

УДК 621.9.048

## РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ УПРОЧНЯЮЩИХ И ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

**Тарельник В.Б., д.т.н., профессор, Коноплянченко Е.В., к.т.н., доцент,  
Марцинковский В.С., к.т.н., доцент, Косенко П.В., аспирант,  
(Сумский национальный аграрный университет, г. Сумы, Украина)  
Антошевский К., магистр инженерии.  
(Политехнический университет, г. Кельце, Польша)**

*Представлены результаты анализа различных методов, направленных на устранение разупрочненного слоя (слоя пониженной твердости), образующегося в зоне термического влияния под упрочненным слоем, при электроэрозионном легировании термообработанных стальных деталей. Предложена к применению новая технология нитроцементации, применяемая при восстановлении частично удаленного, упрочненного ионным азотированием, поверхностного слоя.*

**Введение.** Проблема энергосбережения на рубеже тысячелетий превратилась в одну из важнейших общечеловеческих проблем. рациональное и экономное использование природных ресурсов, сокращение вредных выбросов в атмосферу и эффективное использование электрической и тепловой энергии приобретают исключительно большое значение в современном обществе.

Использование упрочняющих и защитных покрытий обеспечивает надежную работу узлов и деталей в тяжелых условиях эксплуатации оборудования, позволяет снизить материальные и энергетические затраты на эксплуатацию машин, уменьшить расход дорогостоящих конструкционных материалов. Поэтому исследования в направлении создания новых защитных покрытий и повышение качества существующих актуальны и своевременны.

**Анализ основных достижений и публикаций.** Одним из наиболее простых с технологической точки зрения методов поверхностного легирования является электроэрозионное легирование (ЭЭЛ). Его достоинствами являются локальность воздействия, малый расход энергии, отсутствие объемного нагрева материала, простота автоматизации и «встраиваемости» в технологический процесс изготовления деталей, возможность совмещения операций.

При помощи ЭЭЛ можно повысить твердость металлической поверхности, нанесением на нее материала более высокой твердости или диффузионным введением в поверхностный слой необходимых химических элементов из окружающей среды, или из материала анода; или понизить твердость, нанося на поверхность более мягкие материалы.

Однако ЭЭЛ термообработанных деталей, подвергаемых в условиях эксплуатации высоким удельным нагрузкам (детали штампов, валы прокатных станов и др.) не всегда приводит к желаемому результату. Причиной выхода из строя некоторых из них является то, что под слоем повышенной твердости после ЭЭЛ появляется зона отпуска – зона сниженной твердости. Это приводит к продавливанию упрочненного слоя и, как следствие, к быстрому износу детали. ЭЭЛ в данном случае принесет вред, особенно если допустимый износ легированной поверхности превышает толщину слоя повышенной твердости [1].

Согласно [2] «провал» твердости в зоне термического влияния можно устранить путем применения после ЭЭЛ дополнительной обработки для создания наклепа методом поверхностного пластического деформирования. Следует отметить, что в данном случае общего повышения твердости в переходной зоне не наблюдается.

Согласно [3] проведение ионного азотирования (ИА) до или после ЭЭЛ позволяет устранить зоны пониженной твердости при использовании электродов из чистых твердых износостойких металлов. Кроме того, наблюдается плавное изменение твердости упрочненного слоя и увеличение общей глубины зоны повышенной твердости.

Известен способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием (ЦЭЭЛ) [4], когда при ЭЭЛ в качестве электрода используют графит (углерод). Способ ЦЭЭЛ имеет ряд достоинств, основными из которых являются:

- достижение 100% сплошности упрочнения поверхностного слоя;
- повышение твердости поверхностного слоя детали за счет диффузионно-закалочных процессов;
- легирование можно осуществлять в строго указанных местах, не защищая при этом остальную поверхность детали;
- отсутствие объемного нагрева детали, а, следовательно, поводок и короблений.

С целью снижения шероховатости поверхности деталей машин, с сохранением качества поверхностного слоя (отсутствие микротрещин, наличие слоя повышенной твердости, 100%-я сплошность и др.) и таким образом расширения области их применения, предложено ЦЭЭЛ проводить поэтапно, снижая на каждом этапе энергию разряда [5].

**Постановка задачи.** По сравнению с цементацией и закалкой процесс азотирования протекает при более низкой температуре. Азотированная поверхность имеет более высокую твердость, износо- и коррозионную стойкость, лучшую полируемость; свойства азотированной поверхности практически не изменяются при повторных нагревах вплоть до 500 - 600 °С, в то время как при нагревах цементированной и закаленной поверхности до 225 - 275 °С твердость ее снижается.

Учитывая это свойство, в предварительно азотированной поверхности не следует ожидать снижения твердости в зоне термического влияния после ЦЭЭЛ.

При ЦЭЭЛ стальной азотированной поверхности происходит процесс аналогичный нитроцементации, только насыщение поверхности азотом и углеродом протекает поочередно, а при традиционной нитроцементации – одновременно.

С целью повышения таких эксплуатационных характеристик деталей машин как износостойкость и усталостная прочность, упрочнению подвергают, как правило, их поверхностный слой. При этом сердцевина остается более мягкой и пластичной.

После поверхностного упрочнения (цементацией, газовым азотированием, карбонитрацией, ионным азотированием и др.), с целью устранения отклонения деталей от правильной геометрической формы, нередко возникает необходимость в удалении части поверхности, причем наиболее твердой, так как при поверхностном упрочнении величина твердости снижается по мере углубления.

Преимущества ИА по сравнению с обычным жидкостным (карбонитрация) и газовым азотированием состоят:

- в возможности целенаправленного контроля структуры получаемого поверхностного слоя;
- применении относительно низких температур (до 500 °С);
- отсутствие поводок и коробления;
- исключение наводораживания и предотвращение развития процессов отпускной хрупкости в основном металле;
- безвредность и экологическая безопасность процесса, оборудование ИА может располагаться в механических цехах;
- сокращение (в 2 - 3 раза) продолжительности обработки. Длительность ИА колеблется от 0,5 - 36 ч в зависимости от необходимой глубины упрочненного слоя;
- получения равномерного по толщине азотированного слоя на всех поверхностях детали;
- большая экономичность процесса, повышение коэффициента использования энергии [6].

Нередко упрочненный поверхностный слой детали удаляют после ее сборки с другими деталями, например, после напресовки на вал. В данном случае может быть удалено от 0,05 до 0,15 мм. Увеличить твердость поверхностного слоя такой детали, без необходимой предварительной разборки, вышеуказанными технологиями практически невозможно.

В данном случае предлагается применять способ ЦЭЭЛ, одним из достоинств которого является возможность проведения процесса в локальном месте, не защищая при этом другие поверхности. При необходимости, шероховатость поверхности после ЦЭЭЛ можно уменьшить, поэтапно снижая энергию разряда согласно [5] или применяя последующую обработку методом БУФО.

Учитывая, выше сказанное, представляет научный и практический интерес проведение металлографических и дюрOMETрических исследований стальных поверхностей после ЦЭЭЛ и ИА проводимых в различных последовательностях.

Таким образом, **целью** работы является повышение качества поверхности термообработанных стальных деталей, методом нитроцементации.

**Методика исследований.** Для ИА и ЦЭЭЛ использовали специальные образцы из стали 40Х, термообработанные, как и в [3], на твердость 3900-4000 МПа, а также на твердость 3000-3100 МПа. Образцы изготавливали в виде катушки, состоящей из двух дисков, диаметром 50 мм и шириной 10 мм, соединенных между собой проставкой диаметром 15 мм и имеющей два технологических участка такого же диаметра (рис. 1,а). Поверхности дисков шлифовали до Ra = 0,5 мкм. Из упрочненных образцов вырезали сегменты, из которых изготавливали шлифы (рис. 1, б).



Рисунок 1 – Образец для ИА и ЦЭЭЛ (а); шлифы образцов (б).

Процесс ЦЭЭЛ производился в автоматическом режиме с помощью установки модели «ЭИЛ – 8А». Поэтапная ЦЭЭЛ образцов проводилась путем легирования графитовым электродом марки ЭГ-4 (ОСТ 229-83) с энергией разряда 0,42 Дж (1-й этап) и 0,1 Дж (2-й этап) с производительностью, соответственно 2 и 5 мин/см<sup>2</sup>. Ионное азотирование образцов проводили при температуре 520 °С в течение 12 ч на установке НГВ-6,6/6-И1 (рис. 2). Упрочнение образцов проводили в различной последовательности: ИА; ЦЭЭЛ; ЦЭЭЛ+ИА; ИА+ЦЭЭЛ. С целью снижения шероховатости поверхности после ЦЭЭЛ применяли БУФО.



Рисунок 2 - Установка ИА модели «НГВ - 6,6/6 - И1».

Шлифы исследовали на оптическом микроскопе «Неофот-2», где проводилась оценка качества слоя, его сплошности, толщины и строения зон подслоя – диффузионной зоны и зоны термического влияния. Одновременно проводился дюрOMETрический анализ на распределение микротвердости в поверхностном слое и по глубине шлифа. Замер микротвердости проводили на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием алмазной пирамиды под нагрузкой 0,05 Н.

На всех этапах обработки измеряли шероховатость поверхности на приборе профилографе - профилометре мод. 201 завода «Калибр».

**Результаты исследований.** В табл. 1 представлено распределение микротвердости в поверхностном слое образцов стали 40Х, термообработанных на твердость 3900-4000 МПа и упрочненных различными способами, а также приведены результаты влияния этих способов упрочнения на шероховатость формируемого упрочненного поверхностного слоя.

Анализ табл. 1 показывает, что при ЦЭЭЛ, как и при ЭЭЛ хромом, вольфрамом и твердым сплавом Т15К6, под слоем повышенной твердости располагается зона отпуска («провал твердости»). В данном случае эта зона располагается на глубине  $\approx 60$  мкм и составляет 3800 МПа. ИА проводимое, как до ЦЭЭЛ, так и после устраняет характерный «провал твердости» и в обоих случаях отмечается плавное снижение твердости.

Таблица 1 – Шероховатость и распределение микротвердости в поверхностном слое образцов из стали 40Х, термообработанных на твердость 3900-4000 МПа, после упрочнения различными способами

| Способ упрочнения                   | Микротвердость, МПа (шаг измерения $\sim 30$ мкм) |      |      |      |      |      |      |      |      |      | Ra, мкм |     |
|-------------------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------|-----|
|                                     | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |         |     |
| Микротвердость основы 3900-4000 МПа |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |         |     |
| ИА                                  | 7200  | 5010 | 4800 | 4800 | 4800 | 4010 | 3900 | 4000 |      |      |         | 0,5 |
| ЦЭЭЛ                                | 7010  | 3800 | 4300 | 4100 | 3900 |      |      |      |      |      |         | 0,8 |
| ЦЭЭЛ + ИА                           | 8200  | 5600 | 5510 | 5010 | 4600 | 4400 | 4310 | 3980 | 4000 |      |         | 0,8 |
| ИА + ЦЭЭЛ                           | 12000   | 6500 | 6200 | 4600 | 4410 | 4410 | 4230 | 4160 | 3900 | 3900 |         | 0,8 |
| ЭЭЛС r + ИА*                        | 8000  | 5500 | 5400 | 5100 | 5000 | 4300 | 3900 |      |      |      |         | 2,6 |
| ЭЭЛW + ИА*                          | 8000  | 5000 | 4200 | 4100 | 4000 | 4000 | 3900 |      |      |      |         | 3,3 |
| ЭЭЛТ15К6+ИА*                        | 5000  | 3800 | 4200 | 4100 | 4000 | 4000 | 4000 |      |      |      |         | 5,1 |
| ИА+ЭЭЛС r*                          | 9000  | 5200 | 5000 | 4900 | 4700 | 4500 | 3950 |      |      |      |         | 2,6 |
| ИА+ЭЭЛW*                            | 10000   | 4800 | 4200 | 4000 | 3900 | 3900 |      |      |      |      |         | 3,3 |
| ИА+ЭЭЛТ15К6*                        | 7000  | 5500 | 4900 | 4700 | 4600 | 4500 | 3950 |      |      |      |         | 5,1 |

\* - данные взяты из [3].

Таким образом, при упрочнении термообработанных деталей методом ЭЭЛ, необходимо до или после легирования подвергать их ИА, в течение времени достаточном для насыщения металла азотом на глубину зоны термического влияния. При этом в качестве электрода инструмента целесообразно применять графитовый электрод, что обеспечивает при всех прочих равных условиях наибольшую твердость и наименьшую шероховатость поверхностного слоя. В результате совершается процесс насыщения

поверхностного слоя азотом и углеродом, который называется нитроцементацией.

Следует отметить, что наибольшая твердость (12000 МПа) и глубина зоны повышенной твердости ( $\approx 220$  мкм) отмечается при ЦЭЭЛ проводимой после ИА.

Ниже приведены результаты исследований влияния ИА и ЦЭЭЛ на образцы стали 40Х после термообработки на твердость 3000-3100 МПа.

В табл. 2 представлено распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя и величины шероховатости поверхности при различных вариантах ИА и ЦЭЭЛ. Кроме того в табл. 2 приведены результаты измерения шероховатости поверхности после БУФО.

Таблица 2 – Шероховатость и распределение микротвердости в поверхностном слое стали 40Х после упрочнения различными способами

| Способ упрочнения                   | Микротвердость, МПа (шаг измерения $\sim 30$ мкм) |      |      |      |      |      |      |      |      |      | Ra, мкм |      |
|-------------------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------|------|
|                                     | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | ЦЭЭЛ    | БУФО |
| Микротвердость основы 3000-3100 МПа |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |         |      |
| ИА                                  | 7010  | 5010 | 4800 | 4800 | 4800 | 4010 | 3700 | 3000 |      |      | 0,5     | 0,5  |
| ЦЭЭЛ                                | 7010  | 5010 | 4010 | 3860 | 3100 |      |      |      |      |      | 0,8     | 0,5  |
| ЦЭЭЛ + ИА                           | 8250  | 5490 | 5010 | 5010 | 4600 | 4410 | 4410 | 3580 | 3000 |      | 0,8     | 0,5  |
| ИА + ЦЭЭЛ                           | 11190   | 5490 | 5220 | 4600 | 4410 | 4410 | 4230 | 3860 | 3700 | 3100 | 0,8     | 0,5  |

На рис. 3 изображены микроструктуры (а, б, в, г) и распределение микротвердости ( $H_{\mu}$ ) по глубине поверхностного слоя (h) образцов стали 40Х после ИА, ЦЭЭЛ, ИА с предыдущей и последующей ЦЭЭЛ, соответственно (а\*, б\*, в\*, г\*). На всех микрофотографиях четко просматривается «белый» слой, не поддающийся травлению обычными реактивами. Его микротвердость в зависимости от вида упрочнения колеблется от 7010 МПа при ИА и ЦЭЭЛ до 8250 и 11190 МПа при ИА+ЦЭЭЛ и ЦЭЭЛ+ИА, соответственно.

Ниже располагается переходная, диффузионная зона, с плавно снижающейся микротвердостью, переходящей в микротвердость основы (3000-3100 МПа).

Глубина зоны повышенной твердости составляет при ЦЭЭЛ, ИА, ЦЭЭЛ+ИА, ИА+ ЦЭЭЛ, соответственно, 60-70, до 190, 220 и 250 мкм.

Как видно из табл. 2 и рис. 3 наибольшая толщина (250 мкм) и твердость упрочненного слоя (11190 МПа) принадлежат способу упрочнения ИА + ЦЭЭЛ. При этом шероховатость поверхности Ra, составляет 0,8 мкм, что ниже, чем при использовании в ЭЭЛ металлических электродов. Применение метода БУФО позволяет снизить величину шероховатости до  $Ra = 0,5$  мкм.

Таким образом, наиболее предпочтительным способом повышения твердости поверхностного слоя стальных деталей, у которых частично или полностью удален упрочненный поверхностный слой, является ЦЭЭЛ, а в качестве предварительного упрочнения целесообразнее всего применять ИА, имеющее ряд преимуществ перед другими способами.

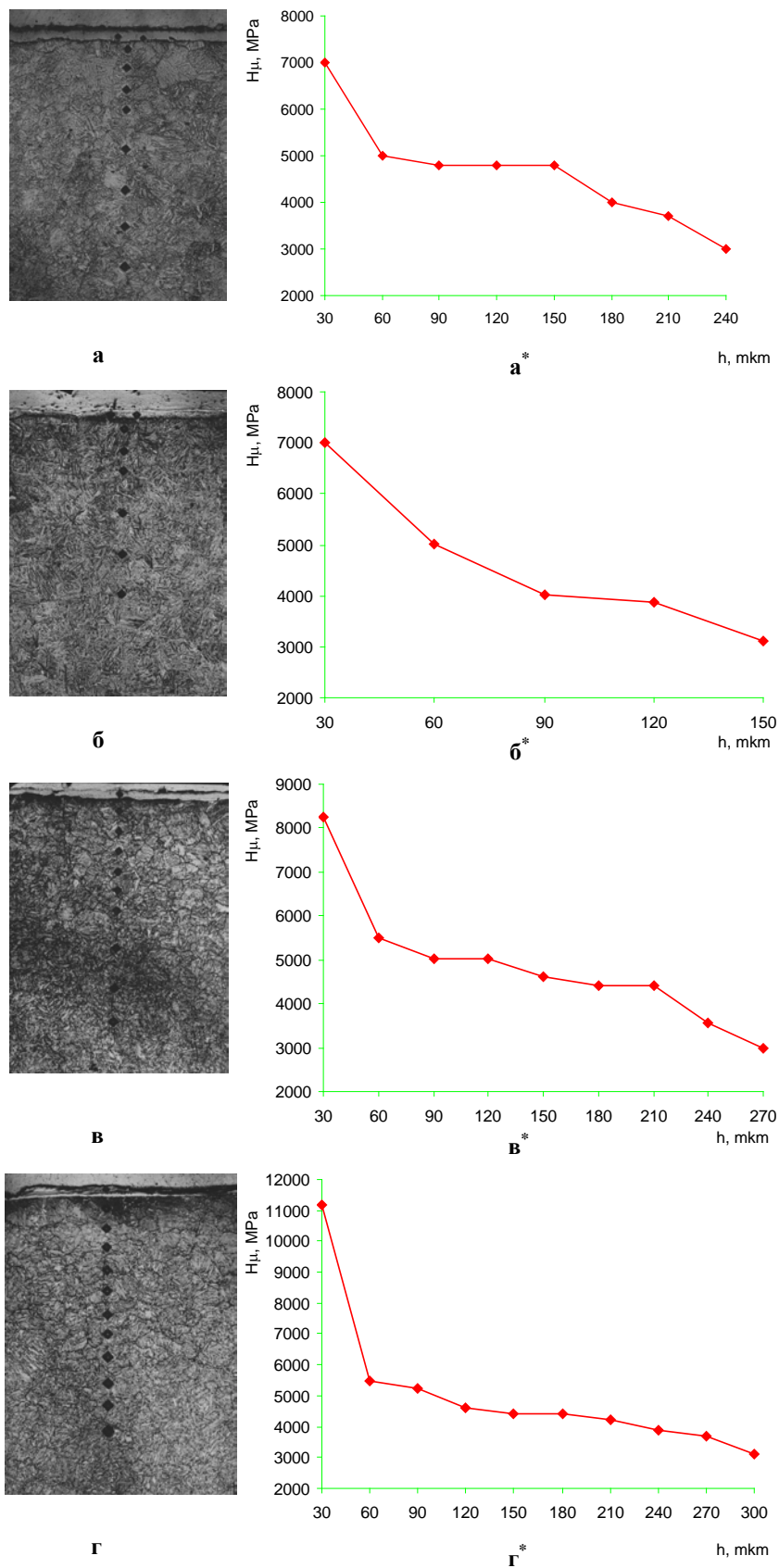


Рисунок 3 – Микроструктура и распределение микротвердости ( $H_{ц}$ ) поверхностного слоя ( $h$ ) образцов стали 40X после: **а, а\*** – ИА; **б, б\*** – ЦЭЭЛ; **в, в\*** – ЦЭЭЛ + ИА; **г, г\*** – ИА + ЦЭЭЛ.

**Пример практического применения.** В 2013 г. ООО «ТРИЗ» г. Сумы выполнил реконструкцию центробежного компрессора природного газа 22ЦКО поз. 252-3 цеха производства метанола ОАО НАК «Азот». В процессе работ возникла проблема по изготовлению защитных втулок (ЗВ) концевых уплотнений ротора, устанавливаемых на вал по горячей посадке.

Традиционно втулки изготавливали из монель-металла (основа) марки НМЖМц 28-2,5-1,5 с нанесением на наружную поверхность втулки износостойких порошков, с последующим оплавлением покрытия в вакуумной печи. После изготовления ЗВ устанавливаются на вал с натягом, обрабатываются эльборовыми и гексанитовыми резцами и полируются эльборовым наждачной бумагой. Толщина нанесенного слоя составляет  $\approx 2$  мм, а после проточки на валу 1 мм, при общей толщине втулки 3 мм.

В качестве альтернативы, для замены ЗВ из монель-металла на более дешевые, но не уступающие по своим эксплуатационным характеристикам, специалистами «ТРИЗ» были разработаны два других способа их изготовления.

Первый - изготовление втулок из стали 38Х2МЮА с последующим упрочнением поверхностного слоя методом карбонитрации в расплаве солей (рис. 4). Глубина упрочненного слоя при этом составляла 0,55 - 0,6 мм, а поверхностная твердость после карбонитрации HRC 55-62. Температура упрочнения методом карбонитрации находится в пределах 540 - 600°C, что не превышает температуру отпуска стали 38Х2МЮА, которая составляет 640°C.

Сложность отработки технологии изготовления втулок с применением упрочнения поверхностного слоя методом карбонитрации, заключалась в обеспечении твердости поверхностного слоя, после горячей посадки на вал ротора и шлифования, так как твердость упрочненного поверхностного слоя, максимальная на поверхности, по мере углубления снижается.

Второй способ впервые был применен во время остановочного ремонта в марте 2014 года на ПАО «АЗОТ» г. Черкассы, при ремонте ротора КНД компрессора поз. 103J. Он состоял в том, что после посадки на вал и шлифовки втулок, подверженных ИА, проводили их поверхностное упрочнение методом ЦЭЭЛ с последующей обработкой методом БУФО (рисунок 5 и 6).



Рисунок 4 - Внешний вид ЗВ уплотнения после упрочнения методом карбонитрации и очистки.





Рисунок 5 - Внешний вид втулки после ЦЭЭЛ.



Рисунок 6 - Внешний вид втулки после обработки БУФО.

Ремонт был выполнен в сжатые сроки в течении 24 часов. При этом параметры работы уплотнения не изменились.

#### **Выводы:**

1. Анализ химико-термических методов поверхностного упрочнения (цементация, азотирование, нитроцементация) показал, что в современном материаловедении все большее применение находит ионное азотирование в плазме тлеющего разряда, которое ни в чем не уступает выше названным методам, а по ряду показателей имеет значительные преимущества.

2. Для восстановления частично удаленного, упрочненного ионным азотированием поверхностного слоя, предлагается применять ЦЭЭЛ и тем самым реализовывать процесс нитроцементации (насыщения поверхностного слоя азотом и углеродом).

3. Для снижения шероховатости поверхности после ЦЭЭЛ рекомендуется применять метод БУФО.

#### **Список литературы:**

1. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревутский В.М. – Кишинев: Штинца, 1985. – 196 с.

2. Андреев В.И. Повышение эксплуатационных характеристик рабочих поверхностей деталей // Вестник машиностроения.- 1978.- №7.- С.71-72.
3. Патент України на винахід № 103701, 23Н 5/00. Спосіб зміцнення поверхонь сталевих деталей, підданих термічній обробці. / В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник / Опубл. 11.11.2013, бюл. № 21.
4. Патент України на винахід № 82948, 23С 8/00. Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням/ В.С. Марцинковский, В.Б.Тарельник, А.В. Белоус / Опубл. 25.03.2008, бюл. № 10.
5. Патент України на винахід № 101715, 23Н 9/00. Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням/ В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник, М.П. Братушак / Опубл. 25.01.2013, бюл. № 8.
6. Полевой С. Н., Евдокимов В. Д. Упрочнение металлов. Справочник.- М.: Машиностроение, 1986.- С. 135.

## Анотація

### **Ресурсозберігаючі технології нанесення зміцнюючих та захисних покриттів поверхонь тертя сталевих деталей машин**

Тарельник В.Б., Коноплянченко Є.В., Марцинковський В.С.,  
Косенко П.В., Антошевський К.

*Представлено результати аналізу різних методів, спрямованих на усунення шару зниженої твердості, що утвориться в зоні термічного впливу під зміцненим шаром, при електроерозійному легуванні термооброблених сталевих деталей. Запропонована до застосування нова технологія нітроцементації, що застосовується при відновленні частково видаленого, зміцненого іонним азотуванням, поверхневого шару.*

## Abstract

### **Save resource technologies strengthening and protective coating of steel parts friction surface**

Tarelnyk V.B., Konopyanchenko E.V., Martsinkovskiy V.S.,  
Kosenko P.V., Antoszewski K.

*The results of the analysis of the various methods to eliminate softening layer (layer reduced hardness) formed in the heat-affected zone under the hardened layer, at electroerosive alloying heat-treated steel parts. It proposed to use the new technology carbonitriding applied in restoring partial removal reinforced ion nitriding surface layer.*