

НЕКОТОРЫЕ ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

А.А. Анохин

*Кафедра технологии и оборудования
металлургии и машиностроения
Старооскольского технологического института
в составе Московского государственного
института стали и сплавов
м-н Макаренко, 42, г. Старый Оскол,
Россия, 309530.
E-mail: anokhin@mail.ru*

В обзоре описаны технологии восстановления поверхностей деталей, изнашивающихся в процессе эксплуатации и подверженных усталостным разрушениям, эрозии и коррозии. Рассмотрена классификация технологических способов повышения качества поверхностных слоев изделий и проанализированы технологии электроэрозионного легирования с применением комплексных покрытий, а также комбинированные технологии электроэрозионного легирования и поверхностно-пластической деформации.

1. Технологические способы повышения качества поверхностных слоев деталей

Известно, что наиболее распространенной причиной нарушения работоспособности деталей машин является повреждение или износ их рабочих поверхностей [1]. Это обусловлено факторами механического износа контактирующих взаимноперемещающихся элементов машин, усталостных разрушений, эрозии и коррозии, старения материала и т. д. Для повышения надежности взаимодействующих деталей применяются технологические способы их упрочнения, среди которых могут быть выделены:

- термическая поверхностная закалка
- химико-термическая обработка поверхности
- физико-химическая обработка рабочих поверхностей деталей лазерная обработка (ЛО)
- поверхностное пластическое деформирование (ППД)
- металлопокрытия (гальванические покрытия, металлизация напылением и наплавка поверхностей) и др.

Классификация достоинств и недостатков названных технологий по их влиянию на характеристики качества поверхностного слоя приведена в таблице 1 [2].

Таблица 1.

Достоинства и недостатки
технологических способов повышения
качества поверхностных слоев деталей.

Характеристика качества поверхностного слоя	Наименование методов повышения качества поверхностного слоя
Достоинства	
Повышение твердости	Закалка ТВЧ, цементация, азотирование, ИА, цианирование, борирование, термодиффузионное хромирование; КИБ, ЭЭЛ; ЛО; ППД; гальванопокрытия, металлизация напылением, наплавка
Снижение твердости	ЛО, ЭЭЛ

Таблица 1. Продолжение

Характеристика качества поверхностного слоя	Наименование методов повышения качества поверхностного слоя
Отсутствие коробления	КИБ, ЛО, гальванопокрытия, ЭЭЛ
Повышение жаростойкости	борирование, ЭЭЛ
Повышение износостойкости	Закалка ТВЧ, цементация, азотирование, ИА, цианирование, борирование, термодиффузионное хромирование; КИБ; ЛО; ППД; гальванопокрытия, ЭЭЛ
Повышение коррозионной стойкости	азотирование, ИА, цианирование, термодиффузионное хромирование; КИБ, ЭЭЛ, гальванопокрытия,
Возможность упрочнения в локальных местах	ЛО, ЭЭЛ
Возможность восстановления изношенных поверхностей	КИБ, ЭЭЛ; гальванопокрытия, металлизация напылением, наплавка
Возможность нанесения на упрочняемую поверхность чистых металлов, тугоплавких соединений и т.п.	КИБ, ЭЭЛ
Создание на рабочей поверхности переходных слоев определенной шероховатости	ЭЭЛ
Повышение усталостной прочности	Закалка ТВЧ, цементация, азотирование, ИА, цианирование, борирование, термодиффузионное хромирование; КИБ; ЛО; ППД;
Снижение шероховатости	ЛО; ППД
Экологическая безопасность	Закалка ТВЧ, ИА, КИБ, ЭЭЛ; ЛО;
Недостатки	
Увеличение шероховатости	ЭЭЛ; гальванопокрытия, металлизация напылением, наплавка
Снижение усталостной прочности	ЭЭЛ; гальванопокрытия, металлизация напылением, наплавка
Невозможность упрочнения крупногабаритных деталей	КИБ, ЛО
Повышенная экологическая опасность	цементация, азотирование, цианирование, борирование, термодиффузионное хромирование; гальванопокрытия, металлизация, наплавка Характеристика качества поверхностного слоя

Таблица 1. Продолжение

Характеристика качества поверхностного слоя	Наименование методов повышения качества поверхностного слоя
Достоинства	
Повышение твердости	Закалка ТВЧ, цементация, азотирование, ИА, цианирование, борирование, термодиффузионное хромирование; КИБ, ЭЭЛ; ЛО; ППД; гальванопокрытия, металлизация напылением, наплавка
Снижение твердости	ЛО, ЭЭЛ
Отсутствие коробления	КИБ, ЛО, гальванопокрытия, ЭЭЛ
Повышение жаростойкости	борирование, ЭЭЛ
Повышение износостойкости	Закалка ТВЧ, цементация, азотирование, ИА, цианирование, борирование, термодиффузионное хромирование; КИБ; ЛО; ППД; гальванопокрытия, ЭЭЛ
Повышение коррозионной стойкости	азотирование, ИА, цианирование, термодиффузионное хромирование; КИБ, ЭЭЛ, гальванопокрытия,
Возможность упрочнения в локальных местах	ЛО, ЭЭЛ
Возможность восстановления изношенных поверхностей	КИБ, ЭЭЛ; гальванопокрытия, металлизация напылением, наплавка
Возможность нанесения на упрочняемую поверхность чистых металлов, тугоплавких соединений и т.п.	КИБ, ЭЭЛ
Создание на рабочей поверхности переходных слоев определенной шероховатости	ЭЭЛ
Повышение усталостной прочности	Закалка ТВЧ, цементация, азотирование, ИА, цианирование, борирование, термодиффузионное хромирование; КИБ; ЛО; ППД;
Снижение шероховатости	ЛО; ППД
Экологическая безопасность	Закалка ТВЧ, ИА, КИБ, ЭЭЛ; ЛО;
Недостатки	
Увеличение шероховатости	ЭЭЛ; гальванопокрытия, металлизация напылением, наплавка
Снижение усталостной прочности	ЭЭЛ; гальванопокрытия, металлизация напылением, наплавка
Невозможность упрочнения крупногабаритных деталей	КИБ, ЛО
Повышенная экологическая опасность	цементация, азотирование, цианирование, борирование, термодиффузионное хромирование; гальванопокрытия, металлизация, наплавка

Все названные технологические способы преследуют главную цель – повышение качественных параметров поверхностного слоя деталей за счет восстановления изношенных участков поверхностей. К таким параметрам можно отнести твердость, микротвердость, шероховатость. Решение задачи восстановления поверхностей должно обеспечивать повышение износостойкости, увеличение усталостной прочности, изменение величины и знака остаточных напряжений и т.д. Следует отметить, что одним из наиболее простых и доступных с технологической точки зрения является метод электроэрозионного легирования (ЭЭЛ). Повышение износостойкости поверхностного слоя детали с помощью ЭЭЛ можно добиться как нанесением твердых износостойких, так и мягких антифрикционных материалов [3,4].

2. Технологии электроэрозионного легирования

Авторами работы [5] описаны результаты отработки технологии ЭЭЛ для торцевых уплотнений деталей, применяемых в высокооборотных насосах и компрессорах большого давления. Доводом в пользу применения технологии может служить тот факт, что несмотря на кратковременное контактирование торцевых поверхностей колец при нормальной работе уплотнения (только в моменты пуска и останова машины), уплотнительные кольца целиком изготавливаются из износостойких материалов, таких как карбид вольфрама, карбид кремния, различных видов графитов.

Для качественной оценки износостойкости покрытий в условиях торцевого трения авторами применялся экспрессный метод [4]. Экспресс-оценка величины износа пар трения осуществлялась с помощью установки, сконструированной на базе вертикально-сверлильного станка мод. 2М-112, снабженной реле времени, регулирующим как время испытания, так и реверс вращения шпинделя. Время испытания образцов на один километр пути при 2500 об/мин шпинделя составляло 16 мин. Испытания проводились в течение 320 мин при скорости скольжения 1 м/с и удельном давлении 1,0 МПа в условиях сухого трения. Нагрузка на контртело (полый цилиндр длиной 60 мм, наружным диаметром 12 мм и внутренним диаметром 4 мм) из фторопласта 4К – 20, закрепленного в шпинделе станка, составляла 100Н. Линейный износ образца определялся методом искусственных баз по разности глубин отпечатков, измеренных до и после окончания эксперимента. В качестве образцов использовались детали из конструкционной стали 45, имеющих в исходном состоянии микротвердость $H_m=2800$ МПа. ЭЭЛ осуществлялась на установке «УИЛВ-8». Мягкие антифрикционные металлы наносились на «мягких» режимах ($J_{к.з.}=0,5...0,6$ А; $U_{х.х.}=56,1$ В; $C=20$ мкФ), а твердые износостойкие металлы на средних режимах, когда ($J_{к.з.}=2,0...2,2$ А; $U_{х.х.}=68,7$ В; $C=300$ мкФ). Шероховатость получаемых покрытий измерялась на приборе профилограф–профилометр мод.201. В качестве покрытий использовались титан, хром, сплав ВК8, вольфрам и технологический подслои из индия и основного покрытия из твердого сплава ВК8.

Результаты эксперимента при ЭЭЛ стали 45 твердыми износостойкими металлами Ti, V, W и их карбидами, а также мягкими антифрикционными металлами Cd, In, Sn, Pb и Cu показали следующее:

- При исходной шероховатости образцов $Ra=0,23$ мкм линейный износ (Dh) за 320 мин испытаний составляет 15,9 мкм;
- После нанесения покрытия Ti, V, W шероховатость увеличивается соответственно до 2,82, 3,22 и 3,2 мкм;
- При последующей обработке электродом одного из мягких антифрикционных металлов шероховатость поверхности меняется незначительно;
- При нанесении первоначально в качестве технологического покрытия одного из мягких антифрикционных металлов (Cd, In, Sn, Pb, Cu) с последующим нанесением основного покрытия из твердого износостойкого металла наблюдается резкое снижение шероховатости поверхности до $Ra=0,54...0,91$ мкм. Одновременно повышается износостойкость покрытия.

Авторы отмечают, что первоначально у всех образцов наблюдалось наиболее интенсивное изнашивание-приработка. У образца без покрытия износ в начале резко увеличивался, а затем плавно возрастал. После 160 мин испытаний износ значительно уменьшался, а у образцов (In+W) и (Cu+ВК8) практически отсутствовал, что свидетельствует о наступлении стадии стабильного изнашивания.

Лучшие результаты по износостойкости были получены на образцах с покрытием Cu+ВК8 и составили после 320 мин испытаний 0,8 мкм. Износ покрытия с технологическим подслоем из индия и основного покрытия из титана, хрома, твердого сплава ВК8 и вольфрама после 320 мин испытаний составили соответственно: 2,4; 2,3; 2,2; 1,2 мкм.

Авторы работы [5] делают вывод о том, что электроэрозионные покрытия, состоящие из подслоя из мягкого антифрикционного металла и основного покрытия из твердого износостойкого материала, позволяют использовать метод ЭЭЛ для повышения эксплуатационных характеристик поверхностей деталей при торцевом трении.

В работе [6] описаны результаты исследований применения технологии ЭЭЛ для восстановления поверхностей образцов из никелевого сплава ХН58МБЮД и медного сплава – бериллиевой бронзы БрБ2, с твердостью после окончательной термообработки соответственно 400 и 370НВ. Применением данной технологии решались две задачи, первая из которых заключалась в повышении микротвердости и износостойкости рабочих поверхностей импульсных торцевых уплотнений за счет ЭЭЛ твердыми износостойкими материалами, а вторая – в повышении герметичности уплотнения путем снижения микротвердости и увеличения пластичности поверхности пояска уплотнения в локальном месте за счет ЭЭЛ мягкими антифрикционными материалами и углеродом (графитом марки ЭГ-4).

ЭЭЛ образцов из никелевого и медного сплавов проводилось при следующих режимах: $J_{к.з.}=2,1$ А; $U_{х.х.}=68,7$ В; $C=300$ мкФ. В качестве материала электрода использовался твердый сплав ВК8, для упрочнения сплава ХН58МБЮД дополнительно применялся молибден. Для бериллиевой бронзы использовался электрод марки 1М, содержащий 70% никеля, 20% хрома, 5% бора, 5% кремния, а также электрод из чистого хрома. Полученные результаты показали, что:

Таблица 2.

Режимы нанесения материалов

Материалы	Режимы
Олово и бериллиевая бронза	Ж.з.=0,7...0,8А; U _{х.х.} =68,7В; С=20мкФ
Медь	Ж.з.=1,6...2,0А; U _{х.х.} =56,1В; С=300мкФ
Углерод	Ж.з.=2,0...2,2А; U _{х.х.} =68,7В; С=300мкФ

- при упрочнении твердым сплавом ВК8 глубина упрочненного слоя составляет 20...25 мкм с микротвердостью в верхней его части 9400-10000 МПа и нижней – 4400-5750 МПа. Микротвердость уменьшалась по мере углубления и на глубине 25...30 мкм от поверхности твердость основного металла составила 4000 МПа;
- при упрочнении молибденом микротвердость поверхностного слоя глубиной 10-15 мкм (в отдельных участках до 25 мкм), составляет 5200-5750 МПа, переходной зоны 4200 МПа, сплошность слоя – 80%;
- в случае ЭЭЛ бериллиевой бронзы твердым сплавом ВК8 упрочнения поверхностного слоя не происходило, т.к. микротвердость легированного слоя оказалась существенно ниже, чем основного металла и составила 1650 МПа. По мере углубления микротвердость плавно возрастала и на глубине 15...20 мкм стала соответствовать твердости основного металла. Сплошность слоя составила 70%. Снижение микротвердости поверхностного слоя при ЭЭЛ твердым сплавом ВК8 авторы объяснили тем фактом, что при ЭЭЛ легкоплавких материалов тугоплавкими имеет место зависимость, в которой привес катода (детали) в течение всего периода обработки остается отрицательным, т.е. материал электрода не переносится на деталь [3]. Однако при определенных условиях, как отмечают авторы, ссылаясь на работу [7], материал электрода может быть подобран таким образом, чтобы он переносился на катод;
- при ЭЭЛ бериллиевой бронзы сплавом 1М наблюдалось незначительное повышение микротвердости до 4500 МПа и формирование массивного слоя с толщиной до 50 мкм и сплошностью 75%;
- при легировании бериллиевой бронзы хромом было отмечено образование неравномерного поверхностного слоя (10...40 мкм) с микротвердостью в отдельных участках до 11020 МПа. Под слоем с повышенной микротвердостью располагалась переходная зона глубиной 25 мкм с микротвердостью ниже основы (2100...2500 МПа).

На основании этих результатов автором сделан вывод о том, что повышения микротвердости в поверхностном слое при ЭЭЛ никелевого сплава ХН58МБЮД можно добиться твердым сплавом ВК8, а бериллиевой бронзы БрБ2 – хромом (соответственно 10000 и 11020 МПа).

ЭЭЛ мягкими антифрикционными материалами рекомендовано применять в заключительной операции в целях снижения коэффициента трения, улучшения прирабатываемости трущихся поверхностей и снижения микротвердости поверхностного слоя, ранее упрочненного термической обработкой детали.

При разупрочнении никелевого сплава ХН58МБЮД в качестве материала электрода применялись медь и никель, которые наносились при следующих режимах: Ж.з.=1,6...2,0А; U_{х.х.}=56,1В; С=300мкФ. Для снижения микротвердости поверхностного слоя бериллиевой бронзы БрБ2 в качестве материала анода использовались олово, медь, бериллиевая бронза БрБ2, а также применялся графит марки ЭГ-4 с различным временем легирования – 1, 2, 3 и 4 мин/см². В таблице 2 приведены режимы нанесения примененных материалов.

Автором приведены результаты исследований, на основании которых было установлено, что:

- сплав ХН58МБЮД легированный медью и никелем имеет неравномерную толщину формируемых слоев, составляющую 5-10 мкм, а в отдельных участках – до 35 мкм, и 15-25 мкм с протяженностью слоя 70-80% при ЭЭЛ медью и никелем соответственно. При легировании бериллиевой бронзы БрБ2 медью, бериллиевой бронзы БрБ2 и оловом структуры сформированных поверхностных слоев значительно отличаются. Так, установленная глубина разупрочненного слоя при легировании медью достигала 80 мкм, а в отдельных случаях – 100 мкм со сплошностью 100% и минимальной микротвердостью 1100 МПа. Данные результаты были получены для случая, когда соответствующие параметры структуры поверхностного слоя при ЭЭЛ бериллиевой бронзы БрБ2 и оловом составляли соответственно 25 и 15 мкм, 70 и 15%, 1650 и 1750 МПа;
- с увеличением времени легирования бериллиевой бронзы БрБ2 после ЭЭЛ углеродом (графитом марки ЭГ-4) с различной производительностью от 1 до 4 мин/см² увеличивается глубина разупрочненного слоя с 25 мкм до 120 мкм. Микротвердость при этом увеличивается с 1400 до 2290 МПа.

На основании полученных результатов автором сделан вывод о возможности рекомендовать к применению в качестве легирующего материала для снижения микротвердости поверхностного слоя никелевого сплава ХН58МБЮД медь и никель, а для бериллиевой бронзы БрБ2 – медь и углерод (графит).

Несмотря на очевидные преимущества технологии электроэрозионного легирования, оно несвободно от недостатков. В частности, применение технологии ЭЭЛ может приводить к возникновению в поверхностном слое растягивающих остаточных напряжений и снижению усталостной прочности, а также к увеличению шероховатости поверхности детали. Известным методом устранения этих недостатков является применение технологии ЭЭЛ совместно с другими технологиями:

- поверхностной пластической деформацией (ППД), позволяющей сформировать поверхностный слой с высокой твердостью, износостойкостью, низкой шероховатостью и повышенной усталостной прочностью [8-10];
- лазерной обработкой (ЛО), снижающей шероховатость электроэрозионных покрытий и увеличивающей глубину проникновения легирующих элементов в основу [11];
- термической обработкой (ТО), позволяющей количественно регулировать фазовый состав

рабочих поверхностей титановых деталей в требуемом направлении [12];

- с наложением ультразвука, значительно увеличивающим массоперенос [13].

3. Комбинированные технологии ЭЭЛ+ППД

Среди названных комбинированных методов особый интерес может представлять метод ЭЭЛ+ППД, т.к. эти технологии взаимно дополняют друг друга. В практических условиях поверхностные слои со сложной структурой получают нанесением на металлические подложки мягких антифрикционных, твердых износостойких и комбинированных электроэрозионных покрытий [14]. В случае ППД упрочненных ЭЭЛ слоев физически обоснованной и удобной может выступать величина пластической деформации, поскольку она фактически определяет способность слоя к упрочнению в процессе ППД и, таким образом, к изменению эксплуатационных свойств данного слоя [15]. Автор работы отмечает, что в случае ЭЭЛ твердыми износостойкими материалами на поверхности катода (детали) возникает так называемый белый слой который, как правило, имеет твердость значительно выше твердости основного металла. 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 и механизм их упрочнения может быть идентичен в первом случае упрочнению покрытий из твердых износостойких, а во втором – из мягких антифрикционных материалов. В работе [16] приведены соотношения для определения геометрических параметров очага деформации и его макроскопических параметров – глубины наклепанного слоя и интенсивности деформации. Значительные напряжения, появляющиеся в ЭЭЛ слоях, обусловлены процессами нагрева и охлаждения материала электродов в зоне импульсного разряда, а также фазовыми превращениями в материалах, сплавах [17-18].

Наиболее опасными для усталостной прочности могут считаться осевые остаточные напряжения растяжения, увеличивающие амплитуду действующих напряжений и способствующие снижению выносливости деталей. Так, в работе [18] показано, что при ЭЭЛ слоев легированных валов растягивающие остаточные напряжения возникают в поверхностном слое глубиной до 0,2 мм. В результате упрочнения ППД обкаткой шариком (ОШ) деформационные кривые значительно изменяются, т.к. деформации имеют отрицательный знак, что определяет наличие в поверхностном слое благоприятных напряжений сжатия величиной до 520 МПа и глубиной залегания до 0,9 мм [18]. Автор показывает, что предварительное упрочнение ОШ с последующим ЭЭЛ и повторным упрочнением ОШ незначительно изменяет деформацию в сторону увеличения по сравнению с деформацией образцов, обработанных ППД только после ЭЭ. Величина остаточных сжимающих напряжений достигает у поверхности 550 МПа, а глубина их распространения уменьшается до 0,75-0,82 мм. Это, по

мнению автора, связано с тем, что предварительное упрочнение ППД образцов перед ЭЭЛ усилием 980 Н не позволяет после повторного упрочнения с усилием 1470 Н увеличить глубину упрочнения, но зато интенсивнее деформируется покрытие, о чем свидетельствует рост остаточных напряжений у поверхности.

В работе [21] приведены результаты исследований осевых остаточных напряжений. Исследования проводились на призматических образцах из стали 45 размером 70x5x2 мм по методике И.А. Биргера путем послойного электрополирования напряженных слоев на установке типа «Пион» в электролите следующего состава: H_2SO_4 – 40%, H_3PO_4 – 45%, H_2O – 10%, Cr_2O – 5%. Состояние поверхностного слоя при исследовании остаточных напряжений определялось для следующих серий: ЭЭЛ – Cu, ЭЭЛ – Cu+ЭЭЛ–Cr; ЭЭЛ–Cu+ ЭЛ–Cr+ОШ; ЭЭЛ–Cu+ОШ. В результате исследований было установлено, что ЭЭЛ стали 45 медью приводит к формированию в ее поверхностном слое растягивающих напряжений с глубиной залегания до 0,1 мм и максимальной величиной на поверхности до 170 МПа. Нанесение на сталь 45 КЭП медь+хром, приводило к возрастанию как величины напряжения, так и глубины залегания, соответственно до 210 МПа и 0,15 мм. В результате упрочнения ОШ образцов после ЭЭЛ-медь и медь+хром деформационные кривые значительно изменялись, т.к. деформации имели отрицательный знак, что и определяло наличие в поверхностном слое благоприятных напряжений сжатия.

В работе [21] было установлено также влияние ППД на усталостную прочность ЭЭЛ слоев. В частности, было показано, что усталостная прочность натуральных валов из стали 45, в результате ЭЭЛ хромом снижалась по сравнению с образцами без ЭЭЛ с 395 до 170 МПа. ОШ полностью восстанавливала усталостную прочность образцов с покрытиями, а алмазное выглаживание (АВ) увеличивало ее на 10% по сравнению с образцами без покрытия. Снижение уровня остаточных напряжений при применении КЭП, состоящих из мягкого антифрикционного и твердого износостойкого металла, по сравнению с покрытиями, состоящими только из твердого износостойкого металла, например, медь+хром и хром, обуславливало проведение испытаний этих покрытий на усталостную прочность. При испытании натуральных валов с КЭП меди+хром было установлено, что в результате ЭЭЛ усталостная прочность снижалась по сравнению с образцами без покрытия в 1,5 р (с 395 до 255 МПа), но зато она была в полтора раза выше, чем у образцов, легированных только хромом. Обкатка шариком КЭП медь+хром увеличивала их усталостную прочность на 16-20% выше базового варианта (образцов без покрытия).

Увеличение предела выносливости натуральных валов за счет применения КЭП и последующей ППД автор объясняет снижением у них уровня остаточного напряжения и структурой КЭП покрытия – зарождающаяся на поверхности вала микротрещина, развиваясь вглубь и «натякаясь» на мягкую составляющую КЭП, временно «затухает» (релаксируется), увеличивая тем самым усталостную прочность вала.

На основании полученных результатов автор делает вывод о том, что предел выносливости натуральных образцов с покрытием из мягкого антифрикционного металла меди и последующего ППД находится на уров-

не образцов без покрытия, поэтому при необходимости можно рекомендовать данный комплекс упрочняющих технологий к практическому применению. При этом усталостная прочность КЭП сформированных поочередным нанесением меди и хрома будет на 50% выше, чем у покрытий, состоящих только из хрома, а ППД увеличивает предел выносливости КЭП медь+хром по сравнению с базовым вариантом – образцом без покрытия на 20%.

Применение пластической деформации вызывает изменение микрогеометрии поверхностного слоя, его структуры и свойств. Величиной, позволяющей обобщить это влияние, автор работ [22, 23] предлагает использовать удельное усилие обкатки. В работе [24] было изучено влияние ППД, заключающееся в ОШ и АВ на микрогеометрию, структуру и другие свойства поверхностных слоев, сформированных за счет ЭЭЛ твердыми износостойкими материалами. В частности, было установлено, что при АВ величина шероховатости поверхности в значительной степени определяется радиусом индентора, а при ОШ практически все точки зависимости шероховатости поверхности от среднего удельного усилия укладываются на одну кривую для всех покрытий независимо от вида ЭЭЛ. При ЭЭЛ хромом и вольфрамом с последующей ППД поверхностных слоев стали 45 выяснилось, что увеличение удельного усилия деформации не сказывается на величине микротвердости белого слоя, а приводит к увеличению в подслое. Это связано, по мнению автора, с тем, что белый слой, обладающий высокой микротвердостью, не упрочняется, а вминается в более мягкий подслой, упрочняя при этом последний. Наиболее рациональными удельными усилиями ППД электроэрозионно-легированных слоев из твердых износостойких материалов является 1000 МПа для АВ и 1500 МПа для ОШ. Наиболее эффективно ППД, с точки зрения деформационного упрочнения, при уменьшении исходной твердости зоны термического влияния или наличии мягкого подслоя после ЭЭЛ [26]. В работе было установлено экспериментально, что в случае ОШ стальных образцов, легированными мягкими антифрикционными металлами, с увеличением удельного усилия деформации снижается шеро-

ховатость поверхностного слоя. Усилие обкатки зависит от микротвердости покрытия и величины исходной шероховатости. Так, если для снижения шероховатости поверхности стали 45 с Ra, равной 4,5 мкм до Ra=0,5 мкм, легированный оловом и имеющей микротвердость 800 МПа, необходимо удельное усилие деформации ~ 750 МПа, то для получения такой же шероховатости на поверхности стали 40Х, легированной медью и имеющей соответственно исходную микротвердость и шероховатость 1300 МПа и 12 мкм требуется удельное усилие деформации ~ 1250 МПа. Дальнейшее увеличение удельного усилия деформации приводит к увеличению шероховатости, появлению на поверхности различных дефектов. Таким образом, в работе делается вывод о том, что чем меньше исходные микротвердость и шероховатость поверхностного слоя, тем меньше удельное усилие деформации необходимо для его выглаживания. Согласно [25], при выглаживании металлопокрытий оптимальная величина нормальной силы зависит от толщины покрытия, физико-механических свойств материалов основы и покрытия, а также прочности сцепления покрытия с основой. При выглаживании мягких покрытий (серебро, кадмий и др.) нормальная сила выглаживания в основном определяется свойствами самого покрытия. Для твердых покрытий сила зависит не только от свойств покрытий, но и от его толщины и свойств основы. При толщине покрытия до 10 мкм доминирует основа, свыше 10 мкм наблюдается совместное влияние основы и покрытия, а при толщинах более 80 мкм в основном проявляется влияние только покрытия. На основе проведенных исследований и выводов из работы [25] автор работы [26] предлагает использовать разбиение материалов на три группы в зависимости от микротвердости упрочняемого участка покрытия: мягкие – менее 2000 МПа, средние – 2000-3000 МПа, твердые – более 3000 МПа. Для мягких покрытий рекомендуется применять удельные усилия деформации $R_{ср}=750-1250$ МПа, для средних – 13000-1500 МПа, для твердых – 2500-3000 МПа. Мягкие покрытия рекомендуется упрочнять ОШ, средние и твердые можно упрочнять как ОШ (Ra менее 12 мкм) так и АВ (Ra менее 5 мкм).

ЛИТЕРАТУРА

1. Д.Н.Гаркунов. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1989. – с.327
2. В.Б. Тарельник. Проблемы формирования качества поверхностных слоев деталей и инструментов// Вестник ХГПУ, 1999. – № 118. – с. 35-38
3. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей. – М.: Машиностроение, 1976.-С.46
4. Тарельник В.Б. Комбинированные технологии электроэрозионного легирования. – К.: Техніка, 1997.-С.128
5. Н.В. Захаров, В.Б. Тарельник. Применение комбинированных электроэрозионных покрытий для повышения износостойкости деталей, работающих в условиях торцевого трения// ВЕСТНИК ХГПУ, 1999. – №59. – С. 69-71
6. В.Б. Тарельник Металлографические исследования поверхностных слоев из никелевого сплава ХН58МБЮД и бериллиевой бронзы бр62 после электроэрозионного легирования// ВЕСТНИК ХГПУ, 1999. – № 82. – С. 52-54
7. Электроискровое легирование металлических поверхностей/ А.Е. Гитлевич, В.В. Михайлов, Н.Я. Парканский, – Кишнев: Штинца, 1985.-196с.

8. Влияние поверхностно-пластической деформации на характеристики искровых покрытий на основе железа. Сообщение 1./ А.И.Михайлюк, Л.С. Рапопорт, А.Е. Гитлевич и др. // Электронная обработка материалов. – 1991.-№1.–с.16-19.
9. Влияние поверхностно-пластической деформации на характеристики искровых покрытий на основе железа. Сообщение 2./ А.И.Михайлюк, Л.С. Рапопорт, А.Е. Гитлевич и др. // Электронная обработка материалов. – 1991.-№2.–с.17-20.
10. Н.П. Коваль, И.И. Сафронов. Влияние поверхностно-пластической деформации на некоторые механические свойства поверхности, упрочненной электроискровым способом // Электронная обработка материалов. – 1982.-№3.–с.87-89.
11. Лазаренко Б.Р., Михайлов В.В., Гитлевич А.Е. и др. Лазерное воздействие на покрытия, полученные методом электроискрового легирования // Электронная обработка материалов. – 1983.-№2.–с.24-25;
12. Н.Н. Морарь Влияние условий электроискрового легирования титана никелем и отжига на фазовый состав поверхностного слоя // Электронная обработка материалов. – 1983.-№5.–с.23-26;
13. А.А. Бугаев Электроискровое легирование с наложением ультразвука // Электронная обработка материалов. – 1984.-№4.–с.12-24.
14. Дрозд М.С., Маталин М.М., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. – М.: Машиностроение, 1986. – 219с.
15. В.Б. Тарельник. Исследование условий силового воздействия на электроэрозионно-легированные слои различной твердости// Вестник ХГПУ, 1999. – № 81 . – с. 42-45
16. Тарельник В.Б. Математична модель процесу масопереносу в електроерозійному легуванні // Машинознавство.–1998.-№11/12.– с.20-23.
17. Лазоренко Н.И. Технологический процесс изменения исходных свойств металлических поверхностей электрическими импульсами//Электроискровая обработка металлов, 1960. – №2. – с. 36-66
18. Тарельник В.Б. Комбинированные технологии электроэрозионного легирования и поверхностной пластической деформации. Сообщение 3. Исследование физико-механических свойств изделий, упрочненных электроэрозионным легированием и поверхностной пластической деформацией// Электронная обработка материалов, 1998. – №3-4. – с. 31-37
19. Колесников Г.Н., Моисеев А.И. К вопросу о влиянии фазовых превращений на релаксацию напряжений. – Труды Института физики металлов, 1958. – Выпуск 19. – с.130-137
20. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1977. – с.646.
21. Влияние поверхностной пластической деформации на остаточные напряжения и усталостную прочность образцов из стали 45 с электроэрозионными покрытиями // Вестник ХГПУ, 1999. – № 80. – с. 69-71
22. Тарельник В.Б. Исследование условий силового воздействия на электроэрозионно-легированные слои различной твердости // Вестник ХГПУ, 1999. – №75. – с.42-45
23. Тарельник В.Б. зміцнення поверхневих шарів інструмента та важко навантажених деталей електроерозійним легуванням з наступною пластичною деформацією. – Автореф. дис. к.т.н. – Луганськ. – 1994 – 16 с.
24. V. B. Tarel'nik. Combined technologies for electroerosion alloying and surface plastic deformation. Communication 2. Effect of surface plastic deformation on microgeometry and structure of electroerosion-alloyed layers // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 1997.-№3.-pp.4-10.
25. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением/ Л.А. Хворостухин, С.В. Шишкин, А.П. Ковалев, Р.А. Ишмаков.- М.: Машиностроение, 1988.-с.144.
26. Микрогеометрия, структура с свойства электроэрозионно-легированных слоев, подверженных пластической деформации // Вестник ХГПУ, 1999. – №77 . – с. 25-29