

ПИ № ФС77-31128

ТРУДЫ

ВСЕРОССИЙСКОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬНОГО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА
РЕМОНТА И ЭКСПЛУАТАЦИИ
МАШИННО-ТРАКТОРНОГО ПАРКА

ГОСНИТИ

ТОМ

111

Часть 2



МОСКВА - 2013

Государственное научное учреждение
Всероссийский научно-исследовательский технологический
институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка
Российской академии сельскохозяйственных наук
(ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии)

ТРУДЫ ГОСНИТИ

Том 111

Часть 2



Москва - 2013

Редакционный совет:

Черноиванов В.И., академик РАСХН, д-р техн. наук, профессор –
председатель;

Соловьев Р.Ю., канд. техн. наук – заместитель председателя;

Лялякин В.П., д-р техн. наук, профессор – заместитель председателя;

Бурумкулов Ф.Х., д-р техн. наук, профессор; Михлин В.М., д-р техн. наук,
профессор;

Горячев С.А., Костомахин М.Н., канд. техн. наук, Веретько Н.Ф.

Решением Президиума высшей аттестационной комиссии Минобр-науки от 19 февраля 2010 г. № 6/6 «Труды ГОСНИТИ» включены в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук».

КОМПЛЕКСНОЕ УПРОЧНЕНИЕ БЫСТРОИЗНАШИВАЮЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ

*А.Д. Верхотуров, д-р техн. наук, профессор
(Институт водных и экологических проблем (ИВЭП) ДВО РАН,
г. Хабаровск, тел. +7 (4212) 22-75-73, verhoturov36@mail.ru),
Э.Г. Бабенко, д-р техн. наук, профессор
(Дальневосточный государственный университет путей
сообщения (ДВГУПС), г. Хабаровск, тел. +7 (4212) 64-70-99; e-mail:
root@festu.khv.ru),
Л.А. Коневцов, канд. техн. наук
(Институт материаловедения Хабаровского
научного центра ДВО РАН,
г. Хабаровск, тел. +7(4212) 22-65-98, e-mail Konevts@narod.ru),
В.И. Иванов, канд. техн. наук
(ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии, г. Москва,
тел. +7 (495) 371-27-56, e-mail: tehnoinvest-vip@mail.ru)*

Аннотация. Работа посвящена исследованию свойств поверхностных слоев, образованных электроискровой обработкой, а также этим методом в комплексе с электродуговой наплавкой. Сочетание электроискровой обработки, формирующей подслоя, и электродуговой наплавки, создающей основной по толщине слой, способствует при определенных условиях увеличению твердости и износостойкости слоя.

Ключевые слова: электроискровое легирование, электродуговая наплавка, установка, электроды, покрытие, кинетика, структура, фазовый состав, твердость, износостойкость, остаточные напряжения.

Введение

В настоящее время наука и техника располагают различными методами поверхностного упрочнения быстроизнашивающихся поверхностей деталей машин и механизмов. Каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки, свои оптимальные области применения.

Так, метод электроискрового легирования (ЭИЛ) имеет следующие достоинства: возможность переноса на обрабатываемую поверхность любых токопроводящих материалов, в том числе карбидов, боридов, нитридов, высокую прочность сцепления легированного слоя (ЛС) с материалом основы, простоту выполнения технологической операции. Недостатки метода – свойственная традиционным технологиям небольшая толщина нанесенного слоя (до 0,3 мм), высокая шероховатость, низкая производительность (1-2 см²/мин). С другой стороны, метод электродуговой наплавки (ЭДН) имеет преимущества: возможность нанесения больших толщин наплавленного слоя (более 1 см), высокую производительность процесса. К недостаткам

метода можно отнести высокую сложность образования покрытий тугоплавкими металлами и соединениями. В связи с этим для расширения возможности обоих методов представляет интерес комплексное использование их для упрочнения быстроизнашивающихся поверхностей.

Целью данной работы являются изучение закономерностей и использование результатов исследования комплексного применения методов ЭИЛ и ЭДН для восстановления и упрочнения поверхностей деталей машин, работающих в условиях интенсивного трения.

Методика и материалы. Проводились сравнительные исследования влияния подслоя, полученного методом ЭИЛ на основном материале, на последующее формирование наплавленного ЭДН слоя, его структуру и свойства. Для исследования кинетики ЭИЛ были выбраны установки «Элитрон-12», «Элитрон-22А», «Элитрон-101», «ЭЛФА-541», позволяющие реализовать способ в ручном режиме с применением вибратора и механизированном режиме с автоматической подачей вращающегося электрода.

В качестве электродов (анода) при ЭИЛ использовались:

1) хром, относящийся к разряду металлов, образующих с железом неограниченные твердые растворы и, соответственно, обладающий наилучшими условиями формирования поверхностных слоев;

2) вольфрам – образующий с железом ограниченные твердые растворы. Несмотря на высокую эрозионную стойкость, ухудшающую создание подложки, он формирует при ЭИЛ железа слой с высокой твердостью;

3) сплавы на основе карбидов, дающие высокую твердость ЛС при ЭИЛ: ВК8, ВК6М и Т15К6, а также безвольфрамовый твердый сплав ЦНХН-45 (ТУ 06678-86 ОКБ ИПМ НАН Украины);

4) опытная сталь, содержащая 8,0 % вольфрама, полученная в ДВГУПС (г. Хабаровск) методом электрошлакового переплава (ЭШП) низкоуглеродистой проволоки во флюсе на основе шеелитового концентрата из минерального сырья Дальневосточного региона плавящимся электродом в среде защитных газов [1].

В качестве катодов использовались образцы из быстрорежущей стали Р9К5 и штамповой стали 5ХНВ.

В качестве материала основы при комбинированной наплавке использовались образцы из стали Ст.3, а переплав осуществлялся электродуговой сваркой в среде углекислого газа низкоуглеродистой сварочной проволокой Св-08ГА диаметром 1,4 мм, током 180 А, при напряжении на дуге 22 В; расход углекислого газа – $(1,6 \cdot 10^{-4})$ м³/с, скорость сварки – $(9 \cdot 10^{-3})$ м/с.

В соответствии с задачей исследования формировались подслои методом ЭИЛ различными материалами, изучалась их структура и свойства, затем формировались покрытия методом ЭДН. Переплав подложек с применением низкоуглеродистой сварочной проволоки осуществлялся в среде CO₂.

Результаты и обсуждение. Исследования кинетики процесса ЭИЛ с использованием ручного вибратора стали 5ХНВ сплавом Т15К6 показали, что наибольший суммарный привес достигнут при использовании режимов установки «Элитрон-22А» ($J_{кз} = 2,8$ А). В этом случае коэффициент переноса $\bar{K}_{\text{вх}}$ и эффективность процесса $\gamma_{\text{вх}}$ составили, соответственно, величины 0,62 и $1,86 \cdot 10^{-3}$ г·мин/см³. Наблюдалось непрерывное повышение суммарной эрозии $\sum_{i=1}^{i=10} \Delta_a$ (за 10-минутную обработку) анода из стандартных твердых сплавов. Для катода (в зависимости от материала) имели место три характерных обстоятельства:

- 1) непрерывный привес в исследуемом промежутке времени;
- 2) привес до определенного времени с последующей стабилизацией;
- 3) привес до определенного времени с последующим снижением.

При использовании сплава ВК8 отмеченные параметры имели более низкие значения. При этом были замечены две особенности:

1) периодические изменения массы катода и анода с связи с циклическим характером хрупкого разрушения по причине возникновения на поверхностях электродов периодически релаксирующих внутренних напряжений [2];

2) с увеличением продолжительности обработки циклические изменения массы анода и катода (Δ_a и Δ_k) стабилизируются относительно некоторого среднего значения, соответствующего формированию «вторичной структуры» на аноде, и указывают на завершение формирования ЛС на катоде.

В [3] обращается внимание на то, что при ЭИЛ должна иметь место аддитивность процесса эрозии. В нашем случае этот тезис не подтвердился, что можно объяснить образованием «вторичной структуры» и периодической релаксацией возникающих внутренних напряжений. Как правило, значения Δ_a и Δ_k изменялись по «схожей» зависимости во времени, но в отдельных случаях периодические локальные разрушения не совпадали.

При использовании в качестве анода сплавов Т15К6 и ВК8 худшие условия формирования отмечались при легировании стали Р9К5 сплавом ВК8 при $J_{кз} = 0,5$ А, что связано с образованием на рабочих поверхностях электродов более хрупкого карбида W_2C (в сравнении с WC); это подтверждается данными рентгенофазового анализа (табл. 1). При упрочнении стали сплавом Т15К6 такой процесс затруднен из-за наличия TiC.

Таблица 1

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ ПОСЛЕ ЭИЛ

Материал: анод/катод	Поверхностный слой	
	Анод	Катод
ВК8/Р9К5	β -WC куб.; W_2C ; WC гекс.	β -WC; W; WC гекс.
ВК8/5ХНВ	W_2C ; WC	Ni_2W_4C ; β -C; W; $(NiCr)_2W_4C$
Т15К6/Р9К5	TiC; W; WC	β -WC куб.; W; TiC; Co_6W_6C ; WC гекс. (следы)
Т15К6/5ХНВ	TiC; W; WC	β -WC куб.; W; TiC; Co_6W_6C ; WC гекс.; W_2C
НЦХН-45/ Р9К5	ZrN (с увеличенным периодом решетки); N; $Cr_{23}C_6$; ϵ -Cr ₃	ZrO_2 куб.; NiO; FeO; Fe_2O_3 ; Ni_2O_3 ; ZrN(O)

В процессе легирования на катоде идет интенсивное перемешивание материалов анода и катода, что дает возможность образования дополнительных карбидов и интерметаллидов легирующих элементов. Поэтому, чем больше в составе легируемой стали имеется карбидообразующих элементов (особенно металлов IV-VI групп), тем больше вероятность образования хрупких карбидных фаз и тем меньше эффективность процесса упрочнения. Так, при ЭИЛ стали Р9К5, содержащей большее количество карбидообразующих элементов (хром, ванадий, вольфрам) по сравнению со сталью 5ХНВ, параметры $\sum_0^t \Delta_k$ и $\bar{K}_{\Sigma}$ значительно ниже. Таким образом, лучшие условия формирования ЛС реализуются при ЭИЛ Т15К6/5ХНВ. Обобщая, скажем, что при увеличении в упрочняемой стали карбидообразующих легирующих элементов условия формирования ЛС значительно ухудшаются.

Исследование параметров массопереноса при ЭИЛ сталей Р9К5 и 5ХНВ сплавом НЦХН-45 показало, что, в отличие от сплавов ВК8 и Т15К6, Δ_k при-

нимает отрицательные значения при $t \geq 4$ мин/см² как при $J_{кз} = 0,5$ А, так и при $J_{кз} = 1,0$ А. При этом отметим, что условия формирования ЛС с ростом тока короткого замыкания ухудшаются.

Эти особенности, вероятно, связаны с более высокой хрупкостью сплава НЦХН-45 по сравнению со стандартными твердыми сплавами за счет того, что степень ковалентности межатомной связи ZrN, составляющего его основу, сильнее, чем WC. По этой же причине удельная эрозия анода из сплава НЦХН-45 существенно превышает таковую для сплавов ВК8 и Т15К6. При этом в первую минуту обработки она принимает наибольшее значение, а затем, уменьшаясь, стабилизируется при образовании на поверхности анода устойчивой «вторичной структуры». Суммарный привес катода при этом повышается, а затем стабилизируется при $t=4$ мин/см². Удельный привес коррелирует с изменением удельной эрозии анода: на первой минуте он принимает наибольшее значение, затем уменьшается до среднего отрицательного. Наибольшие величины Δ_k реализуются при $J_{кз} = 1,0$ А в связи с тем, что сплав НЦХН-45 эродирует преимущественно в твердой фазе даже при больших тепловых нагрузках. Повышение времени ЭИЛ увеличивает число разрушающих циклов, воздействующих на материал электродов, и эффективность процесса снижается.

На эффективность процесса ЭИЛ сплавом НЦХН-45, как и при упрочнении сплавами Т15К6, ВК8, существенное влияние оказывает материал катода. Наибольшая эффективность процесса (γ) достигается на стали 5ХНВ по той же причине, что и для стандартных твердых сплавов, т.е. в связи с меньшим содержанием в ней карбидообразующих легирующих элементов по сравнению со сталью Р9К5.

Таким образом, проведенные исследования формирования покрытия при ЭИЛ сталей Р9К5 и 5ХНВ стандартными твердыми сплавами ВК8, Т15К6 и безвольфрамовым сплавом НЦХН-45 на установке с ручным вибратором «Элитрон-12» показали конкурентоспособность последнего, подтвердили неаддитивность процесса эрозии из-за формирования на поверхности анода «вторичной структуры», а также влияние технологических режимов при условии постоянства межэлектродной среды.

При механизированной обработке вращающимся электродом (установка «ЭЛФА-541») исследования проводились с использованием стержневых электродов диаметром 1,0 мм из стандартного твердого сплава ВК6М и безвольфрамового материала НЦХН-45 (табл. 2). В качестве катода использовалась сталь Р9К5.

Таблица 2

РЕЖИМЫ ЭИЛ СТАЛИ Р9К5 НА УСТАНОВКЕ «ЭЛФА-541»

Номер режима	J_p , А	V , мм/с	f , кГц	C , мкф	Номер режима	J_p , А	V , мм/с	f , кГц	C , мкф
1	0,3	12,5	12,5	0,1	9	3,2	0,3	40	0,1
2	9,6	0,3	12,5	0,1	10	9,6	0,3	40	0,1
3	3,2	0,9	12,5	0,1	11	3,2	0,9	40	0,1
4	9,6	0,9	12,5	0,1	12	9,6	0,9	40	0,1
5	3,2	0,3	12,5	0,47	13	3,2	0,3	40	0,47
6	9,6	0,3	12,5	0,47	14	9,6	0,3	40	0,47
7	3,2	0,9	12,5	0,47	15	3,2	0,9	40	0,47
8	9,6	0,9	12,5	0,47	16	9,6	0,9	40	0,47

Аналізу подвергались параметры Δ_a , Δ_k , $\sum^n \Delta_a$, $\sum^n \Delta_k$, $K_{\text{пх}}$, γ и шероховатость поверхности (табл. 3). Видно, что максимальный коэффициент переноса $K_{\text{пх}}$ и наибольшая эффективность процесса γ наблюдаются при реализации режимов 6 и 10, которым соответствуют максимальный ток ($J = 9,6$ А) и минимальная скорость перемещения электрода ($V = 0,3$ мм/с).

Таблица 3

ПОКАЗАТЕЛИ МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ЭИЛ СПЛАВАМИ ВК6М И НЦХН-45
СТАЛИ Р9К5 НА УСТАНОВКЕ «ЭЛФА-541»

Материал анода	Номер режима ЭИЛ	Показатели массопереноса									Шероховатость поверхности, мкм (при $n=2$)
		n_x	$\sum^n \Delta_k, 10^{-4} \text{ см}^3$	$\sum^n \Delta_a, 10^{-4} \text{ см}^3$	$K_{\text{пх}}$	$\gamma \cdot 10^{-6} \text{ см}^3 / \text{проход}$	$\sum^{n=2} \Delta_k, 10^{-4} \text{ см}^3$	$\sum^{n=2} \Delta_a, 10^{-4} \text{ см}^3$	$K_{\text{пх}}^I$	$\gamma \cdot 10^{-6} \text{ см}^3 / \text{проход}$	
ВК6М	2	9	0,73	1,5	0,48	35,0	0,33	0,47	0,70	23,1	1,05
	6	10	1,13	1,87	0,60	67,8	0,33	0,60	0,55	18,2	1,50
	8	4	0,33	0,80	0,41	13,5	0,20	0,40	0,50	10,0	1,40
	10	10	1,33	2,07	0,64	85,1	0,47	0,53	0,89	41,8	1,10
	14	5	0,40	0,73	0,55	22,0	0,27	0,40	0,67	18,1	1,60
	16	3	0,20	0,40	0,50	10,0	0,20	0,33	0,61	12,2	1,30
НЦХН-45	2	2	0,85	1,69	0,50	42,5	0,85	1,69	0,50	42,5	1,15
	6	10	4,65	6,49	0,72	334,8	0,98	1,55	0,63	61,7	1,00
	8	4	0,84	1,54	0,55	46,2	0,40	0,53	0,75	30,0	1,00
	10	10	4,23	6,90	0,61	258,0	1,30	1,82	0,71	92,3	1,05
	14	1,26	2,10	2,10	0,60	75,6	0,84	1,54	0,54	45,4	1,35
	16	3	0,70	1,26	0,56	39,2	0,56	0,98	0,57	31,9	0,95

В связи с тем, что энергия искрового разряда расходуется не только на эрозию электрода, но и на его нагрев, при высокой частоте следования импульсов и при низкой теплопроводности материала электрода выделившееся в нем за один импульс тепло не успевает рассеиваться и последующий импульс увеличивает его температуру. Такое явление характерно для ЭИЛ вращающимся электродом и следящей системой, когда разряд происходит через определенные промежутки времени, а теплоотвод через электрод-инструмент ограничен в связи с малым его поперечным сечением.

Тепло, накопившееся при многократных импульсах, существенно разогревает анод на расстоянии до 5 мм от торца рабочей поверхности. Такой тепловой эффект («вторичный» нагрев) способствует увеличению доли эрозии в жидкой фазе и производительности ЭИЛ. Этот эффект должен быть тем значительнее, чем больше тепловая нагрузка искрового разряда и частота следования импульсов, а также, чем меньше скорость относительного перемещения электродов и ниже их теплопроводность. Таким образом, уровень «вторичного» нагрева анода обуславливается как электромеханическими параметрами, так и теплофизическими свойствами электродного материала.

В условиях ЭИЛ с ручным вибратором этот эффект выражен значительно слабее из-за менее стабильной скорости перемещения электрода, а в ряде случаев – из-за низкой частоты импульсов.

ЭИЛ на режимах с повышенной энергией импульса при большой скорости перемещения электрода приводит к разрушению основы катода уже на начальном этапе.

В целом при ЭИЛ сплавом НХЦН-45, по сравнению со сплавом ВК6М, суммарный привес катода больше в 3-4 раза, а эффективность процесса выше в 3-5 раз. Это объясняется не только повышенной эрозионной способностью сплава НХЦН-45, но и большим уровнем его «вторичного» нагрева за счет пониженной теплопроводности (25,1 и 29,3 Вт/м·°С для сплавов НХЦН-45 и ВК6М соответственно). Кроме того, что при использовании механизированного метода, из-за низкой энергии в импульсе (менее 1 Дж) и отсутствии удара электрода об обрабатываемое изделие, тепловое влияние искрового разряда превалирует над термомеханическим воздействием, что ведет к увеличению вклада жидкофазной вставляющей эрозии. При этом сохраняются общие закономерности процесса, присущие немеханизированному ЭИЛ: ограничение толщины ЛС, циклический характер изменения величин Δ_a и Δ_k .

Максимальный суммарный привес катода из стали Р9К5 при легировании сплавом ВК6М на установке «ЭЛФА-541» в 2-3 раза ниже, чем на установке «ЭЛИТРОН-12». Это связано со значительно меньшей энергией импульса в первом случае. По шероховатости упрочненной поверхности безвольфрамовый сплав НХЦН-45 не уступает стандартному ВК6М (табл. 3).

При механизированном ЭИЛ на режимах с большим рабочим током формируется плотно прилегающий к основе слой толщиной 6 мкм высокой сплошности и незначительной пористости; на режимах с низким рабочим током образуется более тонкий и несплошный «белый» слой (БС) с повышенной микротвердостью. Результаты измерения микротвердости поперечного среза образца после ЭИЛ сплавом ВК6М на разных режимах обработки приведены в табл. 4.

Таблица 4

**РЕЗУЛЬТАТЫ ДЮРОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СЛОЯ НА СТАЛИ Р9К5 ПОСЛЕ
ЭИЛ СПЛАВОМ ВК6М НА УСТАНОВКЕ «ЭЛФА-541»
(ДЛЯ ОСНОВЫ $H_{\mu} = 8,6$ ГПа)**

Номер режима ЭИЛ	$H_{\mu} \pm 1,5$ ГПа (n=10)		Номер режима ЭИЛ	$H_{\mu} \pm 1,5$ ГПа (n=10)	
	подслоя	БС*		подслоя	БС*
4	14,88	21,63	12	24,80	27,80
5	7,90	-	13	9,60	12,60
6	20,94	-	14	13,30	-
8	12,94	-	-	-	-

Таким образом, видно, что значительное влияние на формирование ЛС оказывает способ легирования. При механизированном безвибрационном ЭИЛ стали сплав НХЦН-45 по эффектности применения превосходит, а по величине шероховатости нанесенного слоя, не уступает стандартному сплаву ВК6М. Однако условия формирования ЛС в первом случае крайне неблагоприятны по причине высокой эрозионной стойкости материалов и внутренних напряжений. При безвибрационном механизированном ЭИЛ резко возрастает тепловой эффект, ведущий к увеличению доли эрозии в жидкой фазе, что значительно увеличивает производительность процесса и толщину наносимого слоя. Это является существенным обстоятельством

при формировании легирующей подложки при комбинированном способе наплавки: последовательное применение ЭИЛ-ЭДН.

Проведенные исследования подтверждают гипотезу о возможности формирования легирующей подложки для комбинированных способов наплавки методом ЭИЛ-ЭДН. Согласно [4-6], в качестве электродного материала при создании подложки для комбинированной наплавки могут использоваться как чистые металлы, так и многокомпонентные сплавы. Наилучшие условия для формирования подложки создаются материалами с высокой взаимной растворимостью с материалом основы. Наибольшая твердость покрытия при ЭИЛ углеродистых сталей достигается применением в качестве анода Cr, W, карбидов и сплавов на их основе.

Исследование поверхностных слоев, полученных при комбинированной наплавке ЭИЛ-ЭДН

При наплавке без подслоя шов имеет две выраженные зоны – наплавленный металл (рис. 1а), имеющий феррито-перлитную структуру с $H_{\mu} = 2,23-2,29$ ГПа и зону термического влияния глубиной до 0,5 мм с $H_{\mu} = 1,83-1,99$ ГПа, основной металл – доэвтектоидная сталь с $H_{\mu} = 1,83-2,1$ ГПа.

При комбинированной наплавке с легирующим подслоем, сформированным ЭИЛ электродом из хрома, получено покрытие толщиной 4 мм со следующими характерными областями:

1. Наплавленный металл (рис. 1б) с микроструктурой игольчатого феррита, троостита и мартенсита, микротвердость которых находится в пределах 3,8-6,16 ГПа, что практически соответствует микротвердости слоя после ЭИЛ армо-железа хромом [7]. Такая структура связана с быстрым охлаждением сварочной ванны, когда легированный хромом феррит переходит из полиэдрической формы (рис. 1а) в игольчатую (рис. 1б), резко повышая его твердость. В результате даже при незначительном содержании углерода в случае наличия хрома образуется структура мартенситного типа, что присуще легированным хромистым сталям.

2. Зона сплавления, показанная на рис 1в. Видно, что вблизи границы сплавления отсутствует кристаллизационная прослойка, характерная для сварки разнородных материалов. Дендриты наплавленного металла являются продолжением кристаллов основного. Не наблюдается также и диффузионных прослоек, вызываемых миграцией углерода на линии раздела.

3. Зона термического влияния глубиной 2,5-3 мм, состоящая из крупных зерен феррита и перлита с $H_{\mu} = 2,1-2,4$ ГПа.

Структура наплавленного металла во всем объеме равномерная, микротвердость на разных участках отличается незначительно ($H_{\mu} = 5,67-6,16$ МПа), что свидетельствует о хорошем перемешивании материала подложки с основным и присадочным металлом.

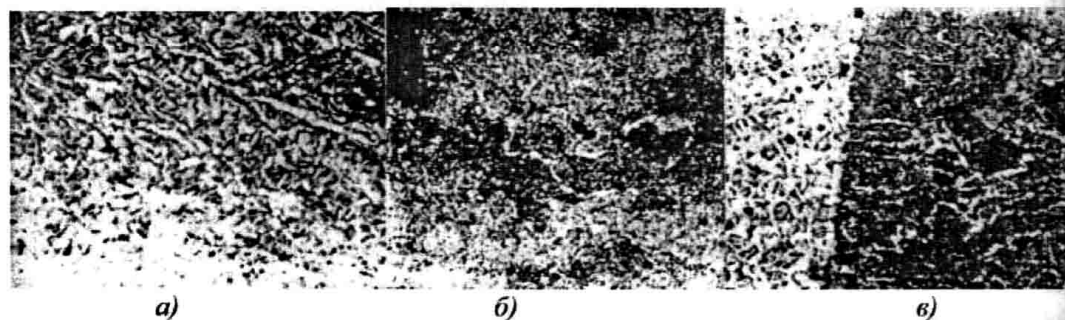


Рис. 1. Микроструктура металла, наплавленного проволокой СВ-08ГА на сталь Ст. 3 в среде углекислого газа, $\times 200$: а) наплавка без легирующей подложки; б) наплавка с легирующей хромосодержащей подложкой; в) зона сплавления с основным металлом и легирующей подложкой

Микроструктура покрытия, полученного переплавом подложки, легированной анодом из вольфрама, во многом схожа с предыдущей. Мало заметно отличие структур в средней части наплавленного слоя (рис. 2а) и в зоне непосредственной близости к основному металлу (рис. 2б). В первом случае она состоит из перлита и бейнита с $H_{\mu}=3,01-3,82$ ГПа, причем зона с наименьшей твердостью расположена в верхней части, а во втором преобладает перлит с $H_{\mu}\leq 2,8-2,9$ ГПа и некоторое количество сорбита. Во всем объеме наплавленного металла присутствуют в небольшом количестве установленные рентгенофазовым анализом избыточные карбиды Fe_3W_3C , повышающие твердость и прочность металла. Наличие вольфрама способствует измельчению зерна.

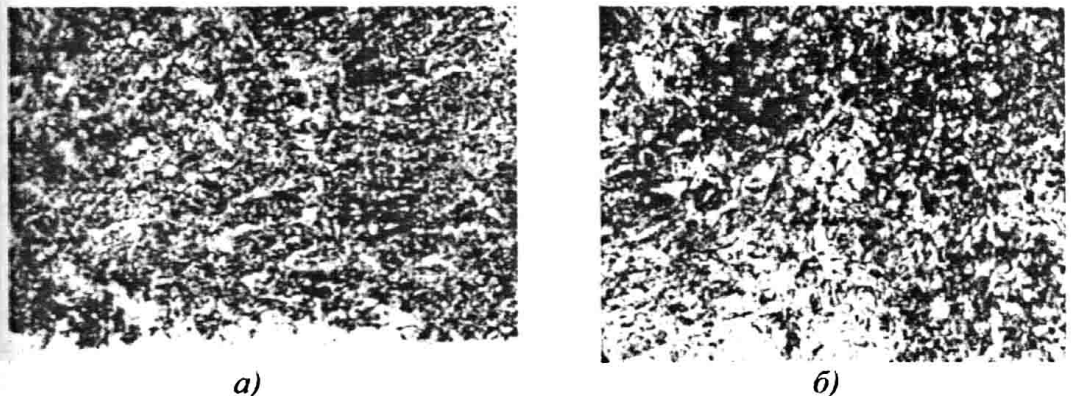


Рис. 2. Микроструктура металла, наплавленного в среде CO_2 проволокой Св-08 ГА на сталь Ст. 3 с вольфрамосодержащей подложкой, $\times 200$:
а - средняя часть валика; б - область у зоны сплавления

Возможность использования для формирования легирующей подложки сплавов на основе карбидов исследовалась при помощи электродов для ЭИЛ, разработанных в ИМ ХНЦ ДВО РАН [8].

В работе [9] показано, что во время ЭИЛ на рабочих поверхностях электродов под воздействием импульсных термодинамических нагрузок, влиянием межэлектродной среды формируется слой «вторичной структуры», отличающийся от исходного материала и имеющий значительные внутренние напряжения. С увеличением продолжительности легирования происходит накопление напряжений, которые через определенное время релаксируют с последующим хрупким разрушением поверхностного слоя.

В работе [10] отмечается, что тугоплавкие соединения эродируют со значительным участием твердой фазы. Поверхность анода после ЭИЛ карбидами WC имеет протяженные участки оплавления с большим количеством пор сферической формы, которые возникают в результате фазообразования при плавлении. Хрупкое разрушение ЛС подтверждается дискретным характером формирования поверхностной структуры. Количество участков хрупкого разрушения с увеличением времени легирования до определенного момента возрастает, а затем стабилизируется.

Учитывая изложенное, из-за низкого K_n стандартного твердого сплава исследовались электроды из ВК6М с пластичными добавками в виде датолита и углерода. На рис. 3 приведена микроструктура сплава, полученного комбинированной наплавкой с подложкой, сформированной ЭИЛ электродами ВК6М-датолит-углерод. В средней части наплавленного объема (рис. 3а) зерна сравнительно мелкие, равноосные, представляют собой смесь легированного вольфрамом феррита и перлита с $H_{\mu}=1,69...3,1$ ГПа. Линия сплавления (рис. 3б) выраженная, но не резкая.

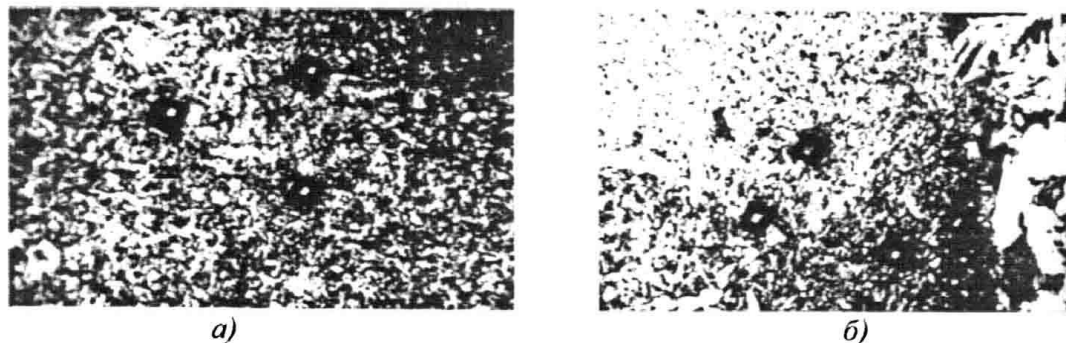


Рис. 3. Микроструктура металла, наплавленного с среде CO_2 проволокой Св-08ГА на сталь Ст. 3 с подложкой, сформированной электродом ВК6М-дастолит-углерод:
а) средняя часть валика; б) зона сплавления

Величина зерен феррита основного металла и их расположение у зоны сплавления характерны для участков неполного расплавления и перегрева. Пустоты, газовые поры и неметаллические включения не обнаружены. Концы зерен основного металла являются началом кристаллитов наплавленного.

Крупные включения феррита в основном металле указывают на диффузию углерода из зоны термического влияния в наплавленный металл, который на этом участке представляет собой грубопластинчатый перлит с $H_m = 2,86$ ГПа и практически не имеет ферритной фазы.

Исследование микроструктуры покрытия, полученного при комбинированной наплавке с подложкой, сформированной ЭИЛ электродом из созданного вольфрамосодержащего опытного сплава, показало, что верхняя часть валика (рис. 4а) представляет собой ферритно-перлитную смесь с преобладанием ферритной составляющей. Ферритные зерна имеют нерегулярные форму и размеры, границы выявлены достаточно полно, тогда как степень травления середины зерен меняется в зависимости от их ориентации. Однако контраст между различно ориентированными зернами незначителен. В зоне сплавления (рис. 4в) на участке основного металла явно выраженные полигональные зерна феррита неправильной формы с зазубренными границами. По границам располагаются темные участки вырожденного перлита в виде глобул или нитей. Внутри некоторых зерен перлита расположены цементитные частицы, оставшиеся во время рекристаллизации зоны термического влияния. В верхней и большей степени средней (рис. 4б) зонах наплавленного валика имеются сложные карбиды $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, которые сгруппированы по границам кристаллитов или на отдельных участках в виде вытянутых линий. Их наличие в покрытии свидетельствует о благоприятных условиях перехода в легирующую подложку из материала анода при ЭИЛ, так как эрозия осуществляется в жидкой фазе железа.

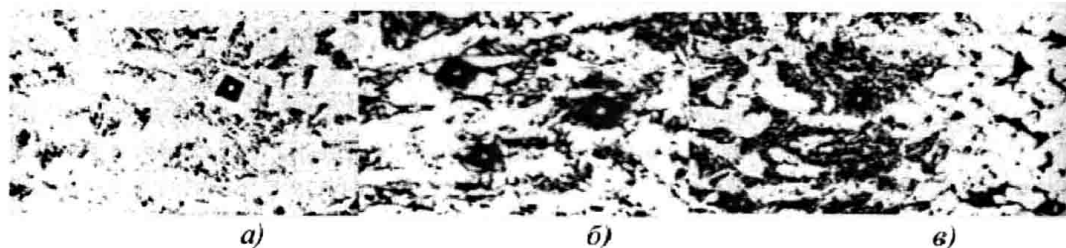


Рис. 4. Структура металла, наплавленного в среде CO_2 проволокой Св-08ГА на сталь Ст. 3 с подложкой, сформированной электродом из опытной вольфрамосодержащей стали: а) верхняя часть валика; б) средняя часть; в) зона сплавления с основным металлом

Микротвердость различных участков наплавленного металла имеет существенный разброс: в верхней части $H_{\mu} = 1,92\text{--}2,08$ ГПа; в средней – $H_{\mu} = 2,17\text{--}2,63$ ГПа; в местах скопления карбидов $H_{\mu} = 5,14\text{--}5,41$ ГПа.

Рассмотренные структуры покрытий были получены комбинированной наплавкой с формированием подложек электроискровым легированием на установке с ручным вибратором.

Серия аналогичных наплавов на подслои ЭИЛ с использованием механизированной установки с вращающимся электродом показала, что отличий структур сплавов по всем четырем группам легирующих материалов практически не наблюдается. Исключение составило покрытие, для формирования которого при ЭИЛ в качестве подложки использовалась опытная вольфрамсодержащая сталь: количество карбидной фазы выросло в $2,5\text{--}3,0$ раза. Это объясняется большим количеством перенесенного на подложку материала за счет дополнительного теплового эффекта, увеличивающего долю эрозии в жидкой фазе и повышающего соответственно ее толщину.

Твердость покрытий. На рис. 5 показано изменение микротвердости характерных участков комбинированных ЭИЛ-ЭДН покрытий, наплавленных с использованием четырех исследуемых типов подложек. При формировании на установке с ручным вибратором (рис. 5а) наибольшую твердость имеют наплавленные поверхности, предварительно легированные хромом (первая группа), отмечено превышение твердости основного металла в три раза. Это можно объяснить следующим. Хром, обладая высокой взаимной растворимостью с железом, способствует формированию качественной подложки. При последующем переплаве подложки в среде CO_2 образуется хромистая сталь, в процессе кристаллизации которой возникают закалочные структуры с повышенной твердостью.

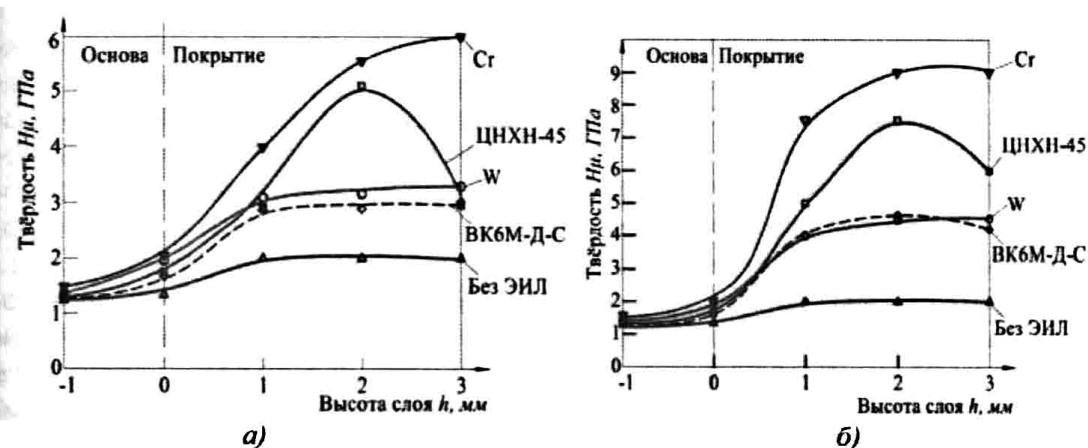


Рис. 5. Микротвердость покрытий на стали Ст. 3 после ЭИЛ (электродами: Cr, ЦНХН-45, W, ВК6М-Датолит-Углерод) и последующей наплавки в среде углекислого газа: а) – при формировании подложки ручным вибратором; б) – при формировании подложки вращающимся электродом; (-1) – основной металл; (0) – зона термического влияния; (1) – участок наплавленного металла у линии сплавления; (2) – средняя часть наплавленного валика; (3) – верхняя часть наплавленного валика

При ЭИЛ подложки вольфрамом (2 группа) твердость покрытия превышает твердость основы только в 1,7 раза, что вдвое меньше твердости, получаемой при использовании хрома. Такое положение объясняется тем, что W с Fe образуют ограниченные твердые растворы, а Cr с Fe – неограниченные, а также высокой эрозионной стойкостью вольфрама и хрупким разрушением поверхностного слоя подложки от значительных внутренних

напряжений. Последнее не позволяет увеличить ее толщину (0,08 мм) и, соответственно, количество легирующего элемента в металле покрытий при последующем переплаве.

Практически одинаковую твердость с вышеуказанными имеют покрытия для формирования подложки материала третьей группы: сплав ВК6М с пластифицирующими добавками. В данном случае, за счет увеличения жидкой фазы при переносе сплава с анода на катод толщина ЛС вырастает до 0,15...0,2 мм, но концентрация легирующих элементов в покрытии после переплава за счет пластифицирующих добавок ниже, чем при использовании чистого металла. Не способствует повышению твердости, что установлено исследованиями микроструктуры, отсутствие в наплавленном материале карбидов (имевшихся в исходном сплаве), которые при высоких температурах формирования подложки и покрытия растворились в аустените, а при дальнейшей кристаллизации из-за малой концентрации только пролегиrowали феррит и цементит в составе перлита.

Особый интерес представляет возможность комплексного использования минерального сырья Дальневосточного региона для получения легированных покрытий при ЭДН плавящимся электродом в среде защитных газов. В этом качестве для выполнения функции при ЭИЛ легирующего электрода использован опытный сплав (4 группа), основой которого является Fe. Получено увеличение толщины покрытия (подложки) до 0,8...0,9 мм, существенно повышена концентрация W в поверхностном слое. Потери эрозийноустойчивых твердых компонентов при переносе с анода на катод при ЭИЛ почти исключены, так как процессы осуществляются в жидкой фазе железа. Твердость наплавленного валика оказалась на 10% ниже, чем при формировании подложки Cr, но в 1,6...1,9 раза выше по сравнению с подложками, сформированными W (вторая группа) и сплавом на основе карбидов (третья группа).

Анализ микроструктуры покрытия показал отсутствие закалочных структур, что вызвано малым содержанием углерода в материалах анода и катода. В связи с этим есть основание предполагать, что в случае наплавки средне- и высокоуглеродистых сталей твердость наплавленного слоя превысит твердость покрытий, сформированных с помощью остальных рассмотренных типов подложек, так как имеет в составе сплава не только легированный вольфрамом цементит и карбиды, но и твердые закалочные фазы.

При комбинированной наплавке ЭИЛ-ЭДН существенное влияние на величину твердости покрытий оказывает способ нанесения подслоя. Так, при использовании для ЭИЛ механизированного режима обработки, твердость покрытий при всех четырех составах подложек возросла (рис. 5б). Наибольший прирост наблюдался в тех случаях, когда перенос легирующего компонента на подложку осуществлялся преимущественно в жидкой фазе (4 группа) или при использовании материалов со взаимной растворимостью с основой (1 и 4 группы). Увеличение твердости связано с тем, что при ЭИЛ со следящей системой, обеспечивающей стабильность процесса обработки, и вращающимся электродом использовалась высокая частота следования импульсов. Выделившаяся за один импульс тепловая энергия не успевала рассеиваться, накапливалась в электроде и существенно разогревала его. Такой дополнительный тепловой эффект повышал долю эрозии в жидкой фазе и увеличивал толщину легирующей подложки, а, соответственно, и концентрацию легирующих элементов в покрытии при ее переплаве.

Износостойкость покрытий определялась по схеме «ролик-плоскость» при сухом трении. Материал контртела – сталь 40Х, закаленная в масле до твердости HRC 52. В качестве сравнительного параметра был принят коэф-

коэффициент износостойкости $K_{\text{и}} = \Delta m_{\text{к}} / \Delta m_{\text{обр}}$, где: $\Delta m_{\text{к}}$ – потери массы контртела при испытаниях, г; $\Delta m_{\text{обр}}$ – потери массы образца, г.

Установлено, что коэффициент $K_{\text{и}} = 0,68$ имеет покрытия, при формировании которых использовалась подложка из хрома. При подложках второй и третьей групп коэффициенты составили 0,57 и 0,55 соответственно. В случае нанесения подложки опытной сталью (4 группа) $K_{\text{и}} = 0,83$.

Проведенные исследования и практика создания легированных покрытий при комбинированной наплавке ЭИЛ-ЭДН дали возможность выделить следующие основные рекомендации:

1) оптимальные условия при формировании подслоя для ЭДН создаются использованием при ЭИЛ электродов из материалов, основа которых имеет неограниченную растворимость с материалом изделия;

2) электродные материалы для ЭИЛ, содержащие фазы с высокой эрозийной стойкостью, должны иметь в своем составе пластифицирующие компоненты, способствующие переносу легирующего материала в жидкой фазе;

3) изобарно-изотермические потенциалы легирующих элементов электродных материалов для ЭИЛ, при формировании подслоя для ЭДН, должны быть выше аналогичных параметров, которыми обладают элементы раскислителей электродных материалов для переплава;

4) наибольшая толщина ЛС достигается при ЭИЛ стержневым вращающимся электродом в механизированном режиме за счет дополнительного теплового эффекта и повышения доли эрозии анода в жидкой фазе;

5) при комбинированной обработке ЭИЛ-ЭДН перспективны в качестве электродов для ЭИЛ при формировании подслоя перед ЭДН материалы, изготовленные на основе легирующих минеральных ассоциаций.

Выводы

1. Предложен способ и сформулированы основные положения по комплексному использованию известных универсальных методов ЭИЛ ЭДН. Способ заключается в предварительном нанесении на поверхность изделия легирующего подслоя с последующим его переплавом электрической дугой в среде защитных газов. Он дает возможность получения покрытий с высокими эксплуатационными свойствами путем легирования как традиционными материалами, так и материалами, созданными из многокомпонентных минеральных ассоциаций.

2. Метод ЭИЛ, обладающий простотой технологии, низкой энергоемкостью, незначительным расходом электродного материала и другими достоинствами, эффективен для формирования легирующего подслоя при комбинированной обработке в сочетании с ЭДН.

3. Установлено, что подслоя, нанесенный электродом из опытной стали с 8%-ным содержанием вольфрама, полученной электрошлаковым переплавом под флюсом из шеелитового концентрата, при комбинированной наплавке способствует формированию покрытия, твердостью вдвое большей твердости покрытия с подложкой, выполненной чистым W, и в 3,8-4,0 раза выше твердости покрытия без подслоя.

4. При создании легирующего подслоя толщина его повышается за счет увеличения доли материала анода, переносимой в жидкой фазе.

5. Исследованы структура и свойства покрытий, сформированных на стали Ст. 3 комбинированной наплавкой с использованием легирующих подслоев из различных материалов. Выявлено, что при создании подслоя электродом из вольфрамосодержащего сплава, полученного электрошлаковым переплавом под флюсом из шеелитового концентрата, твердость покрытий после наплавки составляет 5,0-7,5 ГПа, что в 1,6-1,9 выше твердости по-

крытия, полученного с подслоем, сформированным чистым вольфрамом и сплавами на основе карбидов вольфрама. Коэффициент износостойкости относительно закаленной стали 40ХН имеет величину 0,83.

Литература

1. Бабенко Э.Г., Верхотуров А.Д., Разработка новых сварочных материалов на основе минерального сырья Дальневосточного региона. Научная монография. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 144 с.
2. Верхотуров А.Д. Обобщенная модель процесса электроискрового легирования // Электрофизические и электрохимические методы обработки. 1983, № 1. – С. 3-6.
3. Миркин Л.И. Плотность дефектов кристаллической решетки и твердых сталей // Изв. вузов. Черная металлургия. 1968, № 11. С. 107-110.
4. Бабенко Э.Г., Верхотуров А.Д. Особенности формирования покрытий на металлах методом электроискрового легирования. Научное издание. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – 89 с.
5. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Бабенко Э.Г., др. Повышение износостойкости электроискровых покрытий // Порошковая металлургия. 1987, № 5. С. 94-98.
6. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Бабенко Э.Г., др. // Порошковая металлургия. 1986, № 2. С. 76-79.
7. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 323 с.
8. Николенко С.В. Создание новых электродных материалов с использованием минерального сырья и самофлюсующихся добавок для электроискрового легирования деталей машин. Автореф. дис. канд. техн. наук / ИМ ХНЦ ДВО РАН. – Хабаровск, 1996. – 24 с.
9. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А. Эрозия тугоплавких материалов при воздействии концентрированных потоков энергии. Препринт // Ин-т горного дела ДВО РАН АН СССР. – Владивосток: Дальнаука. 1987. – 64 с.
10. Верхотуров А.Д. Материаловедение электродных материалов для электроэрозионной обработки: Препринт. – Владивосток: Изд-во Дальнаука, 1997. – 27 с.

UDC 621.9.048

JOINT REINFORCEMENT WEARING SURFACES USING THE METHODS OF ELECTRO-SPARK ALLOYING AND ELECTRIC ARC WELDING

**A.D. Verkhoturov, Professor, A.G. Babenko, Professor,
L.A. Konevtsov, Ph.D., V.I. Ivanov, Ph.D.**

Abstract. Paper deals with the properties of the surface layers, which are formed by electro-spark processing, and this method in conjunction with electric arc surfacing. The combination of electric spark processing, under which high sublayer, and electric arc welding, which creates a basic layer thickness, contributes under certain conditions, an increase in hardness and wear resistance of the layer.

Keywords: electro-spark alloying, electric arc surfacing, equipment, electrodes, coated, kinetics, structure, phase composition, hardness, wear and residual stresses.

<i>В.П. Мурзаев, Д.Б. Слинко</i> Модернизация электродуговых металлизаторов станочного типа	183
<i>А.М. Михальченков</i> Влияние тыльной наплавки малоуглеродистыми электродами на абразивное изнашивание восстановленных долот	187
<i>А.А. Аблаев, П.В. Савченко</i> Восстановление и упрочнение деталей машин на лазерных технологических комплексах	192
<i>Д.А. Игнатьков, В.И. Иванов, В.В. Михайлов</i> Фазовый состав, структура и остаточные напряжения после комбинированной модификации металлических поверхностей электроискровым легированием и электролитно-плазменным азотированием	196
<i>И.А. Рафиков, Р.Н. Сайфуллин</i> Опыт восстановления деталей плазменной наплавкой в переменном магнитном поле	202
<i>А.М. Михальченков, В.Ф. Комогорцев, С.В. Минина</i> Изнашивание лемехов, восстановленных приваркой термоупрочненной режущей части, с учетом положения заточки	206
<i>И.В. Козарез, Н.А. Якушенко</i> Статистический анализ износов лемехов фирмы Lemken	210
<i>С.И. Старовойтов, Н.П. Старовойтова, Н.Н. Чемисов</i> К определению предела прочности на растяжение среднесуглинистой почвы	215
<i>Н.В. Титов, Н.Н. Литовченко, В.Н. Коротков</i> Метод вибродуговой наплавки металлокерамики деталей техники, работающей в условиях абразивного износа	219
<i>Н.А. Якушенко</i> Специфика износов лемехов отечественного и европейского производства	223
<i>В.П. Мурзаев, Д.Б. Слинко, Н.С. Левина</i> Исследование абразивной износостойкости газопорошковых покрытий из самофлюсующихся сплавов	228

Подписано в печать 28.01.2013 г.

Печать офсетная. Гарнитура «Pragmatica»

Формат 60х84/8 Объем 29,5 п.л. Тираж 100 экз. Заказ 811

ГОСНИТИ

109428, Москва, 1-й Институтский пр., д. 1