

В. С. Марцинковский, к.т.н., доцент, академик УТА, директор (ООО «ТРИЗ», г. Сумы, Украина)

## Новые методы повышения качества поверхностей ответственных деталей высокоэффективного динамического оборудования. Часть 2

*Предлагаются к применению новые, малоэнергос затратные, экологически чистые технологии изготовления ответственных деталей и узлов динамического оборудования.*

**Ключевые слова:** электроэрозионное легирование, качество поверхностного слоя, шероховатость, микротвердость.

*Пропонуються до застосування нові, малоенерговитратні, екологічно чисті технології виготовлення відповідальних деталей і вузлів динамічного обладнання.*

**Ключові слова:** електроерозійне легування, якість поверхневого шару, шорсткість, микротвердість.

*New, low-energy, environmentally friendly technologies for the manufacture of critical parts and components of dynamic equipment are proposed for use.*

**Keywords:** electroerosion alloying, surface layer quality, roughness, microhardness.

### Упрочнение и ремонт шеек роторов

Реальный ресурс работы машины напрямую зависит от несущей способности поверхностей деталей, которая определяется качеством их поверхностного слоя. На работоспособность валов роторов, кроме действующих переменных сил и моментов, значительное влияние оказывают силы трения, возникающие в подшипнике скольжения (ПС). Трение между поверхностями подшипниковых шеек (ПШ) вала и вкладышами подшипников (ВП) вызывает их износ. Величина этого износа зависит от условий трения, определяющихся рядом факторов: физико-механическими свойствами материалов вала и ВП, формой и размерами деталей, шероховатостью поверхностей трения, скоростью, нагрузочным и тепловым режимами работы трущейся пары, способом подвода, количеством и качеством смазки.

Для повышения несущей способности валов применяются различные методы их упрочнения: закалка ПШ вала токами высокой частоты (ТВЧ), нанесение гальванических покрытий, азотирование, упрочнение методами поверхностного пластического деформирования (ППД), электроэрозионного легирования (ЭЭЛ) и т. д.

Значительным резервом расширения области применения метода ЭЭЛ может быть применение в качестве электродов новых композиционных материалов (КМ) и методов формирования на металлических поверхностях комбинированных электроэрозионных покрытий (КЭП), что обуславливает важность и актуальность проблемы и необходимость ее решения.

В машиностроении широко применяются КМ, сформированные из металлических порошков, частицы которых связаны металлической матрицей. В порошковой металлургии применяют различные методы создания КМ с пропиткой расплавом заготовок из предварительно спрессованных, спеченных, опрессованных и затем спеченных порошков. Большое разнообразие порошков, производство которых освоено промышленностью и не меньшая разнообразность материалов, пригодных в качестве матрицы, позволяет создавать множество КМ [1].

Значительный интерес представляет способ нанесения спеченного покрытия, в котором наполнителем служит твердосплавная смесь ВК6, а легкоплавкой связью - твердый раствор системы Ni-Cr-Si-B. Покрытие наносят на рабочие поверхности деталей шликерным

способом (пульверизацией, либо наливом с последующим встряхиванием и дальнейшим отжигом в вакууме). Лучшую износостойкость против эрозионного износа показали образцы из стали 30ХГСА с покрытием состава 10 вес. % 1М + 90% ВК6, где 1М - 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% В (вес. %). Твердость нанесенного слоя покрытия 85-86 HRA (1050-1100HV) [2].

Следует отметить, что изделия, обработанные указанным способом, имеют недостаточную надежность и долговечность при их работе вследствие того, что при разрушении сформированного шликерного покрытия происходит отказ их работоспособности. Все методы контроля формирования покрытий шликерным способом не могут дать полной гарантии качества сцепления наносимого материала с подложкой. Как правило, перед нанесением шликерного покрытия производится очистка поверхности. На площадках фактического контакта поверхностей действуют силы молекулярного притяжения. Переходной слой, обуславливающий прочную механическую связь, при этом отсутствует, что отрицательно влияет на качество адгезии в целом. Кроме того, указанный способ, является довольно дорогостоящим и трудоемким из-за процессов изготовления, нанесения и отжига покрытий.

Задачу устранения недостатков шликерного метода защиты стальных изделий от абразивного и других видов износа, отмеченных выше, предлагается решить за счет нанесения покрытий способом ЭЭЛ электродами, изготовленными из материалов, используемых в шликерных покрытиях. Таким образом, предложен способ повышения износостойкости стальных изделий, в котором методом ЭЭЛ изнашиваемую поверхность изделия покрывают слоем индия, после чего, на покрытую индием поверхность, наносят износостойкий композитный материал, при этом композитный материал наносят методом ЭЭЛ с применением электрода, предварительно изготовленного из износостойкого композитного материала состава >10 - 30 вес. % смеси 1М и 70 - <90 вес. % смеси ВК6 [3].

На рис. 1 изображены микроструктуры поверхностного слоя стали 45 после ЭЭЛ электродами, изготовленными из композиционного материала, состоящего из твердого сплава ВК6 и сплава 1М в различных соотношениях.

Кроме того, на рис. 1, ж; 1, з и 1, и показаны, соот-

ответственно микроструктуры покрытия сплавов: 1М; 1М с предварительным нанесением меди и сплава 90%ВК6 и 10%1М с предварительным нанесением индия. Результаты металлографических исследований покрытий сведены в табл. 1.

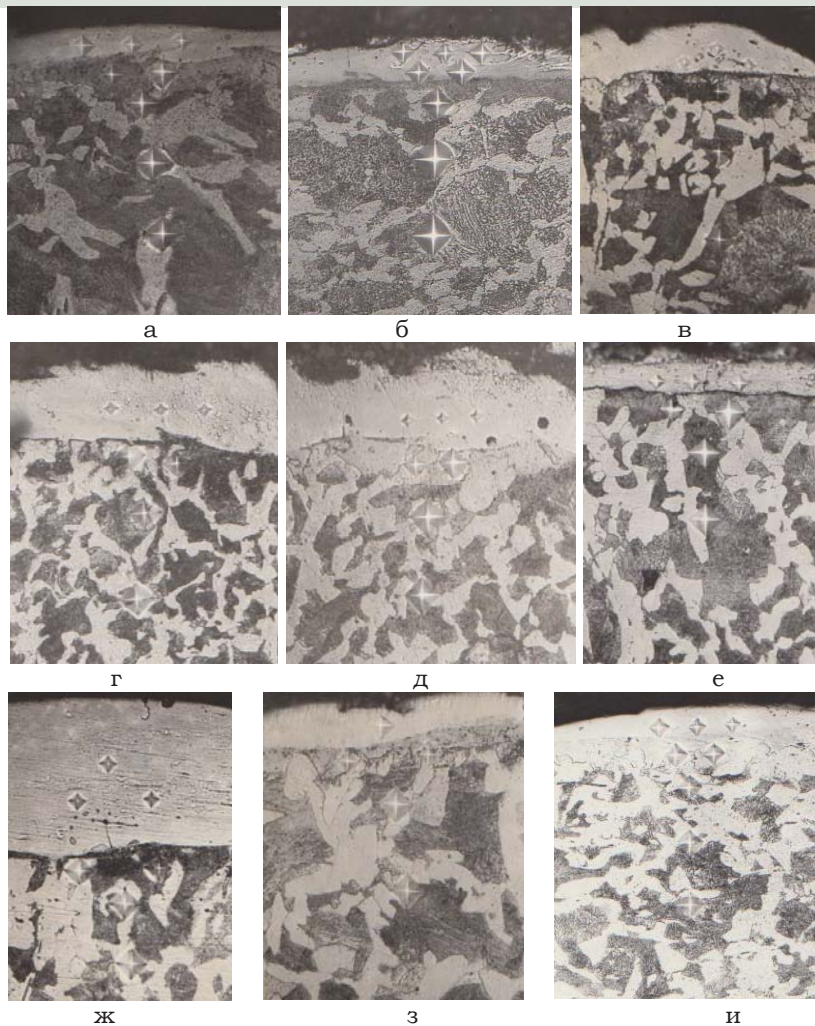
В результате анализа табл. 1 установлено, что наиболее предпочтительным является применение электродов из материала состава (10-30) вес. % 1М+(70-90)% ВК6, позволяющих формировать поверхностный слой с микротвердостью от 12300 до 14200 МПа. Подслой из индия, снижая шероховатость покрытия состава 90%ВК6+10%1М с Ra=3,5...4,2 мкм до Ra=0,6...0,9 мкм и увеличивая сплошность с 80 до 90%, незначительно снижает его микротвердость до 13250 МПа. Следует отметить, что ЭЭЛ электродами, изготовленными из сплава 1М, позволяет формировать относительно толстые покрытия (до 75 мкм) с микротвердостью до 8350 МПа (рис. 1,ж).

Результаты износа образцов в пескоструйных камерах, работающих от воздушной магистрали с давлением 600 кН/м<sup>2</sup>, как упрочненных, так и неупрочненных занесены в табл. 2.

Таким образом, на основании анализа проведенных испытаний можно заключить, что стойкость против эрозионного износа образцов из стали 30ХГСА с ЭЭЛ покрытием 90%ВК6 + 10%1М в 3,5 раза выше, чем без покрытия в состоянии термообработки и, соответственно, в 1,9; 1,5 и 1,7 раз выше, чем у образцов, упрочненных твердым сплавом ВК6, Т15К6 и 1М. Износостойкость образцов, расположенных под углом 90°, выше, чем у образцов, расположенных под углом 45°.

Покрытия, сформированные электродами из КМ, впервые нашли применение на Северодонецком ПО «Азот», где был остановлен воздушный компрессор КВД модели 2МСЛ-456 (поз. М101j) фирмы «Хитачи» (Япония) по причине эрозионного подреза лопаток рабочих колес 1-й и 2-й ступеней ротора.

На вновь изготовленных рабочих колесах входные кромки лопаток, подвергаемые наибольшему эрозионному износу, упрочнялись методом ЭЭЛ на установке модели «УИЛВ-8». В качестве упрочняющего материала применялся композиционный материал состава 90% ВК6 + 10% 1М. Годовой экономический эффект от внед-



**Рис. 1. Микроструктуры поверхностного слоя стали 45 с покрытиями состава (x400): а - 50% 1М + 50% ВК6; б - 40% 1М + 60% ВК6; в - 30% 1М + 70% ВК6; г - 20% 1М + 80% ВК6; д - 10% 1М + 90% ВК6; е - 100% ВК6; ж - 100%1М; з - Cu + 100% 1М; и - In + 90%ВК6 + 10%1М**

ренной разработки составил 27 тысяч гривен.

При исследовании многослойных покрытий, состоящих из твердых износостойких и мягких антифрикционных материалов, установлено, что лучшими показателями по шероховатости и микротвердости поверхностного слоя обладают КЭП с подслоем из меди и покрытия из твердого сплава ВК8.

Металлографические исследования КЭП по предлагаемому способу [4] показывают, что их микротвердость находится на сравнительно высоком уровне (8400...12300 МПа). Следует отметить, что сверху покрытия находится пленка меди толщиной 1...2 мкм. Все покрытия, сформированные предлагаемым способом, имеют характерный цвет меди. Наличие меди как на поверхности, так и по глубине покрытия подтверждается рентгеноструктурным анализом.

Наиболее перспективной на наш взгляд является комбинированная технология, составляющими которой являются взаимодополняющие технологии ЭЭЛ и ППД.

Проведенные исследования позволили применить КЭП (состава медь и ВК8) с последующей поверхностной пластической обработкой обкаткой шариком (ОШ) для упрочнения шеек валов под подшипники скольжения. При этом ОШ позволяет изменить остаточные напряжения в поверхностном слое покрытия с растягивающих на сжимающие,

**Таблица 1. Результаты металлографических исследований образцов из стали 45 с композиционными электроэрозионными покрытиями**

Материал покрытия	Толщина слоя, мкм	Микротвердость, H <sub>v</sub> , МПа	Сплошность, %
50%ВК6 + 50%1М	5...50	8900	75
60%ВК6 + 40%1М	5...45	11500	75
70%ВК6 + 30%1М	10...40	12300	75
80%ВК6 + 20%1М	10...40	13250	80
90%ВК6 + 10%1М	10...40	14200	80
100%ВК6	10...30	12500	80
100%1М	40...75	8350	60
Cu + 100%1М	20...25	6030	85
In + 90%ВК6 + 10%1М	15...20	13250	90

повысить усталостную прочность вала и наряду с этим снизить шероховатости поверхности покрытия до Ra=0,1 мкм.

В результате исследования износа образцов, упрочненных ЭЭЛ с ППД и образцов без упрочнения, получены следующие данные (табл. 3.)

Установлено, что нанесение на сталь 45 электроэрозионных покрытий обуславливает наличие в поверхностном слое неблагоприятных растягивающих напряжений. Последующее ППД формирует в поверхностном слое благоприятные сжимающие напряжения, которые полностью нейтрализуют растягивающие, образованные ЭЭЛ.

При испытании натуральных моделей валов с КЭП (Cu + Cr) установлено, что в результате ЭЭЛ усталостная прочность снизилась по сравнению с валами без покрытия в 1,5 раза, но зато она в 1,5 раза выше, чем у валов, легированных только хромом. Обкатка шариком (ОШ) образцов увеличивает их усталостную прочность на 16-20% выше образцов без покрытия. Так как место разрушения образцов при испытаниях перемещалось за пределы покрытия, можно сделать вывод, что увеличение предела выносливости еще больше [6].

На рис. 2 показано ЭЭЛ и ОШ подшипниковых шеек ротора турбокомпрессора ГТТ-3. Работа по ремонту ротора проводилась в Новомосковске на ЗАО «МХК «ЕвроХим» представителями ООО «ТРИЗ». Обмер шеек ротора после ОШ показал, что их размер увеличился на 0,02 мм.

Разработанная технология ремонта и упрочнения шеек валов внедрена в Новомосковске на ЗАО «МХК «ЕвроХим», на Углегорской и Мироновской ГРЭС с организацией участков в ремонтных цехах.

### Цементация стальных деталей ЭЭЛ

Современная упрочняющая технология ЭЭЛ, применяемая ООО «ТРИЗ», располагает многочисленными методами улучшения структуры и свойств поверхностного слоя, каждый из которых имеет оптимальные области применения. Одной из специфических особенностей ЭЭЛ является то, что процесс легирования может происходить без переноса материала анода (легирующего электрода) на поверхность катода (детали) и не образовывать прирост материала, то есть происходит диффузионное насыщение поверхности детали составными элементами (элементом) анода, например, при ЭЭЛ графитовым электродом.

Метод ЭЭЛ графитовым электродом основан на

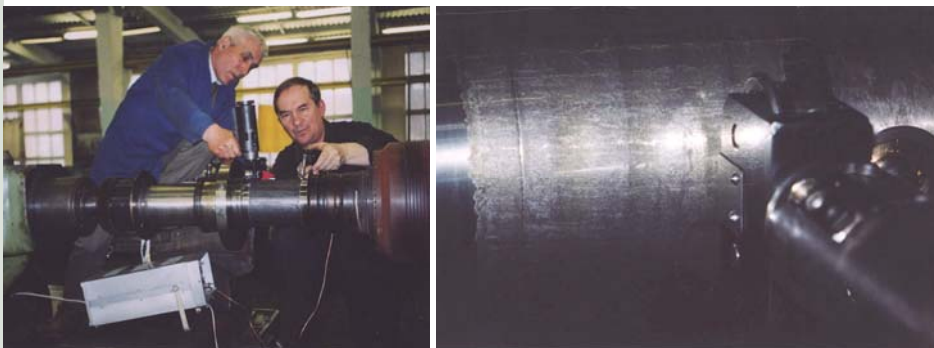


Рис. 2. ЭЭЛ (а) и ОШ (б) ПШ ротора турбокомпрессора ГТТ-3

Таблица 2. Результаты сравнительных испытаний на эрозионный износ образцов из стали 30ХГСА

Материал покрытия	Потеря веса, г	Время испытания, ч	Угол атаки, градус
Без покрытия	51	1	45
Без покрытия	38	1	90
ВК6	29	1	45
ВК6	21	1	90
T15K6	23	1	45
T15K6	17	1	90
1М	27	1	45
1М	20	1	90
90%ВК6 + 10%1М	16	1	45
90%ВК6 + 10%1М	11	1	90

Таблица 3. Износ упрочненной стали 45 в паре с баббитом Б83

Упрочнение	Износ	
	весовой $\times 10^3$ , кг	линейный, мкм
Без упрочнения	0,079	6,516
Обкатка роликом $\varnothing 76,0$	-	2,0*
ЭЭЛ Cr+AB (алмазное выглаживание)	0,017	1,643
ЭЭЛ Gr (ЭГ-4) + ОШ	0,019	1,855
ЭЭЛ Cu + ЭЭЛ ВК8 + ОШ	0,015	1,564

\* - данные взяты из [5].

процессе диффузии (насыщении поверхностного слоя детали углеродом) и имеет определенное сходство с разновидностью химико-термической обработки - цементацией.

По сравнению с традиционной цементацией, цементация методом ЭЭЛ (ЦЭЭЛ) [7,8] не только обладает всеми достоинствами сравниваемого метода, но имеет и ряд преимуществ (отсутствие поводок и короблений детали, возможность ведения процесса в локальном месте, значительно меньший расход электроэнергии, простота и др.). Производительность процесса при этом составляет 2-5 см<sup>2</sup>/мин.

ЦЭЭЛ - отдельное технологическое направление ЭЭЛ, позволяющее формировать на деталях машин поверхностные слои повышенной износостойкости и твердости без изменения исходного размера детали.

Специалистами кафедры технического сервиса Сумского НАУ и фирмы «ТРИЗ» проведены исследования влияния технологических параметров оборудования (энергия разряда, длительность легирования) на качественные параметры (структуру, шероховатость,

сплошность, микротвердость, глубину слоя, остаточные напряжения, фазовый состав) поверхностных слоев деталей из различных материалов при ЦЭЭЛ. На основании проведенных исследований разработана гамма технологических процессов упрочнения деталей для динамических машин. В зависимости от конструктивных особенностей детали, в качестве финишной операции после ЭЦ используются: шлифование, притирка, ППД (АВ, ОШ или роликом, метод БУФО).

Ниже приведены некоторые

примеры интегрированных технологий применения метода ЦЭАЛ с последующей финишной обработкой различными методами.

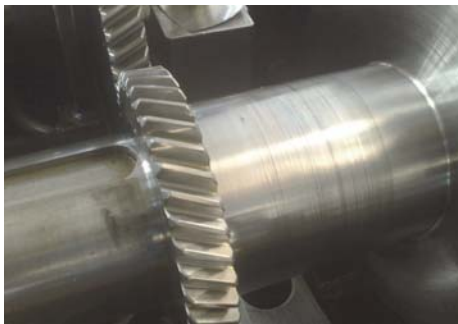
### **Торцевая уплотняющая поверхность плавающего уплотнения**

В плавающем уплотнении торцевые контактирующие поверхности должны обладать высокой твердостью и износостойкостью, а также низкой шероховатостью.

Упрочнение торцевых поверхностей колец плавающих уплотнений из стали 30X13 (рис. 3) производится на установке «Элитрон 22А» методом ЦЭАЛ при энергии разряда 0,5 Дж. Глубина упрочненного слоя составляет 30-50 мкм, а микротвердость 900-1100 НВ. После чего, с целью снижения шероховатости поверхности и коэффициента трения, производится легирование серебром при энергии разряда 0,05 Дж. Финишная обработка - притирка.



**Рис. 3. Плавающее уплотнение**



**Рис. 4. Состояние неупрочненных ПШ ротора после двух лет работы**

### **Детали типа тел вращения**

При изготовлении и ремонте роторов турбин возникают проблемы с упрочнением несущих поверхностей подшипников. На рис. 4 показано состояние неупрочненных ПШ вала ротора после двухлетнего пробега. Как правило, при проведении ремонта роторов во время шлифовки опорных ПШ удаляется упрочненный поверхностный слой.

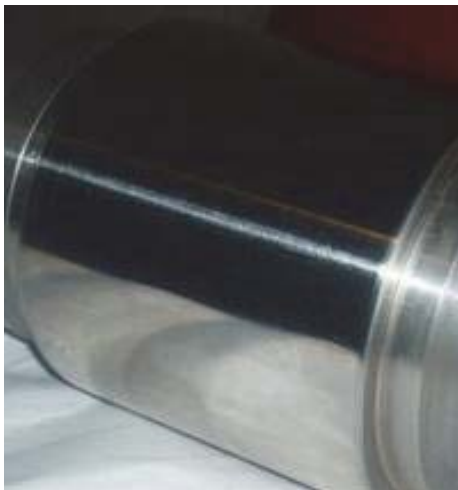
Традиционная технология упрочнения поверхностей валов может быть реализована различными методами: ТВЧ, азотированием, цементацией. ООО «ТРИЗ» в этих случаях рекомендует комбинированные технологии: КЭП+ОШ (рис. 2) или ЦЭАЛ+БУФО (рис. 5).

Предлагаемая комбинированная технология, заключающаяся в ЦЭАЛ с последующей обработкой БУФО, позволяет достигать требуемых качественных параметров упрочняемых поверхностей при значительно меньших затратах чем при упрочнении традиционными методами.

### **Насосные втулки**

Данные изделия (рис. 6) применяются в насосной технике как пары трения в виде статорной и роторной деталей. В первом случае упрочняют внутреннюю, а во втором наружную поверхность.

По штатному технологическому процессу упрочнение контактирующих поверхностей осуществлялось методом гальванического хромирования, что в процессе работы нередко приводило к сколам и разрушению покрытий.



**Рис. 5. Подшипниковая шейка вала после упрочнения ЦЭАЛ+БУФО**



**Рис. 6. Статорная втулка насоса, упрочненная методом ЦЭАЛ**

Разработанный новый технологический процесс упрочнения представляет собой комбинированную технологию, включающую в себя ЦЭАЛ, обкатку шариком и последующее шлифование. Следует отметить, что весь технологический процесс упрочнения выполняется на одном и том же оборудовании одним и тем же специалистом.

Замена гальванического хромирования на ЦЭАЛ позволило за счет улучшения качества упрочненных поверхностей продлить общий ресурс работы втулок.

Будем рады сотрудничеству, наши реквизиты: «ТРИЗ» ЛТД ООО Украина, г. Сумы, 40020, ул. Машиностроителей, 1, а/я 1421.

Веб-сайт: [www.triz.sumy.ua](http://www.triz.sumy.ua)  
E-mail: [triz@triz.sumy.ua](mailto:triz@triz.sumy.ua)

### **Список литературы:**

1. Кирик Г.В. Новые композиционные материалы: монография / Г. В. Кирик, В. Н. Радзиевский, А.Д.Стадник. - Сумы: Университетская книга, 2011.- 310 с.
2. Л.А.Иванов, Г.П.Пархоменко. Спеченное покрытие для деталей, работающих в условиях эрозионного износа // Порошковая металлургия. - 1974.- №2.- С.90-94.
3. Способ электроэрозионного легирования поверхностей стальных деталей. Пат. 2524471. Российская Федерация. МПК В 23Н 9/00 / Тарельник В.Б., Марцинковский В.С., Оpubл. 27.07.14, Бюл. № 21.
4. Способ электроэрозионного легирования поверхностей стальных деталей: Пат. 2524471. Российская Федерация. МПК В23Н 9/00 / Марцинковский В.С., Тарельник В.Б.; Оpubл. 27.07.14, Бюл. № 21.-10 с.
5. НИ и ИТР по повышению износостойкости шеек коленчатых валов оппозитных компрессоров баз М 16, М 25, М 40 методами ППД: Отчет о НИР / ВНИИкомпрессормаш. - Арх. № 4654/90.- Сумы., 1990.-85 с.
6. В.Б. Тарельник, В.С. Марцинковский, Б. Антошевский. Повышение качества подшипников скольжения: Монография. - Сумы: Издательство «МакДен», 2006.-160 с.
7. Способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием. Пат. 2337796. Российская федерация. МПК В 23Н 9/00 / Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Білоус А.В.; Оpubл. 10.04. 2008, Бюл. № 31.- 3с.
8. Способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием. Пат. 2468899. Российская Федерация. МПК В 23Н 9/00 / Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., М.П. Братушак/ Оpubл. 10.12. 2012, Бюл. № 34.