

**ГЕРВИКОН
NERVICON**

**ЭККОН
ЕККОН**



6 - 9 сентября 2011, СумГУ, г. Сумы, Украина

*XIII Международная научно-техническая конференция "ГЕРВИКОН-2011"
Международный форум "НАСОСЫ-2011"
Семинар "ЭККОН-11"*

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПРЕССОВЫХ ПОСАДОК ОТ ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИИ

**Тарельник В.Б.¹, Марцинковский В.С.², Братушак М.П.³,
Антошевский Богдан⁴**

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты исследований качественных параметров поверхностных слоев, цементированных методом электроэрозионного легирования (ЦЭЭЛ) стальных деталей, а так же деталей, ЦЭЭЛ и покрытых мягкими антифрикционными металлами, после безабразивной ультразвуковой финишной обработки.

ВВЕДЕНИЕ

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 турбин, компрессоров и насосов, валов с зубчатыми колесами редукторов, осей и валов сельскохозяйственных машин и др.

¹ Тарельник Вячеслав Борисович, д.т.н., профессор, Сумский национальный аграрный университет, г. Сумы, Украина.

² Марцинковский Василий Сигизмундович, к.т.н., доцент, Сумский национальный аграрный университет, г. Сумы, Украина.

³ Братушак Максим Петрович, старший преподаватель, Сумский национальный аграрный университет, г. Сумы, Украина.

⁴ Антошевский Богдан, д.т.н., профессор, Технологический университет г.Кельце, Польша.

Наиболее характерными случаями отказов работы прессовых и прессово-шпоночных соединений являются нарушение прочности сопряжения, фреттинг-усталостные повреждения и поломки вследствие усталости. Поэтому повышение работоспособности этих соединений является одной из важнейших задач в обеспечении надежности и долговечности деталей машин.

Фреттинг-коррозия наблюдается при различных прессовых посадках на вращающихся валах, в местах посадки лопаток турбин, в шлицевых, шпоночных, болтовых и заклепочных соединениях.

1. АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Изнашивание при фреттинг-коррозии возникает при малых колебательных, циклических, возвратно-поступательных перемещениях с малыми амплитудами.

В результате фреттинг-коррозии снижается усталостная прочность деталей, что может явиться причиной серьезных аварий.

Повреждения от фреттинг-коррозии зависят от многих факторов: амплитуды относительного проскальзывания, контактного давления, количества циклов, частоты колебаний, материала и окружающей среды.

Для существенного повышения несущей способности прессовых соединений в последнее время широкое развитие получило направление, связанное с введением в зону контакта мягких и твердых прослоек [1-6].

В [7] автор приводит результаты работ А. Тума и Ф. Вундерлиха в которых отмечается значительный эффект повышения предела выносливости валов с напрессованными деталями путем цементации. Было установлено, что на предел выносливости образцов диаметром 12 мм с запрессованными втулками влияла поводка их при закалке. После принятия мер против поводки предел выносливости повысился с 137,3 до 412,0 МПа. По данным Э. Лера предел выносливости цементированных образцов диаметром 60 мм в запрессовке повысился более чем в два раза.

Анализ литературных источников показывает отсутствие единого механизма защиты от фреттинг-коррозии. Установлено что фреттинг-коррозию деталей можно уменьшить или полностью исключить, изменяя качественные параметры их поверхностных слоев, например, нанесением коррозионно-стойких защитных покрытий требуемой твердости, толщины и коэффициента трения, прочно соединенных с основой детали и не снижающих их усталостную прочность.

Одним из наиболее перспективных способов формирования поверхностных слоев деталей с требуемыми свойствами является метод

электроэрозионного легирования (ЭЭЛ) [8]. Метод имеет ряд специфических особенностей, одной из которых является то, что процесс легирования может происходить без переноса материала анода на поверхность катода и не образовывать прирост материала, например, при ЭЭЛ графитовым электродом.

Способ ЭЭЛ графитовым электродом основан на процессе диффузии (насыщении поверхностного слоя детали углеродом) и имеет определенное сходство с разновидностью химико-термической обработки - цементацией.

По сравнению с обычной цементацией, способ цементации стальных деталей ЭЭЛ не только обладает всеми достоинствами сравниваемого метода, то есть упрочнение поверхности детали осуществляется при сохранении свойств ее исходного материала, но, кроме того, не происходит ее коробления, а малогабаритные установки позволяют выполнять упрочнение на любом имеющемся оборудовании. Производительность процесса при этом составляет 1-5 мин /см².

При ЭЭЛ графитовым электродом упрочнение поверхности детали происходит за счет диффузионно-закалочных процессов, заключающихся в локальном насыщении ее углеродом, при достаточно высокой температуре (до 10000°С), с последующим быстрым охлаждением до практически комнатной температуры самой детали.

Цементацию стальных деталей электроэрозионным легированием (ЦЭЭЛ) можно выделить в отдельное направление, позволяющее формировать на деталях машин поверхностные слои повышенной износостойкости без изменения исходного размера детали [9].

При ЦЭЭЛ стальных деталей толщина упрочненного слоя зависит от энергии разряда и времени легирования (производительности процесса). С увеличением энергии разряда и времени легирования толщина упрочненного слоя увеличивается. При этом возрастает и шероховатость поверхности. Так при ЭЭЛ углеродом среднеуглеродистой легированной стали 40Х (Ra = 0,5мкм) с производительностью 5 мин/см² при энергии разряда 6,8 Дж толщина слоя повышенной твердости составляет более 1,15 мм. Шероховатость поверхности при этом соответствует Ra = 11,7-14,0 мкм.

С целью снижения шероховатости поверхности после ЦЭЭЛ применяют, как правило, методы поверхностно-пластического деформирования (ППД).

Среди методов ППД особого внимания заслуживают: обкатывание шариком и ультразвуковое упрочнение - метод безабразивной ультразвуковой финишной обработки (БУФО).

Следует отметить, что применение методов ППД не всегда приводит к желаемым результатам. Так, при обкатке шариком, незначительное превышение необходимого удельного усилия обкатки, обуславливает возникновение в поверхностном слое, предварительно ЭЭЛ углеродом,

микротрещин [10]. Микротрещины, являясь концентраторами напряжений, могут привести к разрушению деталей, особенно тех, которые в процессе работы подвергаются знакопеременным нагрузкам.

Несмотря на то, что последующая обработка БУФО значительно снижает шероховатость поверхности, для многих деталей машин это является недостаточным.

Применение после ЦЭЭЛ шлифовки не представляется возможным, так как в данном случае удаляется, как минимум 50-100 мкм поверхностного слоя, причем слоя с наибольшей твердостью.

Таким образом, целью работы является повышение качества ЦЭЭЛ поверхностного слоя деталей технологичными методами.

Качество цементированного слоя можно повысить как за счет выбора наиболее рациональных режимов обработки, так и за счет нанесения на цементированный слой мягких антифрикционных материалов, например, меди, серебра и др. и последующей обработки БУФО.

2. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЦЕМЕНТИРОВАННОГО СЛОЯ ПУТЕМ ВЫБОРА НАИБОЛЕЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЭЛ

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, предлагается после ЭЭЛ углеродом (графитовым электродом) производить легирование этим же электродом, но поэтапно. На каждом последующем этапе необходимо использовать режим ЭЭЛ с такой энергией разряда, при которой шероховатость поверхности этого же, но нелегированного (исходного) материала была бы в 2-3 раза ниже, чем на предыдущем этапе. При этом если величина шероховатости снижается в два раза, то легирование проводить за 1 проход, а если в три раза, то за 2 прохода. Один проход соответствует 100% обработки всей поверхности изделия с производительностью, соответствующей используемой энергии разряда.

Производительность процесса ЭЦ, в зависимости от режима легирования представлена в таблице 1.

Таблица 1 - Производительность процесса ЦЭЛ, в зависимости от режима легирования

| | | | | | | | |
|--|-----|------|------|-----|------|-----|-----|
| Энергия разряда (W_p), Дж | 0,1 | 0,31 | 0,53 | 0,9 | 2,83 | 3,4 | 6,8 |
| Производительность ЭЦ, м/см ² | 2,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |

Ниже приведена методика и результаты проведенных исследований.

ЭЦ выполнялась на переносных установках ЭЭЛ с ручным вибратором, обеспечивающих энергию разряда в диапазоне 0,1...0,53 Дж «Элитрон - 22А» и установки электроэрозионного легирования большей мощности - «Элитрон - 52А» с энергией разряда до 6,8 Дж.

Процесс ЦЭЭЛ проводился в автоматическом режиме с помощью специального приспособления на различных режимах в диапазоне энергий разряда (W_p) от 0,1 до 6,8 Дж.

Для исследований использовали специальные образцы, изготовленные из сталей 38ХМЮА, 40ХН2МА 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 перед ЭЦ шлифовались до Ra = 0,5 мкм. Образцы закреплялись в патроне токарного станка, после чего производилась ЦЭЭЛ (рис. 2) и обработка БУФО. Кроме того, для исследований использовались плоские образцы из стали 20, размером 20 x 40 x 5 мм. На всех этапах обработки измерялась шероховатость поверхности на приборе профилографе - профилометре мод. 201 завода «Калибр». Дальше круглые образцы разрезались на отдельные диски (диаметром 50 мм и шириной 10 мм) (рис. 1, б). Из дисков, в свою очередь, вырезались отдельные сегменты, а из плоских образцов параллелепипеды размером 10 x 10 x 5 мм из которых изготавливались шлифы для металлографических и дюрOMETрических исследований. Кроме того плоские образцы исследовались на электронном микроскопе-анализаторе "РЕМ - 106 И" производства ОАО «SELMИ», г. Сумы, где проводилась оценка качества и топографии поверхностного слоя.



а)

б)

Рисунок 1 – Стальные образцы для исследования результатов ЦЭЛ



Рисунок 2 – ЦЭЭЛ с использованием токарного станка

ЦЭЭЛ производилась графитовыми электродами марки ЭГ-4 с производительностью 5 мин/см².

При ЦЭЛ круглых образцов из сталей 38ХМЮА и 40ХН2МЮА с энергией разряда $W_p = 0,53$ Дж шероховатость поверхности (R_a) повышается с 0,5 до 1,4-1,7 мкм. Окончательная обработка БУФО снижает шероховатость поверхности до $R_a = 0,6$ мкм. Толщина упрочненного слоя в этом случае не превышает 35 мкм, а микротвердость, соответственно 950 и 800 НВ.

С увеличением режима ЦЭЭЛ до $W_p = 0,9$ Дж глубина упрочненного слоя увеличивается до 150 – 170 мкм (рисунки 3 и 4). Микротвердость на поверхности составляет, соответственно, для сталей 38ХМЮА и

40ХН2МЮА 1350 и 760 НV. По мере углубления микротвердость снижается и плавно переходит в твердость основы, соответственно, для сталей 38ХМЮА и 40ХН2МЮА 225 и 260 НV. Шероховатость поверхности в свою очередь увеличивается до $Ra = 1,6 - 2,0$ мкм. Последующая обработка БУФО снижает шероховатость поверхности до $Ra = 0,8-0,9$ мкм, что является недостаточным для многих деталей машин. Дальнейшее увеличение толщины слоя повышенной твердости сопровождается формированием еще большей шероховатости поверхности.

Результаты исследований параметров качества поверхностного слоя (общей толщины слоя повышенной твердости; максимальной микротвердости на поверхности, НV; шероховатости после ЭЦ и БУФО) сталей 38ХМЮА и 40ХН2МЮА сведены в таблицу 2.

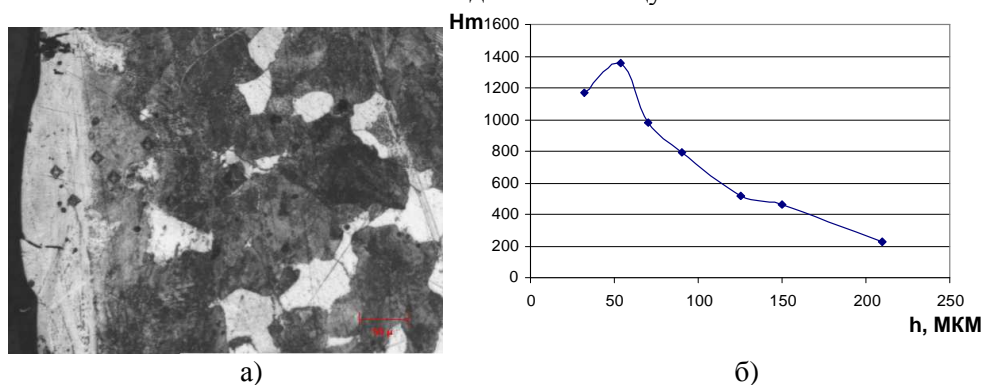


Рисунок 3 – Распределение микротвердости по глубине слоя при ЭЭЛ стали 38ХМЮА углеродом ($W_p = 0,9$ Дж).

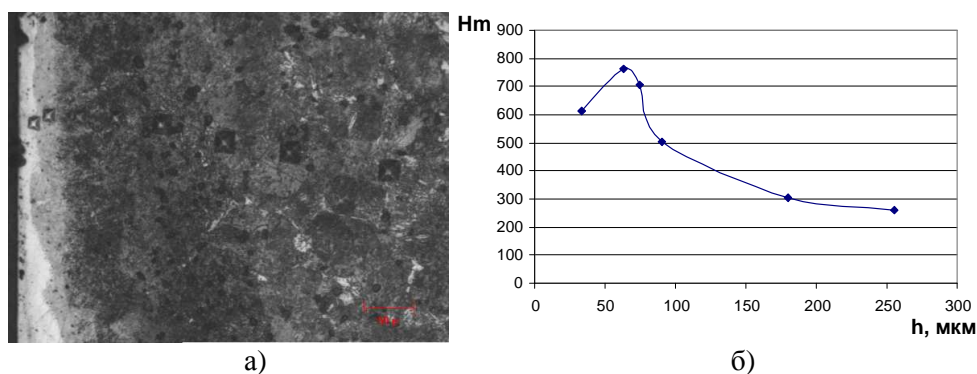


Рисунок 4 – Распределение микротвердости по глубине слоя при ЭЭЛ стали 40ХН2МЮА углеродом ($W_p = 0,9$ Дж)

В таблица 3 представлены результаты максимального снижения величины шероховатости образцов после ЦЭЭЛ при использовании режимов легирования с различной энергией разряда. Так, например, после ЦЭЭЛ стали 38ХМЮА при энергии разряда 2,83 Дж шероховатость поверхности составляет $R_a = 5,7-6,9$ мкм. После ЭЭЛ графитовым электродом с производительностью 2 мин/см² (2 прохода с производительностью 1 мин/см²) и использованием режима с энергией разряда 0,9 Дж шероховатость поверхности составляет $R_a = 1,7-2,2$ мкм. Дальнейшее увеличение производительности легирования (числа проходов) не способствует снижению величины шероховатости поверхности.

Таблица 2 – Результаты исследования стальных образцов после ЦЭЭЛ и БУФО

| Марка стали | Энергия разряда, W_p , Дж | Общая глубина слоя, мкм | Максимальная микротвердость на поверхности, HV | Шероховатость, R_a , мкм | |
|-------------|-----------------------------|-------------------------|--|----------------------------|------------|
| | | | | после ЦЭЭЛ | после БУФО |
| 38ХМЮА | 0,1 | 10 | 900 | 0,8-0,9 | 0,2 |
| | 0,31 | 20 | 900 | 0,9-1,0 | 0,3 |
| | 0,53 | 35 | 950 | 1,4-1,7 | 0,6 |
| | 0,9 | 170 | 1350 | 1,6-2,0 | 0,8 |
| | 2,83 | 215 | 980 | 5,7-6,9 | 1,5 |
| | 3,4 | 230 | 960 | 8,3-8,5 | 2,3 |
| | 6,8 | 370 | 1010 | 11,9-14,0 | 3,2 |
| 40ХН2МЮ А | 0,1 | 10 | 900 | 0,8-0,9 | 0,2 |
| | 0,31 | 20 | 900 | 0,9-1,0 | 0,3 |
| | 0,53 | 37 | 800 | 1,4-1,7 | 0,6 |
| | 0,9 | 163 | 760 | 1,7-2,0 | 0,9 |
| | 2,83 | 245 | 1002 | 5,7-6,7 | 1,5 |
| | 3,4 | 262 | 1006 | 8,6-8,9 | 2,3 |
| | 6,8 | 380 | 1070 | 11,9-14,1 | 3,2 |

После ЭЭЛ стали 38ХМЮА графитовым электродом с использованием режимов с энергиями разряда 0,53; 0,31 и 0,1 Дж и производительностью, соответственно 3; 6 и 14 мин/см² шероховатость поверхности составляет, соответственно $R_a = 1,6-1,9$; $1,2-1,3$ и $1,1-1,2$ мкм. Дальнейшее увеличение производительности легирования на исследованных режимах не способствует снижению величины шероховатости поверхности.

Таким образом, чтобы максимально снизить шероховатость поверхности, например, стали 38ХМЮА после ЦЭЛ с энергией разряда 6,8 Дж, которая составляет $R_a = 11,9-14,0$ Дж необходимо:

- на первом этапе произвести ЭЭЛ графитом при $W_p = 2,83$ Дж (т.е. с энергией разряда, обеспечивающей снижение величины шероховатости при ЭЦ ~ в 2 раза с 11,9-14,0 до 5,7-6,9 мкм) с производительностью 0,5 мин/см². (шероховатость поверхности после ЭЭЛ на первом этапе составляет $R_a = 6,3-6,9$ мкм);

- на втором этапе произвести ЭЭЛ графитом при $W_p = 0,9$ Дж (т.е. с энергией разряда, обеспечивающей снижение величины шероховатости при ЭЦ ~ в 3 раза с 6,3-6,9 до 1,7-2,1 мкм) с производительностью 2 мин/см². Шероховатость поверхности после ЭЭЛ на втором этапе составляет $R_a = 1,7-2,2$ мкм;

Таблица 3 – Результаты максимального снижения шероховатости поверхности стальных образцов после ЦЭЭЛ

| Марка стали | Энергия разряда, W_p , Дж | Шероховатость, R_a , мкм | | | | | | |
|-------------|-----------------------------|----------------------------|---|----------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | после ЭЦ | Производительность, мин/см ² | | | | | |
| | | | Энергия разряда, W_p , Дж | | | | | |
| | | | 0,1 | 0,31 | 0,53 | 0,9 | 2,83 | 3,4 |
| 38ХМЮА | 0,1 | 0,8-0,9 | | | | | | |
| | 0,31 | 0,9-1,0 | $\frac{0,8-0,9}{2}$ | | | | | |
| | 0,53 | 1,4-1,7 | $\frac{0,8-0,9}{2}$ | $\frac{0,9-1,0}{1}$ | | | | |
| | 0,9 | 1,7-2,1 | $\frac{0,9-1,0}{2}$ | $\frac{1,0-1,1}{1}$ | $\frac{1,4-1,7}{1}$ | | | |
| | 2,83 | 5,7-6,9 | $\frac{1,1-1,2}{14}$ | $\frac{1,2-1,3}{6}$ | $\frac{1,6-1,9}{3}$ | $\frac{1,7-2,2}{2}$ | | |
| | 3,4 | 8,3-8,9 | $\frac{1,3-1,6}{18}$ | $\frac{1,4-1,7}{7}$ | $\frac{2,0-2,3}{4}$ | $\frac{2,3-2,7}{3}$ | $\frac{5,7-6,7}{0,5}$ | |
| | 6,8 | 11,9-14,0 | $\frac{1,6-1,9}{25}$ | $\frac{1,8-2,1}{13}$ | $\frac{2,4-2,6}{8}$ | $\frac{2,6-3,1}{5}$ | $\frac{6,3-6,9}{0,5}$ | $\frac{8,5-9,0}{0,5}$ |
| 40ХН2МЮА | 2,83 | 5,7-6,7 | $\frac{1,0-1,1}{14}$ | $\frac{1,2-1,3}{6}$ | $\frac{1,5-1,8}{3}$ | $\frac{1,7-2,1}{2}$ | | |
| 12Х18Н10Т | 2,83 | 2,9-3,7 | $\frac{0,8-0,9}{14}$ | $\frac{1,0-1,2}{6}$ | $\frac{1,5-1,8}{3}$ | $\frac{1,7-2,0}{2}$ | | |

- на третьем этапе произвести ЭЭЛ графитом при $W_p = 0,1$ Дж (т.е. с энергией разряда, обеспечивающей снижение величины шероховатости при ЭЦ ~ в 2 раза с 1,7-2,2 до 0,8-0,9 мкм) с производительностью 2 мин/см².

Шероховатость поверхности после ЭЭЛ на третьем этапе составляет $R_a = 0,8-0,9$ мкм.

Следует отметить, что одноэтапное ЭЭЛ графитовым электродом, с целью снижения шероховатости поверхности этой же стали после ЭЦ с энергией разряда 6,8 Дж, на любом режиме не позволяет достичь аналогичных результатов. Так например, последующее легирование при $W_p = 0,1$ Дж с производительностью 25 мин/см² позволяет снизить шероховатость поверхности до $R_a = 1,6-1,9$ мкм.

Для сравнения в табл. 3 приведены результаты поэтапного снижения шероховатости сталей 40ХН2МЮА и 12Х18Н10Т после ЭЦ с мощностью разряда $W_p = 2,83$ Дж.

Аналогичные исследования проводились на плоских образцах из стали 20. Результаты измерения шероховатости поверхности образцов до упрочнения сведены в таблице 4.

Образец №1 подвергался ЦЭЭЛ, при этом энергия разряда составляла $W_p = 2,83$ Дж. Результаты измерения шероховатости поверхности после упрочнения сведены в таблице 5.

Таблица 4 – Исходная шероховатость поверхности образцов из Стали 20

| Значение шероховатости поверхности в отдельных точках, мкм | | | | | | Среднее значение параметра шероховатости, мкм | |
|--|------|------|------|------|------|---|-------|
| R_a | | | | | | | |
| 0,70 | 0,39 | 0,51 | 0,59 | 0,67 | 0,45 | | |
| R_z | | | | | | R_a | R_z |
| 2,00 | 1,11 | 1,46 | 1,58 | 1,96 | 1,35 | 0,55 | 1,58 |

Таблица 5 – Шероховатость поверхности образцов из стали 20 после ЦЭЭЛ с энергией разряда $W_p = 2,83$ Дж

| Значение шероховатости поверхности в отдельных точках, мкм | | | | | | | Среднее значение параметра шероховатости, мкм | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|-------|
| R_a | | | | | | | | |
| 5,10 | 5,00 | 4,64 | 4,43 | 4,49 | 5,20 | 4,70 | | |
| R_z | | | | | | | R_a | R_z |
| 14,42 | 14,14 | 13,40 | 12,50 | 12,70 | 14,70 | 13,52 | 4,79 | 13,62 |

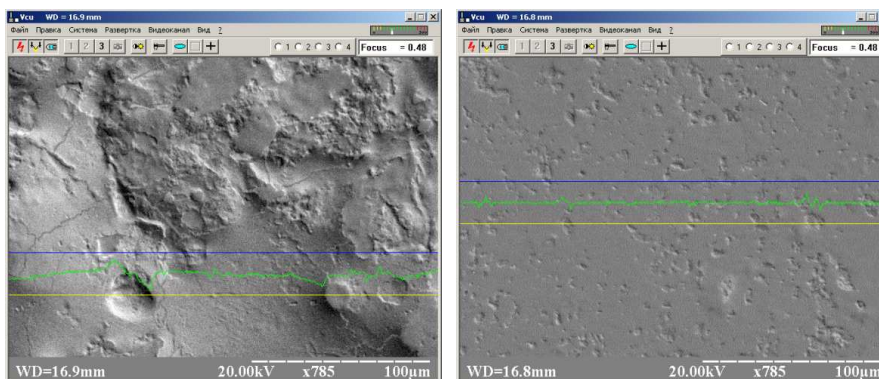
Образец №2 подвергался ЦЭЭЛ поэтапно при энергиях разряда $W_p = 2,83; 0,9$ и $0,1$ Дж с производительностью, соответственно, 0,5; 2,0 и 2,0 мин/см². Результаты измерения шероховатости поверхности сведены в таблице 6.

Таблица 6 – Шероховатость поверхности образцов из стали 20 после поэтапной цементации с энергиями разряда $W_p = 2,83; 0,9$ и $0,1$ Дж

| Значение шероховатости поверхности в отдельных точках, мкм | | | | | | | Среднее значение параметра шероховатости, мкм | |
|--|------|------|------|------|------|------|---|-------|
| R_a | | | | | | | | |
| 1,10 | 1,14 | 0,98 | 1,21 | 0,90 | 1,29 | 1,11 | R_a | R_z |
| R_z | | | | | | | | |
| 3,05 | 3,23 | 2,77 | 3,42 | 2,56 | 3,76 | 3,18 | 1,10 | 3,14 |

Ниже приведены результаты исследований на электронном микроскопе-анализаторе "РЕМ - 106 И", где проводилась оценка качества и топографии поверхностного слоя.

На рисунке 7 изображены участки поверхности образцов №1 и №2 при одинаковом увеличении. Поверхности изображены в режиме, который подчеркивает рельеф поверхности (режим «Торо»). Желтая линия соответствует 0, синяя 1 яркости. Зеленая линия показывает распределение контрастности вдоль желтой (базовой) линии. Поскольку изображение получено в режиме, когда контрастность формируется преимущественно микрорельефом поверхности, то можно по высоте зубьев на зеленой линии оценивать микронеровности данного микрорельефа.



а)

б)

Рисунок 7 – Участки поверхности образца № 1 (а) и № 2 (б)

Ниже на рисунках 8 и 9 представлены микрошлифы и распределение микротвердости в поверхностном слое стали 20 образцов № 1 и № 2.

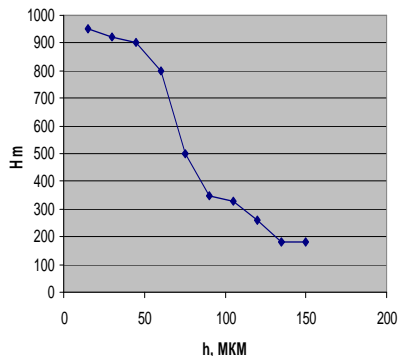
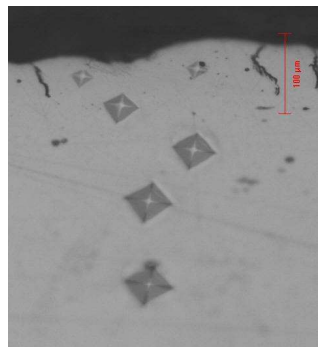


Рисунок 8 - Микрошлиф и распределение микротвердости в поверхностном слое стали 20 образца № 1

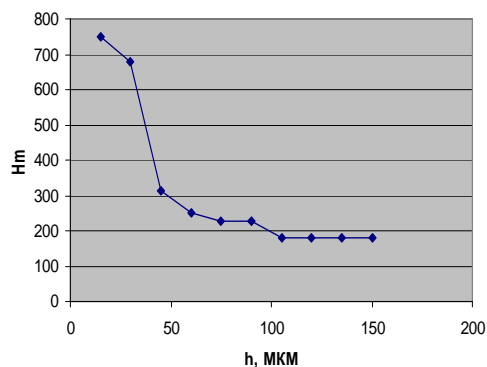
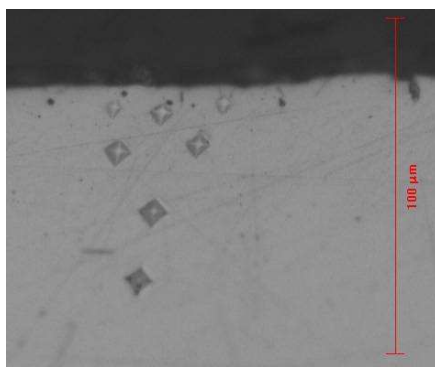


Рисунок 9 - Микрошлиф и распределение микротвердости в поверхностном слое стали 20 образца № 2

Анализируя распределение микротвердости в образцах №1 (цементация методом ЭЭЛ при $W_p = 2,83$ Дж) и № 2 (позатупная цементация методом ЭЭЛ при $W_p = 2,83; 0,9$ и $0,1$ Дж) можно сказать, что в обоих случаях наибольшая микротвердость отмечается в приповерхностных слоях. Для образца № 1 она составляет 920 – 950 HV и глубиной распространения до 60 мкм, а для образца № 2, соответственно - 690 – 720 HV и 30 мкм. По мере углубления, для обоих образцов величина микротвердости плавно снижается, и на глубине 130 и 100 мкм соответствует микротвердости основы – 180HV.

Снижение глубины и микротвердости упроченного слоя для образца № 2 можно объяснить тем, что при поэтапной ЦЭЛ поэтапно снижается энергия разряда с $W_p = 2,83$ до $0,9$ и $0,1$ Дж, постепенно уменьшается зона термического влияния и в уже упроченном слое происходит отпуск – нагрев закаленного сплава ниже температуры фазового превращения.

Таким образом, в результате поэтапной цементации:

- снижается шероховатость поверхностного слоя с $Ra = 4,79$ до $Ra = 1,10$ мкм и с $Rz = 13,62$ до $Rz = 3,14$ мкм;
- снижается микротвердость в «белом слое» (приповерхностном слое повышенной твердости) с 920 – 950 HV до 690 – 720 HV;
- снижается с 130 до 100 мкм общая глубина зоны повышенной твердости поверхностного слоя.

3. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЦЕМЕНТИРОВАННОГО СЛОЯ ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ МЯГКИХ АНТИФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

ЦЭЭЛ выполнялась на переносной установке ЭЭЛ с ручным вибратором, обеспечивающей энергию разряда в диапазоне 0,1...0,53 Дж «Элитрон - 22А» и установке электроэрозионного легирования большей мощности - «Элитрон - 52А» с энергией разряда до 6,8 Дж.

Процесс ЦЭЭЛ проводился в автоматическом режиме с помощью специального приспособления на различных режимах в диапазоне энергий разряда (W_p) от 0,1 до 6,8 Дж.

Для исследований использовали специальные образцы, изготовленные из стали 40Х 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. 10). Поверхности дисков перед ЦЭЭЛ шлифовались до $Ra = 0,5$ мкм. Образцы закреплялись в патроне токарного станка, после чего производилась ЦЭЭЛ, легирование серебром и медью и обработка БУФО. На всех этапах обработки измерялась шероховатость поверхности на приборе профилографе - профилометре мод. 201 завода «Калибр». Из дисков, в свою очередь, вырезались отдельные сегменты, из которых изготавливались шлифы для металлографических и дюрOMETрических исследований (рис. 11).



Рисунок 10 - Стальные образцы для исследования результатов ЦЭЭЛ и ЭЭЛ:
а) – серебром и б) – медью



Рисунок 11 - Шлифы для проведения металлографических и дюрOMETрических исследований

После изготовления 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 от поверхности. Замер микротвердости проводили на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием алмазной пирамиды.

При ЦЭЭЛ деталей использовались графитовые электроды марки ЭГ-4 ОСТ 229-83.

Процесс ЦЭЭЛ проводили с производительностью 5 мин/см².

Ниже представлены результаты исследования следующих серий образцов из стали 40Х:

- поэтапная цементация ($W_p = 2,83$ и $0,9$ Дж; с производительностью, соответственно, 5 и 2,0 мин/см²); обработка БУФО (образец № 3);

- цементация ($W_p = 2,83$ Дж; с производительностью 5 мин/см²); легирование серебром ($W_p = 0,4$ Дж; с производительностью 1 мин/см²); обработка БУФО (образец № 4);

- цементация ($W_p = 2,83$ Дж; с производительностью 5 мин/см²); легирование медью ($W_p = 0,4$ Дж; с производительностью 1 мин/см²); обработка БУФО (образец № 5).

В таблицах 7 и 8 представлены результаты измерения шероховатости образца № 3, соответственно, после поэтапной цементации и БУФО.

Таблица 7 - Шероховатость поверхности образца №3 после поэтапной цементации с энергиями разряда $W_p = 2,83$ и $0,9$ Дж

| Значение шероховатости поверхности в отдельных точках, мкм | | | | | | Среднее значение параметра шероховатости, мкм | |
|--|------|-------|-------|-------|-------|---|-------|
| R_a | | | | | | | |
| 3,09 | 2,73 | 2,19 | 3,41 | 2,31 | 2,24 | | |
| R_z | | | | | | R_a | R_z |
| 10,27 | 8,19 | 13,21 | 10,20 | 14,70 | 12,57 | 2,3 | 11,5 |

Таблица 8 - Шероховатость поверхности образца №3 после поэтапной цементации с энергиями разряда $W_p = 2,83$ и $0,9$ Дж и БУФО

| Значение шероховатости поверхности в отдельных точках, мкм | | | | | | | Среднее значение параметра шероховатости, мкм | | |
|--|------|------|------|------|------|------|---|-------|--|
| R_a | | | | | | | | | |
| 0,7 | 0,47 | 0,52 | 0,64 | 0,59 | 0,45 | 0,7 | | | |
| R_z | | | | | | | R_a | R_z | |
| 1,93 | 1,31 | 1,49 | 1,81 | 1,67 | 1,29 | 1,93 | 0,56 | 1,58 | |

На рисунке 12 изображен микрошлиф, и распределение твердости в образце №3 из стали 40X. Как видно из рисунка максимальная микротвердость образца (до 650 HV) присутствует на его поверхности и по мере углубления плавно снижается до микротвердости основы, которая составляет 220 HV. Глубина зоны повышенной твердости при этом распространяется до 100 мкм.

Таким образом, после поэтапной цементации с энергиями разряда $W_p = 2,83$ и $0,9$ Дж и БУФО шероховатость поверхности (R_a) круглого образца из стали 40X, составляет 0,56 мкм, при этом глубина зоны повышенной твердости распространяется до 100 мкм.

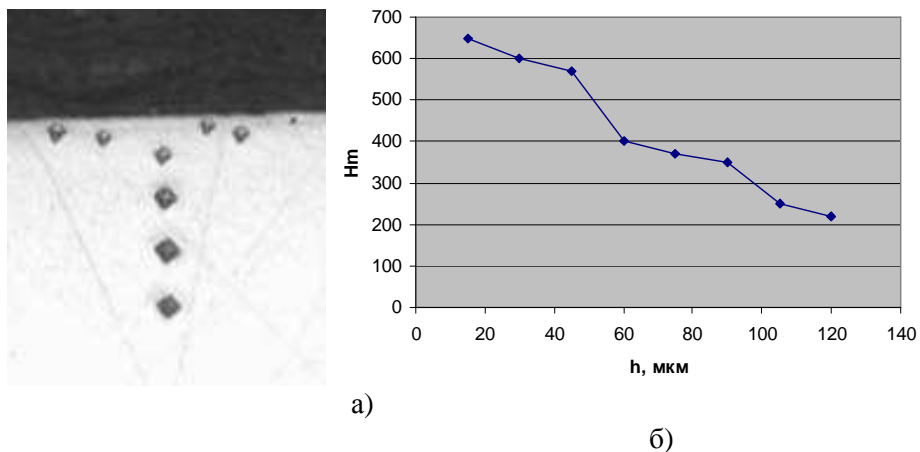


Рисунок 12 - Микрошлиф (а) и распределение микротвердости в поверхностном слое стали 40X образца №3 (б)

Результаты измерения шероховатости поверхности образца №4 после поэтапной цементации и электроэрозионного легирования серебром представлены в таблице 9 и с последующей обработкой БУФО в табл. 10.

Следует отметить, что при ЭЭЛ серебром диаметр образца №4 увеличился на 0,05 мм, а после обработки БУФО снизился на 0,03 мм.

Таблица 9 - Шероховатость поверхности образца №4 после поэтапной цементации и ЭЭЛ серебром

| Значение шероховатости поверхности в отдельных точках, мкм | | | | | | Среднее значение параметра шероховатости, мкм | |
|--|------|------|------|------|------|---|------|
| R _a | | | | | | | |
| 1,92 | 3,3 | 1,55 | 2,57 | 2,15 | 2,04 | R _a R _z | |
| R _z | | | | | | | |
| 5,43 | 9,37 | 4,38 | 7,26 | 6,17 | 5,76 | 2,26 | 6,40 |

На рисунке 13 изображен микрошлиф, и распределение микротвердости в образце №4 из стали 40X. Как видно из рисунка на поверхности образца располагается слой с твердостью порядка 80 – 90 HV, который ниже микротвердости основы (220 HV) и глубиной до 35 мкм. Далее, по мере углубления микротвердость плавно повышается и на глубине ~ 60 мкм достигает максимального значения 470 HV, после чего снова плавно понижается до глубины 100 мкм, на которой соответствует микротвердости основы.

Таблица 10 - Шероховатость поверхности образца №4 после поэтапной цементации, ЭЭЛ серебром и обработкой БУФО

| Значение шероховатости поверхности в отдельных точках, мкм | | | | | | | Среднее значение параметра шероховатости, мкм | |
|--|------|------|------|------|------|------|---|-------|
| R_a | | | | | | | | |
| 0,59 | 0,86 | 1,27 | 0,47 | 1,33 | 0,76 | 0,59 | R_a | R_z |
| R_z | | | | | | | | |
| 1,68 | 2,44 | 3,59 | 1,33 | 3,76 | 2,14 | 1,68 | 0,88 | 2,49 |

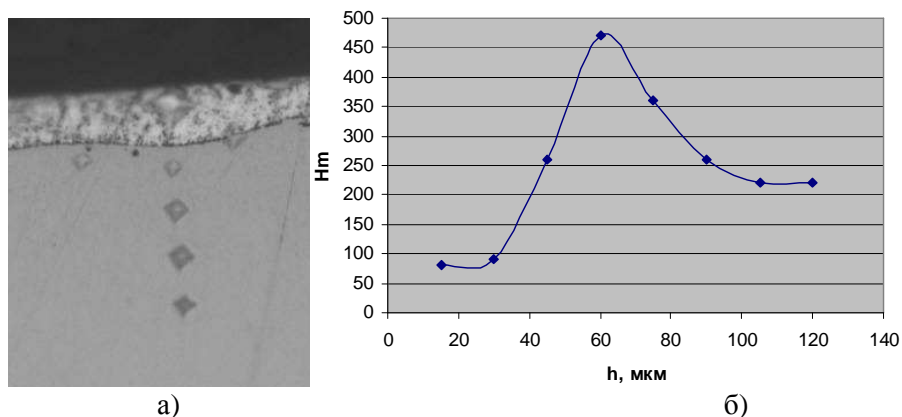


Рисунок 13 - Микрошлиф (а) и распределение микротвердости в поверхностном слое стали 40X образца № 4 (б)

Результаты измерения шероховатости поверхности образца №5 после поэтапной цементации и электроэрозионного легирования медью представлены в таблице 11 и с последующей обработкой БУФО в таблице 12.

Следует отметить, что при ЭЭЛ серебром диаметр образца №4 увеличился на 0,04 мм, а после обработки БУФО снизился на 0,02 мм.

Таблица 11 - Шероховатость поверхности образца №5 после поэтапной цементации и ЭЭЛ медью

| Значение шероховатости поверхности в отдельных точках, мкм | | | | | | Среднее значение параметра шероховатости, мкм | |
|--|-------|------|------|------|------|---|-------|
| R_a | | | | | | | |
| 3,02 | 4,46 | 2,5 | 3,38 | 2,14 | 3,41 | R_a | R_z |
| R_z | | | | | | | |
| 8,54 | 12,63 | 7,07 | 9,67 | 6,06 | 10,2 | 3,15 | 9,03 |

Таблица 12 - Шероховатость поверхности образца №5 после поэтапной цементации, ЭЭЛ медью и обработкой БУФО

| Значение шероховатости поверхности в отдельных точках, мкм | | | | | | | Среднее значение параметра шероховатости, мкм | |
|--|------|------|------|------|------|------|---|----------------|
| R _a | | | | | | | | |
| 0,55 | 0,65 | 0,91 | 0,62 | 0,87 | 0,71 | 0,51 | R _a | R _z |
| R _z | | | | | | | | |
| 3,05 | 2,40 | 2,35 | 2,64 | 2,48 | 3,01 | 3,25 | 0,80 | 3,19 |

На рисунке 14 изображен микрошлиф, и распределение микротвердости в образце №5 из стали 40X. Как видно из рисунка на поверхности образца располагается слой с твердостью порядка 140 – 170 HV, который ниже микротвердости основы (220 HV) и глубиной до 40 мкм. Далее, по мере углубления микротвердость плавно повышается и на глубине ~ 75 мкм достигает максимального значения 510 HV, после чего снова плавно понижается до глубины 120 мкм и на которой соответствует микротвердости основы.

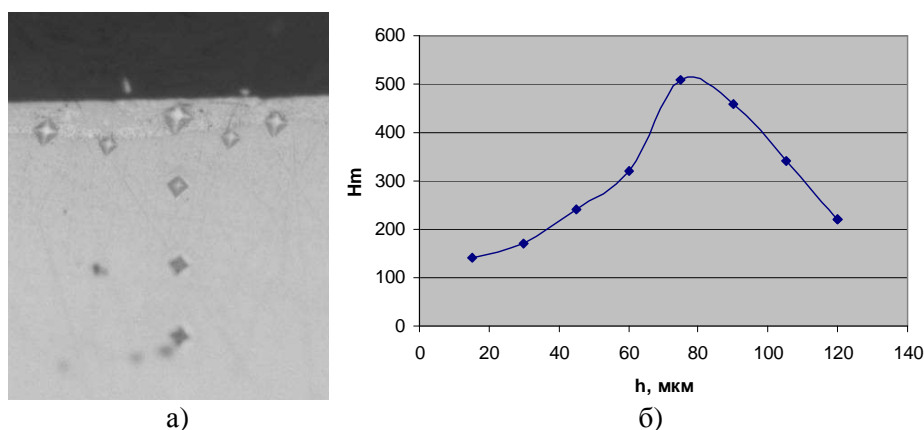


Рисунок 14 - Микрошлиф (а) и распределение микротвердости в поверхностном слое стали 40X образца №5 (б)

Анализируя проведенные исследования можно сказать, что при нанесении мягких антифрикционных металлов, например меди или серебра на участки, цементированные методом ЭЭЛ, поверхность детали формируется из двух слоев:

- слой из мягкого антифрикционного металла, находящийся снаружи;
- слой из твердого износостойкого металла, находящийся ниже.

Нанесение мягкого антифрикционного металла позволяет при последующей обработке БУФО получить качественный износостойкий слой с требуемой шероховатостью.

ВЫВОДЫ

1. В результате нанесения на поверхность, цементированных методом ЭЭЛ деталей, мягких антифрикционных металлов, например, меди или серебра, можно существенно повысить качество их поверхностного слоя. При последующей обработке БУФО можно получить износостойкий слой с требуемой шероховатостью.

2. Мягкие антифрикционные покрытия, наносимые на цементированные методом ЭЭЛ участки, можно использовать в парах трения для приработки поверхностей деталей.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Тарельник В.Б. Модернизация и ремонт роторных машин: монография / В.Б. Тарельник, В.С. Марцинковский.-Сумы: Издательство «Казацкий вал», 2005.-364 с.
2. Гаркунов Д.Н. Триботехника / Гаркунов Д.Н. . – М.: Машиностроение, 1989. – 327с.
3. Уотерхауз Р.Б. Фреттинг – коррозия / Уотерхауз Р.Б. Пер. с англ. – Л.: Машиностроение, 1976. – 270 с.
4. Тарельник В.Б. Проблеми захисту деталей гнучких муфт турбокомпресорів від фретінг-корозії /Тарельник В.Б., Марцинковський В.С., Братущак М.П. // Вісник СНАУ. – Випуск 12, 2004.– с. 89-95.
5. Пат. 66105 Україна, МПК (2006) В23Н 5/00. Спосіб обробки сполучних поверхонь деталей (варіанти) / Марцинковский В.С., Тарельник В.Б.; заявл. 25.07.2003; опубл. 10.04.08, Бюл. № 7.
6. Пат. № 2410212 Российская Федерация, МПК В23Н 9/00. Способ обработки сопрягаемых поверхностей стальных или чугунных деталей / Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Коноплянченко Е.В., Олейник И.А.; заявл. 24.02.09; опубл. 27.01.11, Бюл. № 3.
7. Л.Т. Балацкий. Прочность прессовых соединений /Л.Т. Балацкий. – К.: Техніка, 1982. – 152с.
8. Тарельник В.Б. Управление качеством поверхностных слоев деталей комбинированным электроэрозионным легированием / Тарельник В.Б. – Сумы.: Изд-во «МақДен», 2002. – 323 с.
9. Пат. 2337796. Российская Федерация. МПК В 23Н 9/00. Способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием / Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Белоус А.В.; заявл. 05.10.2006; опубл. 10.04. 2008, Бюл. № 31.- 3с.

10. Тарельник В.Б. Повышение качества подшипников скольжения: монография / Тарельник В.Б., Марцинковский В.С., Антошевский Б. - Сумы: Издательство «МакДен», 2006.-160 с.

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF FITS WITH A TIGHTNESS
DETAILS SURFACES PROTECTION FROM FRETTING CORROSION**

**Vyacheslav Tarelnik,
Sumy National Agrarian University**

**Vasily Martsinkovsky,
TRIZ Ltd**

**Maxim Bratushchak,
Sumy National Agrarian University**

**Bogdan Antoszewski,
Kielce University of Technology**

SUMMARY

Presented of researches results of steel details surface layers parameters of quality, which case hardening by a method electroerosive alloying (CEEA) and details with CEEA and covered by soft antifrictional metals, after abrasive-free ultrasonic finishing processin.