрин, В.В. Ульянов, А.А. Бекаев, Н.Ю. Чихачёва // Производство проката. 2009. № 5. С. 18–21.
5. Щедрин А.В., Ульянов В.В., Скоромнов В.М. и др. Повышение эффективности методов комбинированного волочения за счет регуляризации микрогеометрии рабочей поверхности инструмента // Вестник машиностроения. 2006. № 11. С. 58–60.
6. Кучеряев Б.В., Николаев Р.А., Жукова Е.А. Расчет энергосиловых параметров процесса волочения прутков // Производство проката. 2006. № 6. С. 30–33.
7. Shchedrin A.V. Generalized space-time model of deforming-cutting process // Russian Engineering Research. 1997. Vol. 17. № 3. P. 55–59.
8. Гаврилов С.А. Совершенствование процесса поверхностного пластического деформирования на основе применения металлоплакирующих смазочных материалов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. № 4. С. 33–39.
9. Гаврилов С.А., Зинин М.А. Применение эффекта безыносности при синтезе металлоплакирующих смазок для экстремальных условий трения // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 2. С. 29–33.
10. Щедрин А.В., Гаврилов С.А. Перспективные методы комбинированного волочения сплошных и круглых профилей // Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 6. С. 51–53.
11. Щедрин А.В., Козлов А.Ю., Поляков А.О., Гаврилов С.А. Трибология на основе самоорганизации // Производство проката. 2013. № 3. С. 46–47.
12. Гаврилов С.А., Зинин М.А., Ерохин В.В. и др. Закономерности контактного взаимодействия фильеры со сферическими деформирующими элементами // Тракторы и сельхозмашины. 2011. № 10. С. 52–54.

УДК 621.787.4:621.93

В.М. Сорокин¹, С.С. Танчук¹, А.В. Михеев², В.А. Зотова³,
Н.М. Тудакова², В.В. Берглезов⁴¹Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия;²Нижегородский государственный технический университет;³Нижегородский государственный педагогический университет;⁴ПК ООО "Спектр-Б" г. Павлово-на-Оке)

E-mail: zhulina-l@yandex.ru

Теоретико-экспериментальное обоснование нового совмещенного процесса комбинированной обработки поверхностей трения резанием, ППД и воздействием напорных струй технологических жидкостей

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследований при обработке цилиндрических поверхностей трения деталей типа валы при совмещении в одной технологической наладке процессов резания, ППД и воздействия напорных струй смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) и раствора антифрикционной смеси (РАС) в зоне реза и вибрирующего шарика соответственно с целью повышения качества обработки и производительности.

Ключевые слова: совмещенный процесс, комбинированная обработка, резание, ППД, воздействие напорных струй, технологические жидкости.

There are presented of the results theoretic-experimental of working cylindrical researches surfaces friction details tupe shafts off – coincidence, off – one technological instrument processing cutting, PPD and to influence pressure streams SOG and antifricition solution (RAS) in zone of cutter and vibro – to wear down ball for rising quality working and productivity.

Keywords: coincidence processing, combination working, cutting, PPD, influence pressure, streams technological fluids mediums.

В различных областях техники (авиационно-космической, автомобиле- и станкостроении, в дорожно-строительных машинах и др.) находят широкое применение детали типа нежесткие валы, штоки, работающие в условиях знакопеременного нагружения, трения скольжения и др. Основными эксплуатационными требованиями к таким деталям являются высокие износо- и задиростойкость, контактная жесткость и прочность, коррозионная стойкость, обеспечение плотности и герметичности в сопряжениях и др., которые зависят от параметров качества поверхностей: шероховатости и микрорельефа, твердости и структуры поверхностного слоя металла, знака и характера распределения в нем остаточных напряжений [1].

Для обеспечения требуемых показателей качества цилиндрических поверхностей и повышения их эксплуатационных показателей в технологический процесс изготовления деталей вводятся дополнительные чистовые и отделочно-упрочняющие операции резания и *поверхностного пластического деформирования* (ППД). При этом, как показывает практика, это осуществляется в основном по принципу применения последовательной обработки поверхностей данными методами, а это связано с увеличением трудоемкости и, следовательно, себестоимости изготовления деталей машин. Поэтому наиболее эффективным представляется

использование комбинированных методов, основанных на последовательном соединении в одной наладке режущих и деформирующих элементов без изменения их основных функций – формообразования поверхности и формирования качества поверхностного слоя соответственно. Кроме того, для качественной обработки длинномерных (нежестких) деталей необходимо снижать усилия резания и ППД. Этого можно достичь за счет подачи в зоны обрабатываемых элементов высоконапорных струй *технологических жидкостей* (ТЖ) СОЖ в зону резания и РАС в зону обработки шариком или роликом.

В связи с этим был разработан и изготовлен [2, 3] многофункциональный комбинированный инструмент (устройство), обеспечивающий совмещение процессов формообразования (резание чашечным резцом) с воздействием высоконапорной струи СОЖ, отделки и упрочнения вибронакатыванием с нанесением антифрикционного покрытия (Cu, MoS₂, латунь и др.) за счет подачи в зону обработки высоконапорной струи РАС.

Устройство состоит из режуще-деформирующего инструмента [4] и приспособления с хвостовиком, служащего соединительным звеном в системе раздельного подвода ТЖ к обрабатываемым элементам и звеном для крепления в суппорте станка.

В приспособлении выполнены два сквозных отверстия с резьбой со стороны обоих торцев, одно из которых расположено с противоположной стороны от хвостовика под углом 10...15° к его (хвостовика) продольной оси, другое под углом 65...70° относительно первого по окружности кронштейна. В отверстиях сверху установлены изогнутые трубки с дозирующими соплами на концах, подведенными к обрабатываемым инструментам с зазором 2...5 мм, для обеспечения полуоткрытого способа подачи под давлением СОЖ и РАС; снизу в отверстиях установлены штуцеры с трубопроводами для подвода ТЖ.

Обработку предлагаемым устройством осуществляют следующим образом. Заготовку закрепляют в центрах или патроне токарного станка и сообщают ей вращение. На торцевой поверхности заготовки резцом *комбинированного инструмента* (КИ) или предварительно другим резцом на другом станке выполняют фаску: $h = t_0 + i_{\text{деф}}$, где t_0 – глубина резания – установленный припуск на обработку; $i_{\text{деф}}$ – статический натяг деформирования – разница между радиальными вылетами резца и шарика. Затем, установив чашечный резец на глубину резания t_0 под углом 15...35° к оси детали, включают осевую подачу и одновременно подачу СОЖ под давлением $p = 20 \cdot 10^5$ Па на обрабатываемую поверхность. Затем в контакт с поверхностью, оставшейся на заготовке фаски высотой $i_{\text{деф}}$, входит деформирующий шарик, при выходе которого на цилиндрическую поверхность заготовки усилие деформирования возрастает до заданного номинального значения, одновременно включается подача РАС и производится процесс вибронакатывания обработанной впереди идущим чашечным резцом поверхности с нанесением под давлением $p \approx 20 \cdot 10^5$ Па струи РАС антифрикционными элементами из раствора. Подробное описание конструкции и принципа работы данного устройства приведены в работах [3, 5], поэтому в статье рассмотрены результаты теоретико-экспериментального исследования, касающиеся нового *совмещенного процесса комбинированной обработки* (СПКО), состоящего из *обработки резанием* (Р), ППД и воздействия *напорных струй технологических жидкостей* (НСТЖ) – СОЖ и РАС на зоны контактов резца и шарика с поверхностью заготовки (Р–ППД–НСТЖ). При такой совмещенной обработке обеспечиваются более благоприятные условия для процессов резания металла и пластического деформирования за счет подачи под заданным давлением НСТЖ, в частности, снижение усилий резания и ППД.

Так как взаимодействие обрабатываемых элементов устройства с поверхностью заготовки происходит в условиях действия высоконапорных струй ТЖ, то

силы резания и ПД шариком (или удельные давления от действия этих сил) можно представить в виде слагаемых:

$$\begin{aligned} q_{\Sigma p} &= q_{1p} + q_{2\text{СОЖ}}, \\ q_{\Sigma ш} &= q_{1ш} + q_{2\text{РАС}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где q_{1p} и $q_{1ш}$ – удельные давления, создаваемые в зонах обработки резцом и шариком соответственно, МПа;

$q_{2\text{СОЖ}}$ и $q_{2\text{РАС}}$ – удельные давления (нагрузка), создаваемые в зонах обработки от действия напорных струй СОЖ и РАС соответственно, МПа.

Давления $q_{2\text{СОЖ}}$ и $q_{2\text{РАС}}$, создаваемые импульсными струями СОЖ и РАС на поверхности заготовки, определяются зависимостями, основанными на формуле гидроудара Н.Е. Жуковского:

$$q_{2\text{СОЖ (РАС)}} = K_1 \rho_{\text{ж}} C_{\text{ж}} v_{\Sigma \text{ТЖ}}, \quad (2)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий свойства ТЖ (СОЖ или РАС);

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность ТЖ, кг/м³;

$C_{\text{ж}}$ – скорость звука в ТЖ, м/с;

$v_{\Sigma \text{ТЖ}}$ – суммарная скорость воздействия струй ТЖ на обрабатываемую поверхность заготовки:

$$v_{\Sigma \text{ТЖ}} = \frac{0,85 K_{\text{т}} \sigma_{\text{в}}}{\rho_{\text{ж}} C_{\text{ж}} \sin \alpha}. \quad (3)$$

Зависимость (3) основана на следующем: для осуществления процессов резания или упрочнения ПС металла детали необходимо, чтобы напряжения, возникающие в нем, были равны или превышали предел текучести ($\sigma_{\text{т}} \approx 0,85 \sigma_{\text{в}}$), т.е. на поверхности детали следует создать давление, равное или превышающее предел текучести материала. Так как взаимодействие струи жидкости и обрабатываемых инструментов (резец, шарик) с поверхностью детали можно рассматривать как создание распределенной нагрузки величиной $q_{\Sigma p}$ или $q_{\Sigma \text{ПД}}$ (см. (1)), то их можно переписать в виде

$$\begin{aligned} q_{\Sigma p} &= q_{1p} + q_{2\text{СОЖ}} \geq 0,85 K_{\text{т1}} \sigma_{\text{в}}; \\ q_{\Sigma \text{ПД}} &= q_{1ш} + q_{2\text{РАС}} \geq 0,85 K_{\text{т2}} \sigma_{\text{в}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $K_{\text{т1(2)}}$ – коэффициенты, учитывающие изменение термодинамического состояния поверхности в результате обработки соответствующей струей ТЖ вращающейся детали с учетом условий поперечного растекания, а также свойств ТЖ. В зависимости от скоростей вращения детали $v_{\text{г}}$ и подачи инструмента $v_{\text{с}}$ для среднеуглеродистых сталей типа 30ХГСА, 40Х, 45 и т.д. (36...42 НРС) величина $K_{\text{т}}$, полученная экспери-

ментальным путем, составляет 5...10. Величину $v_{\Sigma ТЖ}$ можно также оценить по выражению

$$v_{\Sigma ТЖ} = \sqrt{(C_l v_{ж} \sin \alpha)^2 + v_g^2 + v_s^2}, \quad (5)$$

где C_l – коэффициент потерь, учитывающий расстояние от сопла до поверхности обрабатываемой детали ($C_l = 0,7...0,9$);

$v_{ж}$ – скорость ТЖ на выходе из сопла, м/с.

Влияние скорости v_s на эффективность обработки связано с высокой интенсивностью подвода в зону обработки энергии, что увеличивает область критических значений напряженного состояния.

Частоту (n) воздействия импульсных струй ТЖ (СОЖ и РАС) на поверхность заготовки и диаметр действия давлений (d_{gg}) этих струй определяют по формулам [6]

$$n = \frac{120 K_{п} K_c d_{gg} v_{н}}{v_s C_{ж}} \sqrt{1 - \frac{v_{н}^2}{C_{ж}^2}}; \quad (6)$$

$$d_{gg} = K_c d_c \frac{v_{н}}{C_{ж}} \sqrt{1 - \frac{v_{н}^2}{C_{ж}^2}}, \quad (7)$$

где $v_{н} = v_{ж} \sin \alpha$ ($v_{ж}$ – скорость ТЖ на выходе из сопла, м/с);

$K_{п}$ – коэффициент перекрытия зон обработки;

K_c – эмпирический коэффициент, учитывающий отличие размера контактной зоны обработки от условного диаметра струи ТЖ ($K_c = 1,2...3,0$);

d_c – диаметр сжатой струи, м, можно принять равным условному диаметру сечения сопла d_y .

Площадь сечения сопла определяется по формуле

$$f_c = \frac{Q}{K_p \sqrt{\frac{2 \Delta p q}{\rho_{ж}}}}, \quad (8)$$

где Q – расход ТЖ через отверстие d_y ;

Δp – перепад давления, кГс/м²;

q – ускорение силы тяжести, м/с²;

K_p – коэффициент расхода ТЖ ($K_p = 0,620...0,625$).

Принимая $v_{ж} \approx 10 v_{тр}$ ($v_{тр}$ – скорость жидкости в трубопроводе), перепад давления можно найти из выражения

$$\Delta p = \frac{0,1 \rho_{ж} v_{ж}^2}{q}. \quad (9)$$

Контактную нагрузку $q_{1р}$ при обработке чашечным резцом можно определить по формулам, если процесс резания описывать зависимостями сил резания P_x, P_y, P_z и моментов $M = C_m P_x P_z = C_m S_0 7 t$ [7].

Результаты исследований М.Л. Хейфеца и других показали, что напряженное состояние в зоне резания

целесообразно представлять параметрами, характеризующими напряжения на участках единичной длины (σ_l, σ_v) в направлениях главного движения $v - \sigma_z$, и перемещения режущего лезвия $v_z - \sigma_x$. Тогда, учитывая взаимозависимости движений v и v_r , можно записать $\sigma_{xz} = \sigma_x \sigma_z = \sigma_e \sigma_v$; $\sigma_B = \sigma_e \sigma_v / (\sigma_l + \sigma_v)$, где $\sigma_e = t K_e$; $\sigma_v = \frac{P_z}{S} t$ напряжения (σ_e), при которых на-

чинается пластическое течение металла и условное напряжение (σ_v), характеризующее энергоемкость процесса соответственно. Отсюда имеем

$$\begin{aligned} P_z &= \sigma_B S t (K_e + 1); \\ P_{рез} &= \sqrt{P_z^2 + P_y^2}; \\ P_y &= P_z \operatorname{tg}(\eta + \varphi). \end{aligned} \quad (10)$$

Сила P_x практического значения не имеет, так как ее величина составляет не более $0,1 P_y$.

K_e – усадка стружки в продольном направлении ($K_e = 1,5...1,8$); η – угол трения скольжения; φ – угол наклона режущей кромки резца к оси детали ($\varphi = 16'35^\circ$). Произведение $S t$ можно принять за площадь контакта режущей кромки резца ($S_{п.к}$) с поверхностью детали, тогда после преобразований получим контактную нагрузку $q_{1р}$ при резании чашечным резцом:

$$q_{1р} = \sigma_B (K_e + 1) \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\eta + \varphi)}. \quad (11)$$

Среднюю контактную нагрузку при вибронакатывании шариком радиусом $R_{ш}$ определяем по выражению

$$q_{2ш} = \pi R_{ш}^2 H_V \varepsilon C_k \frac{1}{S_0}, \quad (12)$$

где $\varepsilon = h / R_{ш}$ – относительная глубина внедрения шарика при вибронакатывании (вдавливании шарика); H_V – твердость по Виккерсу; C_k – коэффициент, учитывающий виброколебания шарика ($C_k = 0,6...0,8$); S_0 – площадь отпечатка шарика, мм².

По данным И.В. Крагельского, В.М. Торбило, следует считать, что при $\varepsilon = 0,0001...0,0004$ происходит переход упругой деформации в пластическую и начинается процесс вибронакатывания при минимальном усилии прижима шарика к поверхности детали. Отсюда удельное давление при вибронакатывании шариком составит:

$$q_0 = 4,65 \left(\frac{3 \sigma_b}{1 - 2 \mu} \right) 3 \frac{(R_{ш} \beta_0)^2}{S_{\phi}}, \quad (13)$$

где $\beta_0 = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}$ – приведенный параметр, учи-

тывающий упругие характеристики контактирующих тел; μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона; E_1 и E_2 – модули упругости Юнга этих тел; S_ϕ – фактическая площадь контакта при минимальной нагрузке, которая, по данным Н.Б. Демкина, Д.Н. Гаркунова, а также наших исследований (в условиях контакта с антифрикционным покрытием) [9], может составлять 0,01...0,10 % от номинальной площади отпечатка (S_0) шарика.

Полученная обобщенная теоретическая модель (1)–(13) показывает, что эффективность и качество процесса СПКО с воздействием напорных струй ТЖ зависят от конструктивно-технологических параметров процесса, условий обработки, геометрических параметров инструмента и физико-механических характеристик контактирующих тел. Для оценки влияния ТЖ необходимо проводить эксперименты по определению зависимости интенсивности воздействия напорных струй на процесс перехода металла из упругого состояния в упругопластическое. Эксперимент позволяет определить влияние на процессы резания и упрочнения инструментом воздействия напорных струй ТЖ, а также без них.

Использование предложенных математических зависимостей для заданных технологических условий обработки Р–ППД–НСТЖ позволяет определить основные конструктивно-технологические параметры процесса и комбинированного инструмента (P_1 , q_{cp} , $R_{ш}$, v_Σ , d_{gg} , f_c и др.). Например, задаваясь $\varepsilon = h / R_{ш} \approx 0,0001...0,0003$, параметрами канавки РМР глубиной 2...5 мкм, шириной 0,2...0,3 мм определяют величины $R_{ш} = 2...3$ мм; $P_{ш} = 50...150$ Н, $\Delta p = (15...25) \cdot 10^5$ Па; $v_d = 130...160$ м/мин; $v_\Sigma = 600...900$ м/мин.

Для оценки эффективности данной обработки проводили комплекс исследований на цилиндрических образцах – валах с наружным диаметром 30...60; 80...100 мм, длиной 600...700 мм из сталей 45, 40Х, 30ХГСА, получивших распространение при изготовлении штоков различных пневмо-гидроагрегатов. Обработку проводили на металлорежущем станке модели 1А616 при следующих условиях и режимах, полученных расчетно-экспериментальным путем: исходная точность заготовки – 10...11-й квалитет; чашечный резец диаметром 60 мм с режущим элементом из материала Т15К6; деформирующий элемент – шарик диаметром 5...6 мм (ШХ15, 60 HRC); скорость вращения заготовки 130...160 м/мин; осевая подача инструмента 0,08...0,15 мм/об; сила деформирования 50...150 Н; амплитуда колебаний шарика 1,0...1,5 мм; глубина

резания 1,5...2,0 мм; фаска на торце заготовки, выполненная предварительно высотой 4 мм; статический натяг деформирования 1,5...2,0 мм; площадь сечения сопла 1...1,5 мм²; $v_\Sigma = 10...20$ мс; СОЖ – эмульсия под давлением $(15...20) \cdot 10^5$ Па; раствор антифрикционной смеси – состав % мас.: медь хлорная – 10, олово двуххлористое – 3...4, стеариновая кислота – 0,5, уксусная кислота – 8...10, мочевины (карбамид) – 1, дисульфид молибдена – 4, вода – 10, глицерин (динамитный) – остальное, давление подачи РАС – $(20...25) \cdot 10^5$ Па.

Параметры качества поверхностного слоя: характеристики микрорельефа, микротвердость H_μ и твердость по Виккерсу HV, микроструктуру, прочность сцепления антифрикционного покрытия с основой и др., а также эксплуатационные характеристики: износо- и задиростойкость, коэффициент трения, коррозионную стойкость изучали с помощью известных стандартных методик и приборов, приведенных в работах И.В. Крагельского, А.М. Сулимы, а также наших исследованиях и др.

В результате исследований, после такого комплексного воздействия на заготовку, выявлено, что при совмещенной обработке Р–ПД–НСТЖ на указанных выше режимах обеспечиваются устойчивое резание и упрочнение вибронакатыванием металла, сплошное равномерное покрытие пленкой толщиной до 1,5 мкм на микровыступах неровностей обработанной поверхности с шероховатостью после обработки резцом $0,6 < Ra < 5$ мкм.

В зависимости от режима обработки и исходной шероховатости происходит изменение (улучшение) в сравнении с обработкой без РАС параметров качества поверхностного слоя: по критериям Ra с 0,63...0,45 до 0,30...0,16 мкм; S_m с 0,3...0,6 до 1,0 мм; $t_p = 50$ % с 38...40 до 32 %; радиуса скругления вершин r_1 и впадин r_2 микронеровностей соответственно r_1 с 0,8...1,2 до 2,0 мм и r_2 с 1,4...1,7 до 2,5...3,0 мм. Таким образом, на поверхности формируется более пологий микрорельеф с особой вытянутой текстурой покрытия и тончайшего слоя металла основы толщиной до 1,5 мкм. Это происходит за счет благоприятного действия РАС, обеспечивающей смазку при пластическом деформировании шариком металлов покрытия и основы. При этом микротвердость покрытия повышается на 30...40 %, а металла основы на 15...20 %. В поверхностном слое образуются остаточные напряжения сжатия величиной до 700 МПа, переходящие в растягивающие на глубине 0,2 мм. Точность при совмещенной обработке Р–ППД–НСТЖ повышается с 11...10-го квалитета после резания до 9...8-го квалитета после традиционного вибронакатывания и 8...7-го квалитета с подачей СОЖ и РАС под давлением

Результаты сравнительных испытаний пяти образцов из сталей 45, 30ХГСА

Показатели качества обработки	Обработка КИ, СОЖ поливом (без давления)	Обработка КИ с подачей СОЖ и РАС под давлением $\approx 20...25 \cdot 10^5$ Па
Средний износ обработанной поверхности, мг, в условиях ($P_{\text{наг}} = 6$ МПа, $t = 10$ ч, $v = 800$ мин ⁻¹)	116,7	38,4
Интенсивность износа $Jh \cdot 10^5$, мг/м	4,8...5,2	1,74...1,81
Коэффициент трения	0,11...0,12	0,065...0,7
Задиростойкость, с	71...73	172...225
Коррозионная стойкость в условиях влажного воздуха и морской воды, %	100	350...450
Стойкость резца (средняя), мин	36	65

(15...20)·10⁵ МПа. Производительность увеличивается в 2–3 раза за счет совмещения операций обработки.

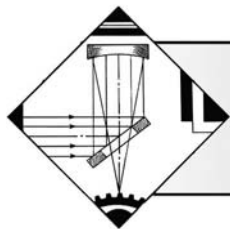
Изменения параметров качества поверхностного слоя приводят к значительному уменьшению контактного давления между деталями и коэффициентов трения, что резко снижает вероятность задиры рабочей поверхности и теоретически (в некоторых случаях практически) исключает изнашивание основных металлов трущихся деталей. Для подтверждения указанного проводились сравнительные испытания на специальных установках типа 77МТ, СМЦ-2. Результаты испытаний приведены в таблице.

Таким образом, указанные выше результаты исследования и данные таблицы свидетельствуют, что новый совмещенный способ Р-ППД-НСТЖ [3, 5] обеспечивает более высокие показатели качества поверхностного слоя и точности обработки, стойкости резца (шара), износо- и задиростойкости и др. по сравнению с обработкой данным КИ в обычных тра-

диционных условиях, когда СОЖ в зону обработки резцом подавали способом полива (без давления), а в зону обработки шариком РАС не подавали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сорокин В.М., Тудакова Н.М., Михеев А.В. Повышение качества поверхности и эксплуатационных свойств изделий технологическими методами: монография. Н. Новгород: Изд. НГТУ, 2012. 219 с.
2. Сорокин В.М., Танчук С.С., Зотова В.А. и др. Устройство для режуще-деформирующей обработки валов с нанесением антифрикционных покрытий // СТИН. 2012. № 9. С. 38–40.
3. Сорокин В.М., Тудакова Н.М., Михеев А.В. и др. Многофункциональное устройство для режуще-деформирующей обработки с нанесением антифрикционных покрытий // Вопросы вибрационной технологии. Межвуз. сб. науч. статей. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2012. С. 116–119.
4. А.с. 1252146. Комбинированный инструмент / В.М. Плотников, Л.Г. Терикова и др. 23.08.86. Бюл. № 31.
5. А.с. 122053. Комбинированный инструмент / В.М. Сорокин, Н.М. Тудакова, С.С. Танчук и др. 20.11.12. Бюл. № 32.
6. А.с. №1806210. Способ упрочнения поверхности металлических изделий / В.Ф. Жданов, А.В. Кузнецов. Заявка № 4800939/02 от 18.12.89. Оpubл. 30.03.93. Бюл. № 12.
7. Хейфец М.Л. Резание и деформирование поверхности при свободном вращении лезвия ротационного инструмента // Вопросы вибрационной технологии: межвуз. сб. науч. статей. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2012. С. 177–180.
8. Сорокин В.М. Комбинированная антифрикционно-упрочняющая обработка деталей машин. Горький: Все-союз. совет научн.-техн. обществ, 1985. 91 с.
9. Сорокин В.М., Суслик М.Е., Танчук С.С. Технологическое и расчетное обеспечение при послойном натирании и упрочнении твердых смазок на внутренних поверхностях цилиндров // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 11. С. 42–45.
10. Сорокин В.М., Танчук С.С., Михеев А.В. и др. Упрочнение поверхностей валов совмещенным натиранием антифрикционных покрытий и ППД // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 2. С. 38–43.
11. Сорокин В.М., Зотова В.А., Михеев А.В. и др. Методика и результаты сравнительных испытаний на износо- и задиростойкость гильз и цилиндров после комбинированной обработки // Технология упрочнения, нанесения покрытия и ремонта: теория и практика. Ч. 2. Матер. междунаучн.-практ. конф. СПб.: изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 311–316.



ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

УДК 631.3.02: 621.793.927.7

В.П. Лялякин¹, В.Ф. Аулов¹, В.В. Иванайский¹,
Н.Т. Кривочуров¹, Д.В. Коваль², А.В. Ишков¹

(¹НИ технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка РА
сельскохозяйственных наук (ГОСНИТИ),

²Барнаульский аграрный университет)

E-mail: gosniti@mail.ru

Особенности индукционной наплавки длинномерных почвообрабатывающих органов сельхозтехники

Установлено, что скорости нагрева шихты и поверхности длинномерной детали при индукционной наплавке твердого сплава не совпадают, это вызывает ухудшение качества упрочняющего покрытия, нарушает условия теплоотвода и способствует увеличению доли наименее износостойкой доэвтектической зоны покрытия. Разработан и изготовлен индуктор для односторонней автоматической наплавки длинномерных рабочих органов сельхозтехники, выбран способ и режимы наплавки твердого сплава. Для упрочненных новым способом полевых досок, лемехов и ножей землеройных машин проведены металлографические исследования получающегося покрытия и установлен состав наплавленного слоя из твердого сплава ПГ-С27 на сталях 65Г и 15ХСНД.

Ключевые слова: упрочнение поверхности, ТВЧ-нагрев, твердый сплав, рабочие органы сельхозтехники, автоматическая технология, износ.

It is established, that heat rates of fusion mixture and a surface of a lengthy detail at induction overlaying welding hard metal do not coincide are calls deterioration of a hardening covering, breaks conditions of heat rejection and promotes increase in a share of the least wear-resistant low eutectic cover zones. The inductor for single-sided automatic overlaying welding lengthy actions of agricultural machinery is developed and manufactured, the way and regimes of overlaying welding of hard metal picked. For the swath boards strengthened by a new way, shares and knives of digging machines metallurgical surveys of a received covering are lead and the structure of a built-up layer from hard material ПГ-С27 on steels 65Г, 15ХСНД (in Russian) is established.

Keywords: reinforcement of a surface, RFC-heating, hard material, organs of agricultural machinery, automatic technology, wear.

Введение

Среди используемых в настоящее время конструкций *почвообрабатывающих органов* (ПОО) сельхозтехники и *рабочих органов* (РО) других машин большую долю составляют плоские детали, длина (l) которых значительно (в 3–10 раз) превосходит остальные габаритные размеры.

Толщина (h) таких длинномерных РО, как правило, задается параметрами товарного проката конструкционных и легированных сталей (5...30 мм), а ширина (b) колеблется в интервале 45...160 мм. Такая форма РО обеспечивает высокую технологичность их изготовления в 2–3 операции, а их длинная режущая кромка упрочняется методами напыления, химико-термической обработки или индукционной наплавки [1]. Примерами длинномерных ПОО сельхоз-

техники являются: лемех предплужника ПЛЖ 02.701, полевая доска П01.580, долотообразный лемех С01.702А, лемех КША 07.030, отношение l/d которых составляет 2,9; 3,4, 5,2 и 9,6 соответственно.

Еще больших значений этот параметр достигает у РО дорожных землеройных машин. Так, нож ДЗ.118.10.001 имеет габаритные размеры ($l \times d \times h$) 1500×400×30 мм, при этом ширина наплавленного участка поверхности составляет 80...150 мм.

У длинномерных ПОО и РО относительно небольшой по площади упрочняемый участок их поверхности обеспечивает нормальное функционирование всей детали, поэтому здесь к качеству наплавки предъявляются повышенные требования.

Цель работы – выявление основных факторов, влияющих на структуру наплавленного слоя и разработка конструкции индуктора для односторонней ин-

дукционной наплавки длинномерных почвообрабатывающих органов с получением качественного износостойкого покрытия.

Методы проведения исследований и материалы

В качестве длинномерных ПОО и РО, упрочняемых индукционной наплавкой твердого сплава, исследовались: полевая доска П01.580, лемех КША 07.030, лемех ПЛЖ 02.701, отштампованные из стали 65Г, а также нож землеройной машины ДЗ.118.10.001, выполненный из стали 15ХСНД.

Упрочнение ПОО и РО осуществлялось наплавкой высоколегированного хромистого чугуна ПГ-С27 из шихты, содержащей 85 % мас. твердого сплава и 15 % мас. плавящего боратного флюса П-0,66 [1]. Для индукционной наплавки использовался высокочастотный промышленный генератор ВЧГ3-160/0,066, работающий в следующих режимах: анодный ток 10 А, сеточный ток 2,5 А, анодное напряжение 10...12 кВ.

Для контроля температуры шихты и поверхности упрочняемой детали использовали хромель-алюмелевые микротермопары ХА с диаметром шарика 0,2 мм, которые с помощью конденсаторной контактной сварки приваривали к детали или на 3/4 погружали в шихту. Измерения осуществляли следующим образом. После предварительной калибровки термопару подключали к печатающему устройству АЦП К57ПВ1А и осуществляли считывание, оцифровку и передачу на персональную ЭВМ его показаний со скоростью до 36 с⁻¹, что позволяло фиксировать быстропротекающий процесс индукционного нагрева. Для серии параллельных измерений температуры использовали по три образца. Общая погрешность измерения температуры не превысила 4,5 %.

Микроструктуру покрытий исследовали на МИМ-7, микротвердость определяли на микротвердомере ПМТ-3 с нагрузкой 100 г, фазовый анализ проводили на установке ДРОН-2, химический состав изучали на спектрометре "UV FOUNDRIMASTER".

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 приведены чертежи длинномерных ПОО сельхозтехники с указанием расположения на них участков, упрочняемых индукционной наплавкой. К таким деталям из-за ограничения по мощности ВЧ-генераторов и с точки зрения экономии электроэнергии предпочтительно применение одностороннего непрерывно-последовательного

способа индукционной наплавки, при котором электромагнитное поле индуктора воздействует только на наплавляемый участок поверхности детали [2].

При этом, с учетом размеров и геометрии ПОО и РО, условия теплоотвода от поверхности вглубь детали по ее ширине различные. Кроме того, при наплавке длинномерных деталей в массовом производстве возникают дополнительные проблемы непостоянства размеров и разнотолщинности проката, что также приводит к неравномерному нагреву упрочняемой поверхности, а в последующем – к перегреву наплавочной шихты. Общее ухудшение качества упрочняемого слоя возникает вследствие наложения этих факторов.

Кроме указанных выше факторов, установлено, что на качество наплавленного слоя влияют неравномерность нагрева образца на границах шихта–основной металл и шихта–воздух из-за происходящих в шихте металлургических процессов, разная дисперсность частиц твердого сплава, различные теплоемкости и температуры плавления ПГ-С27, боратного флюса и его компонентов.

На рис. 2 приведены обобщенные экспериментальные зависимости температуры на границах шихта–основной металл и шихта–воздух от времени при нагреве образцов из сталей 65Г, 15ХСНД и максимальной вводимой мощности, которые показывают принципиальное различие в механизмах ТВЧ-нагрева шихты и поверхности детали под ее слоем.

Как следует из рис. 2, наблюдается как минимум три временных стадии, отличающиеся интенсивностью нагрева шихты и основного металла.

На первой стадии ($t_0 - t_1$) на границе основной металл–шихта происходит интенсивный рост температуры до T_1 , которая для сплава ПГ-С27 достигает 800...850 °С в зависимости от марки стали, а на границе шихта–воздух она достигает лишь 100...150 °С. В этот

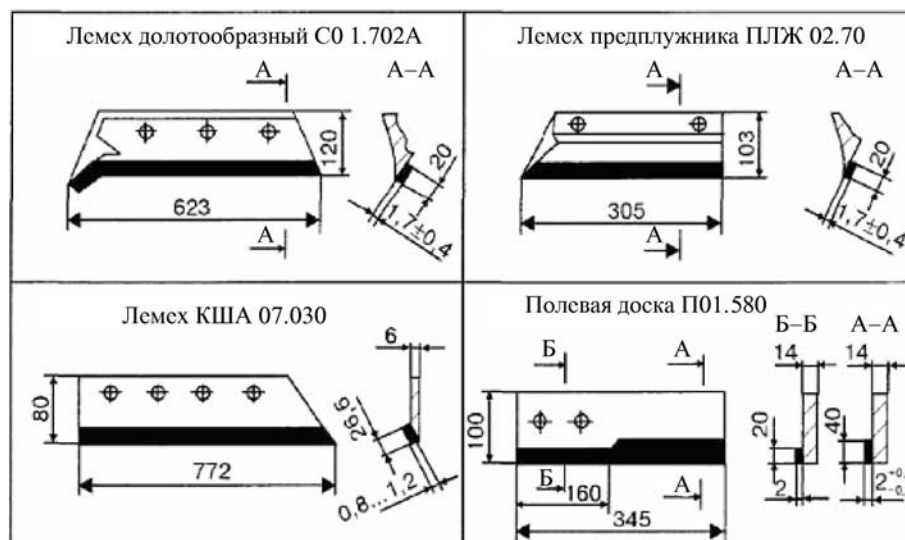


Рис. 1. Длинномерные почвообрабатывающие органы сельхозтехники, упрочняемые индукционной наплавкой твердых сплавов

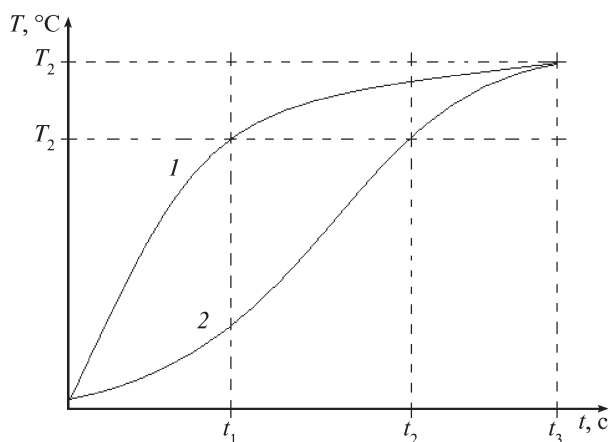


Рис. 2. Обобщенная зависимость температуры на границах шихта–основной металл (1) и шихта–воздух (2) от времени

период времени по толщине наплавочной шихты имеет место максимальный температурный градиент. В конце первой стадии вследствие достижения высокой температуры упрочняемой поверхности на ней образуются отдельные участки расплавленного флюса, который активно взаимодействует с окисными пленками и подготавливает поверхность основного металла для образования металлических связей с твердым сплавом. Из наплавочной шихты удаляется адсорбционная и кристаллизационная влага. По времени эта стадия занимает $\approx 30\%$.

Вторая стадия процесса ($t_1 - t_2$) характеризуется снижением интенсивности нагрева основного металла в 3–4 раза, но увеличивается скорость нагрева наплавочной шихты. В этот промежуток времени происходит разложение и гидролиз буры, плавление компонентов флюса. По всему слою наплавочной шихты протекают реакции взаимодействия между окислами твердого сплава и компонентами флюса (CaSi_2), происходит растворение окислов в основном компоненте флюса – $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, взаимодействие между кислотными и основными оксидами. По мере распространения температуры по сечению шихты расплавленный флюс стекает между зернами твердого сплава в зону максимальных температур и на поверхности основного металла образуется система, состоящая из расплавленного флюса, шлака и частиц твердого сплава. Вследствие расплавления флюса и зерен твердого сплава фронт плавления послойно движется вверх по шихте. В этот период заканчивается плавление флюса. Из-за высокой термодинамической активности углерод и бор диффундируют в основной металл, что вызывает образование и рост доэвтектических зон. Продолжительность стадии составляет 45...55 % общего времени ТВЧ-нагрева.

На третьей стадии ($t_2 - t_3$) интенсивность нагрева несколько понижается. На контактирующих поверхностях между зернами твердого сплава и основного металла образуется легкоплавкая эвтектика, имею-

щая для системы ПГ-С27 – флюс П-0,66, температуру плавления $\sim 1080^\circ\text{C}$. Уменьшается температурный градиент по сечению наплавленного слоя, и в конце он практически исчезает. Кроме того, происходит интенсивное плавление зерен сплава и на поверхности основного металла образуется жидкая ванна [3]. Эта стадия характеризуется интенсивным взаимодействием шлака с наплавляемым сплавом и сплава с основным металлом.

Следует отметить, что при расплавлении порошковых смесей (псевдосплавов) ПС-14-80, ПС-14-60 и др. не расплавившиеся альтернативные частицы псевдосплава остаются в упрочняемом слое до завершения процесса плавления наплавочной шихты, в то время как в монофазных высоколегированных хромистых белых чугунах ПГ-УС25, ПГ-С27 и др. зерна твердого сплава растворяются полностью, поэтому их использование оказывается более предпочтительным.

В конце третьей стадии процесс плавления завершается полностью. Технологически здесь должно быть достаточно времени, чтобы успели пройти все металлургические и иные процессы: всплытие шлака, отделение газовых пузырей, раскисление и пр.

Таким образом, время и температура нагрева на каждой из указанных стадий также определяют качество наплавленного слоя. А так как во всех случаях интенсивность нагрева шихты на первой стадии процесса резко отстает от интенсивности нагрева основного металла, то для получения качественного упрочняющего покрытия при односторонней индукционной наплавке длинномерных ПОО и РО требуется изменение конструкции индуктора и организация на наплавляемой поверхности детали двух зон – зоны предварительного подогрева и зоны догрева.

Конструктивно эти зоны могут быть выполнены путем поворота ветвей плоского петлевого индуктора на разные углы относительно плоскости детали. На основании результатов проведенных ранее исследований установлено [4], что первая ветвь индуктора должна обладать наклоном грани под углом $20...35^\circ$, а вторая – под углом $10...20^\circ$ к поверхности нагрева, а оптимальная скорость перемещения детали под индуктором (v) должна составлять $3,0...3,5$ мм/с с очередным проходом обеих зон (рис. 3).

При 2-зонном нагреве расширена нагреваемая зона наплавляемого участка, вследствие чего увеличивается как время протекания металлургических процессов, так и время плавления твердого сплава. При оптимальном ориентировании ветви подогрева под ней осуществляется процесс интенсивного нагрева, необходимый на начальной стадии плавления, а конечная стадия плавления ведется при значительно меньших удельных мощностях и, следовательно, при меньшей температуре поверхности наплавляемой детали, не превышающей максимально допустимой, под ветвью догрева.

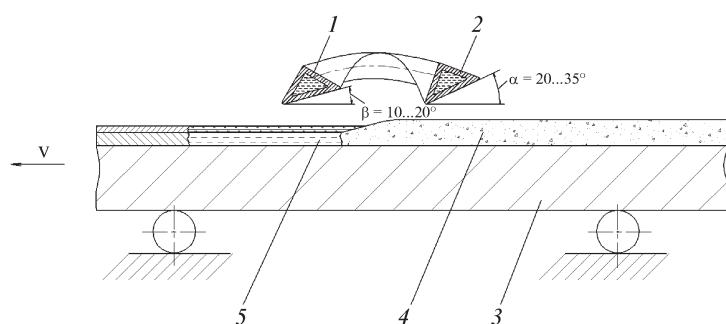


Рис. 3. Индуктор для автоматической односторонней наплавки и схема осуществления 2-зонной наплавки ПОО и РО

На основе проведенных исследований была проведена односторонняя автоматическая индукционная наплавка длинномерных ножей дорожных машин Д3.118.10.001 и исследованы характеристики получающихся покрытий. На рис. 4 представлена микроструктура наплавленного сплава ПГ-С27 и зоны сплавления на стали 15ХСНД.

Микроструктура твердого сплава соответствует стадии полного расплавления шихты, а в наплавленном слое в процессе кристаллизации образовались все зоны [1, 5]. Граничная полоска имеет толщину от 0,008...0,01 мм, на долю наименее износостойкой до эвтектической зоны приходится 20...30 % от общей толщины упрочняющего покрытия, эвтектическая зона составляет 8...10 %, остальное – сверхтвердая заэвтектическая зона, содержащая различные карбидные фазы. Твердость всего наплавленного слоя составила 50...53 HRC. Микротвердости (HV) структурных составляющих исследуемого сплава приведены ниже:

граничная полоска 414...480; дендриты аустенита 414...600;



Рис. 4. Микроструктура наплавленного сплава ПГ-С27 на стали 15ХСНД:

1 – граничная полоска; 2 – дендриты аустенита; 3 – карбидная эвтектика; 4 – первичные карбиды

карбидная эвтектика 390...450; первичные карбиды 1400...1760.

Металлографическим анализом установлено, что в составе заэвтектической, эвтектической и доэвтектической зон присутствуют α - и γ -фазы. Последовательным исследованием наплавленного металла установлено, что основным карбидом во всех зонах является соединение типа $(Cr,Fe)_7C_3$, а карбид $(Cr,Fe)_3C$ образует лишь отдельные включения.

Химический состав основной заэвтектической зоны следующий: C > 4,50 %; Si – 2,50 %; Mn – 1,23 %; Cr – 31,20 %; Ni – 1,24 %. Химический состав покрытия не соответствует рецептурному составу твердого сплава ПГ-С27 по хрому ~ на 3 %, по никелю ~0,7 %, однако это не является браковочным признаком.

Износостойкое покрытие по основной структуре и фазовому составу отвечает требованиям, предъявляемым к наплавленному слою. Основопологающим фактором является размер доэвтектической зоны, которая в наплавленном слое не превышает 30 %.

Выводы

1. Исследованы процессы нагрева на границах шихта–основной металл и шихта–воздух при односторонней автоматической индукционной наплавке длинномерных плоских деталей. Установлено, что скорости нагрева шихты и поверхности детали не совпадают, что вызывает ухудшение качества упрочняющего покрытия.

2. Разработан и изготовлен индуктор для односторонней автоматической непрерывно-последовательной наплавки в двух зонах: зоне интенсивного нагрева упрочняемой поверхности и плавления шихты.

3. Проведена односторонняя автоматическая индукционная наплавка при оптимальных режимах (наклон первой ветви индуктора 20...35°, второй 10...20° к наплаваемой поверхности, скорость перемещения детали 3,0...3,5 мм/с с поочередным проходом обеих зон в автоматическом режиме, анодный ток 10 А, сеточный ток 2,5 А, анодное напряжение 10...12 кВ) длинномерных ножей Д3.118.10.001, выполненных из стали 15ХСНД твердым сплавом ПГ-С27.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Износостойкие** боридные покрытия для рабочих органов сельхозтехники / А.В. Ишков, Н.Т. Кривочуров, Н.М. Мишустин, В.В. Иванайский, А.А. Максимов // Вестник АГАУ. 2010. № 9 (71). С. 71–75.

2. **Способы** контроля тепловложения при индукционной наплавке / Н.Т. Кривочуров, В.В. Иванайский, Е.А. Иванайский, В.Я. Деризин // Вестник АГАУ. 2007. № 3 (29). С. 61–62.

3. **Иванайский В.В.** Физико-химические и технологические основы управления структурой и свойствами защитного покрытия на рабочих органах сельхозмашин: монография. Барнаул: Изд-во АГАУ, 2010. 186 с.

4. **Патент РФ № 1815078.** Способ односторонней непрерывно-последовательной индукционной наплавки / А.А. Боль, О.А. Нагорных, А.Ю. Балаганский. Заявл. 13.12.90. Опубл. 15.05.93. // Бюл. № 18.

В.М. Макиенко, А.Д. Верхотуров, И.О. Романов, Д.В. Строителев
(Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск)
E-mail: mvm_tm@festu.khv.ru

Исследование изменения фазового и химического составов концентратов минерального сырья при воздействии на них дуговых разрядов

Приведены методологическая схема и результаты исследования шеелитового и бадделейитового концентратов при воздействии на них дуговых разрядов.

Ключевые слова: состав, структура, свойства, минеральное сырье.

Given the methodological scheme and the results of the study scheelite and baddeleyite concentrates at influence on them of arc discharges.

Keywords: the composition, structure, properties, mineral raw materials.

Возможность эффективного использования местного минерального сырья (концентратов и руд) для получения сварочных материалов рассмотрена в [1–6]. При этом установлено [2, 3], что при использовании ряда концентратов в шлаковых системах, содержащих Ti, Zr, W, в наплавленном слое образуются тугоплавкие соединения данных металлов, повышающие уровень его физико-химических и эксплуатационных свойств. Анализ показывает не только перспективы в использовании минерального сырья для получения сварочно-наплавочных материалов, обеспечивающих высокий уровень необходимых свойств, но и возможность разработки новых безотходных, экологически чистых металлургических процессов и технологий создания и получения легированных, быстрорежущих сталей [2, 3], а также для обогащения концентратов.

Научный и практический интерес представляет использование дугового разряда для "вскрытия" и восстановления руд и концентратов, изучение изменения их фазового и химического составов до и после обработки, а также создание теории выбора необходимых компонентов шихты и оптимальных режимов обработки. Отсутствие данной теории не позволяет обоснованно разрабатывать перспективные шлаковые системы. Для решения данной проблемы необходимо вначале разработать методологическую схему выполнения работы, "вектор" которой направлен на создание теории и практики использования минерального сырья для получения заданных свойств формируемых покрытий.

В этом направлении имеются два основных пути:

1. Полная или частичная замена стандартных составляющих шихты на сходные по составу руды, концентраты (метод подбора).

2. Введение в состав шихты минерального сырья, содержащего элементы, способные при воздействии

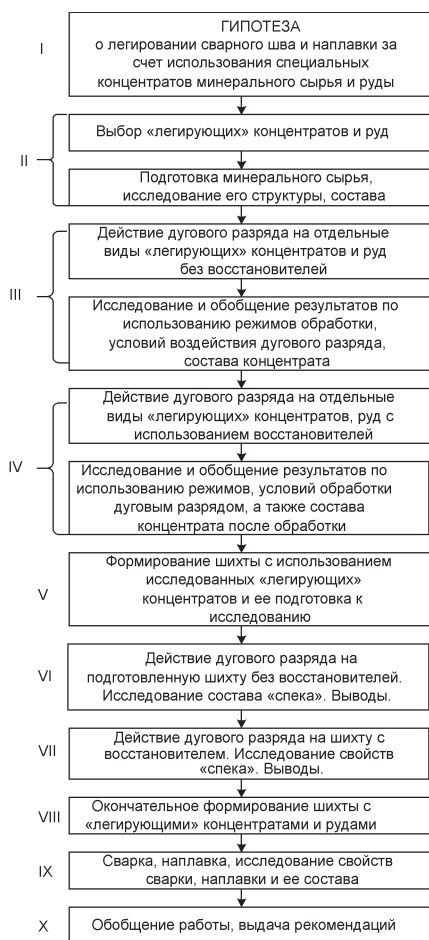
дугового разряда и восстановителей образовывать износостойкие, жаростойкие, коррозионно-стойкие, прочные тугоплавкие соединения (аналитический метод).

Была разработана методологическая схема, которая включает этапы исследований от гипотезы до получения "рабочей" шихты, содержащей концентраты и руды (см. рисунок), обеспечивающие высокий уровень свойств за счет образования при сварке и наплавке композита с включениями тугоплавких соединений (карбидов, нитридов, боридов и сплавов на их основе).

Сначала выбирают основополагающее предположение, основанное на общей потребности повышения уровня свойств сварного шва и наплавков. Гипотеза состоит в том, что в шихту добавляют не металлические легирующие компоненты, а минеральное сырье, содержащее элементы, которые под действием дугового разряда и восстановителей будут образовывать карбиды, бориды, нитриды тугоплавких металлов и сплавов на их основе, обеспечивая высокий уровень свойств.

Выбор "легирующих" концентратов на основании выдвинутой гипотезы основан на содержании в них элементов, обеспечивающих высокий уровень свойств сталей. Базой для этого являются данные по влиянию легирующих элементов (Ti, Zr, V, Cr, Mo, W, Mn) на свойства стали [7].

Экспериментальная часть связана, прежде всего, с созданием исследовательской установки, обеспечивающей дуговой процесс при минимальном износе электрода (электроды на основе вольфрама и графита). Режимы обработки приведены в табл. 1. Обработку минерального сырья осуществляли за один проход (без восстановителей), затем размалывали до частиц размером менее 0,125 мкм и исследовали химический и фазовый составы.



Методологическая схема исследований по возможности повышения свойств сварного шва и наплавки за счет использования в шихте "легирующих" концентратов и руд

Аналогичные исследования проводились и с восстановителем (графит). Режимы обработки приведены в табл. 2.

Далее были обобщены результаты экспериментов и выданы рекомендации для подготовки и исследования "рабочей" шихты.

Результаты исследований приведены в табл. 3–7. В большинстве случаев после воздействия дугового разряда произошло изменение фазового, химического составов концентратов по основным компонентам. Кроме того, при малых удельных воздействиях дугового разряда с использованием графитового электрода на шеелитовый концентрат ($t = 3,08; 4,07$ мин) его фазовый состав не изменился (образцы 2.2; 2.3); аналогично при воздействии на бадделеит графитовым электродом с $t = 3,02$ мин, когда в "спёке" наблюдался кроме ZrO_2 и $ZrSiO_4$.

При использовании графитового электрода на его поверхности обнаружены летучие оксиды SiO_2, WO_3 , которые находятся также и на вольфрамовом электроде.

Наблюдается значительное изменение фазового состава бадделеитового концентрата. В большинстве случаев его состав SiO_2, ZrO_2 и $ZrSiO_4$ изменяется (см. табл. 5), при воздействии дугового разряда происходит практически полное удаление SiO_2 (см. табл. 5, 6).

Как видно из табл. 4, при воздействии дугового разряда вольфрамовым и графитовым электродами с $t = 5,0$ мин происходит вскрытие концентрата до образования циркониевой керамики, которая при на-

Таблица 1

Режимы проведения эксперимента

Номер эксперимента	Минеральное сырье, % мас.			Режимы обработки				
	Шеелит	Графит	Бадделеит	Сила тока, А	Напряжение, В	$T_{cp}, ^\circ C$	$T_{max}, ^\circ C$	t , мин
Ш-1.1	95	5	—	150	28	1820	1880	4,25
Ш-1.2	90	10	—	150	28	1851	1911	4,17
Ш-1.3	85	15	—	150	28	1823	1892	4,22
Ш-1.4	80	20	—	150	28	1844	1899	4,25
Б-1.1	—	5	95	140	25	2422	2636	4,13
Б-1.2	—	10	90	140	25	2460	2594	4,15
Б-1.3	—	15	85	140	25	2431	2608	4,18
Б-1.4	—	20	80	140	25	2457	2681	4,16

Примечание. Ш – шеелитовая основа; Б – бадделеитовая основа.

Таблица 2

Условия проведения эксперимента

Номер эксперимента	Минеральное сырье, % мас.			Режимы обработки				
	Шеелит	Графит	Бадделеит	Сила тока, А	Напряжение, В	$T_{\text{ср}}$, °С	$T_{\text{макс}}$, °С	t , мин
Графитовый электрод								
2.1	100	–	–	50	60	1841	1876	5,45
2.2	100	–	–	50	60	1815	1932	4,07
2.3	100	–	–	50	60	1830	1872	3,18
2.4	–	–	100	62	40	2642	2876	5,00
2.5	–	–	100	62	40	2613	2802	4,05
2.6	–	–	100	66	30	2614	2810	3,02
Вольфрамовый электрод								
3.1	100	–	–	150	28	1770	1866	4,02
3.2	–	–	100	140	25	2633	2781	4,00
4.1	–	10	90	160	55	2810	2902	4,00
4.2	90	10	–	220	45	1943	2011	4,00

Таблица 3

Фазовый состав бадделеитового концентрата до обработки

2θ , °	I , имп/с	d , Å	46–1045	24–1165	3–459
20,0360	27,2	4,4278			ZrSiO ₄
20,9061	224,1	4,2455	SiO ₂		
24,0314	31,1	3,6999		ZrO ₂	
24,4530	26,7	3,6371		ZrO ₂	
26,6685	897,7	3,3398	SiO ₂		ZrSiO ₄
28,2450	243,0	3,1586		ZrO ₂	
31,5261	184,1	2,8354		ZrO ₂	
33,9598	19,1	2,6375			ZrSiO ₄
34,2251	55,5	2,6177		ZrO ₂	

О б о з н а ч е н и я: 2θ – угол (Брегга) падения (отражения) рентгеновского излучения, на котором наблюдается пик с интенсивностью I ; I – интенсивность пика, имп./с;

d – межплоскостное расстояние в кристаллической решетке, Å;

24–1165, 3–459 и т.д. – номера карточек, характеризующих вещество.

Фазовый состав бадделеитового концентрата после обработки

2θ, °	I, имп./с	d, Å	24-1165	14-534	26-1077	39-1346	26-1399	27-997
17,5745	20,3	5,0421	ZrO ₂ (монокл.)					
24,1947	62,1	3,6753	ZrO ₂ (монокл.)					
24,5931	49,0	3,6167	ZrO ₂ (монокл.)					
26,7905	55,3	3,3248			С (гексаг.)			
28,3264	490,9	3,148	ZrO ₂ (монокл.)				Zr	
30,3746	64,2	2,9402		ZrO ₂ (тетраг.)		Fe ₂ O ₃		ZrO ₂ (кубич.)
31,6044	387,1	2,8285	ZrO ₂ (монокл.)					
34,2721	97,7	2,6142	ZrO ₂ (монокл.)					
34,5619	60,3	2,593	ZrO ₂ (монокл.)	ZrO ₂ (тетраг.)				
35,4176	70,7	2,5322	ZrO ₂ (монокл.)	ZrO ₂ (тетраг.)			Zr	
35,7170	13,8	2,5117				Fe ₂ O ₃		
36,0260	9,6	2,4909	ZrO ₂ (монокл.)					
38,7422	28,8	2,3222	ZrO ₂ (монокл.)			Fe ₂ O ₃		
40,4390	21,3	2,2286				Fe ₂ O ₃		
40,8647	65,8	2,2064	ZrO ₂ (монокл.)					
41,2468	27,9	2,1868	ZrO ₂ (монокл.)					
41,5180	20,9	2,1732	ZrO ₂ (монокл.)					
44,9605	41,9	2,0145	ZrO ₂ (монокл.)					
45,6370	33,6	1,9861	ZrO ₂ (монокл.)			С (гексаг.)		
49,4121	105,2	1,8429	ZrO ₂ (монокл.)					
50,2878	135,6	1,8128	ZrO ₂ (монокл.)					
50,7300	75,1	1,7981	ZrO ₂ (монокл.)	ZrO ₂ (тетраг.)	С (гексаг.)		Zr	ZrO ₂ (кубич.)
51,3565	32,2	1,7776	ZrO ₂ (монокл.)					
53,5653	13,0	1,7094				Fe ₂ O ₃		
54,1933	68,2	1,691	ZrO ₂ (монокл.)			С (гексаг.)		
55,5507	63,4	1,6529	ZrO ₂ (монокл.)					
56,0848	32,7	1,6384	ZrO ₂ (монокл.)			Fe ₂ O ₃		

плавке должна обеспечить высокий уровень свойств (ZrO₂ (М), ZrO₂ (кубич.)). Такая керамика получается по сложной технологии порошковой металлургии и используется для жаростойкости керамического материала при стабилизации бадделита MgO [7]. Пред-

ставляет интерес воздействие дугового разряда на концентраты с добавками графита. Рентгенофазовый состав при воздействии дугового разряда во всех случаях при содержании графита от 5 до 20 % показал разложение концентрата с выделением вольфрама

Таблица 5

Фазовый состав шеелитового концентрата после обработки

2θ, °	I, имп./с	d, Å	7-210	4-806
18,5792	87,3	4,7716		
18,8131	372,8	4,7128	CaWO ₄	
28,9091	990,9	3,0858	CaWO ₄	
29,2306	448,0	3,0526	CaWO ₄	
31,6033	354,9	2,8286	CaWO ₄	
34,3630	232,6	2,6075	CaWO ₄	
37,9236	13,4	2,3705		
39,3924	252,1	2,2854	CaWO ₄	
40,1276	40,6	2,2452	CaWO ₄	
40,5281	77,1	2,2239		W
43,5178	79,0	2,0778	CaWO ₄	
45,6365	128,1	1,9862	CaWO ₄	
47,3026	382,5	1,9200	CaWO ₄	

при содержании графита до 15 %, а при добавке 20 % мас. – образование карбидов типа W₂C и WC. При содержании 20 % мас. не наблюдается фаза ZrSiO₄ и уменьшается содержание SiO₂.

Значительный интерес представляют данные химического анализа, показывающие уменьшение содержания вольфрама в спёке шеелита и в некоторых случаях циркония в бадделеите, при этом не наблюдается закономерности изменения их содержания от содержания графита.

По нашему мнению, данные химического анализа изменяются в связи с интенсивной коагуляцией вольфрама в процессе воздействия дугового разряда. Вольфрам и его соединения образуют отдельные конгломераты, в которых его содержание повышается до 50...55 %. При этом в значительной части спёка его содержание уменьшается.

Исследования показывают, что при воздействии дугового разряда без защитной среды и восстановителей происходит изменение химического и фазового составов концентратов. Кроме того, в бадделеите происходит практически полное удаление и образование циркониевой керамики, которая при наплавке должна обеспечить высокий уровень свойств. В шеелитовом концентрате происходит частичное восстановление вольфрама. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности использования дугового разряда для предварительной оценки минерального сырья с целью выбора компонентов шлаковой системы.

Таблица 6

Фазовый, химический состав шеелитового (Ш) и бадделеитового (Б) концентратов до и после воздействия электрической дугой

Номер образца	Электроды	Содержание элементов				Фазовый состав
		Si	Zr	W	Ca	
2.1	Ш/Г	0,358	–	45,15	11,66	CaWO ₄ , W
2.2	Ш/Г	0,372	0,012	44,63	11,36	CaWO ₄
2.3	Ш/Г	0,511	0,0664	46,37	11,93	CaWO ₄
3.1	Ш/W	0,473	0,031	47,94	10,64	CaWO ₄ , W, Ca ₃ WO ₆
4.2	Ш+10 % Г/W	0,352	0,118	37,21	10,02	C, W, CaWO ₄
2.4	Б/Г	7,888	33,21	1,587	0,598	ZrO ₂ , ZrO ₂ (тетр.)
2.5	Б/Г	8,200	28,10	2,034	0,543	ZrO ₂ , SiO ₂
2.6	Б/Г	8,113	33,30	2,02	0,617	ZrO ₂ , ZrSiO ₄
3.2	Б/W	9,04	28,39	9,655	0,814	ZrO ₂ (М); ZrO ₂ (кубич.)

Номер образца	Электроды	Содержание элементов				Фазовый состав
		Si	Zr	W	Ca	
4.1	Б + 10 % Г/W	4,409	29,42	0,0512	0,435	ZrO ₂ (М), ZrO ₂ (тетр.), С
5.1	Б	17,000	41,40	1,070	0,920	ZrO ₂ , SiO ₂ , ZrSiO ₄
5.2	Ш	1,930	0,03	41,94	17,20	CaWO ₄

Примечание. Содержание остальных элементов: Mg, Al, P, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Se, Y, Nb, Hf < 1 %.
 Ш/Г; Б/Г – соответственно шеелитовый, бадделеитовый концентраты переплавлены графитовым (Г) электродом;
 Ш/ W; Б/ W – соответственно шеелитовый, бадделеитовый концентраты переплавлены вольфрамовым (W) электродом;
 Ш+10 % Г/ W; Б+10 % Г/ W – соответственно шеелитовый, бадделеитовый концентраты с 10 % добавкой графита (Г) переплавлены вольфрамовым электродом.

Таблица 7

Результаты экспериментальных исследований до и после обработки

Номер эксперимента	Химический состав, %	Фазовый состав
Ш	W – 47,4; Ca – 17,2; Si – 1,93; Fe – 2,89; P – 2,03	CaWO ₄
Ш-1.1	W – 22,6; Ca – 6,71; Fe – 0,7	CaWO ₄ ; W
Ш-1.2	W – 16,3; Ca – 7,1; Fe – 0,7	CaWO ₄ ; Ca ₃ WO ₆ ; W
Ш-1.3	W – 6,6; Ca – 8,3; Fe – 0,7	CaWO ₄ ; Ca ₃ WO ₆ ; W
Ш-1.4	W – 10,0; Ca – 8,1; Fe – 0,3	CaWO ₄ ; W ₂ C; W; WC
Б	Zr – 33,27; Si – 14,56; Al – 1,27	ZrO ₂ ; SiO ₂ ; WO ₃
Б-1.1	Zr – 28,4; Si – 13,10; Al – 2,80; W – 2,2	ZrO ₂ ; SiO ₂ ; CaWO ₄ , ZrSiO ₄
Б-1.2	Zr – 33,30; Si – 16,30; Al – 2,90; W – 2,0	ZrO ₂ ; SiO ₂ ; CaWO ₄ ; ZrSiO ₄
Б-1.3	Zr – 35,20; Si – 19,70; Al – 0,90; W – 2,0	ZrO ₂ ; SiO ₂ ; ZrSiO ₄
Б-1.4	Zr – 19,70; Si – 9,80; Al – 0,90; W – 1,8	ZrO ₂ ; ZrO; SiO ₂

Выводы

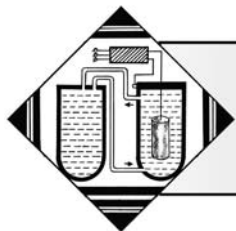
1. Показано, что при воздействии дугового разряда на шеелитовый и бадделеитовый концентраты проис-

ходит их частичное разложение. Кроме того, в бадделеите происходят полное удаление SiO₂ и образование циркониевой керамики ZrSiO₄.

2. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности полного восстановления концентратов (с образованием карбидов, нитридов и других соединений) при использовании защитной среды, оптимальных режимов обработки и применении восстановителей, а также использования дугового разряда для предварительной оценки минерального сырья с целью выбора компонентов шлаковой системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Верхотуров А.Д., Гладких Ю.Ф., Ткачук Н.С.** Использование природного минерального сырья в качестве наплавочных флюсов // Сварочное производство. 1989. № 8. С. 21–22.
2. **Бабенко Э.Г., Верхотуров А.Д., Григоренко В.Г.** Основные аспекты транспортного минералогического материаловедения. Владивосток: Дальнаука, 2004. 224 с.
3. **Бабенко Э.Г.** Теоретические и технологические основы повышения качества и свойств сплавов (покрытий) при электротермических процессах на базе создания сварочно-наплавочных материалов с использованием минерального сырья: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Комсомольск-на-Амуре, 2006. 23 с.
4. **Бабенко Э.Г., Верхотуров А.Д.** Разработка сварочных материалов на основе минерального сырья Дальневосточного региона. Владивосток–Хабаровск: Изд-во ДВГУПС; Владивосток ДВО РАН, 2000. 144 с.
5. **Верхотуров А.Д., Бутуханов В.Л., Гладких Ю.Ф.** Рациональные пути переработки вольфрамовых концентратов месторождений Дальнего Востока // Управление свойствами и переработка дисперсных материалов Дальнего Востока: сб. науч. тр. Владивосток: Дальнаука, 1990. С. 63–77.
6. **Верхотуров А.Д., Бабенко Э.Г., Макиенко В.М.** Методология создания сварочных материалов / Под ред. член-корр. РАН Б.А. Воронова. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2009. 128 с.
7. **Власова Н.М.** Создание новых композиционных оксидных и боридных керамических материалов на основе цирконийсодержащего минерального сырья: автореф. дис. ... канд. техн. наук: Комсомольск-на-Амуре, 2005. 23 с.



ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

УДК 621.793.79

И.Б. Степанов¹, Г.А. Прибытков², И.А. Фирсин², Ю.Ф. Иванов³

(¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет;

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН;

³Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск)

E-mail: stepanovib@tpu.ru

Нитридные покрытия, полученные вакуумно-дуговым испарением порошковых катодов Ti–Al, Ti–Al–Si*

Проведены исследования структуры и свойств покрытий, полученных вакуумно-дуговым испарением экспериментальных спеченных катодов Ti–Al и Ti–Al–Si. Установлено, что покрытия содержат нанокристаллические составляющие, обладают сверхвысокой твердостью, износостойкостью, имеют низкий коэффициент трения. Шероховатость поверхности покрытий, осажденных при испарении композиционных катодов, значительно меньше, чем у соответствующих композиционных покрытий, осажденных при совместном использовании одно-элементных титанового и алюминиевого катодов.

Ключевые слова: спекание, катоды, вакуумно-дуговое испарение, покрытия, твердость, износостойкость.

A structure and properties of coatings received by vacuum-arc evaporation of experimental sintered Ti–Al and Ti–Al–Si cathodes have been investigated. It is established that the coatings contain nanocrystalline constituents and have high hardness, wear resistance and low friction coefficient. A surface roughness of the coatings deposited by evaporation of sintered cathodes significantly less than of the coatings deposited by evaporation of titanium and aluminum cathodes.

Keywords: sintering, cathodes, vacuum-arc evaporation, coating, hardness, wear resistance.

Введение

Нанесение износостойких ионно-плазменных покрытий из многокомпонентных тугоплавких соединений (нитридов, карбидов, боридов и т.д.) позволяет увеличить стойкость режущего инструмента с одновременным увеличением скоростей резания. Особый практический интерес с точки зрения применения покрытий на металлорежущий инструмент представляют сложные нитриды Ti–Al–N и Ti–Al–Si–N, которые в настоящее время наиболее часто используются в качестве замены покрытий из простого нитрида титана. Для нанесения покрытий такого состава часто используют магнетронное распыление или вакуумно-дуговое испарение двух- или трехкомпонентных порошковых катодов Ti–Al или Ti–Al–Si в среде азота. Масштаб неоднородности химического состава в таких катодах не превышает десятка микрометров. При вакуумно-дуговом распылении композиционно-

го порошкового катода из-за высокой температуры вакуумной дуги происходит одновременное испарение всех элементов, находящихся в области катодного пятна на поверхности катода, что обеспечивает стабильность во времени элементного состава генерируемой плазмы.

Материалы и методы проведения исследований

В настоящей работе приведены результаты сравнительных исследований нитридных покрытий, полученных вакуумно-дуговым испарением в среде азота или смеси азота с аргоном экспериментальных катодов Ti–Al и Ti–Al–Si. Катоды были получены вакуумным спеканием прессовок из смесей порошков Ti и TiAl₃ с кремнием или без него [1, 2]. Замена порошка Al на более тугоплавкий интерметаллид позволила получить катодный материал с меньшей остаточной пористостью. Для сравнения были проведены исследования покрытий, полученных испарением металлургических катодов из титана и алюминидов титана или отдельным испарением титанового и алюминиевого катодов.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 08-12-00785-а и Госзадания "Наука".

Покрyтия осаждали на предварительно подготовленные образцы – подложки из стали Р6М5 или титана ВТ1-0 на установках, оснащенных тремя вакуумно-дуговыми испарителями с *плазменными фильтрами* (ПФ) жалюзийного типа [3] и генератором газовой плазмы.

Подложки предварительно полировали с использованием алмазной пасты до шероховатости $Ra \sim 0,04$ мкм и очищали в ультразвуковой ванне. Непосредственно перед осаждением покрyтия поверхность подложки была дополнительно очищена, активирована и нагрета ионами аргона при напряжении смещения $U_{см} \sim -1$ кВ. При нанесении покрyтий ток дуги варьировали в интервале 25...350 А; ток разряда генератора газовой плазмы – 5...20 А, давление газа – до 0,9 Па. На подложки подавали отрицательное импульсное смещение амплитудой до 4,0 кВ с частотой 100 кГц. Продолжительность осаждения в зависимости от тока разряда дугового испарителя и необходимой толщины покрyтий составляла 60...180 мин, температуру подложки поддерживали в интервале 400...450 °С.

Исследование покрyтий включало определение элементного состава (Оже-спектроскопия), фазового состава и размера кристаллитов (просвечивающая электронная микроскопия, микроскоп "ЭМ-125"), адгезии (Micro-Scratch Tester "MST-S-AX-0000"), нанотвердости (нанотвердомер "NHT-S-AX-000X"), исследование шероховатости поверхности (профилометр "MICRO MEASURE 3D station"). Коэффициент трения и скорость износа при сухом трении измеряли по схеме "неподвижный сферический индентор из Al_2O_3 – покрытие на вращающемся диске" (трибометр "THT-S-AX0000" (ASTM G99 и DIN 50324)).

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование элементного состава покрyтий показало, что относительное содержание алюминия и титана в покрyтиях, нанесенных при напряжении смещения $-0,2$ кВ и общем давлении 0,8 Па, практически не изменяется по сравнению с его содержанием в распыляемых катодах Ti–Al (табл. 1).

Из результатов электронно-микроскопического исследования покрyтий следует, что покрытие Ti–Al–N состоит из блоков размером $\sim 100...200$ нм, включающих кристаллиты твердого раствора алюминия в решетке нитрида титана размером 3...14 нм (рис. 1). Покрyтие имеет столбчатую структуру. Кристаллиты внутри блока ориентированы хаотично друг относительно друга. Это подтверждается четкой коль-

Таблица 1

Элементный анализ Ti–Al–N покрyтий

Элемент	Состав катода Ti60Al40, % ат.	
	порошковый	металлургический
Al	20,2	23,1
C	1,4	1,0
N	41,3	38,7
Ti	32,4	33,6
O	4,7	3,6

цевой структурой образца дифракции (рис. 1, а). Для покрyтий, сформированных при низких напряжениях смещения, свойственны наибольшие локальные внутренние напряжения и наименьший средний размер зерна.

Зависимость скорости роста покрyтий от давления реакционного газа для покрyтий Ti–N, Ti–Al–N и Ti–Al–Si–N представлена в табл. 2, из которой следует, что при увеличении давления наблюдается монотонный спад скорости роста покрyтия. Уменьшение скорости роста покрyтий связано с рассеянием ионов на молекулах газа, снижением энергии ионов, а также с химическими процессами на поверхности мишени.

Применение плазменного фильтра приводит к дополнительному снижению скорости роста покрyтия в области повышенного давления реакционного газа. В диапазоне давления 0,18...0,93 Па скорость роста покрyтия снижается более чем в два раза.

По мере увеличения амплитуды импульсного смещения от 0,1 до 4 кВ и, соответственно, с ростом энергии ионов толщина покрyтия уменьшается с 3,5 до

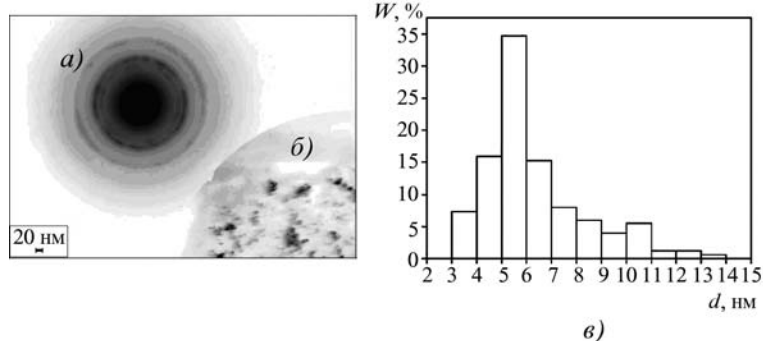


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры Ti–Al–N покрyтия:

а – образец дифракции; б – светлопольное изображение; в – распределение кристаллитов в покрyтии по размерам

Таблица 2

Скорость роста нитридных покрытий (мкм/ч) в зависимости от давления реакционного газа N₂ (U_{см} = 0,2 кВ)

P, Па	Катод			
	металлургический		порошковый	
	Ti	Ti-Al	Ti-Al	Ti-Al-Si
0,18	2,10	2,30	3,20	2,80
0,36	1,78	1,94	2,56	2,35
0,60	1,52	1,67	2,20	1,99
0,93	1,12	1,27	1,64	1,44

0,3 мкм (рис. 2). Такая зависимость является следствием увеличения коэффициента распыления растущего покрытия в условиях ионной бомбардировки. Скорость роста покрытий снижается также при увеличении коэффициента заполнения импульсов. Однако это снижение выражено не столь значительно.

Покрытия Ti-Al-N, полученные испарением спеченных катодов, имеют высокую твердость (38 ГПа). Максимальная твердость покрытия (42 ГПа, измерена при нагрузке 0,1 Н) и минимальная остаточная деформация были зарегистрированы для покрытий с кремнием, нанесенных при потенциале смещения -100 В (рис. 3).

Для порошковых катодов при больших токах дугового разряда была зафиксирована повышенная скорость эрозии поверхности катода (рис. 4). Коэффициенты эрозии спеченного и металлургического катодов Ti-Al составили 88,7·10⁻⁹ и 68,9·10⁻⁹ кг/Кл

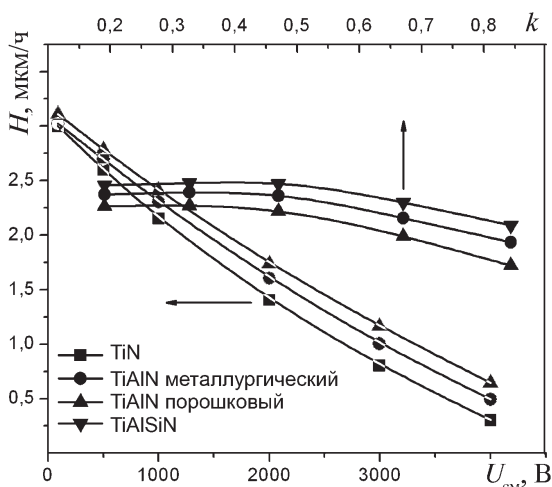


Рис. 2. Скорость осаждения покрытия (с применением ПФ) в зависимости от амплитуды потенциала смещения и коэффициента заполнения импульсов k (при U_{см} = -1000 В)

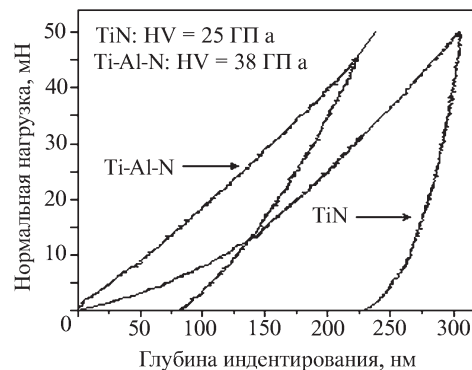


Рис. 3. Наноиндентирование покрытий Ti-N и Ti-Al-N (ток дуги 25 А; U_{см} = -100 В, общее давление 0,1 Па; время осаждения 1 ч)

соответственно. Основной причиной ускоренной эрозии порошковых катодов является меньшая теплопроводность из-за повышенной пористости и, как следствие, более высокая температура поверхностного слоя катода. При больших токах дуги это приводило к поверхностному оплавлению катода и увеличению шероховатости покрытия за счет закристаллизовавшейся микрокапельной фракции (МКФ). При уменьшении толщины катода с 40 до 25 мм вследствие улучшения условий теплоотвода от рабочей поверхности катода можно повысить ток разряда до 350 А без изменения содержания МКФ на поверхности покрытий.

Отношение шероховатостей покрытий, сформированных с применением металлургического и порошкового Ti-Al-катодов при токе разряда 115 А, составило 0,86. Наибольшую шероховатость (Ra = 0,089 ± 0,008 мкм) имело покрытие, осажденное при раздельном распылении титанового (ток разряда 90 А) и алюминиевого (ток разряда 130 А) катодов. Это является доказательством преимущества метода генера-

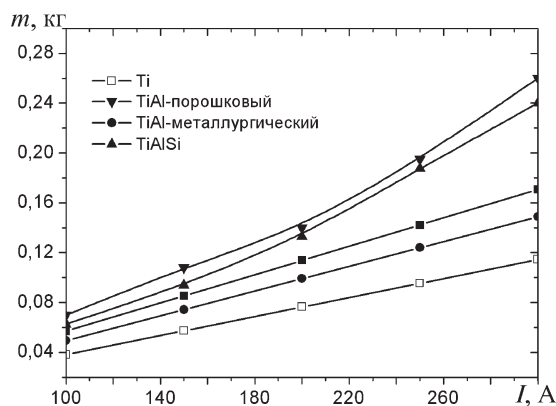


Рис. 4. Влияние тока разряда на эрозию катода (напряжение смещения -0,1 кВ; общее давление 0,8 Па; время осаждения 30 мин)

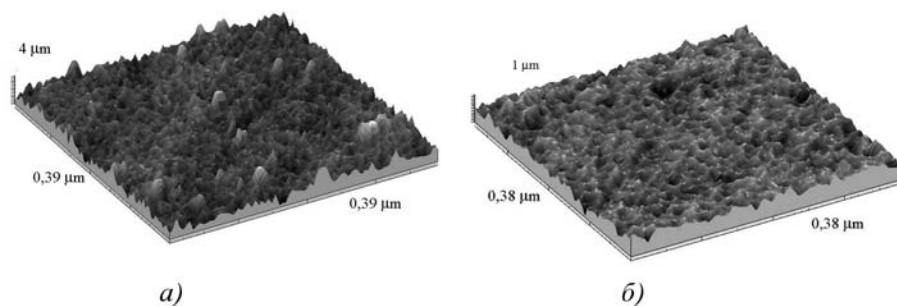


Рис. 5. Трехмерное изображение поверхности Ti–Al–N-покрытия, полученное при испарении спеченного катода Ti–Al без использования плазменного фильтра (ПФ) (а) и с ПФ (б)

ции плазмы распылением многокомпонентных катодов над методом совмещенных пучков. Уменьшить шероховатость поверхности покрытий можно использованием плазменного фильтра, преимущественно удаляющего капельную фракцию из плазменного потока (рис. 5).

На рис. 6 приведены результаты подсчета количества капель различного размера на покрытиях, осажденных при различных токах дугового разряда.

Как следует из представленных на рис. 6 результатов, при малой длительности процесса (до 10 мин) и умеренных токах дугового разряда технология изготовления катода не влияет на содержание капельной фазы в плазменных струях. С увеличением величины тока дугового разряда на поверхности порошкового катода количество закристаллизовавшихся капель на покрытии возрастает в основном за счет крупных капель. Это может быть следствием перегрева и оплавления катода.

На поверхности покрытий, нанесенных с применением ПФ, резко уменьшается содержание крупных капель, что можно объяснить их дроблением при ударе об электроды фильтра. При увеличении амплитуды

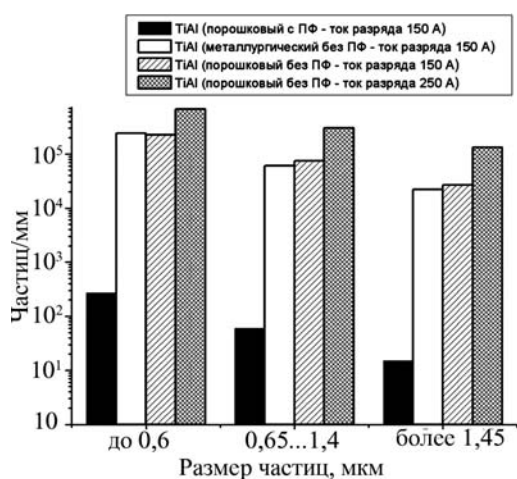


Рис. 6. Содержание МКФ различного размера на поверхности покрытий в зависимости от тока дугового разряда (время осаждения – 300 с; расстояние подложки от испаряемого катода – 120 мм)

импульсного смещения на образцах шероховатость поверхности покрытий уменьшается. При этом в отдельных случаях импульсно-периодической ионной обработки коротко-импульсным потенциалом смещения шероховатость покрытия становилась меньше соответствующей характеристики исходной подложки. Это позволяет предполагать, что в процессе плазменно-иммерсионной ионной обработки происходит распыление имеющихся на поверхности микроострий (см. рис. 5) за счет увеличения напряженности электрического поля на остриях и, как следствие, многократного увеличения плотности ионного тока [3]. Этот эффект может сопровождаться перераспределением продуктов распыления по поверхности, приводя к усилению эффекта сглаживания. Также известен эффект снижения шероховатости покрытия при применении высокочастотных короткоимпульсных потенциалов смещения в результате уменьшения доли МКФ на поверхности покрытия с ростом амплитуды потенциала смещения [4].

Результаты сравнительных исследований коэффициентов трения и интенсивности износа Ti–Al–N и Ti–N покрытий представлены в табл. 3. Из представленных данных следует, что интенсивность износа Ti–Al–N в 6 раз меньше интенсивности износа

Таблица 3

Коэффициент трения и интенсивность износа для Ti–Al–N и Ti–N-покрытий

Покрытие	Коэффициент трения	Интенсивность износа, относит. ед.
Ti–Al–N (с ПФ)	0,19	0,06
Ti–N (с ПФ)	0,21	0,35
Ti–N (без ПФ)	0,32	0,70

Примечание. Параметры теста: линейная скорость – 6 см/с, нормальная сила – 5 Н, число оборотов диска – 40 000.

Ti–N-покрытия. Применение фильтра снижает в два раза износ покрытия Ti–N. Одна из возможных причин – меньшая шероховатость покрытия, осажденного из фильтрованной плазмы.

Выводы

1. Экспериментальные спеченные порошковые катоды Ti–Al и Ti–Al–Si стабильно работают в условиях вакуумно-дугового испарения в вакууме и реакционных газах, а осажденные нитридные покрытия имеют меньшую шероховатость и большую износостойкость по сравнению с покрытиями, осажденными испарением титана или одновременным испарением титанового и алюминиевого катодов.

2. Для применения спеченных катодов при повышенных токах дугового разряда без перегрева необходимо уменьшить остаточную пористость материала катода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прибытков Г.А., Андреева И.А., Коржова В.В. Объемные изменения и формирование структуры при твердофазном спекании порошковых смесей Ti–TiAl₃ // Порошковая металлургия. 2008. № 11/12. С. 79–86.

2. Прибытков Г.А., Андреева И.А., Коржова В.В. Влияние состава на формирование структуры при твердофазном спекании порошковых смесей Ti–TiAl₃ // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2007. Т. 4. № 2. С. 128–133.

3. Степанов И.Б. Оборудование и методы импульсно-периодической ионной и плазменной обработки материалов: автореф. дисс. д-ра техн. наук. Томск. 2010. 44 с.

4. Механизмы и закономерности накопления микрочастиц на поверхности мишени, погруженной в плазму вакуумной дуги, при отрицательном импульсно-периодическом потенциале смещения / А.И. Рябчиков, Д.О. Сивин, А.И. Бумагина, В.К. Струц // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 11/2. С. 210–216.



ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

учебное пособие

Н.П. Алешин

2013 г. Объем 576 с. Формат 60x88 1/16 Переплет ISBN 978-5-94275-695-6 Цена 1000 р.



Рассмотрены дефекты сварных соединений и физические методы неразрушающего контроля, основанные на использовании различных излучений и их взаимодействий с объектами контроля. Приведены классификации и рекомендации по выбору методов неразрушающего контроля. Изложены сведения по теории, оборудованию и технологиям методов дефектоскопии различных типов сварных соединений.

Для студентов, бакалавров, магистров, подготовка которых осуществляется в области сварочного производства, а также специалистов, проходящих сертификацию по EN 437.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

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



УДК 621.515

М.З. Нафиков¹, Р.Н. Сайфуллин², А.А. Зайнуллин¹
(¹ФГБОУ ВПО "Башкирский ГАУ", г. Уфа;
²ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии, г. Москва)
E-mail:nafikovmz@rambler.ru

Свойства покрытий, полученных электроконтактной приваркой присадочного материала из стальных проволок

Описаны процесс формирования металлопокрытий электроконтактной приваркой стальных проволок и физико-механические и эксплуатационные свойства покрытий. Приведены примеры использования таких покрытий на деталях машин.

Ключевые слова: покрытия, электроконтактная приварка, стальная проволока.

The of forming process of metal coatings by electrocontact welding of steel wires are described and the physical and mechanical properties and performance coatings. The examples of use of such coatings for machine parts are presented.

Keywords: coatings, electrocontact welding, steel wire.

Введение

Наиболее совершенными и перспективными для восстановления автотракторных валов являются *электроконтактные способы наплавки* (ЭКН), основанные на использовании тепловой энергии, выделяющейся в зоне образования соединения присадочного материала с основным при прохождении импульсов электрического тока (Джоулево тепло) в сочетании с одновременным силовым воздействием со стороны наплавляющего ролика-электрода. Эти способы имеют целый ряд преимуществ по сравнению со способами, основанными на расплавлении присадочного металла энергией электрической дуги. Важнейшими из них являются: малый нагрев деталей; возможность приварки различных присадочных материалов; закалка слоя непосредственно в процессе приварки; повышение производительности в 2–3 раза; уменьшение расхода металла по сравнению с дуговой наплавкой в 3–4 раза; отсутствие выгорания легирующих примесей и значительное улучшение условий труда. Все это явилось причиной большого интереса к рассматриваемым способам не только исследователей, но и производителей.

По виду используемого присадочного материала электроконтактные способы нанесения металлопокрытий подразделяются на следующие разновидности:

- 1) электроконтактную приварку стальными проволоками;
- 2) электроконтактную приварку к изношенным поверхностям стальных лент;
- 3) электроконтактное напекание металлических порошков.

Цель работы – проанализировать литературные источники и дать описание физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий, сформированных электроконтактными способами, привести примеры использования таких покрытий на деталях машин.

Формирование металлопокрытий на цилиндрических поверхностях электроконтактной приваркой стальных проволок (ЭКПП)

Исторически первым присадочным материалом, применяемым при электроконтактной приварке, явились стальные проволоки. Исследованиям ЭКПП посвящены как ранняя работа Ю.В. Клименко [1], так и современные работы [3–7 и др.].

Промышленностью выпускается самая широкая номенклатура присадочных проволок различного диаметра и химического состава. Для восстановления деталей, поверхности которых должны быть твердыми и износостойкими, рекомендуется применять уг-

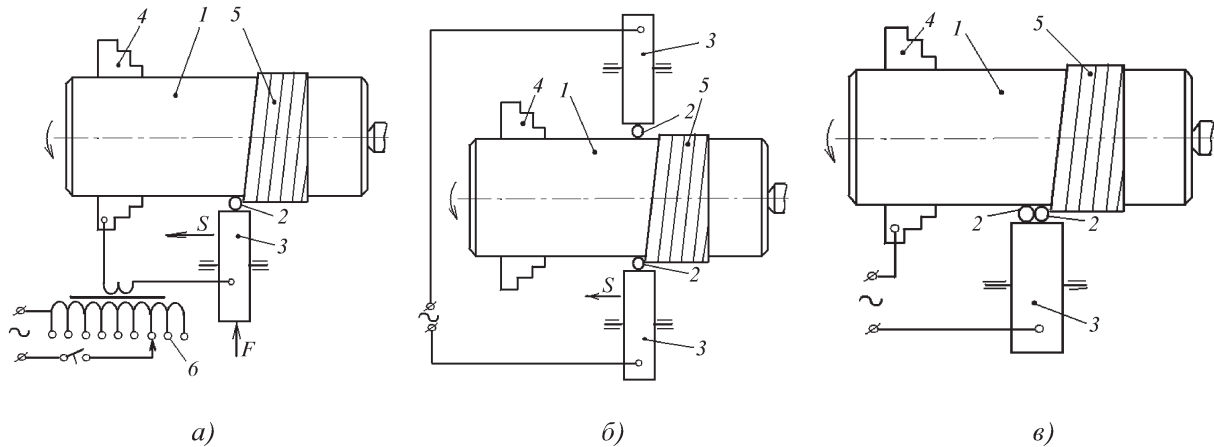


Рис. 1. Технологические схемы ЭКПП:

a – основная; *б* – двухроликковая двумя проволоками; *в* – однороликковая двумя проволоками; 1 – деталь; 2 – присадочная проволока; 3 – ролик-электрод; 4 – патрон; 5 – металлопокрытие; 6 – сварочный трансформатор; 7 – прерыватель тока

леродистые или легированные присадочные проволоки марок Нп-50, Нп-65Г, Нп-80, Нп-30ХГСА и др. по ГОСТ 10543–98, пружинную проволоку ПК-2 по ГОСТ 9389–75. При приварке проволоки диаметром 1,8 мм можно восстанавливать детали с износом до 0,20...0,25 мм на сторону. При больших значениях износа применяются проволоки большего диаметра или производится многослойная приварка.

К достоинствам данного присадочного материала можно отнести его доступность и невысокую стоимость, он не требует предварительной подготовки или раскраса.

Известно большое количество технологических схем восстановления валов ЭКПП [1], но применение получили лишь однозаходная наплавка по винтовой линии (рис. 1, *a*) и более производительные двухзаходные схемы с разновидностями (рис. 1, *б*, *в*).

Анализ литературных источников и металлографические исследования показывают, что сварное соединение при ЭКПП формируется без оплавления контактируемых поверхностей, т.е. в твердой фазе. Поэтому качество (прочность) формируемого соединения зависит, прежде всего, от деформации, происходящей в стыке соединяемых поверхностей. В момент осадки часть присадочного металла выдавливается из-под ролика-электрода в направлении, обратном направлению затягивания проволоки. В результате длина сварного шва оказывается существенно больше длины затраченной проволоки, что приводит к дроблению и выносу из стыка плотных гидроксидных пленок – главного препятствия для образования металлических связей соединяемых поверхностей. По мнению большинства исследователей [3–5], именно относительная

осевая пластическая деформация проволоки ε_y определяет при ЭКПП прочность сварного соединения. Оценить качество приварки углеродистых присадочных проволок можно оперативным способом по зависимости [7]

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} = 3,04 \varepsilon_y - 0,922,$$

где σ – прочность соединения на исследуемом режиме; σ_{\max} – максимально возможная прочность сварного соединения, равная пределу прочности на разрыв основного металла детали.

При максимально достижимой осевой деформации присадочной проволоки $\varepsilon_y = 0,44...0,46$ прочность сварного соединения равна прочности основного металла вала. Из рис. 2 видно, что при ЭКПП на рациональных режимах разрушение соединения каждый раз происходит не по сварочному стыку, а по телу самих штифтов, выполненных из нормализованной стали 45.

В работах [2, 4–6] рассмотрена кинетика формирования сварного соединения при ЭКПП. Определено условие формирования сварного соединения в пределах контактных площадок, формулируемое как $\sigma_y \geq \sigma_t$, где σ_y – действующие растягивающие напряжения в поперечном сечении сварного шва; σ_t – предел текучести присадочного материала при данной температуре его нагрева. Разработанный аналитический способ [8] определения размеров зоны образования соединения металлопокрытия с основой, как границы относительного движения присадочного металла по наплавляемой поверхности, положен в основу определения режимов ЭКПП, обеспечи-

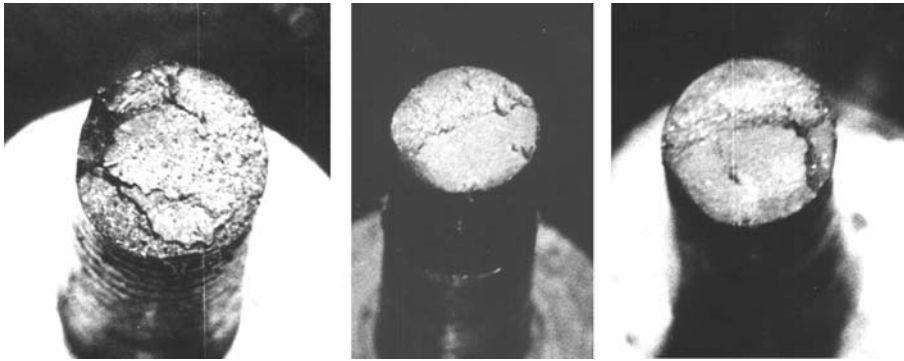


Рис. 2. Торцы штифтов, оторванных от наваренного при оптимальном режиме металлопокрытия

вающих формирование сплошного металлопокрытия без зазоров и непроваров.

В работе [6] предложено увеличивать осевую деформацию и, соответственно, прочность сварного соединения путем притормаживания ролика-электрода. Однако данный технологический прием может привести к появлению поперечных трещин в сварном шве.

Структура металлопокрытия. На рис. 3 показаны макроструктуры единичных площадок металлопокрытий из углеродистой и легированной сталей. Поверхностная твердость таких одиночных, не перекрывающихся по их ширине валиков постоянно по всей площади. Для проволок Нп-65 и Нп-30ХГСА твердость составляет 63...65 и 54...56 HRC соответственно, что близко к предельным значениям для данных материалов. Металлопокрытие в этом случае имеет структуру мелкоигльчатого мартенсита с присутствием остаточного аустенита.

На рис. 4 показаны структуры наваренных по винтовой линии металлопокрытий и зон термического влияния (ЗТВ). Приварка присадочных проволок производилась на рациональных режимах. При приварке с оптимальным тепловыделением и достаточной длительностью прохождения импульсов тока диффузионные процессы протекают более полно, ориентированная в плоскости стыка межзеренная граница мигрирует. В зоне стыка образуются общие для соединяемых металлов зерна, а сама граница не просматривается (см. рис. 4). Такое сварное соеди-

нение имеет повышенную прочность и пластичность.

Получить однородное металлопокрытие по всей восстанавливаемой поверхности вала не удастся. Как и при всех видах наплавки по винтовой линии с перекрытием смежных валиков, структура металлопокрытий имеет ярко выраженную структурную неоднородность, что можно наблюдать на рис. 4. Ранее наплавленный и закаленный присадочный металл при тепловом воздействии последующего сварного валика может нагреваться и отпускаться в различной степени. Металл в зоне стыков нагревается выше A_{C_3} , а более удаленные от стыка объемы присадочного металла нагреваются ниже критических температур. Теплоотвод от верхних слоев металлопокрытия более интенсивный и направлен в сторону массивного медного ролика-электрода. Теплоотвод от нижележащих слоев покрытия, направленный преимущественно в деталь, менее интенсивный. Таким образом, в металлопокрытии чередуются структуры закалки, частичного и полного отпуска.

Вышесказанное подтверждается результатами замеров микротвердости по глубине металлопокрытия и ЗТВ (рис. 5).

Уменьшить отмеченный недостаток структуры можно правильным выбором режима охлаждения и шага наварки детали по винтовой линии. Кардинально улучшить структуру можно путем введения в технологический процесс восстановления дополнительных упрочняющих операций, таких как ППД ролика-

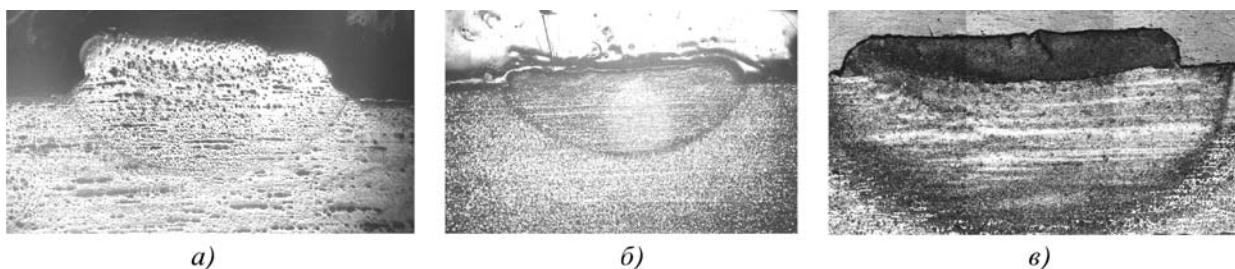


Рис. 3. Макроструктура ($\times 6$) не перекрываемых сварных валиков:

а – проволока Нп-65; б – проволока Нп-30ХГСА; в – проволока Нп-65 (приварка сдвоенного валика по схеме на рис. 1, в)

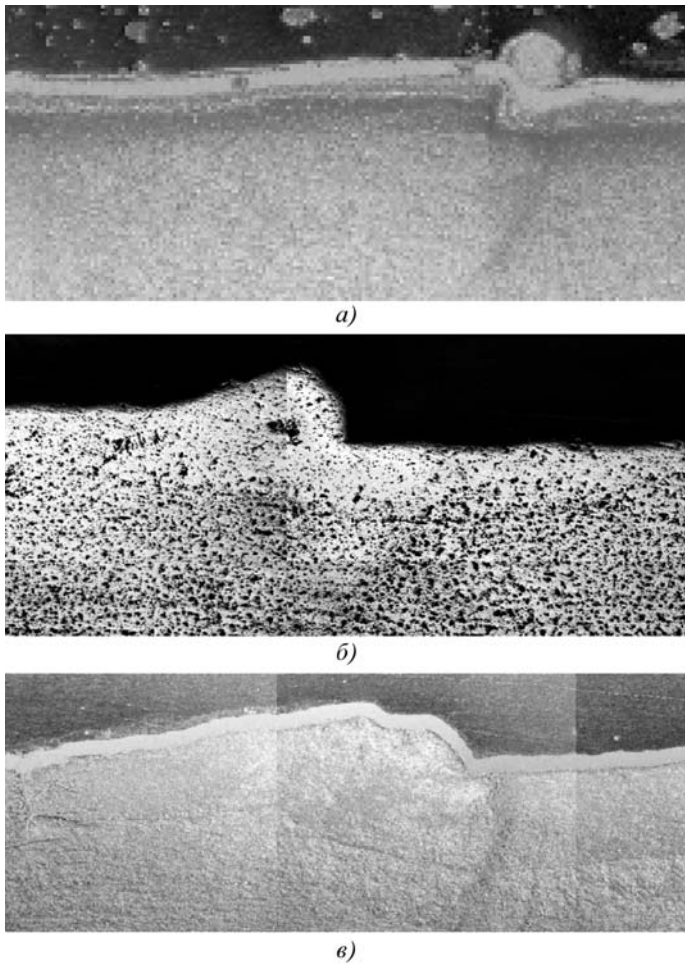


Рис. 4. Макроструктура ($\times 30$) наваренного металла и ЗТВ в пределах одного валика:
a – проволока Нп-65 на сталь 45; *б* – те же материалы, приварка сдвоенного валика по схеме рис. 1, *в*; *в* – проволока 30ХГСА на сталь 30ХГСА

ми, электромеханическое упрочнение, закалка с нагревом ТВЧ и др.

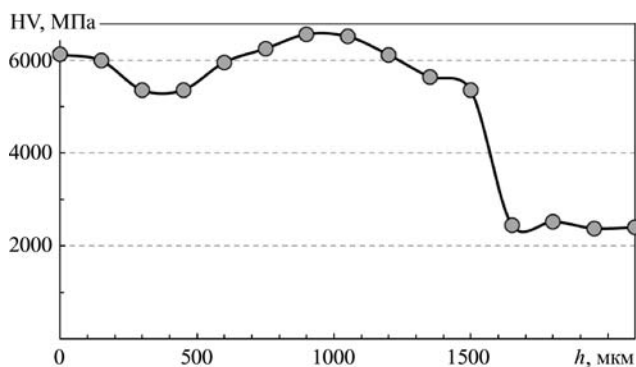


Рис. 5. Распределение микротвердости по глубине наваренного слоя

Износостойкость металлопокрытия. В табл. 1 приводятся данные по относительной износостойкости покрытий, определенные в исследованиях [4] по результатам износных испытаний наваренных образцов в паре с контртелом из серого чугуна СЧ 15-32 ГОСТ 1412–85 в соответствии со схемой буксового трения.

Видно, что износостойкость покрытия, нанесенного ЭКН проволокой ПК-2 при оптимальном режиме, в 1,4–1,5 раза выше износостойкости эталонных образцов.

Коэффициенты износостойкости металлопокрытия не повысились в результате дополнительного упрочнения слоя обкаткой роликами, закалкой ТВЧ и электромеханическим упрочнением. Нет смысла применять дополнительные упрочняющие технологии для деталей, работающих на износ.

Физико-механические свойства металлопокрытий. Остаточные напряжения. В табл. 2 приводятся значения характеристик упругости металлопокрытий – модуля упругости E при растяжении–сжатии, модуля упругости G при сдвиге и коэффициента Пуассона μ . Экспериментальные данные заимствованы из источника [4]. Там же для сравнения приводятся физико-механические характеристики металлопокрытий, нанесенных дуговыми способами наплавки.

Характеристики упругости металла, нанесенного ЭКПП, отличаются от характеристик основного металла образцов несущественно, так как в результате термомеханического воздействия на присадочный металл происходит дробление, измельчение и уплотнение его структуры. Для литой структуры металла при дуговых способах восстановления характеристики упругости существенно ниже.

Таблица 1

Твердость и износостойкость металлопокрытий, наваренных различными способами

№ п/п	Способ восстановления	Твердость, HRC	Коэффициент износостойкости
1	Сталь 45, закаленная ТВЧ (эталон)	52...54	1,00
2	ЭКН проволокой ПК-2 ГОСТ 9389–75	28...55	1,40...1,51
3	ЭКН проволокой 30ХГСА ГОСТ 10543–75	30...50	1,33...1,45
4	Вибродуговая наплавка проволокой ПК-2	30...54	0,80...0,89

Таблица 2

Характеристики упругости металлопокрытий, нанесенных различными способами

№ п/п	Вид наплавки	$E, 10^5$ МПа	$G, 10^5$, МПа	μ
1	Нормализованная сталь 45 (эталон)	1,90...1,96	0,805...0,815	0,18...0,25
2	ЭКПП проволокой ПК-2	1,88...1,92	0,788...0,808	0,18...0,22
3	Нормализованная сталь 30ХГСА (эталон)	1,96...2,00	0,810...0,816	0,20...0,23
4	ЭКПП проволокой 30ХГСА	1,93...1,96	0,805...0,816	0,19...0,23
5	Вибродуговая наплавка проволокой ПК-2	1,70...1,96	0,763...0,786	0,10...0,24
6	Автоматическая наплавка проволокой ПК-2 под слоем флюса	1,80...2,07	–	0,25...0,31

Ударная вязкость наваренных ЭКПП образцов практически совпадает с эталонной (нормализованная сталь 45).

Исследования [3, 4] показали, что в металлопокрытиях, нанесенных ЭКПП, формируются небольшие по величине, благоприятные сжимающие остаточные напряжения. При всех других способах восстановления деталей в металлопокрытиях действуют значительные

растягивающие остаточные напряжения. Экспериментально определены осевые и окружные остаточные напряжения в металлопокрытиях, сформированных ЭКПП (рис. 6).

Усталостная прочность восстановленных деталей. Об усталостной прочности восстановленных ЭКПП деталей можно судить по данным работ [2–6], приведенным в табл. 3.

Можно отметить, что ЭКПП валов на рациональных режимах несколько снижает их усталостную

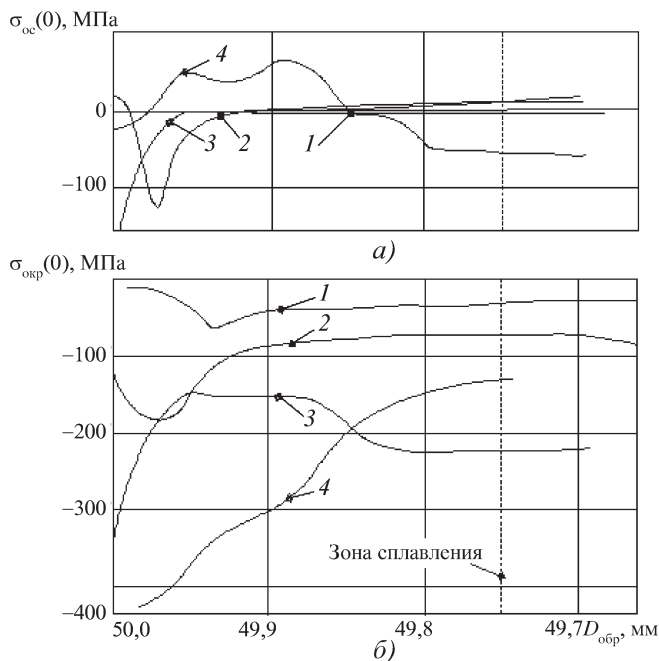


Рис. 6. Осевые (а) и окружные (б) остаточные напряжения в образцах:

1 – ЭКПП пружинной проволокой; 2 – ЭКПП с последующей закалкой ТВЧ; 3 – ЭКПП с последующим электромеханическим упрочнением; 4 – ЭКПП с последующим ППД

Таблица 3

Усталостная прочность наваренных и упрочненных образцов

№ п/п	Способ восстановления и упрочнения	Предел выносливости, МПа	$\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1n}}$
1	Нормализованная сталь 45 (эталон)	225...235	1,00
2	ЭКН проволокой ПК-2	193...210	0,85...0,92
3	ЭКН проволокой 30ХГСА	158...168	0,68...0,73
4	ЭКН проволокой ПК-2 + закалка ТВЧ	300...325	1,30...1,40
5	ЭКН проволокой ПК-2 + электромеханическое упрочнение	284...297	1,20...1,29
6	ЭКН проволокой ПК-2 + ППД	250...269	1,08...1,16
7	Вибродуговая наплавка проволокой ПК-2	83...95	0,35...0,45



Рис. 7. Номенклатура деталей сельскохозяйственной техники, восстановленных ЭКПП

прочность. Объясняется это, прежде всего, чередованием структурных составляющих металлопокрытия и зоны термического влияния, вызванным наплавкой с перекрытием по винтовой линии, а также концентрацией напряжений по границе сплавления. Однако при рассматриваемом способе восстановления снижение усталостной прочности менее значительное, чем при других традиционно применяемых способах восстановления.

Существенно повысить динамическую прочность восстановленных валов можно введением в технологический процесс дополнительных операций упрочнения, влияя тем самым на однородность структуры, а также на уровень и характер остаточных напряжений в деталях.

Заключение

В изложенном материале приведены присущие ЭКПП несомненные достоинства. Имеется и ряд недостатков, в некоторой мере сдерживающих производственное применение этого, в целом прогрессивного, способа восстановления.

Недостатки способа ЭКПП – структурная неоднородность металлопокрытия и невысокая стойкость инструмента – роликов-электродов, изготавливаемых из высоко электро- и теплопроводных электродных сплавов.

ЭКПП можно рекомендовать для восстановления самой широкой номенклатуры валов, работающих

как на износ, так и эксплуатирующихся при динамических и повторно-переменных нагрузках (рис. 7). Исключение составляют тяжело нагруженные коленчатые валы, спроектированные без значительного запаса прочности, особо крупные (диаметром более 120...150 мм) детали, а также детали, износ рабочих поверхностей которых превышает 0,8...1,0 мм на сторону.

Себестоимость восстановления составляет 30...50 % от цены новых деталей. При этом их ресурс не ниже ресурса новых.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клименко Ю.В. Электроконтактная наплавка. М.: Металлургия, 1978. 128 с.
2. Дубровский В.А. Создание технологий и оборудования электроконтактной наварки проволокой оплавливанием: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. Калуга. 2006. 32 с.
3. Латыпов Р.А. Выбор компактных и порошковых металлических материалов и управление качеством покрытий при упрочнении и восстановлении деталей электроконтактной приваркой: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. Москва. 2007. 48 с.
4. Нафиков М.З. Обоснование технологических процессов и разработка технических средств восстановления тракторных деталей электроконтактной наплавкой: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. Саранск. 2010. 36 с.
5. Нафиков М.З. Формирование сплошного металлопокрытия при электроконтактной наплавке валов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 9. С. 24–29.
6. Булычев В.В. Разработка элементов теории и технологических путей обеспечения стабильности формирования зоны соединения при электроконтактной приварке проволоки: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. Москва. 2012. 32 с.
7. А.с. 641306 СССР. МКИ G01N3/00. Способ определения прочности сцепления покрытия из углеродистой проволоки с основой из углеродистой стали / М.З. Нафиков, В.С. Ибрагимов. № 2496514/25-28; заявл.13.06.77; опубл. 08.01.79, Бюл. № 1.
8. Пат. 2278009 РФ. МПК В23К11/06, В23К31/12. Способ определения зоны образования соединения металлопокрытия с основой при электроконтактной наплавке / М.З. Нафиков, заявитель и патентообладатель Башкирский государственный аграрный университет. № 2005110504/02; заявл. 11.01.2005; опубл. 20.06.06, Бюл. № 17.



УДК 629.114.4.01:678.026.345

В.Н. Хромов

(Орловский юридический институт МВД России имени В.В. Лукьянова)

E-mail: chrom@orel.ru

Влияние упрочнения деталей на дорожно-транспортные происшествия транспортных средств при их эксплуатации на примере восстановления гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания

Показаны необходимость упрочнения деталей транспортных средств при их восстановлении для уменьшения дорожно-транспортных происшествий и интенсивность отказов транспортных средств в период эксплуатации. Рассмотрена технология восстановления гильз цилиндров термопластическим деформированием с одновременным их упрочнением. Предложены новые способы и устройства для осуществления технологии термопластического деформирования металла.

Ключевые слова: упрочнение и восстановление деталей машин термоупругопластическим деформированием металла; восстановление гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания.

Need of hardening is shown at restoration of details of vehicles for reduction of road accidents. Failure rate of vehicles during their operation is shown. The technology of restoration of sleeves of cylinders by thermoplastic deformation with their simultaneous hardening is considered. New ways and devices for implementation of technology of thermoplastic deformation of metal are offered.

Keywords: Hardening and Restoration Process of the Machine Element by Thermoelastic-Plastic Metal Strain; restoration of sleeves of cylinders of internal combustion engines.

Надежность *транспортных средств* (ТС) характеризуется четырьмя свойствами: безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью, сохраняемостью. Практически все эти четыре свойства надежности ТС оказывают существенное влияние на техническое состояние ТС при его эксплуатации, что может привести к *дорожно-транспортному происшествию* (ДТП).

Статистика гибели людей на дорогах при ДТП показывает, что около 30 тыс. человек только россиян погибает ежегодно на автомобильных дорогах Российской Федерации. До 2009 г. число погибших в ДТП превышало 30 тыс. за год, в последние несколько лет наметилась незначительная тенденция к снижению числа жертв ДТП. Однако в своем выступлении на расширенном заседании коллегии Министерства внутренних дел 8 февраля 2013 г. Президент России отметил, что, несмотря на принимаемые меры, в том числе в рамках федеральной и региональных целевых программ, ситуация на дорогах остается сложной.

На круговой диаграмме из составляющих звеньев комплекса "человек – автомобиль – дорога – среда" на ДТП с автомобилем приходится 12 %, т.е. из-за различных технических неисправностей ТС совершается около 12 % всех ДТП.

Интенсивность отказов ТС имеет во времени t характерный вид (рис. 1).

В первый период эксплуатации объекта (участок I) интенсивность отказов велика. Многие элементы из-

делий отказывают из-за скрытых дефектов, которые не были обнаружены в процессе производства объектов. Этот период называют периодом приработки (тренировки). Если на заводе-изготовителе выполнена полноценная тренировка объекта, то этот период может отсутствовать. Второй период (участок II) называют периодом нормальной эксплуатации. В этот период интенсивность отказов объекта постоянна или медленно возрастает по мере увеличения наработки. В третьем периоде (участок III) интенсивность отказов резко возрастает из-за ухудшения технического состояния элементов объекта в результате износа и старения (предельные износы, коррозия, усталость, коробление и т.д.).

Для увеличения второго периода ТС, т.е. периода нормальной эксплуатации, необходимо не только восстанавливать детали, давая им вторую жизнь, но и,

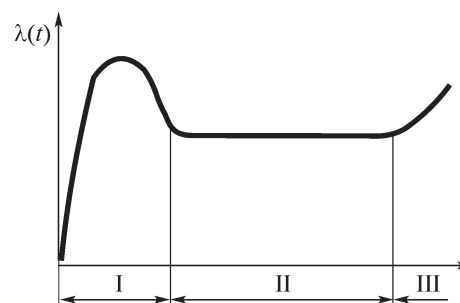


Рис. 1. Диаграмма составляющих ДТП. Зависимость интенсивности отказов транспортных средств от времени

используя упрочняющие технологии, увеличивать первоначальный ресурс восстановленных деталей.

Такая технология разработана для гильз цилиндров *двигателей внутреннего сгорания* (ДВС) различных ТС: автомобилей, тракторов, комбайнов и другой сельскохозяйственной техники, железнодорожных локомотивов, речных и морских судов.

Технология восстановления и упрочнения гильз цилиндров

Восстановление гильз цилиндров до номинальных размеров способом *термопластического деформирования* (ТПД) представлено на рис. 2 [2–4]. Изношенную гильзу 1 устанавливают в обойму 4 и с помощью индуктора 2 нагревают током высокой частоты. Вследствие ограничения свободного расширения в ней нарастают температурные напряжения. При достижении определенной их величины в радиальном направлении начинают развиваться пластические деформации, которые увеличиваются с повышением температуры.

При свободном остывании размеры гильзы уменьшаются как в осевом, так и в радиальном направлениях. Величина уменьшения диаметра зависит от толщины стенки, материала, температуры, скорости нагрева и других факторов. Так, у гильз цилиндров двигателя СМД-14 усадка при оптимальных значениях температуры и скорости нагрева составляет 0,75...0,90 мм.

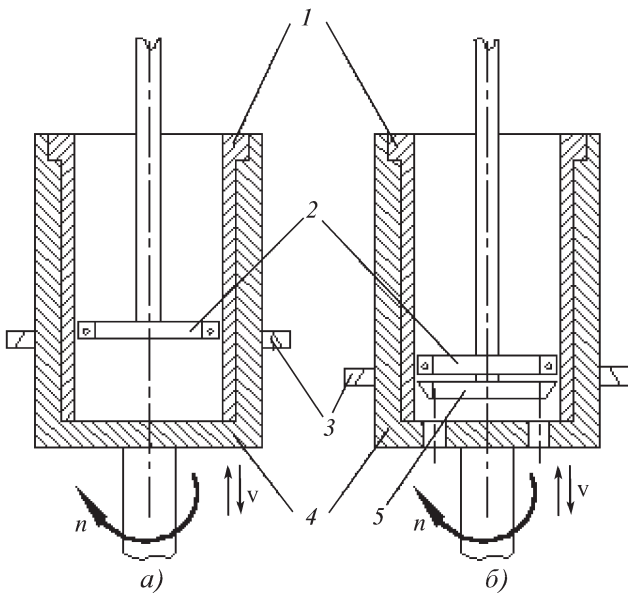


Рис. 2. Схемы способов восстановления внутренней цилиндрической поверхности гильз цилиндров ТПД в охлаждаемой матрице:

а – незакаляемая гильза из легированного чугуна; б – закаляемая гильза: 1 – гильза цилиндра; 2 – индуктор; 3 – спрейер охлаждающий; 4 – матрица; 5 – спрейер закалочный

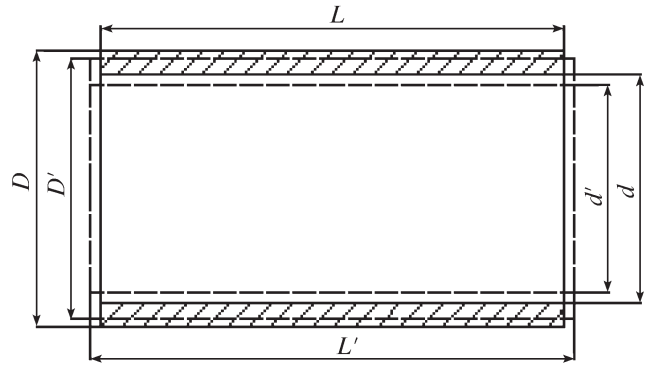


Рис. 3. Схема изменения линейных размеров гильзы цилиндра в результате ТПД:

D, d, L – наружный и внутренний диаметры, длина и высота гильзы цилиндра соответственно; D', d', L' – размеры после ТПД

С учетом величины припуска на последующую механическую обработку (0,2...0,3 мм) термопластическим обжатием можно восстанавливать 90 % гильз двигателей СМД-14 и Д-50.

При ТПД происходит частичное упрочнение металла. Твердость внутренней поверхности гильз после обжатия увеличивается на 2...3 %, износостойкость остается на уровне новых.

Рассматривая методы восстановления гильз цилиндров ТПД под действием внутренних сил, можно выделить несколько способов, схемы которых представлены на рис. 3. Схемы близки и характеризуются созданием движущегося градиента температуры вдоль оси гильзы. Технологически наиболее удобной является схема с размещением индуктора и спрейера с наружной цилиндрической поверхности гильзы. В результате ТПД в гильзе происходит перераспределение металла на внутреннюю изношенную поверхность (рис. 4, см. стр. 4 обложки). Общий вид установки для ТПД гильзы цилиндра дизеля показан на рис. 5.

Данный способ целесообразно применять для незакаляемых гильз цилиндров, изготавливаемых из специального легированного чугуна, например двигателей ЗМЗ-53, КамАЗ-740, ЗИЛ-130. Перед ТПД незакаляемых гильз их объемно прогревают до 500 °С для повышения пластичности металла.

При внутреннем диаметре гильзы цилиндра 100...130 мм величина остаточного перемещения внутренней цилиндрической поверхности составляет 0,7...1,3 мм, что является достаточным при величине износа зеркала гильзы, равной 0,3 мм, величине коробления после ТПД 0,1 мм и припуске на механическую обработку 0,3 мм.

Математическое моделирование процесса ТПД позволило определить оптимальные режимы технологии [5–10]. Отличительной особенностью процесса ТПД методом создания движущегося градиента тем-

пературы вдоль оси является нагрев детали ниже точки A_{C_1} на 20...30 °С. ТПД осуществляли при перемещении гильзы относительно индуктора со скоростью 2,0...2,5 мм/с при непрерывном охлаждении водяным душем. Для снятия высоких термических напряжений после ТПД осуществляли объемный нагрев гильзы до температуры 350...400 °С с последующим охлаждением на воздухе (средний отпуск).

Нагрев проводился на установке ТВЧ петлевым индуктором и последующим охлаждением водой кольцевым спрейером. Мощность генератора установки ТВЧ – 100 кВт, частота вращения гильзы – 30...50 мин⁻¹. Скорость перемещения гильзы относительно индуктора при отпуске – 3 мм/с. Удельный расход воды для охлаждения нагретой поверхности гильзы – 20...40 л/м².

Если после одного цикла ТПД остаточная деформация внутренней цилиндрической поверхности гильзы составляла $\Delta d = 0,7...1,3$ мм, то после двух циклов – $\Delta d = 1,1...1,9$ мм.

После ТПД происходит уменьшение как внутреннего, так и наружного диаметра гильзы. Для восстановления наружных посадочных поясков гильзы необходимо осуществить их наращивание на величину слоя толщиной 1,5...2,0 мм.

Это можно выполнить способом электродугового напыления с использованием стандартных режимов как стальной, так и алюминиевой проволокой.

После получения припусков на механическую обработку внутренней и наружной поверхности гильзы цилиндра осуществляют растачивание на вертикально-расточных станках и хонингование на хонинго-

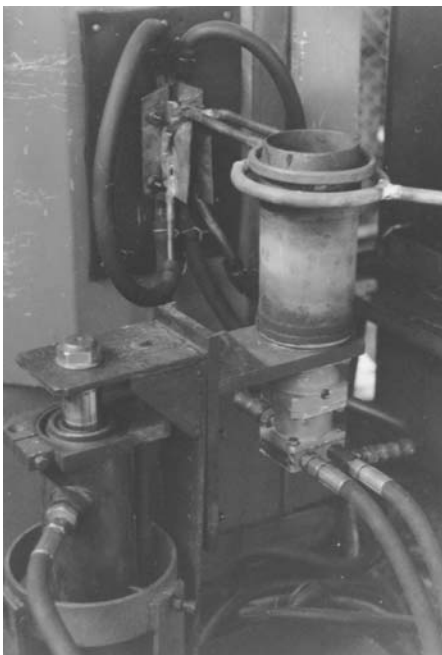


Рис. 5. Общий вид установки для ТПД гильзы цилиндра дизеля

вальном станке. Затем проводят механическую обработку наружных поверхностей гильзы на токарно-винторезном станке.

Гильзы, прошедшие два цикла ТПД, растачивают на вертикально-расточных станках 2733П. Базирование осуществляют по наружной поверхности посадочных поясков, а зажим по торцовым. Режимы растачивания: частота вращения резца – 435 мин⁻¹, подача – 0,05 мм/об.

Гильзы, прошедшие один цикл ТПД, хонинговали на хонинговальном станке 3К833. Обработку проводили хонинговальной головкой брусками АБХ125×8×5×3, АСК125/100-МС1 – 100 % до номинального диаметра. Режимы хонингования – 100 мин⁻¹; количество двойных ходов – 40.

Таким образом установлено, что при обработке гильз цилиндров на хонинговальном станке с гидравлическим приводом разжима брусков с помощью специальной хонинговальной головки достаточно припуска 0,35...0,40 мм на диаметр.

После электродугового напыления механическую обработку наружных поверхностей гильзы цилиндра осуществляют на токарно-винторезном станке. Гильзу закрепляли с помощью специальной двухцанговой оправки.

Экспериментальная установка для восстановления гильз цилиндров

Для выполнения исследований по ТПД гильз цилиндров 50-1002021-А3 на базе установки ТВЧ модели ЛПЗ-67В разработано специальное приспособление, которое обеспечивает перемещение гильзы относительно индуктора с заданной скоростью (рис. 6, 7). Нагрев проводили с помощью специального одновиткового индуктора, а охлаждение нагретой гильзы – с помощью специального одновиткового спрейера. Для обеспечения равномерности нагрева гильза вращается вокруг своей оси.

Установка (см. рис. 6) состоит из следующих основных узлов: гидростанция 1, гидроцилиндр 5, гидромотор 4, пульт управления 2, емкость для сбора охлаждающей жидкости 6, стол 3 для размещения гильз.

Гидростанция обеспечивает (относительное перемещение) подъем и опускание гильзы относительно индуктора при одновременном вращении ее относительно своей оси при различных режимах ТПД.

Гидроцилиндр установлен вертикально и предназначен для перемещения гильзы относительно индуктора с заданной скоростью.

Стол установки смонтирован на штоке гидроцилиндра и обеспечивает надежное расположение, центровку и вращение гильзы.

На пульте управления установлены: регуляторы потока жидкости для изменения скорости перемещения и вращения гильзы, кнопки включения и выключения гидростанции, кран управления подачей воды для охлаждения, кнопка реверса.

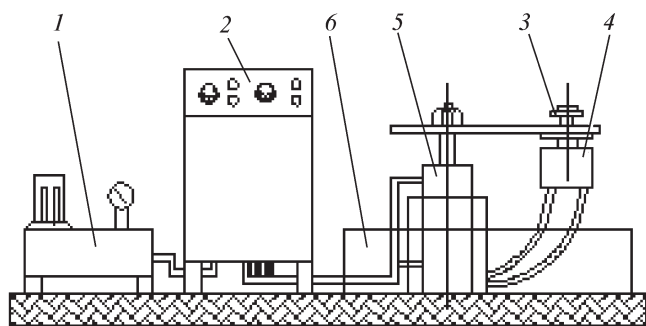


Рис. 6. Установки для восстановления гильзы цилиндра ТПД:
1 – гидростанция; 2 – пульт управления; 3 – стол; 4 – гидромотор; 5 – гидроцилиндр; 6 – емкость для сбора жидкости

Установка для ТПД обеспечивает: частоту вращения гильзы $0...30 \text{ мин}^{-1}$; скорость перемещения гильзы относительно индуктора, мм/с: рабочая – $0...5$; холостая – 5.

Нагревание проводилось с помощью одновиткового петлевого индуктора, а охлаждение – кольцевым спрейером снаружи. Контроль расхода охлаждающей жидкости осуществлялся с помощью расходомера.

Индуктор состоит из двух медных пластин, к которым припаян петлевой одновитковый индуктор, изготовленный из медной трубы с наружным диаметром 16...18 мм. Между пластинками вставлена изоляционная прокладка, которая служит для предупреждения короткого замыкания и обеспечивает жесткость индуктора.

Для уменьшения энергозатрат при нагревании гильзы целесообразно использовать два индуктора с разными диаметрами, что обеспечивает оптимальный зазор между нагреваемой поверхностью и индуктором.

Для $D_{\text{гил}} = 140 \text{ мм}$ – внутренний диаметр гильзы (зона посадочного буфера) $d_{\text{инд}} = 150 \text{ мм}$ – внутренний диаметр индуктора ТВЧ. Для $D_{\text{гил}} = 130 \text{ мм}$ (остальная часть) $d_{\text{инд}} = 140 \text{ мм}$. Размеры $D_{\text{гил}}$ и $d_{\text{инд}}$ указывают, что зазор между индуктором и гильзой должен быть $\approx 5 \text{ мм}$ [3–5].

Выводы

Подводя итог вышеизложенному, можно сказать, что ТПД металла перспективный способ не только вос-

становления, но и упрочнения как стальных, так и чугунных деталей полый цилиндрической формы. Способ может быть широко использован как ремонтными предприятиями, занимающимися восстановлением изношенных деталей, так и машиностроительными заводами для устранения брака механической обработки. Использование упрочняющей технологии ТПД металла для транспортных средств не только продлевает долговечность ТС, но и за счет повышения их надежности при эксплуатации на дорогах значительно снижает вероятность ДТП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Хромов В.Н.** Надежность транспортных средств в процессе эксплуатации и ее влияние на безопасность дорожного движения // Сб. матер. VII междунар. науч.-практ. конф. "Управление деятельностью по обеспечению безопасности дорожного движения (состояние, проблемы, пути совершенствования)" 18–19 апреля 2013 г. Орел: ОрЮИ МВД России имени В.В. Лукьянова, 2013. С. 355–358.
2. **Патент 2181649 РФ.** Способ восстановления закаленных гильз цилиндров / В.Н. Хромов, В.П. Лялякин, А.А. Ширяев, А.Ю. Костюков. Бюл. № 12. 2002.
3. **Патент 2181650 РФ.** Способ восстановления чугунных гильз цилиндров двигателей / В.Н. Хромов. Оpubл. Бюл. № 12. 2002.
4. **Патент 2182932 РФ.** Установка для термической обработки полых цилиндрических деталей / А.А. Ширяев, А.Ю. Костюков, В.Н. Хромов, В.П. Лялякин. Оpubл. Бюл. № 15. 2002.
5. **Хромов В.Н.** Упрочнение и восстановление наружных и внутренних поверхностей деталей типа "полый цилиндр" термопластическим деформированием // Изобретатели – машиностроению. 2012. № 12. С. 9–14.
6. **Василий Хромов.** Восстановление и упрочнение деталей машин и инструмента. Термопластическое деформирование металла [Электронный ресурс]: // Монография. LAP Lambert Academic Publishing. 01.10.2012. 280 с. Режим доступа: [https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/gb/book/978-3-659-25718-6/ Восстановление-и-упрочнение-деталей-машин-и-инструмента?search=%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D0%B2](https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/gb/book/978-3-659-25718-6/Восстановление-и-упрочнение-деталей-машин-и-инструмента?search=%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D0%B2).
7. **Хромов В.Н., Сенченков И.К.** Термоупругопластическое деформирование металла: Восстановление деталей машин. Орел: ОрелГТУ, 2002. 219 с.
8. **Хромов В.Н., Сенченков И.К.** Упрочнение и восстановление деталей машин термоупруго-пластическим деформированием. Орел: Изд-во ОГСХА, 1999. 221 с.
9. **Хромов В.Н.** Упрочнение и восстановление деталей дизелей термоупругопластическим деформированием при производстве и ремонте машин // Тяжелое машиностроение. 2005. № 4. С. 15–17.
10. **Хромов В.Н.** Технология упрочнения и восстановления деталей машин термоупругопластическим деформированием // Технология машиностроения. 2001. № 6. С. 39–42.

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

E-mail: utp@mashin.ru.

Web-site: www.mashin.ru.

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

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

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

Сдано в набор 04.12.13 г. Подписано в печать 22.01.14 г. Формат 60×88 1/8.

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

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

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

ООО "ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ"

п р е д с т а в л я е т

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Выходит с января 2005 г.

E-mail: utp@mashin.ru

Впервые в мире появился журнал, полностью посвященный упрочняющим технологиям и покрытиям, а также различным аспектам их применения. В нем публикуется информация о новейших методах упрочнения материалов и нанесения функциональных покрытий, совершенствовании существующих технологий, перспективном оборудовании, контроле упрочнения, системах автоматизации, нормативно-технические документы и многое другое.

Журнал ориентирован на технологов, конструкторов, специалистов, занимающихся изготовлением, ремонтом и восстановлением машин, оборудования и по роду своей деятельности связанных с проблемами повышения качества, надежности, ресурса и конкурентоспособности изделий. Журнал также может быть полезен преподавателям, аспирантам, студентам вузов и научным работникам.

ЖУРНАЛ РАСПРОСТРАНЯЕТСЯ ТОЛЬКО ПО ПОДПИСКЕ!



ПОДПИСНЫЕ ИНДЕКССЫ:

85159 – по каталогу агентства "Роспечать";
39269 – по объединенному каталогу "Пресса России";
60252 – по каталогу "Почта России"

Тематика журнала

- Общие вопросы упрочнения
- Механическая упрочняющая обработка
- Термическая обработка
- Обработка концентрированными потоками энергии
- Химическая, химико-термическая и электрохимическая обработка
- Методы нанесения функциональных покрытий, в том числе лакокрасочных
- Обработка комбинированными методами
- Перспективное оборудование и системы автоматизации
- Контроль качества упрочняющей обработки
- Информация. Производственный опыт
- Нормативно-технические документы

Журнал входит в перечень изданий ВАК РФ

Подписку на журнал можно оформить в любом почтовом отделении или непосредственно в издательстве "Машиностроение" за наличный или безналичный расчет с любого номера и на любой период. Заявки на подписку принимаются по почте, электронной почте, телефону или факсу.

Телефон: (499) 268-40-77, 269-54-96. Факс: (499) 269-48-97 (работает круглосуточно)

E-mail: utp@mashin.ru Http: www.mashin.ru

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