

Г.В. Кирик, д.т.н., доцент, президент (концерн «NICMAS», г. Сумы, Украина),
 В.Б. Тарельник, д.т.н., проф. (Сумский национальный аграрный университет, г. Сумы, Украина),
 П.Е. Жарков, к.т.н., доцент, академик УТА, вице-президент (концерн «NICMAS», г. Сумы, Украина),
 Б. Антошевский, д.т.н., проф. (Kielce University of Technology, Польша),
 И.Е. Волошин, аспирант (Сумский национальный аграрный университет, г. Сумы, Украина)

Управление качеством поверхностных слоев валов роторов комбинированными технологиями электроэрозионного легирования и поверхностной пластической деформации

Представлены результаты влияния методов поверхностного пластического деформирования (ППД) – алмазного выглаживания (АВ) и обкатки шариком (ОШ) на качественные параметры (шероховатость, распределение микротвердости по глубине слоя и подслоя, остаточные напряжения, усталостную прочность) поверхностных слоев стальных подложек, сформированных методом электроэрозионного легирования (ЭЭЛ). Предложены наиболее рациональные усилия деформации и состав электроэрозионных покрытий, которые обеспечивают наличие в поверхностном слое благоприятных остаточных напряжений сжатия и увеличение усталостной прочности.

Ключевые слова: электроэрозионное легирование, поверхностное пластическое деформирование, качество поверхностного слоя, шероховатость, микротвердость, остаточные напряжения, усталостная прочность.

Представлені результати впливу методів поверхневого пластичного деформування (ППД) - алмазного вигладжування (АВ) і обкатки кулькою (ОК) на якісні параметри (шорсткість, розподіл микротвердості по глибині шару і підшару, залишкові напруги, втомну міцність) поверхневих шарів сталевих підкладок, сформованих методом електроерозійного легування (ЕЕЛ). Запропоновано найбільш раціональні зусилля деформації і склад електроерозійних покриттів, які забезпечують наявність в поверхневому шарі сприятливих залишкових напружень стиску та збільшення втомної міцності.

Ключові слова: електроерозійне легування, поверхнєве пластичне деформування, якість поверхневого шару, шорсткість, микротвердсть, залишкові напруги, втомна міцність.

Presented the results of the influence of surface plastic deformation methods and diamond ball rolling on the qualitative parameters (roughness, microhardness distribution over the depth of the layer and sublayer, residual stresses, fatigue strength) of the surface layers of steel substrates formed by the electro-erosion alloying. The most rational deformation efforts and the composition of electroerosive coatings are proposed that ensure the presence in the surface layer of favorable residual compressive stresses and an increase in fatigue strength/

Key words: electroerosion alloying, surface plastic deformation, surface layer quality, roughness, microhardness, residual stresses, fatigue strength.

Постановка проблемы

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

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

Несмотря на неоспоримые достоинства метод ЭЭЛ имеет и ряд недостатков (увеличение шероховатости поверхности, возникновение в поверхностном слое растягивающих остаточных напряжений, снижение усталостной прочности), которые нередко ограничивают его применение для более широкого круга деталей машин.

С целью повышения таких эксплуатационных характеристик деталей, как выносливость, износостой-

кость все шире применяют методы поверхностного пластического деформирования (ППД). Очевидно, применение ППД в сочетании с ЭЭЛ поверхностного слоя представляет особый интерес, так как эти технологии взаимно дополняют друг друга [2-4].

Работы, проводимые в этом направлении актуальны.

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

Методика исследований

Для исследований влияния ППД на шероховатость, микротвердость и другие свойства поверхностного слоя с КЭП изготавливали образцы из стали 45 и 40Х ($D_{нар} = 50$ мм, $L = 200-250$ мм), по всей поверхности которых проводилось ЭЭЛ твердыми износостойкими (хром, твердые сплавы группы ВК сплав ВНС-2 и др.) и мягкими антифрикционными (индий, медь, олово и др.) материалами в различной последовательности на установках ЭЭЛ как с ручным вибратором, так и механизированных. Затем на каждом образце проводилось ППД методами алмазного выглаживания (АВ), и обкаткой шариком (ОШ). Каждому режиму соответствовала дорожка на образце шириной 10-15 мм.

АВ выполнялось на токарном станке с помощью пружинно-гидравлического приспособления выглажи-

вателями АСПК-3 с радиусом вершины $R = 3, 4$ мм в зависимости от твердости покрытия при скорости $V=40...80$ м/мин, усилия выглаживания $P = 60...350$ Н и подаче $S = 0,02...0,07$ мм/об.

ОШ проводилась на токарном станке пружинно-штоковым приспособлением с шариковыми головками $\varnothing 10$ и $\varnothing 19$ мм. Максимальное усилие обкатки для шарика $\varnothing 10$ мм - 1200 Н, а для $\varnothing 19$ мм - 3000 Н. Подача $S = 0,05...0,21$ мм/об, скорость $V = 30$ м/мин. Смазка производилась индустриальным маслом.

После упрочнения ППД из каждого образца с каждой дорожки вырезались сегменты, из которых, в свою очередь, изготавливались шлифы для проведения металлографических исследований структуры упрочненного слоя, микротвердости, сплошности и т.п.

Исследование осевых остаточных напряжений, являющихся наиболее опасными для валов, проводили на призматических образцах из стали 45 размером $70 \times 5 \times 2$ мм по методике И.А. Биргера путем послойного электрополирования напряженных слоев на установке типа «Пион».

По результатам исследования строились графики распределения остаточных напряжений по глубине для образцов различных серий. В каждой серии исследовалось не менее трех образцов. Состояние поверхностного слоя при исследовании остаточных напряжений определялось для следующих серий: ЭАЛ Cu; ЭАЛ Cu + ЭАЛ Cr; ЭАЛ Cu + ППД; ЭАЛ Cu + ЭАЛ Cr + ППД.

Следует отметить, что ЭАЛ медью и хромом производилось на установке с ручным вибратором «УИЛВ-8», соответственно, при токе короткого замыкания $I_{к.з.} = 0,5-0,6$ А; напряжении холостого хода $U_{х.х.} = 56,1$ В; емкости накопительного конденсатора $C = 20$ мкФ и $I_{к.з.} = 2,0 - 2,2$ А; $U_{х.х.} = 68,7$ В; $C = 300$ мкФ.

ППД покрытия из меди производилось ОШ $\varnothing 19$ мм с усилием 500 Н, а КЭП ЭАЛ Cu + Cr - ОШ $\varnothing 19$ мм - с усилием 1500 Н.

Усталостные испытания проводили на машине УП-50 на базе 1×10^6 циклов. Для определения предела выносливости были изготовлены натурные образцы из стали 45 с рабочим диаметром 50 мм.

Предел выносливости определялся с точностью 10 МПа для тех же серий, что и при нахождении остаточных напряжений.

Обсуждение результатов исследований

Влияние удельного усилия ОШ на микротвердость слоя и подслоя образцов с КЭП показано, соответственно, на рисунках 1 и 2.

На рис. 1 видно, что поверхностные слои, имеющие на поверхности высокую микротвердость (11000 и 8000 МПа), соответственно для покрытий состава Cu + BK8 и BK8 + Cu + BK8 с увеличением удельного усилия ОШ не упрочняются.

Микротвердость более мягкого КЭП, сформированного в последовательности ВНС2 + Cu + ВНС2, которая составляет 3500 МПа с увеличением удельного усилия ОШ до $P_{cp} = 4000$ МПа, увеличивается до ~ 5000 МПа, однако из-за возникновения микротрещин качество слоя ухудшается. Наиболее рациональным является интервал удельного усилия ОШ 2500...3000 МПа.

Следует отметить, что в большей степени упрочняются поверхностные слои с низким сопротивлением деформации, например, КЭП состава In + BK8 ($H_{\mu} = 1970$ МПа). В данном случае микротвердость в поверхностном слое достигает 5000 МПа при удельном усилии ОШ $P_{cp} = 2000$ МПа.

Микротвердость в переходном слое (подслое) для всех КЭП возрастает, но в различной степени. Здесь также существует закономерность - чем ниже исход-

ная микротвердость подслоя, тем больше резервы к ее повышению. Так, микротвердость КЭП: In + BK8, Cu + BK8, BK8 + Cu + BK8 возрастает, соответственно, с 3500 до 4500; с 2500 до 4000 и с 2800 до 4000 МПа при увеличении удельного усилия ОШ до 2000 МПа и для КЭП состава ВНС2 + Cu + ВНС2 с 2540 до 5000 МПа при $P_{cp} = 4000$ МПа (рис. 2).

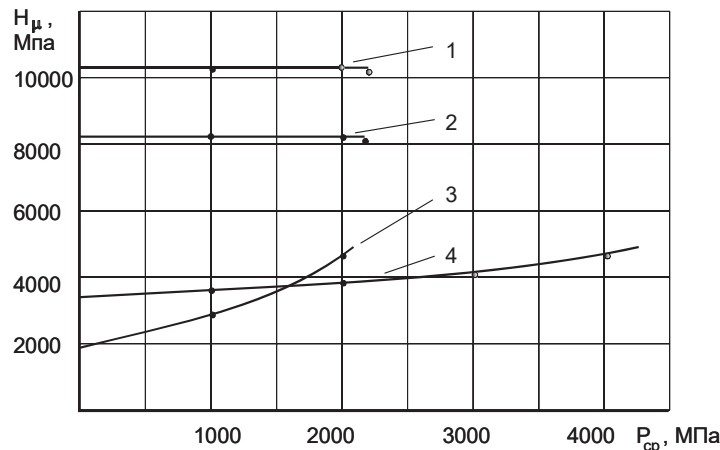


Рис. 1. Влияние удельного усилия ОШ на микротвердость поверхностного слоя образцов с КЭП:

- 1 - сталь 45, Cu + BK8;
- 2 - сталь 45, BK8 + Cu + BK8;
- 3 - сталь 45, In + BK8;
- 4 - сталь 40X, ВНС2 + Cu + ВНС2

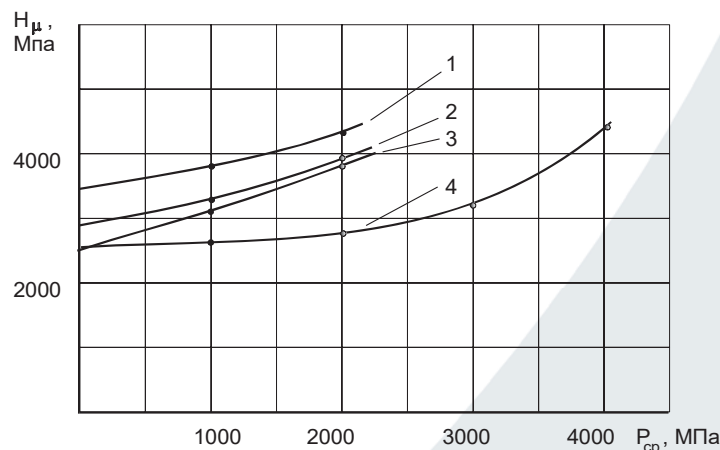


Рис. 2. Влияние удельного усилия ОШ на микротвердость подслоя образцов с КЭП:

- 1 - сталь 45, In + BK8;
- 2 - сталь 45, BK8 + Cu + BK8;
- 3 - сталь 45, Cu + BK8;
- 4 - сталь 40X, ВНС2 + Cu + ВНС2

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

Для повышения качества КЭП с высокой микротвердостью и низкой исходной шероховатостью возможно применение АВ.

На рис. 3 показано влияние удельного усилия АВ на микротвердость слоя и подслоя КЭП состава Cu + BK8 и BK8 + Cu + BK8. С увеличением удельного усилия выглаживания до $P_{cp} = 1000$ МПа микротвердость слоя не изменяется, а затем незначительно снижается,

что свидетельствует о начале разрушения покрытия, которое подтверждается фотографиями микроструктуры. Микротвердость в подслое повышается для покрытия Cu +VK8 с 2500 до 4500 МПа, а VK8 + Cu +VK8 с 2800 до 5000 МПа.

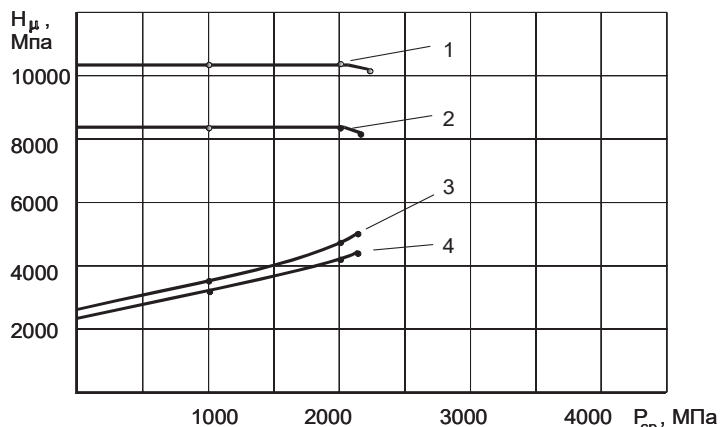


Рис. 3. Влияние удельного усилия АВ на микротвердость слоя (1, 2) и подслоя (3, 4) образцов из стали 45 с КЭП, соответственно, Cu +VK8 и VK8 + Cu +VK8

Наиболее рациональное удельное усилие АВ соответствует 1000 МПа.

Таким образом, для обобщения и упрощения выбора наиболее рационального усилия деформации предлагается все электроэрозионные покрытия, в зависимости от микротвердости упрочняемого участка покрытия, разбить на три группы: мягкие (< 2000 МПа), средние (2000 - 3000 МПа) и твердые (> 3000 МПа). Для мягких покрытий рекомендуются удельные усилия деформации $P_{cp} = 750 - 1250$ МПа, средних - 1300 - 1500 МПа и твердых - 2500 - 3000 МПа. Мягкие покрытия рекомендуется упрочнять ОШ. Покрытия средней твердости и твердые можно упрочнять как ОШ, так и АВ, учитывая то, что шероховатость (R_a) исходной поверхности не должна превышать 12 мкм для ОШ и 5 мкм для АВ.

Формирование покрытий методом ЭЭЛ связано с высокотемпературным воздействием источника энергии на наносимый материал и подложку, а также с образованием различных фаз в поверхностных слоях при взаимодействии наносимого и обрабатываемого материалов. Процессы нагрева и охлаждения материала электродов в зоне импульсного разряда обуславливают появление в слоях, полученных ЭЭЛ, значительных напряжений. Фазовые превращения в металлах и сплавах, сопутствующие ЭЭЛ, также приводят к образованию в них напряженного состояния. Измерение остаточных напряжений в поверхностном слое, сформированном методом ЭЭЛ, показывает, в большинстве случаев, наличие значительных растягивающих напряжений.

Наиболее опасными для усталостной прочности легированных валов являются осевые остаточные напряжения растяжения, которые увеличивают амплитуду действующих напряжений и способствуют снижению выносливости деталей.

Расширение области применения ЭЭЛ для более широкого круга деталей машин за счет применения КЭП обуславливает необходимость дальнейшего изучения остаточных напряжений, возникающих в покрытиях, сформированных как за счет мягких антифрикционных, так и твердых износостойких материалов.

В табл. 1, на конкретных примерах, приведены

некоторые рекомендуемые удельные усилия деформации (P_{cp}) и результаты их влияния на шероховатость и микротвердость поверхностного слоя и подслоя покрытий, сформированных твердыми износостойкими и мягкими антифрикционными металлами, а также КЭП. Снижение удельного усилия деформации не обеспечивает необходимой шероховатости поверхности, а увеличение - приводит к снижению качества сформированного слоя (возникновению микро и макро трещин, шелушению, «закатам» и другим дефектам).

На рис. 4 и в табл. 2 отображены результаты измерения осевых остаточных напряжений в поверхностных слоях стали 45 с электроэрозионным покрытием из меди и КЭП медь + хром, а также влияния ППД на величину и знак этих напряжений.

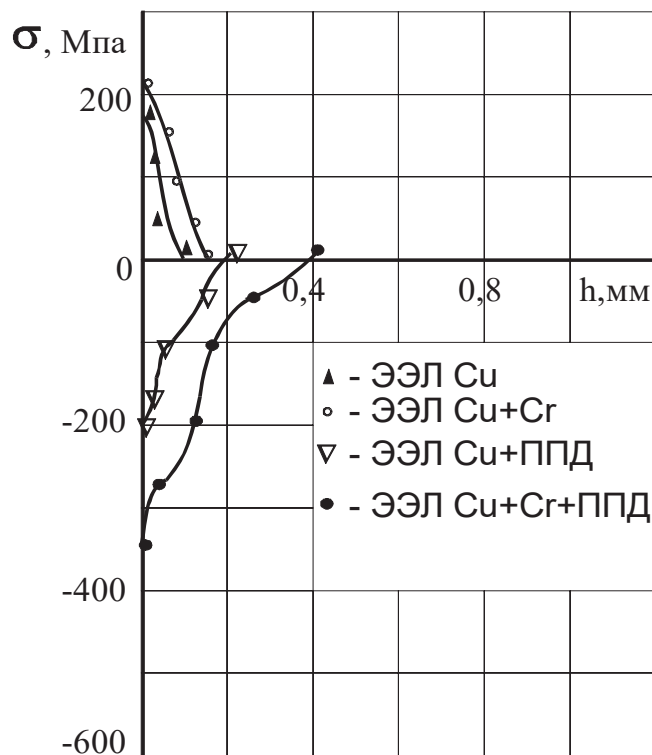


Рис. 4. Влияние ППД на распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя стали 45 с покрытием из меди и медь+хром

ЭЭЛ стали 45 медью приводит к формированию в 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, приводит к возрастанию как величины напряжения, так и глубины залегания, соответственно до 210 МПа и 0,15 мм.

В результате упрочнения ОШ образцов после ЭЭЛ Cu и Cu + Cr деформационные кривые значительно изменяются, так как деформации имеют отрицательный знак, что определяет наличие в поверхностном слое благоприятных напряжений сжатия.

Остаточные напряжения, возникающие в поверхностных слоях деталей, неразрывно связаны с такой эксплуатационной характеристикой, как усталостная прочность.

Снижение уровня остаточных напряжений при применении КЭП, состоящих из мягкого антифрикционного металла и твердого износостойкого материала, по сравнению с покрытиями, состоящими только из твердого износостойкого материала, например, Cu+Cr и Cr, обуславливает проведение испытаний этих покрытий на усталостную прочность (рис. 5).

Таблица 1. Рекомендуемые удельные усилия деформации ЭЭЛ слоев различной твердости и результаты их воздействия на микрогеометрию и микротвердость сформированных покрытий

Покрытие	R _{ср} , МПа	Ra после ППД, мкм	Микротвердость до ППД, H _v , МПа		Микротвердость после ППД, H _v , МПа	
			слой	подслой	слой	подслой
Покрытия из мягких антифрикционных металлов						
Sn	ОШ 750	0,5	800	1500	1500	2300
Sn	АВ*					
Cu	ОШ 1000	0,1	1600	2000	3000	2500
Cu	АВ*					
Cu	ОШ 1250	0,5	1300	2100	2500	3000
Cu	АВ*					
Комбинированные электроэрозионные покрытия						
In + ВК8	ОШ 1000	0,1	1970	3500	5000	5000
In + ВК8	АВ*					
Cu + ВК8	ОШ 1300	0,1	10490	2500	10490	3300
Cu + ВК8	АВ 1000	0,1	10490	2500	10490	3200
ВК8 + Cu + ВК8	ОШ 1300	0,1	8100	2800	8100	3500
ВК8 + Cu + ВК8	АВ 1000	0,1	8100	2800	8100	3500
ВНС2 + Cu + ВНС2	ОШ 2500	1,0	3500	2500	4000	3000
ВНС2 + Cu + ВНС2	АВ*					

* - АВ не рекомендуется.

Таблица 2. Результаты измерения величины, знака и глубины залегания остаточных напряжений в поверхностном слое стали 45 после ЭЭЛ и ППД

Упрочнение	Остаточное напряжение, σ, МПа	Глубина залегания, h, мм	Шероховатость, Ra, мкм
ЭЭЛ			
ЭЭЛ Cr *	250	0,2	3,5 - 4,6
ЭЭЛ Cu	170	0,1	0,6 - 1,0
ЭЭЛ Cu + Cr	210	0,15	0,6 - 0,7
ЭЭЛ + ППД			
ЭЭЛ Cr + ППД *	- 520	0,9	0,5
ППД + ЭЭЛ Cr + ППД *	- 550	0,8	0,5
ЭЭЛ Cu + ППД	- 200	0,2	0,1
ЭЭЛ Cu + Cr + ППД	-350	0,4	0,1

При испытании натуральных валов с КЭП Cu + Cr установлено, что в результате ЭЭЛ усталостная прочность снизилась по сравнению с образцами без покрытия в 1,5 раза (с 395 до 255 МПа), но зато она в 1,5 раза выше, чем у образцов, легированных только хромом. Обкатка шариком КЭП Cu + Cr увеличивает их усталостную прочность на 16-20 % выше базового варианта - образцов без покрытия (табл. 3).

Увеличение предела выносливости натуральных валов за счет применения КЭП и последующей ППД объясняется прежде всего снижением у них уровня остаточных напряжений. Кроме того, увеличению предела выносливости способствует структура КЭП покрытий.

Так, зарождающаяся на поверхности вала микротрещина, развиваясь вглубь и «натываясь» на мягкую составляющую КЭП, временно «затухает» (релаксируется), увеличивая тем самым усталостную прочность вала.

Анализ табл. 3 показывает, что предел выносливости натуральных образцов с покрытием из мягкого антифрикционного металла меди и последующей ППД находится на уровне образцов без покрытия, поэтому при необходимости можно рекомендовать данный комплекс упрочняющих технологий к практическому применению. Так как место разрушения всех упрочненных ППД образцов располагается за пределами

Таблица 3. Результаты усталостных испытаний натуральных моделей из стали 45 после ЭЭЛ и ППД

Упрочнение	Нагрузка Р, Н	Количество циклов, n	Характер разрушения	Напряжение, σ , МПа
Без упрочнения	10000	База 1×10^6		376
	11000	780000	Разрушение	414
	11000	902000	То же	414
ЭЭЛ Cu + ЭЭЛ Cr	4000	База 1×10^6		150
	5000			187,5
	6000			225
	7000	630000	То же	263
ЭЭЛ Cu + ОШ	8000	База 1×10^6		301
	10000	"		376
	11000	255000	То же	414
	12000	"		451
ЭЭЛ Cu + ЭЭЛ Cr + ОШ	10000	База 1×10^6		376
	11000	"		414
	13000	125000	То же	488

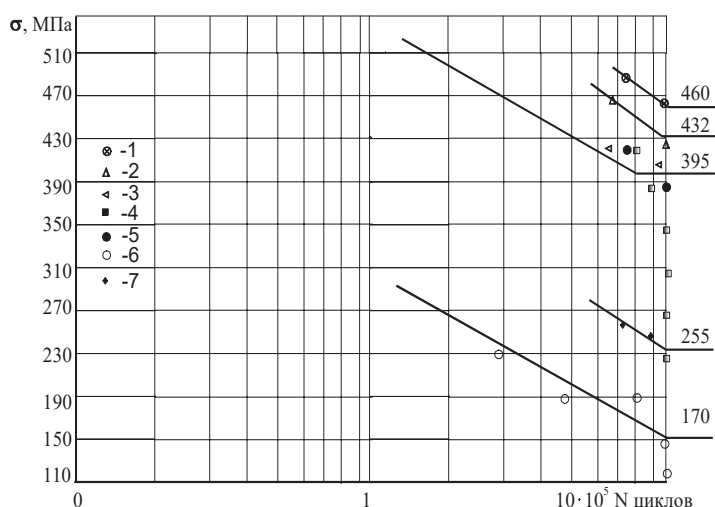


Рис. 5. Усталостная прочность натуральных образцов из стали 45 после ЭЭЛ и ППД:

- 1 - ЭЭЛ Cu + ЭЭЛ Cr + ОШ; 2 - ЭЭЛ Cr + АВ;
3 - ЭЭЛ Cu + ОШ; 4 - без упрочнения;
5 - ЭЭЛ Cr + ОШ; 6 - ЭЭЛ Cr; 7 - ЭЭЛ Cu + ЭЭЛ Cr

покрытия, то увеличение предела выносливости еще больше.

Выводы:

1. Экспериментально установлено, что чем ниже исходная микротвердость упрочняемого участка поверхности, тем больше резервы к ее повышению методами ППД.

2. Для обобщения и упрощения выбора наиболее рационального усилия деформации предлагается все электроэрозионные покрытия, в зависимости от микротвердости упрочняемого участка покрытия, разбить на три группы: мягкие (< 2000 МПа), средние (2000 - 3000 МПа) и твердые (> 3000 МПа). Для мягких покрытий рекомендуются удельные усилия деформации $R_{cp}=750 - 1250$ МПа, средних - 1300 - 1500 МПа и

твердых - 2500 - 3000 МПа.

3. Применение КЭП, сформированных за счет поочередного нанесения на сталь 45 меди и хрома, снижает величину растягивающих напряжений и глубину их распространения, по сравнению с покрытиями только из хрома, соответственно с 250 до 210 МПа и с 0,2 до 0,15 мм. Применение ППД (обкатка шариком) приводит к изменению знака деформаций с положительного на отрицательный, что определяет наличие в поверхностном слое благоприятных напряжений сжатия.

4. Усталостная прочность КЭП, сформированных поочередным нанесением меди и хрома, на 50% выше, чем у покрытий, состоящих только из хрома. ППД увеличивает предел выносливости КЭП Cu + Cr на 20% по сравнению с базовым вариантом - образцом без покрытия.

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. Эдигаров В.Р., Килунин И.Ю., Дегтярь В.В. Классификация комбинированных методов обработки на основе электромеханического упрочнения // Современные наукоемкие технологии. - 2012. - № 3. - С. 32-35.
3. В.И. Иванов, Ф.Х. Бурумкулов Упрочнение и увеличение ресурса объектов электроискровым методом: классификация, особенности технологии // Электронная обработка материалов, 2010, № 5, С. 27-36.
4. Романенко Д.Н. Оценка качества поверхности электроискрового покрытия после выглаживания минералокерамикой / Д.Н. Романенко // Инновационные технологии и оборудование машиностроительного комплекса: межвуз. сб. науч. тр. - Воронеж, 2007. - Вып. 10. - С.62-65.