

УДК 621.9.048

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ШЕЕК ВАЛОВ РОТОРОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

**В. Б. Тарельник**, д.т.н., профессор, Сумский национальный аграрный университет

**Б. Антошевский**, д.т.н., профессор, Политехнический университет, г. Кельце, (Польша)

*Представлена методика расчета геометрических параметров очага деформации для поверхностных слоев со сложной структурой, которые получают при электроэрозионном легировании (ЭЭЛ). Она разработана на основании расчета главных геометрических параметров очага деформации для однородных тел - инженерного метода М.С. Дрозда и базируется на понятии пластической твердости (НД). Переход от твердости по Бринеллю (НВ), параметра, характеризующего сопротивление металла контактному нагружению, к пластической твердости НД, интерпретируемой как модуль упрочнения материала, позволяет также рассматривать эту величину как характеристику сопротивления материала контактной пластической деформации.*

*Проведен анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя детали из стали 45, после ЭЭЛ твердыми износостойкими, мягкими антифрикционными металлами, углеродом и нанесенными комбинированными электроэрозионными покрытиями с последующей поверхностной пластической деформацией. Проведен анализ структуры и свойств сформированных поверхностных слоев. На базе проведенных исследований разработана технология повышения качества шеек валов роторов при их изготовлении и ремонте. Приведены примеры применения разработанной технологии.*

**Ключевые слова:** электроэрозионное покрытие, износостойкость, поверхностное пластическое деформирование.

### **Постановка проблемы в общем виде.**

С целью повышения таких эксплуатационных характеристик деталей, как выносливость, износостойкость все шире применяют методы поверхностного пластического деформирования (ППД).

Немаловажное значение в практике машиностроения имеют покрытия, которые могут быть сформированы различными способами. Основной их задачей является улучшение качественных параметров поверхностного слоя: повышение микротвердости, износостойкости восстановление изношенных участков поверхности и др.

### **Анализ основных исследований и публикаций.**

Одной из перспективных технологий повышения качества поверхностей деталей является метод электроэрозионного легирования (ЭЭЛ). Он универсален и используется для: увеличения твердости, коррозионной стойкости, износо- и жаростойкости; снижения способности к схватыванию поверхностей при трении; восстановлению размеров деталей машин и механизмов; проведения на обрабатываемой поверхности микрометаллургических процессов для образования на ней необходимых химических соединений; создания на рабочей поверхности переходных слоев определенной шероховатости и др. [1].

Несмотря на достоинства метод ЭЭЛ имеет и ряд недостатков (увеличение шероховатости поверхности, возникновение в поверхностном слое растягивающих остаточных напряжений,

снижение усталостной прочности), которые нередко ограничивают его применение для более широкого круга деталей машин.

Очевидно, применение ППД в сочетании с ЭЭЛ поверхностного слоя представляет особый интерес, так как эти технологии взаимно дополняют друг друга [2-4]. Работы, проводимые в этом направлении актуальны.

### **Формулирование целей статьи**

**Целью работы** является повышение качества шеек валов роторов при их изготовлении и ремонте путем определения алгоритма расчета технологических параметров воздействия методами ППД на поверхности подверженные ЭЭЛ.

### **Изложение основного материала исследований.**

### **Анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя после ЭЭЛ и последующего ППД**

Ниже представлена методика расчета геометрических параметров очага деформации для поверхностных слоев со сложной структурой, которые получают при ЭЭЛ. Она разработана на основании расчета главных геометрических параметров очага деформации для однородных тел - инженерного метода М.С. Дрозда и базируется на понятии пластической твердости (НД).

Для удобства сравнения с твердостью по Бринеллю предложено считать числом пластической твердости **НД** отношение:

$$НД = \frac{P - P_0}{\pi D h} \quad (1)$$

где  $P$  – произвольная нагрузка;  $P_0$  – критическая нагрузка, численно равная отрезку, отсека-

емому линейной аппроксимацией функции  $P = f(h)$  на оси  $P$ ;  $D$  – диаметр внедряемого шарика;  $h$  – глубина остаточной вмятины.

Ранее получено, что формирование структуры поверхностного ЭЭЛ слоя во многом зависит от твердости материала легирующего электрода и последовательности нанесения слоев [5]. Установлено также, что в случае ЭЭЛ твердыми износостойкими материалами, на поверхности катода (детали) возникает «белый» слой, который, как правило, имеет твердость значительно выше твердости основного металла. Под «белым» слоем расположена переходная зона – подслой, представляющий собой область термического воздействия импульсных разрядов и диффузионного взаимопроникновения элементов анода и катода. Твердость этой зоны плавно изменяется по глубине по сравнению с твердостью «белого» слоя.

В случае ЭЭЛ мягкими антифрикционными материалами микротвердость поверхностного слоя значительно снижается, изменяя тем самым механизм упрочнения поверхностного слоя.

Комбинированные электроэрозионные покрытия (КЭП), в зависимости от последовательности нанесения твердых и мягких материалов, могут иметь различную микротвердость как на поверхности, так и по мере углубления. Поэтому, рассматривая КЭП с позиций последующего их упрочнения ППД, в зависимости от микротвердости, механизм их упрочнения может быть идентичен в первом случае упрочнению покрытий из твердых износостойких, а во втором – из мягких антифрикционных материалов.

Учитывая выше сказанное, следует отметить, что повышение качества ЭЭЛ слоев ППД (снижение шероховатости, повышение микротвердости и т.д.) во многом зависит от структуры легированного слоя и от правильно выбранных режимов силового воздействия на них.

При ЭЭЛ как твердыми износостойкими, так и мягкими антифрикционными материалами, за исключением легирования углеродом (графитовым электродом), толщина изделия увеличивается на толщину сформированного ЭЭЛ слоя ( $\Delta h_c$ )

В случае ЭЭЛ вала его диаметр ( $D_v$ ) будет увеличен на  $2\Delta h_c$ .

Рассмотрим изменение геометрических параметров контактирующих тел в зависимости от микротвердости структуры сформированных ЭЭЛ покрытий.

В случае наличия твердого покрытия сферический индентор, под воздействием приложенной к нему нагрузки  $P$ , вминает твердый «белый» слой в более мягкий переходной подслоя, упрочняя при этом последний. «Белый» слой служит как бы передаточным звеном, увеличивая радиус воздействия индентора на величину, равную толщине «белого слоя» ( $\Delta h_{б.с.}$ ), и уменьшая диа-

метр вала на  $2\Delta h_{б.с.}$

В случае, когда ЭЭЛ производится мягкими антифрикционными материалами, величина радиуса сферического индентора остается без изменений, а диаметр вала увеличивается на  $2\Delta h_c$ . Деформированию и упрочнению в этом случае подвергаются как мягкий поверхностный слой, так и подслой (переходной слой).

В последнее время в технологии ремонта подшипниковых шеек валов роторов все чаще используется легирование углеродом (графитовым электродом) с последующей обработкой ППД. Легирование углеродом представляет собой метод цементации электроэрозионным легированием (ЦЭЭЛ) [6, 7]. По сравнению с обычной цементацией, способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием обладает рядом достоинств, присущих методу ЭЭЛ. Это прежде всего возможность проведения процесса в локальном месте, отсутствие поводок и короблений, многократная экономия энергоресурсов, малогабаритное и транспортабельное оборудование и др.

При цементации методом ЭЭЛ толщина упрочненного слоя напрямую зависит от энергии разряда и времени легирования. С увеличением энергии разряда увеличивается не только глубина упрочненного слоя, но и шероховатость поверхности.

Обработка ППД после ЦЭЭЛ производится с целью снижения шероховатости поверхности и повышения усталостной прочности вала. Кроме того, при ЦЭЭЛ ранее термообработанных деталей, под слоем повышенной твердости может возникнуть слой пониженной твердости так называемый «провал твердости», который можно устранить последующей обработкой ППД.

В [8] с целью повышения качества поверхности предлагается перед обработкой ППД нацементированный слой наносить покрытия толщиной 0,02 - 0,05 мм на диаметр из мягких антифрикционных материалов, например, меди, серебра и др.

Учитывая выше сказанное, следует отметить, что повышение качества цементированных ЭЭЛ слоев методом ППД (снижение шероховатости, повышение микротвердости и т.д.) во многом зависит от структуры легированного слоя и от правильно выбранных режимов силового воздействия на них.

Геометрические параметры контактирующих тел ниже корректируются с учетом параметра толщины цементированного слоя ( $\Delta h_{ц}$ ) и толщины слоя из мягкого антифрикционного металла ( $\Delta h_c$ ).

Сферический индентор под воздействием приложенной к нему нагрузки  $P$  вминает твердый цементированный слой в более мягкий переходной подслоя, упрочняя при этом последний. Цементированный слой служит как бы передаточ-

ным звеном, увеличивая радиус воздействия индентора на величину, равную его толщине ( $\Delta h_{ц}$ ), и уменьшая диаметр вала на  $2\Delta h_{ц}$ .

Толщину цементированного слоя можно определить традиционным способом, измерив его на шлифе, изготовленном из образца свидетеля.

В случае ЭЭЛ мягкими антифрикционными материалами микротвердость поверхностного слоя снижается, изменяя тем самым механизм упрочнения поверхностного слоя. После цементации мягкими металлами его диаметр ( $D_{в}$ ) будет увеличен на  $2\Delta h_{с}$ , а радиус индентора не изменится. Деформированию и упрочнению в этом

случае подвергается мягкий поверхностный слой, а переходной, в данном случае цементированный слой, не упрочняется.

Проведенный анализ напряженно - деформированного состояния ЭЭЛ слоев различной твердости, подвергаемых последующей ППД позволил определить геометрические параметры очага деформации, а также глубину наклепанного слоя ( $h_s$ ) и интенсивность деформации ( $\epsilon_{ю}$ ) для различных покрытий из твердых и мягких металлов, КЭП, а также поверхностных слоев после ЦЭЭЛ. Все необходимые для расчетов данные занесены в табл. 1, а результаты исследований - в табл. 2.

Таблица 1. Исследуемые твердые, мягкие и комбинированные ЭЭЛ покрытия, а также поверхностные слои после ЦЭЭЛ

Состав покрытия	Материал подложки	Твердость слоя НД, МПа	Толщина слоя, мкм	Оборудование
Cr	Сталь 45	3000	30	УИЛВ-8
W	Сталь 45	2800	25	УИЛВ-8
Ni	Сталь 45	2250	40	УИЛВ-8
BK8	Сталь 45	3200	20	УИЛВ-8
Графит Эг-4	Сталь 45	2700	10	УИЛВ-8
Sn	Сталь 45	1000	60	УИЛВ-8
Cu	Сталь 40X	1700	200	ЭИЛ-9
BHC2 + Cu + BHC2	Сталь 40X	2540	400	ЭИЛ-9
Cu + BK8	Сталь 45	3000	30	УИЛВ-8
In + BK8	Сталь 45	1800	30	УИЛВ-8
Sn + Cr	Сталь 45	2000	30	УИЛВ-8
BK8 + Cu + BK8	Сталь 45	2500	35	УИЛВ-8

Таблица 2. Результаты расчета  $h_s$  и  $\epsilon_{ю}$  для образцов из стали 45 и 40X с поверхностными слоями различной структуры и твердости после ППД обкаткой шариком и алмазным выглаживанием

Состав покрытия	Нагрузка,								
	H	A <sup>1</sup>	B <sup>1</sup>	R <sub>np</sub> <sup>2</sup>	h <sup>3</sup>	a <sup>4</sup>	b <sup>4</sup>	h <sub>s</sub>	ε <sub>ю</sub>
Обкатка шариком									
Без упрочнения	1470	0,05	0,07	8,4	0,008	0,522	0,443	1,07	0,023
Cr	1470	0,05	0,07	8,4	0,005	0,522	0,443	0,98	0,017
W	1470	0,05	0,07	8,4	0,006	0,522	0,443	1,01	0,019
Ni	588	0,10	0,12	4,6	0,008	0,325	0,296	0,73	0,035
Cr	980	0,05	0,07	8,4	0,005	0,522	0,443	0,96	0,017
Sn	392	0,053	0,072	8,1	0,0071	0,443	0,378	0,88	0,027
Cu	490	0,053	0,072	8,1	0,0042	0,340	0,288	0,75	0,025
BHC2 + Cu + BHC2	1470	0,053	0,072	8,1	0,0052	0,522	0,433	1,08	0,017
Cu + BK8	1470	0,053	0,073	8,1	0,0052	0,520	0,441	0,98	0,018
In + BK8	588	0,053	0,073	8,1	0,0048	0,365	0,308	0,80	0,022
BK8 + Cu + BK8	1470	0,053	0,073	8,1	0,0058	0,522	0,438	1,09	0,020
Алмазное выглаживание									
Cr	147	0,170	0,18	2,75	0,0015	0,162	0,153	0,31	0,019
Cr	147	0,250	0,27	1,9	0,0030	0,134	0,118	0,31	0,032
BK8	147	0,170	0,18	2,75	0,0010	0,162	0,153	0,30	0,012
Графит Эг-4	147	0,170	0,18	2,75	0,0020	0,162	0,153	0,33	0,019
Cu + BK8	147	0,166	0,185	2,75	0,0025	0,162	0,153	0,380	0,023
BK8 + Cu + BK8	147	0,166	0,185	2,75	0,0025	0,162	0,153	0,380	0,023
Sn + Cr	147	0,166	0,185	2,75	0,0037	0,162	0,153	0,424	0,030

1 - A, B - главные кривизны поверхностей контактирующих тел; 2 - R<sub>np</sub> - приведенный радиус кривизны контактирующих поверхностей; 3 - h - остаточное смещение центра контакта; 4 - a, b - полуоси контура остаточной вмятины.

### Влияние основных технологических параметров ППД на микрогеометрию, структуру и свойства ЭЭЛ слоев

Определение силовых и деформационных параметров ППД ЭЭЛ слоев различной твердости, проведенное выше, позволило обобщить

результаты исследования микрогеометрии поверхностного слоя, его структуры и свойств.

Режимы ППД образцов алмазным выглаживанием (АВ) и обкаткой шариком (ОШ) после ЭЭЛ хромом, вольфрамом и никелем приведены в табл. 3.

Таблица 3. Режимы ППД образцов после ЭЭЛ хромом, вольфрамом и никелем\*

Размер индентора (r при АВ или Ø при ОШ), мм	Нагрузка на индентор, Р, Н	Удельное усилие деформации P <sub>ср</sub> , МПа
Алмазное выглаживание		
1	150	4500
1	150	4500
1	100	3200
2	150	3000
2	150	3000
2	80	1620
3	150	1920
3	200	2560
3	220	2830
4	150	1330
4	220	1900
4	250	2210
Обкатка шариком***		
19	1000	1380
19	1200	1640
19	1500	2060
10	600	940
10	1100	1700
10	1200	1900

\* Число проходов n = 1.

\*\* Подача S = 0,05 мм/об.

\*\*\* Подача S = 0,1 мм/об.

Результаты измерения шероховатости показаны на рисунках 1-3 в виде зависимостей Ra = f (P<sub>ср</sub>), где P<sub>ср</sub> – удельное усилие обкатки, определяемое по соотношению

$$D_{об} = \frac{D}{pab}, \quad (2)$$

Здесь P – полное усилие обкатки; a, b – полуоси контура остаточной вмятины (см. табл. 2).

Ra, мкм

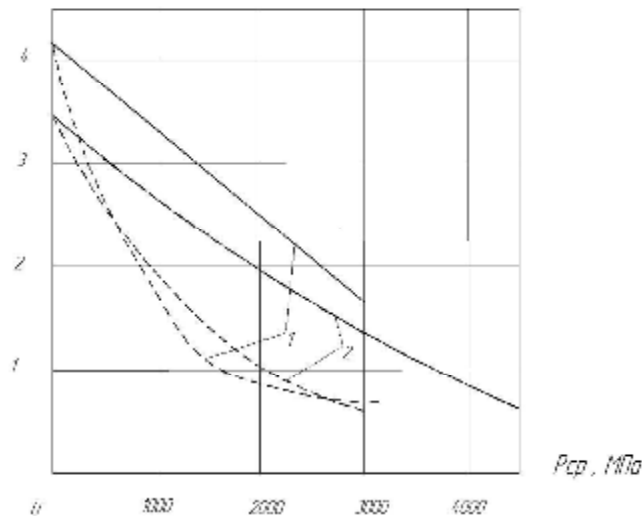


Рисунок 1. Зависимость шероховатости стали 45 ЭЭЛ вольфрамом (1) и хромом (2) от удельного усилия АВ при R = 1 мм (сплошные линии) и R = 2 мм (штриховые).

Из приведенных данных следует, что эффективность ППД, как метода снижения шероховатости поверхности, зависит от удельного усилия обкатки и способа ЭЭЛ. Если для покрытий, полученных с применением вольфрамового электрода, величина Ra в значительной степени определяется радиусом алмазного индентора, то с увеличением пластичности покрытия (электроды из хрома и никеля) влияние радиуса индентора уменьшается. Характерно, что при ППД обкат-

кой шариком практически все точки зависимости Ra = f (P<sub>ср</sub>) укладываются на одну кривую для всех покрытий, независимо от вида ЭЭЛ. Этот факт свидетельствует, по крайней мере, о наличии общего механизма формирования поверхности, суть которого, прежде всего, заключается в комбинации двух процессов: деформации мягкой подложки покрытия и срезании микронеровностей.

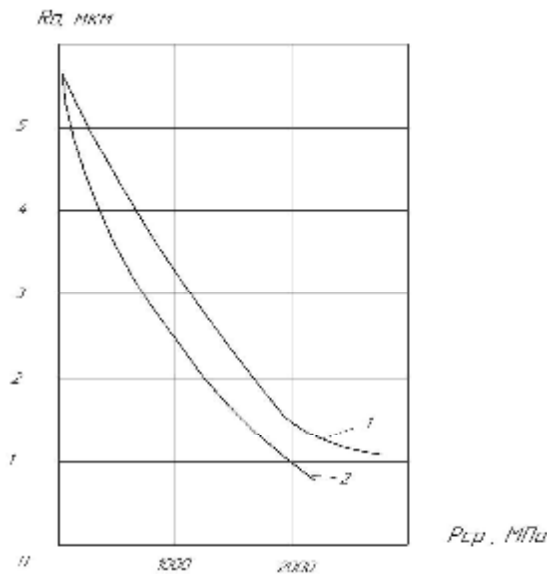


Рисунок 2. Зависимость шероховатости стали 45 ЭЭЛ никелем от удельного усилия АВ при R = 3 мм (1) и R = 4 мм (2).

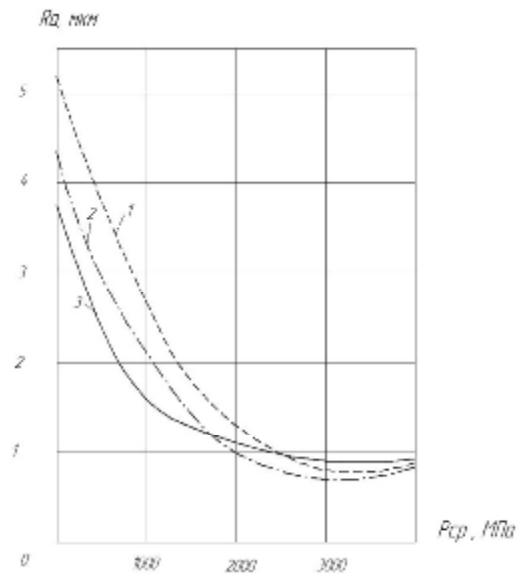


Рисунок 3. Зависимость шероховатости стали 45 ЭЭЛ никелем (1), вольфрамом (2) и хромом (3) от удельного усилия ОШ.

Анализ микроструктуры ЭЭЛ поверхностного слоя стали 45 хромом после АВ показал, что наиболее предпочтительным является АВ инденторами R = 3 мм и R = 4 мм при удельных усилиях 1920 и 1330 МПа соответственно, (рис. 4, а, б). Выглаженная поверхность имеет меньшую шероховатость, макронарушений в слое не наблюдается. Распределение твердости равномерное, причем твердость плавно снижается по мере увеличения глубины измерения и находит-

ся на уровне 7500 – 8000 МПа. К практическому применению может быть рекомендовано АВ индентором R = 4 мм при удельном усилии выглаживания 1330 МПа (рис 4, б).

Наиболее благоприятная ситуация при обкатке хромового покрытия шариком диаметром 10 мм при удельном усилии обкатки  $P_{cp} = 1700$  МПа, где имеется слой практически по всей линии шлифа (рис. 4, в).

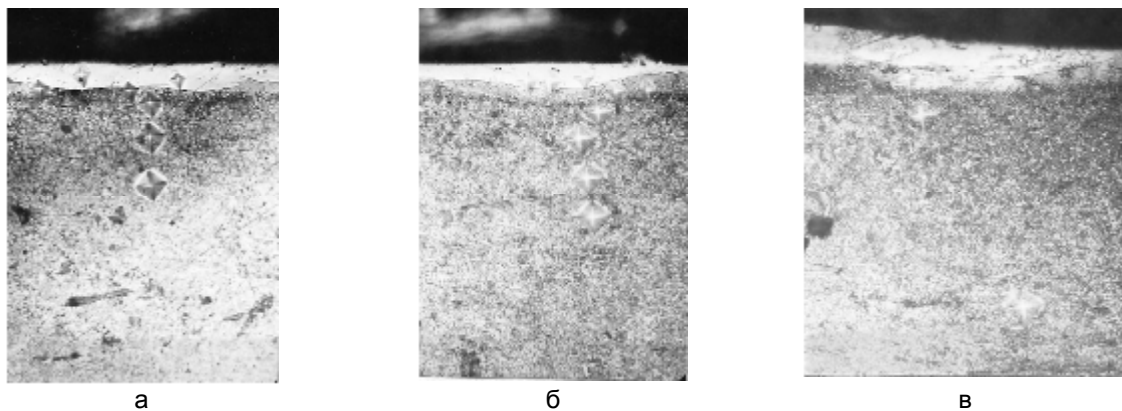


Рисунок 4. Микроструктура поверхностных слоев ЭЭЛ хромом после АВ: (а - R = 3 мм,  $P_{cp} = 1920$  МПа; б - R = 4 мм,  $P_{cp} = 1330$  МПа) и ОШ: (в -  $D_{ш} = 10$  мм,  $P_{cp} = 1700$  МПа).  $\times 400$ .

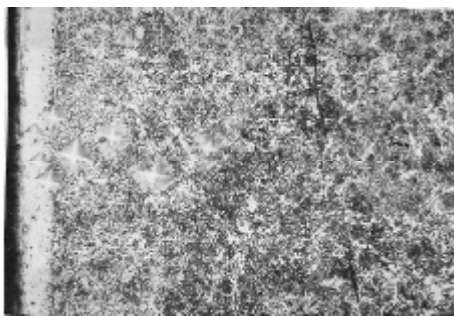
Наиболее благоприятный вариант при АВ образца из стали 45 с вольфрамовым покрытием, который можно рекомендовать для использования (рис. 5, а), когда радиус алмазного выглаживания R = 2 мм, а  $P_{cp} = 1620$  МПа. В этом случае слой достаточного хорошего качества с ровной поверхностью линии шлифа. «Белый» слой с твердостью 7500 МПа, переходная зона с плавно понижающейся твердостью.

При ОШ диаметром 19 мм при удельном

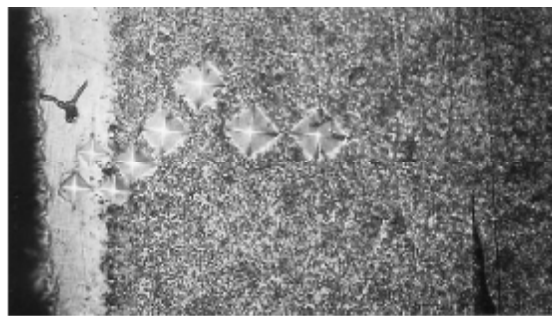
усилии обкатки 1380 МПа поверхностного слоя образца стали 45 ЭЭЛ вольфрамом наблюдается слой хорошего качества: «белый» слой с твердостью 8000 МПа, закаты отсутствуют, поверхность ровная, провалов твердости нет, происходит постепенное снижение твердости от поверхности к основе. В образце ОШ диаметром 10 мм при удельном усилии обкатки  $P_{cp} = 940$  МПа слой тоже хорошего качества. При увеличении удельного усилия обкатки до 2060 и 1700 МПа при обкат-

ке шариками 19 мм и 10 мм, соответственно, наблюдается повреждение слоя. Местами «белый» слой очень тонкий. Наиболее рациональ-

ным может быть вариант ОШ, когда диаметр шарика 19 мм, а удельное усилие  $P_{cp} = 1380$  МПа (рис. 5, б).



а



б

Рисунок 5. Микроструктура поверхностного слоя ЭЭЛ вольфрамом после АВ: (а - индентором  $R = 2$  мм,  $P_{cp} = 1620$  МПа) и ОШ: (б -  $D_{ш} = 19$  мм,  $P_{cp} = 1380$  МПа).  $\times 400$ .

Характерным для ЭЭЛ стали 45 никелем является наличие массивного по толщине нанесенного слоя – до 60 мкм. После АВ слой утоняется, а качество его ухудшается. Буквально на всех режимах наблюдается интенсивное разрушение слоя, образование закатов, вырывов и т.п. На многих образцах слой практически отсутствует. Из этого следует, что АВ при ЭЭЛ никелем, когда образуется мягкий слой ( $H_{\mu} = 2000$  МПа), действует отрицательно и его использование нежелательно.

Положительное влияние на качество ЭЭЛ никелем слоя оказывает ОШ. Так при ОШ диаметром 19 мм и удельном усилии выглаживания  $P_{cp} = 1380$  МПа образуется слой толщиной 30 мкм с твердостью до 3000 МПа. Подобная картина наблюдается и при ОШ диаметром 10 мм с удельным усилием выглаживания 940 МПа. Предпочтительным является ОШ диаметром 19 мм и удельное усилие выглаживания  $P_{cp} = 1700$  МПа. В этом случае слой равномерный по всей длине, твердость его достигает 2800-3000 МПа. В диффузионной зоне твердость выше, она колеблется в пределах 4000-5000 МПа. Очевидно, что здесь сказывается упрочнение ППД. Аналогичная ситуация складывается и при ОШ диаметром 10 мм и удельном усилии выглаживания  $P_{cp} = 2060$  МПа (рис. 6). Важным представляется повышение твердости как в «белом» слое, так и в переходной зоне. С увеличением удельного усилия обкатки происходит деформационное упрочнение поверхностного слоя, которое становится существенным по мере увеличения глубины слоя. В результате наклепа твердость повышается до уровня 6000-6700 МПа, т.е. до значительной твердости слоя, например при ЭЭЛ хромом.

В случае предварительного использования ППД, ЭЭЛ и окончательного ППД металлографический анализ показывает неприемлемость такой схемы. Практически на всех режимах ППД приводит к повреждению поверхности, получению текстуры деформации, закатов.



Рисунок 6. Микроструктура поверхностных слоев ЭЭЛ никелем после обкатки шариком  $D_{ш} = 10$  мм,  $P_{cp} = 2060$  МПа.  $\times 400$ .

На рис. 7 изображена зависимость микротвердости «белого» слоя образцов из стали 45 ЭЭЛ хромом вольфрамом и никелем от удельного усилия обкатки  $H_{\mu \text{ б.с.}} = f(P_{cp})$  при ОШ и АВ. Как при ОШ, так и при АВ микротвердость слоев ЭЭЛ хромом и вольфрамом по мере возрастания удельного усилия выглаживания ( $P_{cp}$ ) практически не изменяется и лишь при достижении  $P_{cp} = 4500$  МПа для хромового покрытия и  $P_{cp} = 3000$  МПа для вольфрамового покрытия незначительно снижается, соответственно с 7500 до 7000 МПа и с 7000 до 6500 МПа. При АВ никелевого покрытия микротвердость белого слоя повышается незначительно, если судить по микротвердости сохранившихся участков (от 2000 до 3000 МПа) при достижении удельного усилия выглаживания 2060 МПа. Иная картина при ОШ никелевого покрытия. Здесь, по мере возрастания удельного усилия обкатки, микротвердость белого слоя возрастает, и при достижении  $P_{cp} = 2060$  МПа составляет 5400 МПа.

На рис. 8 изображена зависимость микротвердости подслоя образцов из стали 45 ЭЭЛ хромом, вольфрамом и никелем от удельного усилия обкатки  $H_{\mu \text{ п.с.}} = f(P_{cp})$  при ОШ и АВ. Как видно из рисунка, микротвердость подслоя при ЭЭЛ хромом, вольфрамом и никелем возрастает по мере увеличения удельного усилия выглаживания. Характерно, что с увеличением пласти-

ности материала увеличивается его способность к упрочнению. Так при АВ микротвердость подслоя вольфрамового покрытия возросла с от 4500 до 5000 МПа, хромового от 4000 до 5000 МПа и никелевого от 2000 до 3700 МПа. При ОШ микротвердость вольфрамового покрытия возросла с 4500 до 5000 МПа, хромового от 4000 до 4500 МПа и никелевого с 2000 до 6700 МПа.

В случае ОШ стальных образцов, легированных мягкими антифрикционными металлами, с увеличением удельного усилия деформации ( $P_{cp}$ ) снижается шероховатость поверхностного слоя. Усилие обкатки зависит от микротвердости покрытия и величины исходной шероховатости. Так, если для снижения шероховатости поверхности стали 45, легированной оловом и имеющей

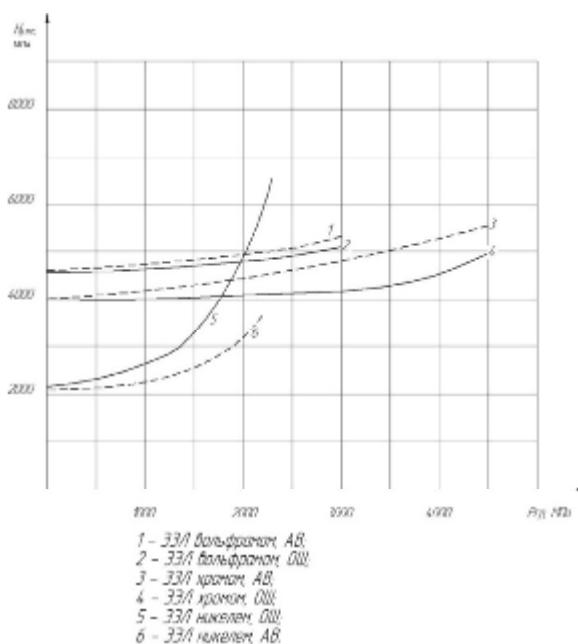


Рисунок 7. Влияние удельного усилия АВ и ОШ на микротвердость белого слоя образцов из стали 45 ЭЭЛ:  
1 – хромом, АВ; 2 – хромом, ОШ;  
3 – вольфрамом, АВ; 4 – вольфрамом, ОШ;  
5 – никелем, ОШ; 6 – никелем, АВ.

Исследование микротвердости покрытий из мягких антифрикционных металлов показывает, что увеличение удельного усилия деформации ОШ, наряду со снижением шероховатости, приводит к увеличению микротвердости как в самом слое, так и в переходном подслое.

В случае силового воздействия ОШ на КЭП, сформированные на установке с ручным вибратором «УИЛВ-8» и имеющие низкую исходную шероховатость ( $Ra = 0,48...0,52$  мкм), практически все точки зависимости  $Ra = f(P_{cp})$  укладываются на одну прямую и шероховатость снижается до  $Ra = 0,1$  мкм.

Иная картина в случае силового воздействия ОШ на КЭП, сформированные на механизированной установке «ЭИЛ-9» и имеющие исходную шероховатость  $Ra \geq 12$  мкм. В данном

микротвердость  $H_{ц} = 800$  МПа с  $Ra = 4,5$  мкм до  $Ra = 0,5$  мкм, необходимо удельное усилие деформации  $\sim 750$  МПа, то для получения такой же шероховатости поверхности, легированной медью и имеющей соответственно исходную микротвердость и шероховатость 1300 МПа и 12 мкм, требуется удельное усилие деформации  $\sim 1250$  МПа. Дальнейшее увеличение удельного усилия деформации приводит к увеличению шероховатости, появлению на поверхности различных дефектов. Очевидно, что чем меньше исходные микротвердость и шероховатость поверхностного слоя, тем меньше удельное усилие деформации необходимо для его выглаживания.

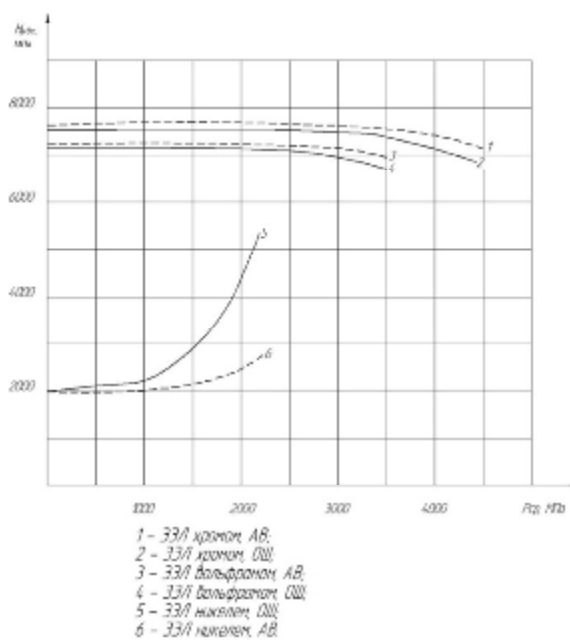


Рисунок 8. Влияние удельного усилия АВ и ОШ на микротвердость подслоя образцов из стали 45 ЭЭЛ:  
1 – вольфрамом, АВ; 2 – вольфрамом, ОШ;  
3 – хромом, АВ; 4 – хромом, ОШ; 5 – никелем, ОШ;  
6 – никелем, АВ.

случае КЭП могут достигать по толщине 1 мм и более, что наряду с высокой шероховатостью и микротвердостью требует гораздо больших усилий выглаживания.

Так, чтобы снизить шероховатость КЭП, состоящего из высокопрочной нержавеющей стали ВНС2 (08X15H5D2Т) и меди, с  $Ra = 12$  мкм до  $Ra = 1$  мкм, необходимо приложить удельное усилие  $\sim 3000$  МПа.

Металлографические исследования КЭП, сформированных на установке с ручным вибратором «УИЛВ-8», показывают, что для получения качественных поверхностных слоев необходимо использовать удельные усилия выглаживания 1000 - 1300 МПа.

В случае, если микротвердость поверхностного слоя высокая, например, КЭП состава Cu

+BK8 ( $H_{\mu} \geq 10000$  МПа) или BK8 + Cu +BK8 ( $H_{\mu} = 8000$  МПа), то сам слой не упрочняется, а вминается в более мягкий подслоя, упрочняя последний. В противном случае, если микротвердость поверхностного слоя низкая, например, КЭП состава In + BK8 ( $H_{\mu} = 1970$  МПа), то упрочняется сам слой.

Микротвердость в переходном слое (подслое) для всех КЭП возрастает, но в различной степени. Здесь также существует закономерность - чем ниже исходная микротвердость подслоя КЭП, тем больше резервы ее повышения. Так, микротвердость КЭП: In + BK8, Cu +BK8, BK8 + Cu +BK8 возрастает соответственно с 3500 до 4500 МПа; с 2500 до 4000 МПа; с 2800 до 4000 МПа при возрастании удельного усилия ОШ до 2000 МПа и для КЭП состава BHC2 + Cu + BHC2 с 2540 до 5000 МПа при  $P_{cp} = 4000$  МПа.

В результате металлографических исследований образцов из стали 45 с покрытиями из мягких антифрикционных металлов (олово, медь и др.), подвергнутых последующей ППД алмазным выглаживанием, установлено, что АВ не рекомендуется применять для мягких покрытий, так как практически на всех режимах выглаживания происходит интенсивное разрушение слоя: образование закатов, вырывов, наволакивание материала покрытия на индентор, срезание слоя и т.д.

Для повышения качества КЭП с высокой микротвердостью и низкой исходной шероховатостью возможно применение АВ. В результате исследования влияния удельного усилия АВ на

микротвердость слоя и подслоя КЭП состава Cu +BK8 и BK8 + Cu +BK8 установлено, что с увеличением удельного усилия выглаживания микротвердость слоя не изменяется до  $P_{cp} = 1000$  МПа, а затем несколько снижается, что свидетельствует о начале разрушения сформированного покрытия, подтвержденное фотографиями микроструктуры. Микротвердость в подслое повышается для покрытия Cu +BK8 с 2500 до 4500 МПа, а BK8 + Cu +BK8 с 2800 до 5000 МПа.

Наиболее рациональное удельное усилие АВ, как и для покрытий из твердых износостойких материалов, соответствует 1000 МПа.

При повышении качества поверхностного слоя подверженного ЦЭЭЛ в последнее время используют ППД методом БУФО (безабразивной ультразвуковой финишной обработки металлов). Применение этого метода наиболее эффективно, когда шероховатость слоя после ЦЭЭЛ не превышает  $Ra = 2,0$  мкм и ее методом БУФО можно снизить до 0,6 – 0,8 мкм. Когда шероховатость поверхности выше, то на цементированный слой можно наносить методом ЭЭЛ покрытия толщиной 0,02 - 0,05 мм на диаметр из мягких антифрикционных (меди, серебра и др.) или более пластичных (никель, сталь 12X18H10T и др.) материалов.

Проведенные исследования позволили рекомендовать для повышения качественных параметров ЭЭЛ поверхностного слоя наиболее рациональные удельные усилия деформации (табл. 4).

Таблица 4. Рекомендуемые удельные усилия деформации ЭЭЛ слоев различной твердости и результаты их воздействия на микрогеометрию и микротвердость сформированных покрытий

Покрытие	Установка ЭЭЛ	$P_{cp}$ , МПа	$Ra$ после ППД, мкм	Микротвердость до ППД, $H_{\mu}$ , МПа		Микротвердость после ППД, $H_{\mu}$ , МПа	
				слой	подслой	слой	подслой
<b>Покрытия из твердых износостойких металлов</b>							
Cr	«УИЛВ-8»	ОШ 1700	0,5	8000	4000	8000	4500
	«УИЛВ-8»	АВ1330	0,4	8000	4000	8000	4500
W	«УИЛВ-8»	ОШ1380	0,6	7800	4300	7800	5000
	«УИЛВ-8»	АВ1620	0,6	7800	4300	7800	5000
Ni	«УИЛВ-8»	ОШ1700	0,5	2000	2000	3000	5500
	«УИЛВ-8»	АВ					
<b>Покрытия из мягких антифрикционных металлов</b>							
Sn	«УИЛВ-8»	ОШ 750	0,5	800	1500	1500	2300
Sn		АВ					
Cu	«УИЛВ-8»	ОШ 1000	0,1	1600	2000	3000	2500
Cu	«УИЛВ-8»	АВ					
Cu	«ЭИЛ-9»	ОШ 1250	0,5	1300	2100	2500	3000
Cu		АВ					
<b>Комбинированные электроэрозионные покрытия</b>							
In + BK8	«УИЛВ-8»	ОШ 1000	0,1	1970	3500	5000	5000
In + BK8	«УИЛВ-8»	АВ					
Cu + BK8	«УИЛВ-8»	ОШ 1300	0,1	10490	2500	10490	3300
Cu + BK8	«УИЛВ-8»	АВ 1000	0,1	10490	2500	10490	3200
BK8 + Cu + BK8	«УИЛВ-8»	ОШ 1300	0,1	8100	2800	8100	3500
BK8 + Cu + BK8	«УИЛВ-8»	АВ 1000	0,1	8100	2800	8100	3500
BHC2 + Cu + BHC2	«ЭИЛ-9»	ОШ 2500	1,0	3500	2500	4000	3000
BHC2 + Cu + BHC2	«ЭИЛ-9»	АВ					

\* - АВ не рекомендуется.



### Практическое применение интегрированной технологии ЭЭЛ + ППД шеек валов роторов

Во ВНИИкомпрессормаше, г. Сумы, проводились работы по ремонту подшипниковых шеек ротора компрессора. На рис. 9, а изображен ротор компрессора с восстановленной шейкой  $\varnothing 50$  мм, а на рис. 9, б – сама шейка, восстановленная на 0,5 мм на диаметр. В данном случае в качестве материала электродов поочередно наносились сталь ВНС-2 и медь, а ППД производилось ОШ  $\varnothing 19$  мм с удельным усилием выглаживания

2500 МПа.

В Новомосковске на ЗАО «МХК «ЕвроХим» представителями ООО «Триз» были проведены работы по ремонту подшипниковых шеек ротора турбокомпрессора ГТТ – 3 методом ЭЭЛ с последующим ППД.

Визуальный осмотр подшипниковых шеек показал, что в результате абразивного износа на поверхностях трения присутствует ряд замкнутых цилиндрических канавок различной глубины и ширины.



а



б

Рисунок 9. Ротор компрессора (а) с шейкой  $\varnothing 50$ , восстановленной под подшипник скольжения (б).

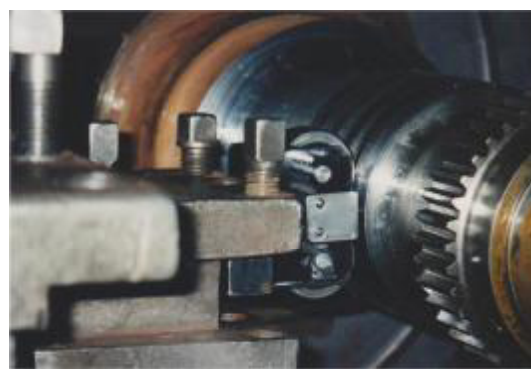
Ротор был установлен на токарно-винторезном станке с удлиненной станиной, где места задира шеек шлифовались абразивной шкуркой и после чего производился их обмер. В результате диаметр опорно-упорной шейки в различных местах составлял 149,65 - 149,66 мм,

а опорной 149,68 - 149,69 мм. На рисунках 10, а и 10, б показаны соответственно ЭЭЛ и ППД подшипниковых шеек ротора обкаткой шариком.

Обмер шеек ротора после выполнения работ показал, что их размер увеличился на 0,02 мм.



а



б

Рисунок 10. Ремонт ротора турбокомпрессора ГТТ – 3 методом ЭЭЛ (а) с последующим ППД (б).

В ООО «Триз», г. Сумы при упрочнении зубьев вал-шестерни и зубчатого колеса мультипликатора (рис. 11), частички абразивного материала, используемого в процессе работы, попали на шейки зубчатой пары, что повлекло за собой их повреждение в виде царапин глубиной до 0,04 мкм.

В процессе ремонта царапины шлифовались абразивной шкуркой и проводилось ЭЭЛ шеек с последующим ППД. При этом на шейки вал-шестерни диаметр которой, колебался от 79,87 до 79,88 мм, а твердость после цементации со-

ставляла 50 HRC, наносили покрытие методом ЭЭЛ стальным электродом марки 12X18H10T (рис. 11, а) и проводили обкатку роликом.

На шейку зубчатого колеса диаметр которого колебался от 129,78 до 129,80 мм, а твердость составляла 180-190 НВ наносили покрытие методом ЭЭЛ электродом из твердого сплава марки Т15К6 и проводили обкатку роликом.

Следует отметить, что после ЭЭЛ и ППД твердость подшипниковых шеек вал-шестерни не изменилась и составляла 50 HRC, а шеек зубчатого колеса увеличилась до 230 НВ.



а



б

Рисунок 11. ЭЭЛ подшипниковых шеек вал шестерни (а) и ППД подшипниковой шейки зубчатого колеса (б).

Мультипликатор установлен между электродвигателем и корпусом низкого давления компрессора природного газа 22ЦКО-42/8-38М1 цеха «Метанол» на ОАО НАК «АЗОТ».

### ВЫВОДЫ

Таким образом, по результатам экспериментальных исследований влияния основных технологических параметров ППД на микрогеометрию, структуру и свойства ЭЭЛ слоев необходимо сделать следующие выводы:

1. Эффективность ППД как метода снижения уровня шероховатости поверхности зависит от удельного усилия обкатки и способа ЭЭЛ.

2. Найденны зависимости твердости поверхностных слоев от удельного усилия деформации, которое рассчитано по геометрическим параметрам очага деформации, определенным на основании анализа напряженно-деформированного состояния при ППД.

3. Согласно зависимости  $H_u = f(P_{cp})$  получено, что рациональными удельными усилиями ППД являются 1000 МПа для алмазного выглаживания и 1500 МПа для обкатки шариком.

4. Выявлено, что наиболее эффективно ППД, с точки зрения деформационного упрочнения, при уменьшении исходной твердости зоны термического влияния или наличии мягкого подслоя после ЭЭЛ.

5. Для обобщения и упрощения выбора наиболее рационального усилия деформации предлагается все электроэрозионные покрытия, в зависимости от микротвердости упрочняемого участка покрытия, разбить на три группы: мягкие (< 2000 МПа), средние (2000 - 3000 МПа) и твердые (> 3000 МПа).

Для мягких покрытий рекомендуются удельные усилия деформации  $P_{cp} = 750 - 1250$  МПа, средних - 1300 - 1500 МПа и твердых - 2500 - 3000 МПа.

Мягкие покрытия рекомендуется упрочнять ОШ. Покрытия средней твердости и твердые можно упрочнять как ОШ, так и АВ, учитывая то, что шероховатость ( $R_a$ ) исходной поверхности не должна превышать 12 мкм для ОШ и 5 мкм для АВ.

### Список использованной литературы:

1. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревутский В.М. – Кишинев: Штинца, 1985. – 196 с.
2. Эдигаров В.Р., Килунин И.Ю., Дегтярь В.В. Классификация комбинированных методов обработки на основе электромеханического упрочнения // Современные наукоемкие технологии.- 2012.- № 3.- С. 32-35.
3. Хворостухин Л.А. Обработка металлопокрытий выглаживанием.- М.: Машиностроение, 1980.- 64 с.
4. Романенко Д.Н. Оценка качества поверхности электроискрового покрытия после выглаживания минералокерамикой / Д.Н. Романенко // Инновационные технологии и оборудование машиностроительного комплекса: межвуз. сб. науч. тр.- Воронеж.- Вып. 10.- С.62-65.
5. Тарельник В.Б. Управление качеством поверхностных слоев деталей комбинированным электроэрозионным легированием. – Сумы.: Изд-во «МакДен», 2002. – 323 с.
6. Способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием. Пат. 2337796. Российская Федерация. МПК В 23Н 9/00 / Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Белоус А.В.; Заявл. 05.10.2006; Опубл. 10.04. 2008, Бюл. № 31.- Зс.
7. Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням: Пат. 66993. Україна. МПК (2011); В23Н 9/00 /Марцинковський В.С., Тарельник В.Б, Братущак М.П.; Опубл. 25.01.2012, Бюл. № 2.- 4 с.
8. Тарельник В.Б. Современные методы формообразования поверхностей трения деталей ма-

шин: Монографія /Тарельник В.Б., Марцинковский В.С., Антошевский Б.- Сумы: Издательство «Мак-Ден», 2012.-280 с.

**Тарельник В.Б., Антошевський Б. ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ШИЙОК ВАЛІВ РОТОРІВ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО ЛЕГУВАННЯ З ПОДАЛЬШИМ ПОВЕРХНЕВИМ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ.**

Представлена методика розрахунку геометричних параметрів осередку деформації для поверхневих шарів зі складною структурою, які отримують при електроерозійному легуванні (ЕЕЛ). Вона розроблена на підставі розрахунку головних геометричних параметрів осередку деформації для однорідних тіл - інженерного методу М.С. Дрозда і базується на понятті пластичної твердості (НД). Перехід від твердості по Бринеллю (НВ), параметра, що характеризує опір металу контактному наагруженню, до пластичної твердості НД, що інтерпретується як модуль зміцнення матеріалу, дозволяє також розглядати цю величину як характеристику опору матеріалу контактної пластичної деформації.

Проведено аналіз напружено-деформованого стану поверхневого шару деталі зі сталі 45, після ЕЕЛ твердими зносостійкими, м'якими антифрикційними металами, вуглецем і нанесеними комбінованими електроерозійними покриттями з подальшою поверхневою пластичною деформацією. Проведено аналіз структури і властивостей сформованих поверхневих шарів. На базі проведених досліджень розроблено технологію підвищення якості шийок валів роторів при їх виготовленні та ремонті. Наведено приклади застосування розробленої технології.

**Ключові слова:** електроерозійне покриття, зносостійкість, поверхнєве пластичне деформування.

**Tarelnik V.B., Antoshevsky B. SHAFT NECKS QUALITY IMPROVEMENT BY ELECTROEROSIVE ALLOY METHOD WITH THE SUBSEQUENT SUPERFICIAL PLASTIC DEFORMATION**

Presented the technique design of the center deformation geometrical parameters for surface layers with complex structure, which receive at an electroerosive alloy. It is developed on the basis of the main geometrical parameters of center deformation calculation for homogeneous bodies by M. Drozds engineering method and is based on concept of plastic hardness. Transition from Brinell hardness, the parameter describing resistance of metal to a contact stressing, to the plastic hardness interpreted as the material hardening module, allows to consider this value as the characteristic of contact plastic deformation material resistance.

Lead the analysis of the is intense-deformed condition of a surface layer of a part from steel 45, after electroerosive alloy by firm wearproof, soft antifrictional metals, carbon and the put combined electroerosive coverings with the subsequent superficial plastic deformation. The assaying of structure and properties of the generated superficial courses is lead. On the basis of the lead explorations the technology of rotors shaft necks quality improvement is developed at their manufacture and repair. The developed technology examples application are resulted.

**Keywords:** electroerosive alloy, combined coverings, surface plastic deformation.

Стаття надійшла в редакцію: 25.09.2013р.  
Рецензент: д.т.н., професор Кочмола М.М.

УДК 621.9.048

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПРЕССОВЫХ ПОСАДОК ОТ ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИИ**

**В. Б. Тарельник**, д.т.н., професор,  
**М. П. Братушак**, ст. преподаватель,  
**С. Г. Никоноров**, ст. преподаватель.  
Сумский национальный аграрный университет

Представлены результаты исследований качественных параметров поверхностных слоев, цементированных методом электроэрозионного легирования стальных деталей, а так же деталей, покрытых мягкими антифрикционными металлами, после безабразивной ультразвуковой финишной обработки. Поверхностные слои, сформированные по предлагаемым интегрированным технологиям, могут служить альтернативой покрытиям, используемым при защите контактирующих поверхностей деталей прессовых посадок против фреттинг-коррозии.

**Ключевые слова:** деталь, фреттинг-коррозия, обработка, электроэрозионное легирование.

**Постановка проблемы в общем виде.**

Одним из наиболее распространенных узлов в механизмах и машинах является прессовое соединение или соединение с гарантированным натягом. Такие соединения широко применяются в машиностроении при изготовлении роторов

Вісник Сумського національного аграрного університету