

П. Е. Жарков, к.т.н., доцент, академик УТА, вице-президент, Лауреат Государственной премии (Концерн «NICMAS», г. Сумы, Украина), Т. П. Волошко, старший преподаватель, А. А. Носко, аспирант (Сумский национальный аграрный университет, г. Сумы, Украина)

## Новый метод цементации стальных деталей электроэрозионным легированием

*В работе представлены результаты качественных параметров (структуры, микротвердости, шероховатости и сплошности), поверхностных слоев сталей 38ХМЮА и 40ХН2МА, сформированных методом электроэрозионного легирования (ЭЭЛ) графитовым электродом.*

*На основании проведенных исследований предложен новый способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием, отличающийся тем, что с целью снижения шероховатости поверхности деталей машин, легирование углеродом (графитовым электродом) проводят поэтапно, используя на каждом последующем этапе режим с меньшей энергией разряда.*

**Ключевые слова:** электроэрозионное легирование, сталь, цементация, структура, микротвердость, шероховатость, сплошность.

*В роботі представлені результати якісних параметрів (структури, мікротвердості, шорсткості і суцільності), поверхневих шарів сталей 38ХМЮА і 40ХН2МА, сформованих методом електроерозійного легування (ЕЕЛ) графітовим електродом.*

*На підставі проведених досліджень запропоновано новий спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням, що відрізняється тим, що з метою зниження шорсткості поверхні деталей машин, легування вуглецем (графітовим електродом) проводять поетапно, використовуючи на кожному наступному етапі режим з меншою енергією розряду.*

**Ключові слова:** електроерозійне легування, сталь, цементация, структура, мікротвердість, шорсткість, суцільність.

*The paper presents the results of qualitative parameters (structure, microhardness, roughness and continuity) of the surface layers of 38ХМЮА and 40ХН2МА steels, formed by the method of electroerosive alloying (EEA) with graphite electrode.*

*Based on the research, a new method for carburization of steel parts by electroerosive alloying was proposed, characterized in that in order to reduce the surface roughness of machine parts, alloying with carbon (graphite electrode) is carried out in stages, using a mode with lower discharge energy at each subsequent stage.*

**Keywords:** electroerosive alloying, steel, carburization, structure, microhardness, roughness, continuity.

### Введение

Анализ существующих технологических способов повышения надежности и долговечности деталей машин свидетельствует о том, что во многих странах активно разрабатываются, испытываются и внедряются в производство все новые методы повышения качества их поверхностных слоев, а также совершенствуются хорошо известные.

В настоящее время одним из наиболее рациональных и эффективных способов защиты от чрезмерного износа является использование специально нанесенных покрытий или упрочненных поверхностных слоев.

Таким образом, работы, направленные на создание новых методов упрочнения поверхностей деталей машин или совершенствование известных, являются актуальными и своевременными.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известен способ электроэрозионного легирования (ЭЭЛ) металлической поверхности - процесс перенесения материала на обрабатываемую поверхность искровым электрическим разрядом [1]. Метод имеет ряд специфических особенностей, одной из которых является то, что в процессе легирования происходит диффузионное насыщение поверхности детали составными элементами (элементом) анода, например, при ЭЭЛ графитовым электродом.

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

По сравнению с цементацией, ЭЭЛ графитовым электродом не только обладает всеми достоинствами сравниваемого метода, то есть упрочнение поверхности

детали осуществляется при сохранении свойств исходного материала детали, и при этом не происходит ее коробления, а малогабаритные установки позволяют выполнять упрочнение на любом имеющемся оборудовании. Производительность процесса при этом составляет 1-5 мин/см<sup>2</sup>.

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.

ЭЭЛ графитовым электродом можно выделить в отдельное направление, позволяющее формировать на деталях машин поверхностные слои повышенной износостойкости без изменения исходного размера детали.

Известен способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием (ЦЭЭЛ) [2], который имеет ряд достоинств, основными из которых являются: достижение 100% сплошности упрочнения 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 и др.

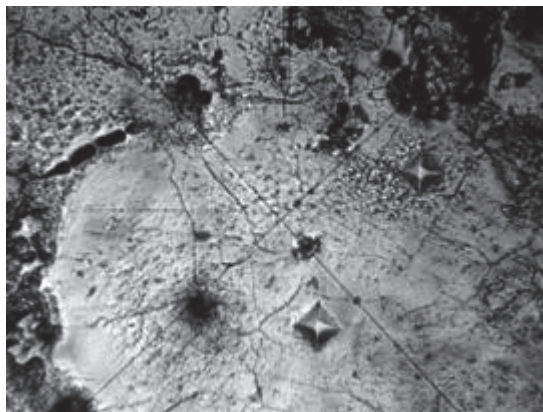
При ЦЭЭЛ толщина упрочненного слоя зависит от энергии разряда и времени легирования. С увеличением энергии разряда и времени легирования толщина упрочненного слоя увеличивается. При этом возрастает и шероховатость поверхности. Так при ЦЭЭЛ среднеуглеродистой легированной стали 40Х (Ra = 0,5мкм) с производительностью 5 мин/см<sup>2</sup> 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.

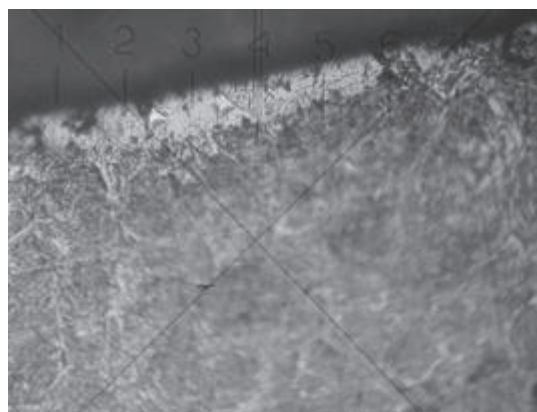
С целью снижения шероховатости поверхности после ЦЭЭЛ применяют, как правило, методы поверхностно-пластического деформирования (ППД).

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 (на 10%) необходимого удельного усилия обкатки, обуславливает



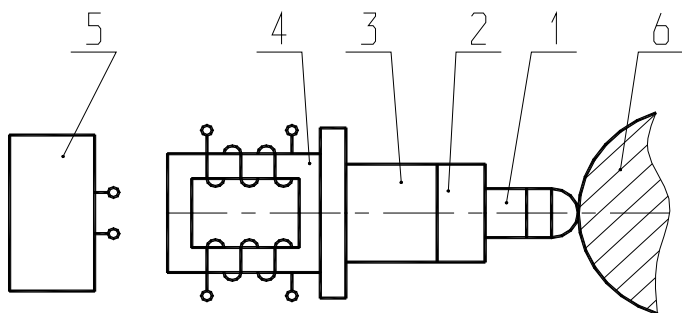
а)



б)

**Рис. 1. Структура и микротвердость стали 40X на поверхности (а) и по глубине слоя (б) после ЭЭЛ (графитом ЭГ-4) + ППД (обкатка шариком  $\varnothing 10$  мм с максимальным удельным усилием  $P = 1650$  Н).**

возникновение в поверхностном слое, предварительно ЭЭЛ углеродом, микротрещин (рис. 1) [3]. Микротре-



**Рис. 2. Схема ультразвуковой установки с деформирующим инструментом в виде полусферы:** 1 – деформирующий инструмент; 2 – концентратор УЗК; 3 – волновод; 4 – преобразователь УЗК; 5 – генератор; 6 – обрабатываемая деталь.

щины, являясь концентраторами напряжений, могут привести к разрушению деталей, особенно тех, которые в процессе работы подвергаются знакопеременным нагрузкам.

В последнее время, с целью снижения шероховатости поверхности, применяют метод БУФО (рис. 2).

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.

В [1] для снижения шероховатости поверхности покрытия, нанесенного методом ЭЭЛ, достаточно в качестве заключительной операции после легирования соот-

ветствующим материалом провести «мягкое» легирование графитом. В этом случае образуется не слой графита, а некоторый диффузионный слой, причем происходит выброс металла катода (детали) в местах приложения импульсов, т.е. распыление наиболее выступающих частей поверхности. В результате происходит сглаживание гребешков и, следовательно, снижается шероховатость поверхности.

С целью снижения шероховатости поверхности деталей машин, с сохранением качества поверхностного слоя (отсутствии микротрещин, наличие слоя повышенной твердости, 100%-я сплошность и др.) и таким образом расширения области их применения, нами предлагается после ЭЭЛ углеродом (графитовым элек-

тродом) 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.

#### Методы решения

Ниже приведена методика и результаты проведенных исследований.

ЦЭЭЛ выполнялась на переносных установках ЭЭЛ с ручным вибратором, обеспечивающих энергию разряда в диапазоне 0,1...0,68 Дж («ЭИЛ-8А», «Элитрон-22А») и установках электроэрозионного легирования большей мощности («Элитрон-52А» и «ЭИЛ-9») с энергией разряда до 6,8 Дж.

**Таблица 1. Производительность процесса ЦЭЭЛ.**

Энергия разряда ( $W_p$ ), Дж	0,1	0,31	0,53	0,9	2,83	3,4	6,8
Производительность, м/см <sup>2</sup>	2,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5

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.

Производительность процесса ЦЭЭЛ, в зависимости от режима легирования представлена в табл. 1.

Для исследований использовали специальные образцы, изготовленные из сталей 38ХМЮА и 40ХН2МА в виде катушки, состоящей из двух дисков, диаметром 50 мм и шириной 10 мм, соединенных между собой про-

ставкой диаметром 15 мм и имеющей два технологических участка такого же диаметра (рис 3, а). Поверхности дисков перед ЦЭЭЛ шлифовали до  $Ra = 0,5$  мкм. Образцы закрепляли в патроне токарного станка, после чего производилась ЦЭЭЛ (рис. 4,а), обработка БУФО (рис. 4, б) и поэтапное снижение шероховатости легированием графитовым электродом.

Обработка БУФО осуществлялась с применением магнитострикционного преобразователя ПМС-39 и ультразвукового генератора УЗУ-030, техническая характеристика которого приведена в табл. 2.

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



Рис. 3. Стальные образцы для исследования результатов ЦЭЭЛ.

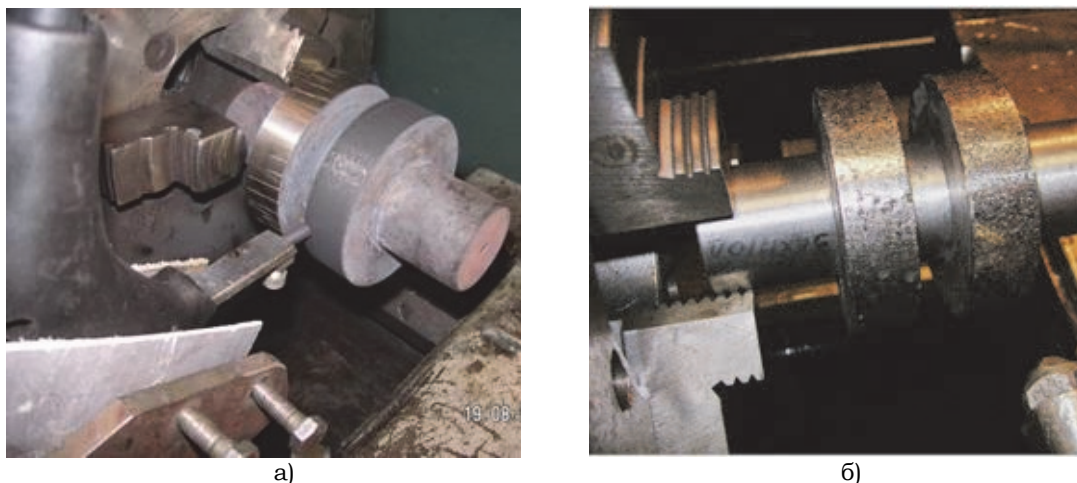


Рис. 4. Реализация метода обработки: а - ЦЭЭЛ с использованием токарного станка, б - БУФО стального образца после ЦЭЭЛ.

разцы разрезались на отдельные диски (диаметром 50 мм и шириной 10 мм) (рис. 3, б). Из дисков, в свою очередь, вырезались отдельные сегменты, из которых изготавливались шлифы для 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 под нагрузкой 0,05 Н.

При ЦЭЭЛ деталей использовались графитовые электроды марок ЭГ-2, ЭГ-3, ЭГ-4 ОСТ 229-83 и др. Процесс ЦЭЭЛ проводили с производительностью 5 мин/см<sup>2</sup>.

#### Ожидаемые результаты

При ЦЭЭЛ с производительностью 5 мин/см<sup>2</sup> круг-

лых образцов из сталей 38ХМЮА и 40ХН2МЮА на установке «Элитрон-22А», с использованием 6-го режима ( $W_p=0,53$  Дж) шероховатость поверхности ( $Ra$ ) повышается с 0,5 до 1,4-1,7 мкм. Окончательная обработка БУФО снижает шероховатость поверхности до  $Ra=0,6$  мкм.

Толщина упрочненного слоя в этом случае не превышает 35 мкм, а микротвердость, соответственно 950 и 800 НV.

С увеличением режима ЦЭЭЛ до  $W_p=0,9$  Дж, с использованием установки «Элитрон-52А» глубина упрочненного слоя увеличивается до 150–170 мкм (рисунки 5 и 6). 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. С увеличением режима ЦЭЭЛ 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 недоста-

Таблица 2. Техническая характеристика ультразвукового генератора УЗУ-030.

Наименование параметра	Выходное значение
Питание от сети переменного тока с номинальным напряжением, В	220 ± 10 %
Потребляемая мощность, Вт	300
Форма выходного сигнала	прямоугольная
Мощность выходная, Вт	500
Частота рабочая, кГц	18,6
Амплитуда колебаний УЗ волновода, мкм	10
Габаритные размеры, мм	400×450×280
Масса, кг	25,4

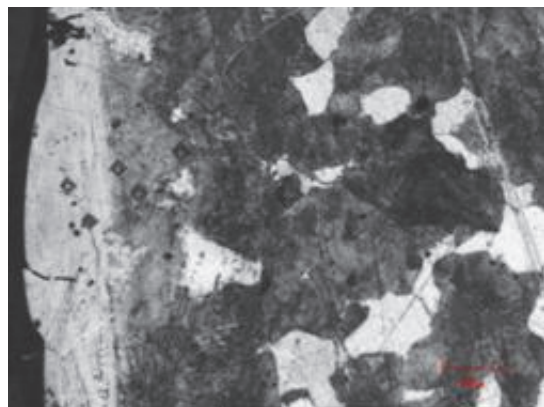


точным для многих деталей машин. Дальнейшее увеличение толщины слоя повышенной твердости сопровождается формированием еще большей шероховатости поверхности.

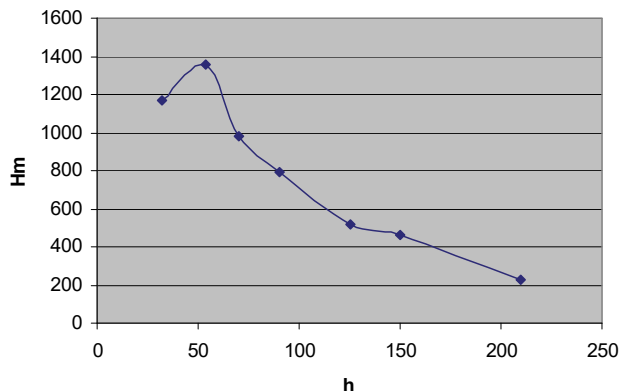
Результаты исследований параметров качества поверхностного слоя (общей толщины слоя повышенной твердости; максимальной микротвердости на поверхности, HV; шероховатости после ЦЭЭЛ и БУФО) сталей

38ХМЮА и 40ХН2МЮА сведены в табл. 3.

В табл. 4 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  $Ra=5,7-6,9$  мкм. После ЭЭЛ графитовым электродом с производительностью 2

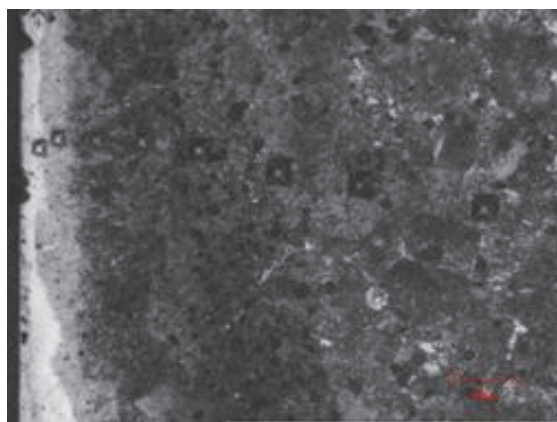


а)

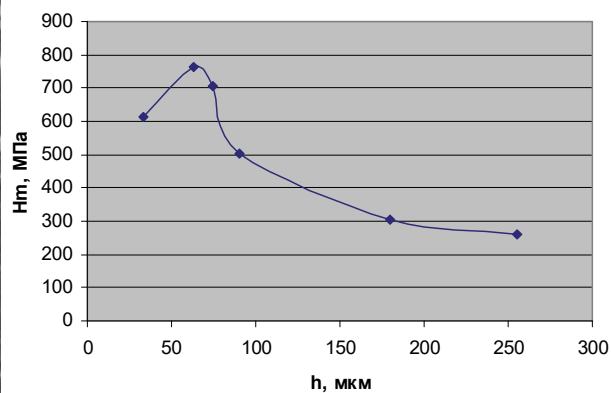


б)

**Рис. 5. Распределение микротвердости по глубине слоя при ЭЭЛ стали 38ХМЮА углеродом ( $W_p = 0,9$  Дж).**



а)



б)

**Рис. 6. Распределение микротвердости по глубине слоя при ЭЭЛ стали 40ХН2МЮА углеродом ( $W_p = 0,9$  Дж).**

Таблица 3. 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, $Ra$ , мкм	
				после ЭЦ	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
40ХН2МЮА	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

Таблица 4. Результаты максимального снижения шероховатости поверхности стальных образцов после ЦЭАЛ при использовании режимов легирования с различной энергией разряда.

Марка стали	Энергия разряда, $W_p$ , Дж	Шероховатость, $R_a$ , мкм						
		После ЦЭАЛ	Производительность, мин/см <sup>2</sup>					
			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	$\frac{0,8-0,9}{14}$	$\frac{1,0-1,2}{6}$	$\frac{1,5-1,8}{3}$	$\frac{1,7-2,0}{2}$		

мин/см<sup>2</sup> (2 прохода с производительностью 1 мин/см<sup>2</sup>) 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.

После ЭАЛ 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/см<sup>2</sup> 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 ЦЭАЛ с энергией разряда 6,8 Дж, которая составляет  $R_a = 11,9-14,0$  Дж необходимо:

- на первом этапе произвести ЦЭАЛ при  $W_p = 2,83$  Дж (т.е. с энергией разряда, обеспечивающей снижение величины шероховатости при ЦЭАЛ ~ в 2 раза с  $11,9-14,0$  до  $5,7-6,9$  мкм) с производительностью 0,5 мин/см<sup>2</sup>. Шероховатость поверхности после ЭАЛ на первом этапе составляет  $R_a = 6,3-6,9$  мкм;
- на втором этапе произвести ЦЭАЛ при  $W_p = 0,9$  Дж (т.е. с энергией разряда, обеспечивающей снижение величины шероховатости при ЦЭАЛ ~ в 3 раза с  $6,3-6,9$  до  $1,7-2,1$  мкм) с производительностью 2 мин/см<sup>2</sup>. Шероховатость поверхности после ЭАЛ на втором этапе составляет  $R_a=1,7-2,2$  мкм;
- на третьем этапе произвести ЦЭАЛ при  $W_p = 0,1$  Дж (т.е. с энергией разряда, обеспечивающей снижение величины шероховатости при ЦЭАЛ ~ в 2 раза с  $1,7-2,2$  до  $0,8-0,9$  мкм) с производительностью 2 мин/см<sup>2</sup>. Шероховатость поверхности после ЭАЛ на третьем этапе составляет  $R_a=0,8-0,9$  мкм.

Следует отметить, что одноэтапное ЭАЛ графитовым электродом, с целью снижения шероховатости поверхности этой же стали после ЦЭАЛ с энергией разряда 6,8 Дж, на любом режиме не позволяет достичь анало-

гичных результатов. Так, например, последующее легирование при  $W_p=0,1$  Дж с производительностью 25 мин/см<sup>2</sup> 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 ЦЭАЛ с мощностью энергии разряда  $W_p = 2,83$  Дж.

#### ВЫВОДЫ

Таким образом, на основании проведенных исследований предложен новый способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием, отличающийся тем, что с целью снижения шероховатости поверхности деталей машин, предлагается после ЭАЛ углеродом (графитовым электродом) производить легирование этим же электродом, но поэтапно. На каждом последующем этапе необходимо использовать режим ЭАЛ с такой энергией разряда, при которой шероховатость поверхности этого же, но нелегированного (исходного) материала будет 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.

#### Литература:

1. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей. - М.: Машиностроение, 1976. - 46 с.
2. 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.- 3с.
3. Тарельник В.Б., Марцинковский В.С., Антошевский Б. Повышение качества подшипников скольжения: Монография. - Сумы: Издательство «МакДен», 2006.- 160 с.





лидер турбокомпрессорного машиностроения

# ПОЛТАВСКИЙ ТУРБОМЕХАНИЧЕСКИЙ ЗАВОД

предприятие основано в 1889 году

УКРАИНА, 36029

г. Полтава, ул. Зеньковская, 6

тел.: +38 /0532/ 51 14 35

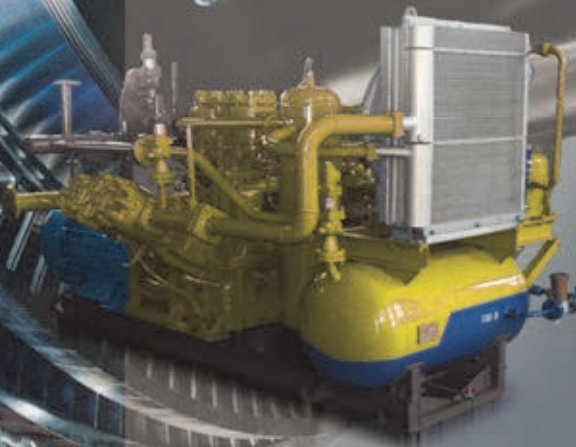
тел./факс: +38 /0532/ 51 16 91

e-mail: [market@ptmz.com.ua](mailto:market@ptmz.com.ua)

[www.ptmz.com.ua](http://www.ptmz.com.ua)

## Традиции, проверенные временем

- компрессоры широкого спектра применения
- узлы и детали турбин
- передвижные дизельные сварочные агрегаты
- насосные агрегаты
- маслоочистители



- проектирование
- энергоаудит
- изготовление
- сервисное обслуживание

BUREAU VERITAS  
Certification



ISO 9001  
ISO 14001