

PHYSICS OF STRENGTH AND PLASTICITY

PACS numbers: 62.20.Qp, 68.35.Ct, 68.35.Gy, 68.55.J-, 81.15.Rs, 81.40.Pq

Повышение качества поверхностных электроэрозионно-легированных слоёв комбинированными покрытиями и поверхностным пластическим деформированием.

III. Влияние основных технологических параметров на микрорельеф, структуру и свойства электроэрозионных покрытий

В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова*, Е. В. Коноплянченко,
В. С. Марцинковский, Н. В. Тарельник, О. А. Василенко

*Сумський національний аграрний університет,
ул. Герасима Кондратьєва, 160,
40021 Суми, Україна*

**Сумський державний університет,
ул. Римського-Корсакова, 2,
40007 Суми, Україна*

В работе обобщены результаты влияния поверхностной пластической деформации (ППД) эрозионных покрытий из твёрдых износостойких, мягких антифрикционных материалов и комбинированных эрозионных покрытий (КЭП) на показатели качества полученных слоёв. Показано, что применение КЭП, включающего формирование подслоя из меди для твёрдых износостойких покрытий, позволяет снизить величину растягивающих напряжений и повысить усталостную прочность. Проведение ППД приводит к созданию в поверхностном слое благоприятных напряжений сжатия. Найдены зависимости твёрдости поверхностных слоёв от удель-

Corresponding author: Vyacheslav Borysovych Tarelnyk
E-mail: tarelnik@i.ua

*Sumy National Agrarian University,
160 Gerasym Kondratiev Str., UA-40021 Sumy, Ukraine*
**Sumy State University, 2 Rymsky-Korsakov Str., UA-40007 Sumy, Ukraine*

Citation: V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, N. V. Tarelnyk, and O. O. Vasylchenko, Improvement of Quality of the Surface Electroerosive Alloyed Layers by the Combined Coatings and the Surface Plastic Deformation. III. The Influence of the Main Technological Parameters on Microgeometries, Structure and Properties of Electrolytic Erosion Coatings, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 3: 313–335 (2019), DOI: [10.15407/mfint.41.03.0313](https://doi.org/10.15407/mfint.41.03.0313).

ного усилия деформации. Получено, что рациональными удельными усилиями ППД являются 1000 МПа для алмазного выглаживания и 1500 МПа для обкатки шариком.

Ключевые слова: электроэррозионное легирование, комбинированное покрытие, пластическое деформирование, структура поверхности, микротвердость.

У роботі узагальнено результати впливу поверхневої пластичної деформації (ППД) ерозійних покріттів з твердих зносостійких, м'яких антифрикційних матеріалів і комбінованих електроерозійних покріттів (КЕП) на показники якості отриманих шарів. Показано, що застосування КЕП, яке включає формування підшару з міді для твердих зносостійких покріттів, дозволяє знизити величину розтягувальних напружень і підвищити втомну міцність. Проведення ППД призводить до створення в поверхневому шарі сприятливих напружень стискання. Знайдено залежності твердості поверхневих шарів від питомого зусилля деформації. Отримано, що рациональними питомими зусиллями ППД є 1000 МПа для алмазного вигладжування і 1500 МПа для обкатки кулькою.

Ключові слова: електроерозійне легування, комбіноване покриття, пластичне деформування, структура поверхні, мікротвердість.

The results concerning an influence of surface plastic deformation (SPD) of erosion coatings from hard wear-resistant, soft antifriction materials and combined electro-erosive coatings (CEECs) on the indicators of layers' quality are generalized. As shown, the applications of CEEC, which includes a formation of copper underlayer for hard wear-resistant coatings, allows to reduce the tensile stresses and to increase the fatigue strength. The performance of the SPD leads to favourable compressive stresses in the surface layer. The dependences of surface layers hardness on the specific strain force are founded. As determined, the rational specific strain force of SPD are 1000 MPa for diamond smoothing and 1500 MPa for running in ball.

Key words: electro-erosive alloying (EEA), combined coating, plastic deformation, structure of surface, microhardness.

(Получено 28 октября 2018 г.; окончат. вариант — 22 ноября 2018 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

В части I [1] настоящей работы представлен анализ особенностей формирования комбинированных эрозионных покрытий (КЭП) на конструкционных, инструментальных сталях и никелевых сплавах. Предложен новый способ формирования КЭП, заключающийся в нанесении промежуточного слоя из меди между основным металлом и покрытием из износостойких сплавов.

Высокими показателями качества характеризуются квазимногослойные покрытия, сформированные в последовательности

$\text{ВК8} \rightarrow \text{Cu} \rightarrow \text{ВК8}$ для стальных подложек, $\text{ВК8} \rightarrow \text{ВК8} \rightarrow \text{Cu}$ и $\text{ВК8} \rightarrow \text{ВК8} \rightarrow \text{Ni}$ — для никелевого сплава ХН58МБЮД. Высокие результаты по микротвёрдости (14200 МПа) получены при электроэрозионном легировании (ЭЭЛ) стали 45 и Р6М5 композиционным электроэрозионным материалом 90% ВК6+10% 1М.

В части II [2] на основании анализа напряжённо-деформированного состояния поверхностных слоёв, подвергаемых ЭЭЛ с последующим поверхностным пластическим деформированием (ППД) алмазным выглаживанием (АВ) и обкаткой шариком (ОШ), и существующей методики определения геометрических и деформационных параметров очага деформации для однородных тел, разработана общая методика расчёта этих параметров для слоёв с любой структурой, возникающей в результате ЭЭЛ, позволяющая в широких пределах управлять качеством поверхностного слоя ответственных деталей.

Определение силовых и деформационных параметров ППД ЭЭЛ слоёв различной твёрдости, проведенное выше, позволило обобщить результаты исследований влияния ППД на микрогеометрию и микроструктуру поверхностных ЭЭЛ слоёв из мягких антифрикционных металлов и КЭП, сформированных как на установке средней мощности разряда с ручным вибратором «УИЛВ-8», так и на механизированной установке «ЭИЛ-9».

Таким образом, целью работы является установление влияния ППД слоёв из твёрдых износостойких, мягких антифрикционных материалов и КЭП, полученных технологиями ЭЭЛ, на микрогеометрию, структуру, остаточные напряжения, усталостную прочность сформированных поверхностных слоёв и разработка на этой основе комбинированных технологий, что позволит в значительной мере реализовать методологию управления качеством поверхности наиболее ответственных деталей при изготовлении и ремонте машин.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Определение силовых и деформационных параметров ППД ЭЭЛ слоёв различной твёрдости, проведенное выше, позволило обобщить результаты исследования микрогеометрии, структуры и свойств поверхностного слоя. Режимы ППД образцов АВ и ОШ после ЭЭЛ хромом, вольфрамом и никелем приведены в табл. 1.

Результаты измерения шероховатости показаны на рис. 1–4 в виде зависимостей $R_a = f(P_{cp})$, где P_{cp} — удельное усилие обкатки, определяемое по соотношению

$$P_{cp} = P / (\pi ab), \quad (1)$$

где P — полное усилие обкатки, a и b — полуоси контура остаточной

ТАБЛИЦА 1. Режимы ППД образцов после ЭЭЛ хромом, вольфрамом и никелем*.

TABLE 1. Conditions of surface plastic deformation (SPD) of samples after electro-erosive alloying (EEA) with chromium, tungsten and nickel*.

Размер индентора (R при АВ или \varnothing при ОШ), мм	Нагрузка на индентор, P , Н	Удельное усилие деформации P_{cp} , МПа
Алмазное выглаживание**		
1	150	4500
1	150	4500
1	100	3200
2	150	3000
2	150	3000
2	80	1620
3	150	1920
3	200	2560
3	220	2830
4	150	1330
4	220	1900
4	250	2210
Обкатка шариком***		
19	1000	1380
19	1200	1640
19	1500	2060
10	600	940
10	1100	1700
10	1200	1900

*Число проходов $n = 1$; **Подача $S = 0,05$ мм/об; ***Подача $S = 0,1$ мм/об.

вмятины, приведенные в табл. 2 работы [2].

Из приведенных данных следует, что эффективность ППД, как метода снижения шероховатости поверхности, зависит от P_{cp} и способа ЭЭЛ. Если для покрытий, полученных с применением вольфрамового электрода, величина R_a в значительной степени определяется радиусом алмазного индентора, то с увеличением пластичности покрытия (электроды из хрома и никеля) влияние радиуса индентора уменьшается (рис. 1). Характерно, что при ППД ОШ (рис. 2) практически все точки зависимости $R_a = f(P_{cp})$ укладываются на одну кривую для всех покрытий, независимо от вида ЭЭЛ. Этот факт свидетельствует о наличии общего механизма формирования поверхности, суть которого, прежде всего, заключается в комбинации двух процессов: деформации мягкой подложки покрытия и срезании микронеровностей. Анализ микроструктуры поверхностного слоя должен дать более подробную информацию о

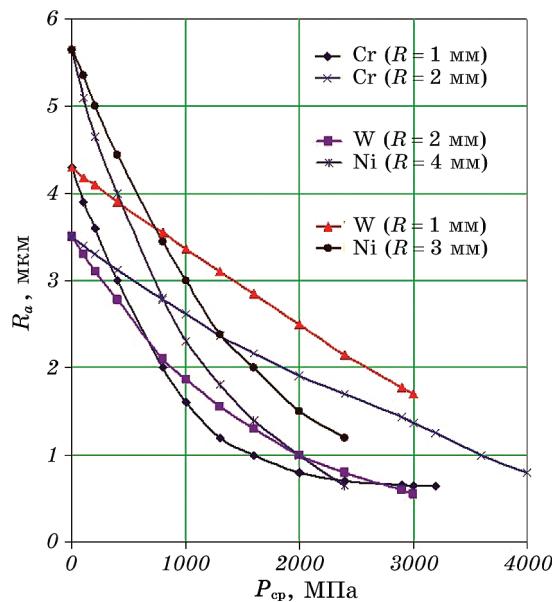


Рис. 1. Зависимость шероховатости стали 45 после ЭЭЛ вольфрамом, хромом и никелем от удельного усилия АВ при различных радиусах алмазного индентора (R).

Fig. 1. Dependence of the roughness of steel 45 after EEA with tungsten, chromium and nickel on the specific force AB at different radius of the diamond indenter (R).

данных процессах.

Установлено, что в случае ОШ стальных образцов, легированных мягкими антифрикционными металлами, с увеличением P_{cp} снижается шероховатость поверхностного слоя. Усилие обкатки зависит от микротвёрдости покрытия и величины исходной шероховатости.

Так, на рисунке 2 показана зависимость $R_a = f(P_{cp})$ для образцов из стали 45, легированных оловом на установке с ручным вибратором «УИЛВ-8», и стали 40Х, легированных медью на механизированной установке «ЭИЛ-9» (рис. 3). Если для снижения шероховатости поверхности стали 45, легированной оловом и имеющей микротвёрдость $H_\mu = 800$ МПа с R_a от 4,5 до 0,5 мкм, необходимо $P_{cp} \sim 750$ МПа, то для получения такой же шероховатости на поверхности стали 40Х, легированной медью и имеющей, соответственно, исходную микротвёрдость и шероховатость 1300 МПа и 12 мкм, требуется $P_{cp} \sim 1250$ МПа. Дальнейшее увеличение P_{cp} приводит к увеличению шероховатости и появлению на поверхности различных дефектов. Таким образом, чем меньше исходные микротвёрдость и шероховатость поверхностного слоя, тем меньшее P_{cp}

необходимо для его выглаживания.

В случае силового воздействия ОШ на КЭП, сформированные на

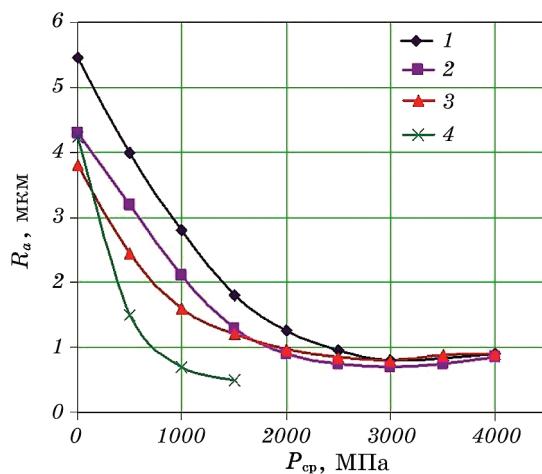


Рис. 2. Зависимость шероховатости стали 45 после ЭЭЛ никелем (1), вольфрамом (2), хромом (3), оловом (4) от удельного усилия ОШ.

Fig. 2. Dependence of the roughness steel 45 after EEA with nickel (1), tungsten (2), chromium (3), and tin (4) on the specific force of running in ball (RB).

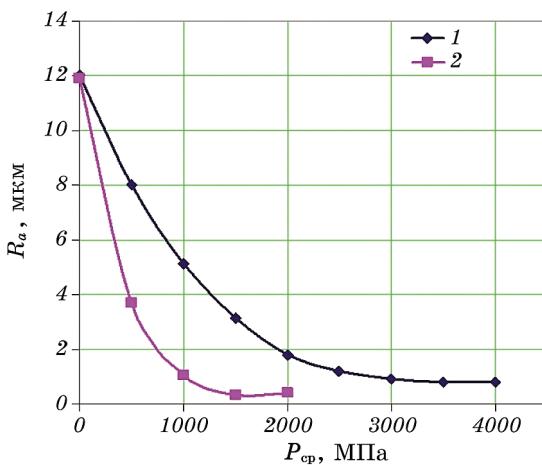


Рис. 3. Зависимость шероховатости образцов стали 40Х с КЭП, сформированным на установке «ЭИЛ-9» в последовательности ВНС2→Cu→ВНС2 (1) и покрытием из меди (2) от удельного усилия ОШ $\varnothing 19$ мм.

Fig. 3. Dependence of the roughness steel samples 40X with CEEC, formed on the installation ‘EIL-9’ in the sequence VNS2→Cu→VNS2 (1) and a copper coating (2) from the specific force of running in ball (RB) $\varnothing 19$ mm.

установке с ручным вибратором «УИЛВ-8» и имеющие низкую исходную шероховатость ($R_a = 0,48\text{--}0,52 \mu\text{м}$), практически все точки зависимости $R_a = f(P_{cp})$ укладываются на одну прямую, где $R_a \sim 0,2 \mu\text{м}$ (рис. 4).

Иная картина наблюдается в случае силового воздействия ОШ на КЭП, сформированные на механизированной установке «ЭИЛ-9» и имеющие исходную шероховатость $R_a \geq 12 \mu\text{м}$. В данном случае КЭП могут достигать по толщине 1 мм и более, что наряду с высокой шероховатостью и микротвёрдостью требует гораздо большего значения P_{cp} (рис. 3). В данном случае, чтобы снизить шероховатость КЭП, состоящего из высокопрочной нержавеющей стали ВНС2 (08Х15Н5Д2Т) и меди, с R_a от 12 мкм до 1 м, необходимо приложить удельное усилие $P_{cp} \sim 3000 \text{ МПа}$.

Металлографические исследования КЭП, сформированных на установке с ручным вибратором «УИЛВ-8», показывают, что для получения качественных поверхностных слоёв необходимо использовать $P_{cp} = 1000\text{--}1300 \text{ МПа}$.

В случае если микротвёрдость поверхностного слоя высокая, например, КЭП, сформированные в последовательности $\text{Cu} \rightarrow \text{VK8}$ ($H_\mu \geq 10000 \text{ МПа}$) или $\text{VK8} \rightarrow \text{Cu} \rightarrow \text{VK8}$ ($H_\mu = 8000 \text{ МПа}$), то сам слой не упрочняется, а вминается в более мягкий подслой, упрочняя последний. В противном случае, если микротвёрдость поверхностного слоя низкая, например, КЭП, сформированные в последовательно-

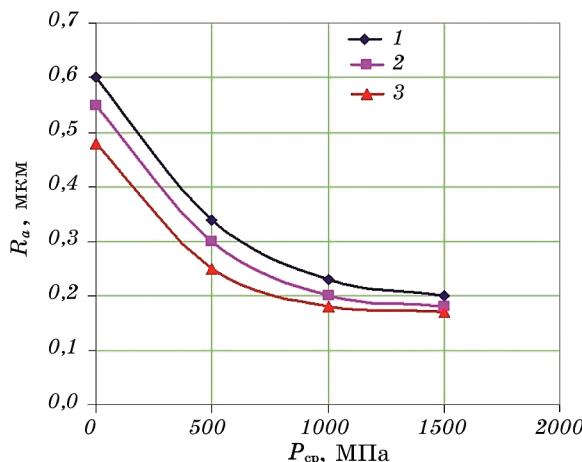


Рис. 4. Зависимость шероховатости образцов из стали 45 с КЭП, сформированным на установке «УИЛВ-8», от удельного усилия ОШ Ø19 мм: 1 — In→VK8, 2 — VK8→Cu→VK8, 3 — Cu→VK8.

Fig. 4. Dependence of the roughness of samples steel 45 with CEEC, formed on the installation ‘UILV-8’, from the specific force of running in ball (RB) Ø19 mm: 1 — In→VK8, 2 — VK8→Cu→VK8, 3 — Cu→VK8.

сти In→VK8 ($H_\mu = 1970$ МПа), то упрочняется сам слой.

На рисунках 5, *a*, *b* показана микроструктура электроэрозионных покрытий (ЭП) стали 45 хромом после АВ инденторами с $R = 1$ мм и $R = 2$ мм при $P_{cp} = 4500$ и 3000 МПа соответственно. При обработке по данным режимам наблюдаются подрывы слоя, поперечные трещины и его отслаивание.

Все это свидетельствует о том, что в очаге деформации создаются неравномерные контактные условия, высокие удельные усилия деформации, что приводит к разрушению слоя. При этом твердость слоя достигает 7000–7500 МПа. Микроанализ упрочнённого слоя по всей поверхности шлифа указывает на его неудовлетворительное качество. Предпочтительным является АВ инденторами $R = 3$ мм и $R = 4$ мм при удельных усилиях 1920 и 1330 МПа соответственно (рис. 5, *c*, *г*). Выглаженная поверхность имеет меньшую шероховатость, особенных макронарушений в слое не наблюдается. Распределение твёрдости равномерное, причём твёрдость плавно снижается по мере углубления и находится на уровне 7500–8000 МПа. К практическому применению может быть рекомендовано АВ индентором $R = 4$ мм при удельном $P_{cp} = 1330$ МПа (рис. 5, *г*).

Очевидно, что очаг деформации при ОШ менее локализован, что, естественно, изменяет условия упрочнения слоя. ОШ обеспечивает более равномерное силовое воздействие на поверхностный слой, что оказывается не всегда целесообразным. Так, при ОШ диаметром 19 мм и $P_{cp} = 1380$ МПа (рис. 6, *a*) в слое наблюдаются трещины и шелушение. При увеличении P_{cp} до 2060 МПа слоя покрытия нет совсем. Есть основание говорить о его съёме при ППД. В случае ОШ диаметром 10 мм и $P_{cp} = 940$ МПа нарушение слоя начинается с зоны термического влияния (рис. 6, *б*) и усугубляется образованием

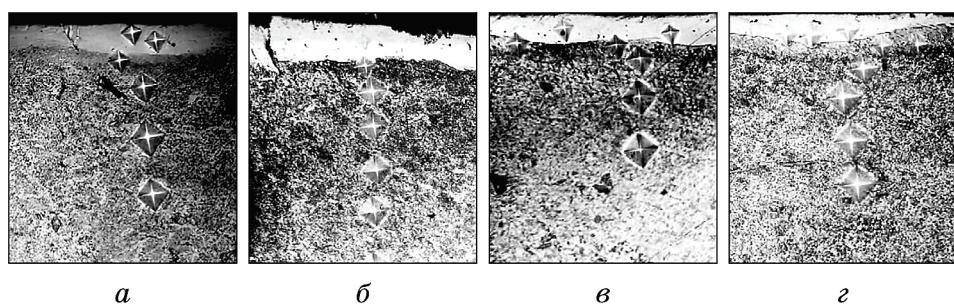


Рис. 5. Микроструктура поверхностных слоёв после ЭЭЛ хромом и АВ: *а* — $R = 1$ мм, $P_{cp} = 4500$ МПа; *б* — $R = 2$ мм, $P_{cp} = 3000$ МПа; *в* — $R = 3$ мм, $P_{cp} = 1920$ МПа; *г* — $R = 4$ мм, $P_{cp} = 1330$ МПа; $\times 400$.

Fig. 5. Microstructure of surface layers after EEA with chromium and diamond smoothing (DS): *a*— $R = 1$ mm, $P_{cp} = 4500$ MPa; *b*— $R = 2$ mm, $P_{cp} = 3000$ MPa; *c*— $R = 3$ mm, $P_{cp} = 1920$ MPa; *г*— $R = 4$ mm, $P_{cp} = 1330$ MPa; $\times 400$.

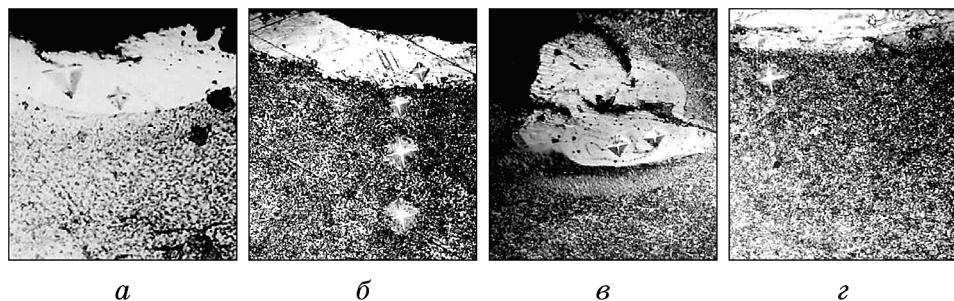


Рис. 6. Микроструктура поверхностных слоёв ЭЭЛ хромом после ОШ: *а* — $D_{ш} = 19$ мм, $P_{cp} = 1380$ МПа; *б* — $D_{ш} = 10$ мм, $P_{cp} = 940$ МПа; *в* — $D_{ш} = 10$ мм, $P_{cp} = 940$ МПа; *г* — $D_{ш} = 10$ мм, $P_{cp} = 1700$ МПа; $\times 400$.

Fig. 6. Microstructure of surface layers after EEA with chromium and running in ball (RB): *a*— $D_{ш} = 19$ mm, $P_{cp} = 1380$ MPa; *b*— $D_{ш} = 10$ mm, $P_{cp} = 940$ MPa; *c*— $D_{ш} = 10$ mm, $P_{cp} = 940$ MPa; *d*— $D_{ш} = 10$ mm, $P_{cp} = 1700$ MPa; $\times 400$.

закатов, завальцовыванием слоя и наволакиванием на него более мягкого металла зоны, не подвергавшейся упрочнению (рис. 6, *в*).

Наиболее благоприятная ситуация в образце после ОШ диаметром 10 мм при $P_{cp} = 1700$ МПа, где имеется слой почти по всей линии шлифа (рис. 6, *г*).

На рисунках 7, *а*, *б* изображены микроструктуры ЭП стали 45 вольфрамом после АВ инденторами $R = 1$ мм и $R = 2$ мм при $P_{cp} = 3200$ и 3000 МПа, соответственно. На обоих режимах наблюдаются подрывы слоя, трещины, что вероятно является следствием высоких удельных усилий деформации. Твёрдость белого слоя и слоя вторичной закалки находится на уровне 7000–8000 МПа. Наиболее благоприятен процесс АВ, который можно рекомендовать для использования (рис. 7, *в*), когда радиус алмазного выглаживания $R = 2$ мм, а $P_{cp} = 1620$ МПа. В этом случае слой достаточно хорошего качества с ровной поверхностью линии шлифа. Белый слой с твёрдостью 7500 МПа, переходная зона с плавно поникающейся твёрдостью.

Металлографический анализ ЭЭП покрытий вольфрамом и ОШ диаметром 19 мм при $P_{cp} = 1380$ МПа на стали 45 показал, что полученные слои характеризуются высоким качеством: отсутствуют макродефекты (закаты, вырывы), поверхность ровная, белый слой имеет твёрдость 8000 МПа, провалов твёрдости нет, происходит постепенное снижение твёрдости от поверхности к основе. В образце ОШ диаметром 10 мм при удельном усилии обкатки $P_{cp} = 940$ МПа слой тоже хорошего качества, а в образцах после ОШ 19 мм и 10 мм при удельных $P_{cp} = 2060$ и 1700 МПа соответственно, наблюдается повреждение слоя. Местами белый слой очень тонкий. Наиболее рациональным может быть вариант ОШ, когда диаметр шарика 19

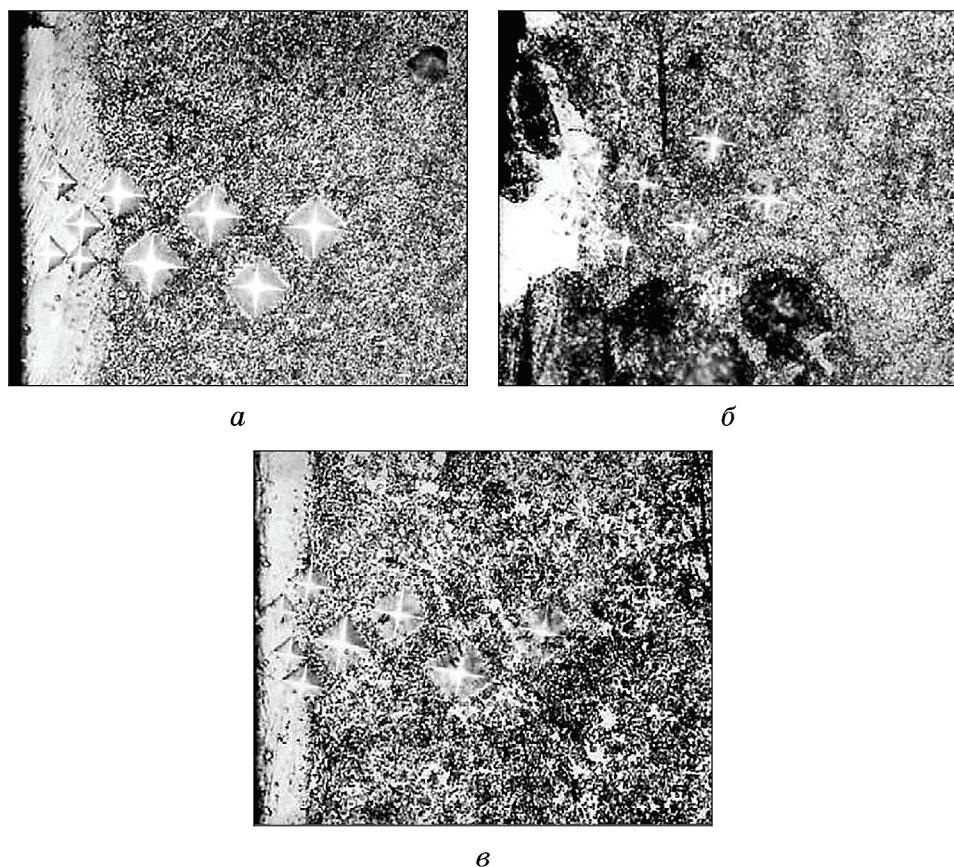


Рис. 7. Микроструктура поверхностных слоёв ЭЭЛ вольфрамом после АВ инденторами: *а* — $R = 1$ мм, $P_{\text{cp}} = 3200$ МПа; *б* — $R = 2$ мм, $P_{\text{cp}} = 3000$ МПа; *в* — $R = 2$ мм, $P_{\text{cp}} = 1620$ МПа; $\times 400$.

Fig. 7. Microstructure of the surface layers after EEA with tungsten and diamond smoothing (DS) by indenters: *a*— $R = 1$ mm, $P_{\text{cp}} = 3200$ MPa; *b*— $R = 2$ mm, $P_{\text{cp}} = 3000$ MPa; *c*— $R = 2$ mm, $P_{\text{cp}} = 1620$ MPa; $\times 400$.

мм, а удельное усилие $P_{\text{cp}} = 1380$ МПа.

Характерным для ЭЭЛ стали 45 никелем является наличие массивного по толщине нанесенного слоя — до 60 мкм. После АВ слой утоняется, а качество его ухудшается. Практически на всех режимах наблюдается интенсивное разрушение слоя, образование закатов, вырывов и т.п. На многих образцах слой практически отсутствует. Из этого следует, что АВ ЭП никелем, когда образуется мягкий слой ($H_u = 2000$ МПа), нежелательно.

Положительное влияние на качество никелевых ЭП оказывает ОШ. Так при ОШ диаметром 19 мм и $P_{\text{cp}} = 1380$ МПа образуется слой

толщиной 30 мкм с твёрдостью до 3000 МПа. Подобная картина наблюдается и при ОШ диаметром 10 мм с $P_{cp} = 940$ МПа.

Предпочтительным является ОШ диаметром 19 мм и $P_{cp} = 1700$ МПа. В этом случае слой равномерный по всей поверхности, твёрдость его достигает 2800–3000 МПа. В диффузионной зоне твёрдость выше, она колеблется в пределах 4000–5000 МПа. Очевидно, что здесь сказывается упрочнение ППД. Аналогичная ситуация складывается и при ОШ диаметром 10 мм и $P_{cp} = 2060$ МПа (рис. 8, б). Важным представляется повышение твёрдости как в белом слое, так и в переходной зоне. С увеличением удельного усилия обкатки происходит деформационное упрочнение поверхностного слоя, которое становится существенным по мере увеличения глубины слоя.

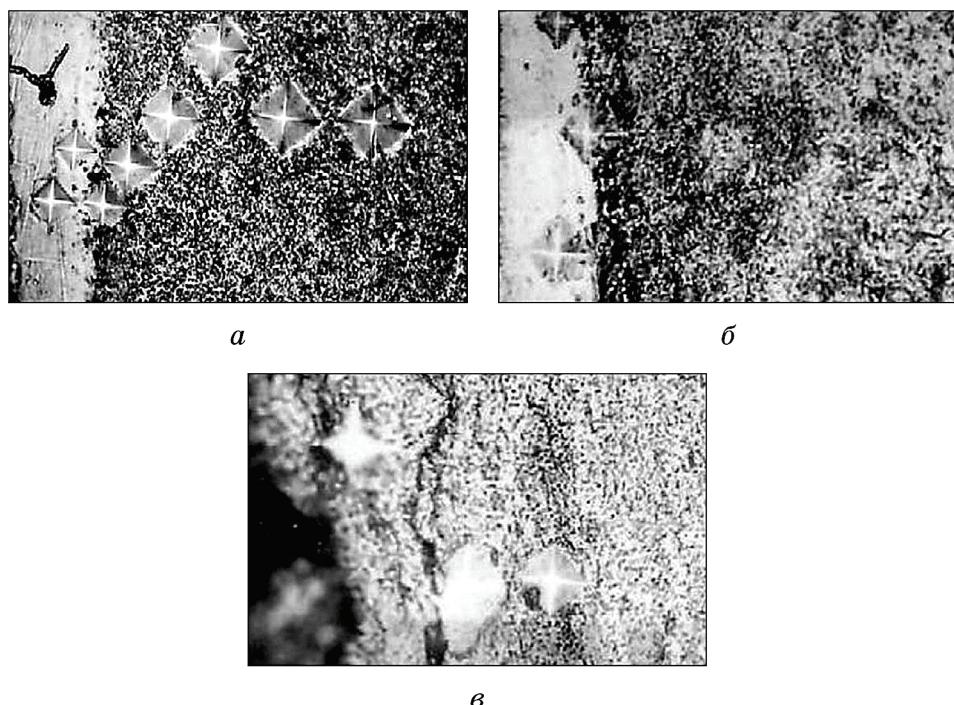


Рис. 8. Микроструктура ЭП на стали 45: *а* — вольфрамом после ОШ $D_{m\text{ }}=19$ мм, $P_{cp}=1380$ МПа; *б* — никелем после ОШ $D_{m\text{ }}=10$ мм, $P_{cp}=2060$ МПа; *с* — после ОШ $D_{m\text{ }}=19$ мм, $P_{cp}=2380$ МПа с последующим ЭЭЛ хромом и АВ при $R=3$ мм и $P_{cp}=2560$ МПа; $\times 400$.

Fig. 8. Microstructure of electro-erosive coatings (EEC) on steel 45: *a*—with tungsten after running in ball (RB) $D_{m\text{ }}=19$ mm, $P_{cp}=1380$ MPa; *б*—with nickel after RB $D_{m\text{ }}=10$ mm, $P_{cp}=2060$ MPa; *с*—after RB $D_{m\text{ }}=19$ mm, $P_{cp}=2380$ MPa with followed EEA with chromium and diamond smoothing (DS) at $R=3$ mm and $P_{cp}=2560$ MPa; $\times 400$.

В результате наклёпа твёрдость повышается до уровня 6000–6700 МПа, т.е. до значений твёрдости слоя, например, при ЭП хромом.

В случае предварительного использования ППД, ЭЭЛ и окончательного ППД металлографический анализ показывает неприемлемость такой технологии. Практически на всех режимах ППД приводит к повреждению поверхности, получению текстуры деформации, закатам и другим макродефектам. На рисунке 8, *в* показана микроструктура такого слоя.

На рисунке 9 изображена структура стали 40Х после ЭЭЛ высокопрочной нержавеющей сталью ВНС2 на механизированной установке «ЭИЛ-9». После одного прохода толщина слоя достигает ~100 мкм, а после двух ~160 мкм, соответственно (рис. 9, *а* и *б*). Шероховатость (R_a) слоя в обоих случаях достигает 20 мкм, а микротвёрдость нанесённого слоя составляет ~4780 МПа. В данном случае ОШ не приводит к желаемому результату, так как в ЭП происходит образование трещин, сколов, шелушение. Микротвёрдость на сохранившихся участках 5000–5200 МПа (рис. 9, *в*).

При нанесении КЭП, сформированных в последовательности ВНС2→Си→ВНС2, шероховатость поверхностного слоя снижается до $R_a = 12$ мкм, а микротвёрдость — до 3500 МПа. Обкатка шариком при $P_{cp} = 3000$ МПа снижает шероховатость ЭП до $R_a = 1$ мкм и повышает микротвёрдость до 4100 МПа. В поверхностном слое начинают зарождаться микротрещины с глубиной распространения до 30 мкм. При этом микротвёрдость в подслое повышается от 2540 до 3200 МПа (рис. 9, *г*). Перепады микротвёрдости отсутствуют — происходит плавное её снижение по мере углубления. Зарождающиеся микротрещины удаляются последующей шлифовкой. Дальнейшее увеличение удельного усилия выглаживания до $P_{cp} = 4000$ МПа приводит к разрушению слоя (рис. 9, *д*).

На рисунке 10 изображена зависимость микротвёрдости белого слоя образцов из стали 45 с ЭП хромом вольфрамом и никелем от удельного усилия обкатки $H_{\mu\text{б.с.}} = f(P_{cp})$ при ОШ и АВ. Как при ОШ, так и при АВ микротвёрдость ЭП хромом и вольфрамом по мере возрастания P_{cp} практически не изменяется и лишь при достижении $P_{cp} = 4500$ МПа для хромового покрытия и $P_{cp} = 3000$ МПа для вольфрамового незначительно снижается, соответственно, с 7500 до 7000 МПа и с 7000 до 6500 МПа.

При АВ никелевого покрытия микротвёрдость белого слоя повышается незначительно, если судить по микротвёрдости сохранившихся участков (от 2000 до 3000 МПа) при $P_{cp} = 2060$ МПа.

Иная картина при ОШ никелевого покрытия. В этом случае, по мере возрастания удельного усилия обкатки, микротвёрдость белого слоя возрастает, и при $P_{cp} = 2060$ МПа составляет 5400 МПа.

На рисунке 11 изображена зависимость микротвёрдости подслоя образцов из стали 45 с ЭП хромом, вольфрамом и никелем от P_{cp} при

ОШ и АВ. По мере увеличения P_{cp} , микротвёрдость подслоя ЭП из хрома, вольфрама и никеля возрастает.

Характерно, что с увеличением пластичности материала увеличивается его способность к упрочнению. Так, при АВ микротвёрдость подслоя вольфрамового покрытия возросла с 4500 до 5000 МПа, хромового — с 4000 до 5000 МПа и никелевого — с 2000 до 3700 МПа. При ОШ микротвёрдость вольфрамового покрытия воз-

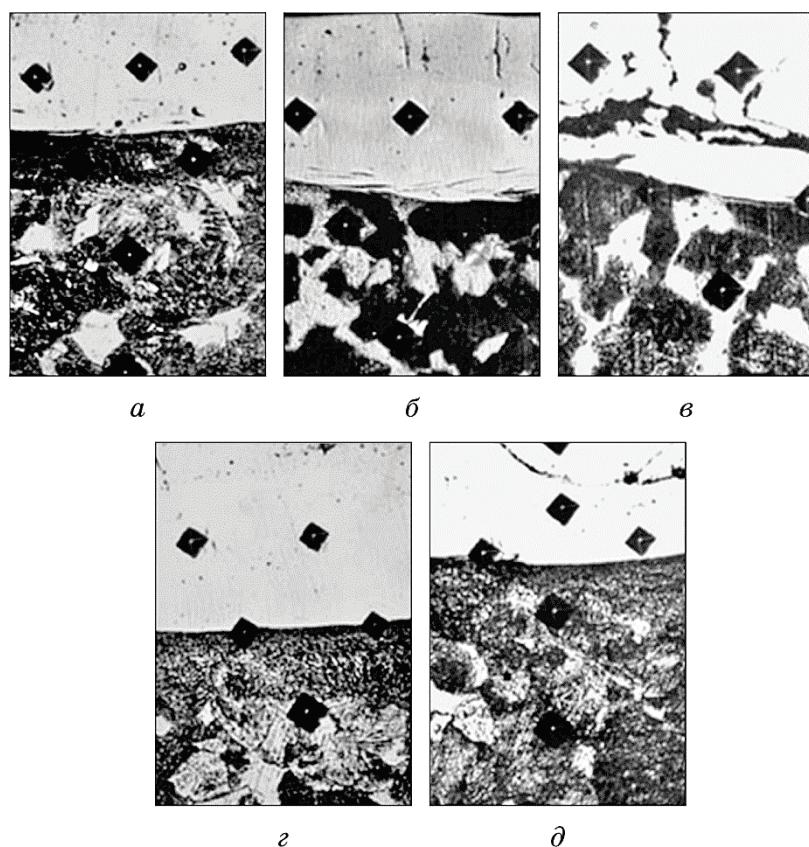


Рис. 9. Микроструктура образцов из стали 40Х после ЭЭЛ на механизированной установке «ЭИЛ-9» и ОШ Ø19 мм: *а* — ЭЭЛ, ВНС2, 1-проход; *б* — ЭЭЛ, ВНС2, 2-прохода; *в* — ЭЭЛ, ВНС2+ОШ ($P_{cp} = 2000$ МПа); *г* — ЭЭЛ, ВНС2→Cu→ВНС2→ОШ ($P_{cp} = 3000$ МПа); *д* — ЭЭЛ, ВНС2→Cu→ВНС2→ОШ ($P_{cp} = 4000$ МПа); $\times 200$.

Fig. 9. Microstructure of samples from steel 40X after EEA on the mechanized installation ‘EIL-9’ and RB Ø19 mm: *a*—EEA, VNS2, 1-pass; *б*—EEA, VNS2, 2-passes; *в*—EEA VNS2+RB ($P_{cp} = 2000$ MPa); *г*—EEA, VNS2→Cu→VNS2→RB ($P_{cp} = 3000$ MPa); *д*—EEA, VNS2→Cu→VNS2→RB ($P_{cp} = 4000$ MPa); $\times 200$.

росла с 4500 до 5000 МПа, хромового — с 4000 до 4500 МПа и никелевого — с 2000 до 6700 МПа.

Исследование микротвёрдости ЭП из мягких антифрикционных металлов показывает, что увеличение P_{cp} ОШ, наряду со снижением шероховатости, приводит к увеличению микротвёрдости как в самом слое, так и в подслое (рис. 12).

Влияние удельного усилия ОШ на микротвёрдость слоя и подслоя образцов с КЭП показано соответственно на рис. 13 и 14. Из рисунка 13 видно, что ЭП, имеющие на поверхности высокую микротвёрдость (11000 и 8000 МПа) с увеличением P_{cp} ОШ не упрочняются.

Микротвёрдость более мягкого КЭП состава ВНС2→Cu→ВНС2 (3500 МПа) с увеличением удельного усилия ОШ до $P_{\text{cp}} = 4000$ МПа, соответственно, увеличивается до ~5000 МПа, но, при этом, из-за возникновения микротрещин, качество слоя ухудшается. Наиболее рациональным является интервал удельного усилия ОШ 2500–3000 МПа. Более всего упрочняются ЭП с низким сопротивлением деформации, например, КЭП, сформированное в последовательности In→BK8 ($H_{\mu} = 1970$ МПа), когда микротвёрдость в поверхностном слое при ОШ с $P_{\text{cp}} = 2000$ МПа достигает 5000 МПа.

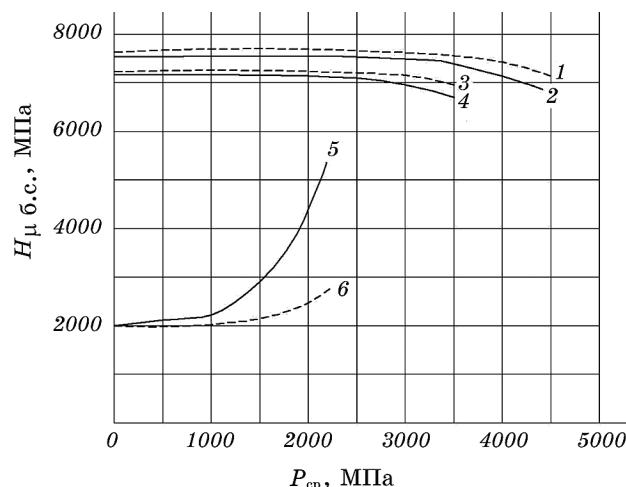


Рис. 10. Влияние удельного усилия АВ и ОШ на микротвёрдость белого слоя ($H_{\mu\text{б.с.}}$) образцов из стали 45 после ЭЭЛ: 1 — вольфрамом, АВ; 2 — вольфрамом, ОШ; 3 — хромом, АВ; 4 — хромом, ОШ; 5 — никелем, ОШ; 6 — никелем, АВ.

Fig. 10. The effect of the specific force DS and RB on the microhardness of the white layer ($H_{\mu\text{б.с.}}$) samples of steel 45 after EEA: 1—tungsten, DS; 2—tungsten, RB; 3—chromium, DS; 4—chromium, RB; 5—nickel, RB; 6—nickel, DS.

Микротвёрдость в переходном слое (подслое) для всех КЭП возрастает, но в различной степени. Здесь также существует законо-

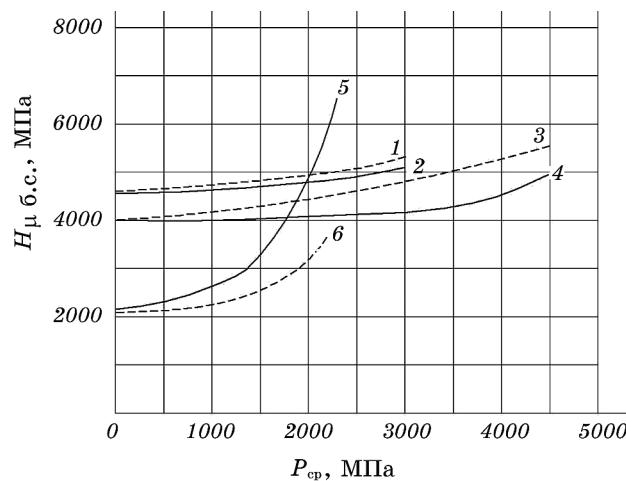


Рис. 11. Влияние удельного усилия АВ и ОШ на микротвёрдость подслоя ($H_{\mu_{п.с.}}$) образцов из стали 45 с ЭП: 1 — хромом, АВ; 2 — хромом, ОШ; 3 — вольфрамом, АВ; 4 — вольфрамом, ОШ; 5 — никелем, ОШ; 6 — никелем, АВ.

Fig. 11. The effect of the specific force DS and RB on the microhardness of the white layer ($H_{\mu_{п.с.}}$) of samples steel 45 with EEC: 1—chromium, DS; 2—chromium, RB; 3—tungsten, DS; 4—tungsten, RB; 5—nickel, RB; 6—nickel, DS.

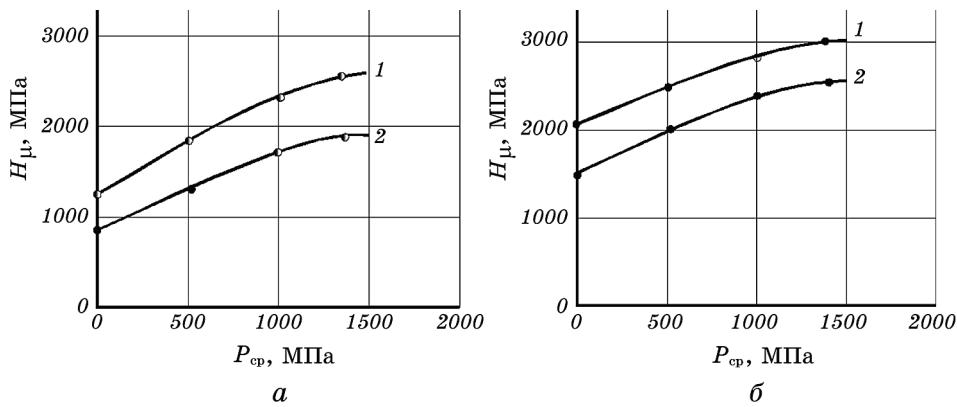


Рис. 12. Влияние удельного усилия ОШ на микротвёрдость слоя (а) и подслоя (б) образцов из стали 45 с ЭП из меди (1) и олова (2).

Fig. 12. The effect of RB specific force on microhardness of the layer (a) and the underlayer (b) of steel 45 samples with EEC from copper (1) and tin (2).

мерность: чем ниже исходная микротвёрдость подслоя КЭП, тем больше резервы её повышения.

Так, микротвёрдость КЭП: In \rightarrow VK8, Cu \rightarrow VK8, VK8 \rightarrow Cu \rightarrow VK8 возрастает, соответственно, с 3500 до 4500 МПа, с 2500 до 4000 МПа, с 2800 до 4000 МПа при возрастании удельного усилия ОШ до

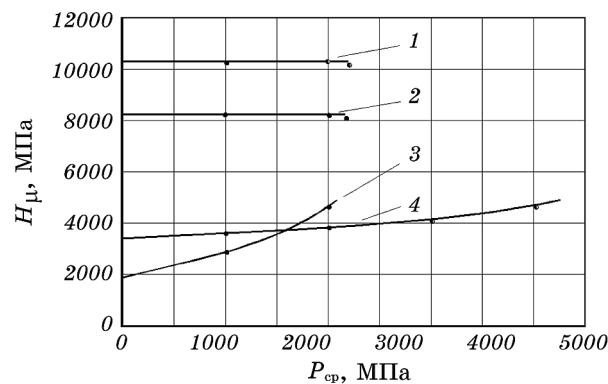


Рис. 13. Влияние ОШ на микротвёрдость поверхностного слоя образцов с КЭП: 1 — сталь 45, ЭЭЛ (Cu \rightarrow VK8); 2 — сталь 45, ЭЭЛ (VK8 \rightarrow Cu \rightarrow VK8); 3 — сталь 45, ЭЭЛ (In \rightarrow VK8); 4 — сталь 40Х, ЭЭЛ (VNS2 \rightarrow Cu \rightarrow VNS2).

Fig. 13. Effect of RB on the microhardness of the surface layer of samples with CEEC: 1—steel 45, EEA (Cu \rightarrow VK8); 2—steel 45, EEA (VK8 \rightarrow Cu \rightarrow VK8); 3—steel 45, EEA (In \rightarrow VK8); 4—steel 40X, EEL (VNS2 \rightarrow Cu \rightarrow VNS2).

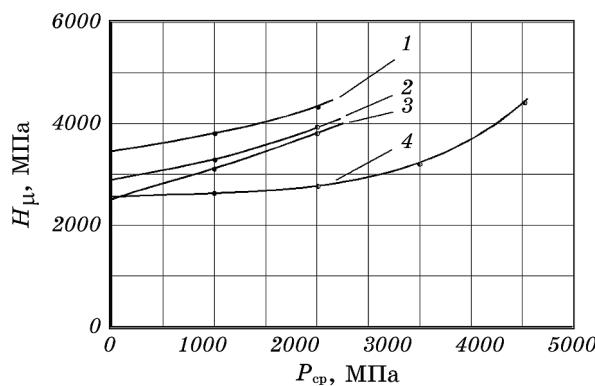


Рис. 14. Влияние ОШ на микротвёрдость подслоя образцов с КЭП: 1 — сталь 45, ЭЭЛ In \rightarrow VK8; 2 — сталь 45, ЭЭЛ VK8 \rightarrow Cu \rightarrow VK8; 3 — сталь 45, ЭЭЛ Cu \rightarrow VK8; 4 — сталь 40Х, ЭЭЛ VNS2 \rightarrow Cu \rightarrow VNS2.

Fig. 14. Effect of RB on the microhardness of the underlayer of samples with CEEC: 1—steel 45, EEA In \rightarrow VK8; 2—steel 45, EEA VK8 \rightarrow Cu \rightarrow VK8; 3—steel 45, EEA Cu \rightarrow VK8; 4—steel 40X, EEA VNS2 \rightarrow Cu \rightarrow VNS2.

2000 МПа и для КЭП состава ВНС2→Cu→ВНС2 с 2540 до 5000 МПа при $P_{cp} = 4000$ МПа.

Таким образом, в результате металлографических исследований образцов из стали 45 установлено, что для мягких ЭП не рекомендуется применять АВ, так как на всех режимах обработки происходит разрушение слоя: образование закатов, вырывов, наволакивание материала покрытия на индентор, срезание слоя и т.д.

Для повышения качества КЭП с высокой микротвёрдостью и низкой исходной шероховатостью возможно применение АВ. На рисунке 15 показано влияние удельного усилия АВ на микротвёрдость слоя и подслоя КЭП, сформированного в последовательности Cu→VK8 и VK8→Cu→VK8.

Из рисунка 15 видно, что с увеличением удельного усилия АВ микротвёрдость слоя не изменяется до $P_{cp} = 1000$ МПа, а затем несколько снижается, что свидетельствует о начале разрушения сформированного покрытия, подтверждаемое металлографическими исследованиями. Микротвёрдость в подслое повышается для покрытия Cu→VK8 от 2500 до 4500 МПа, а VK8→Cu→VK8 от 2800 до 5000 МПа. В данном случае, наиболее рациональное удельное усилие АВ, как и для покрытий из твёрдых износостойких материалов, соответствует 1000 МПа.

Проведенные исследования позволили рекомендовать для повышения качественных параметров ЭП наиболее рациональные удельные усилия деформации (табл. 2), кроме того в таблице приведены результаты их влияния на шероховатость и микротвёрдость

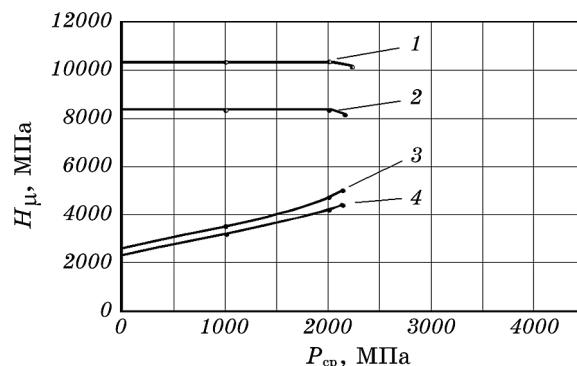


Рис. 15. Влияние АВ на микротвёрдость слоя (1, 2) и подслоя (3, 4) образцов из стали 45 с КЭП, сформированными в последовательности: Cu→VK8 (1, 4) и VK8→Cu→VK8 (2, 3).

Fig. 15. Effect of DS on the microhardness of the layer (1, 2) and the underlayer (3, 4) of steel 45 samples with CEECs formed in the sequence: Cu→VK8 (1, 4) and VK8→Cu→VK8 (2, 3).

ТАБЛИЦА 2. Рекомендуемые удельные усилия деформации ЭП различной твёрдости и результаты их воздействия на микрогеометрию и микротвёрдость сформированных покрытий.

TABLE 2. Recommended specific stress deformation of EEC with different hardness and the results of their influence on the microgeometry and microhardness of the formed coatings.

Покрытие	Установка ЭЭЛ	$P_{ср}$, МПа	R_a после ППД, мкм	Микротвёр- дость до ППД, H_u , МПа		Микротвёр- дость после ППД, H_u , МПа	
				слой	подслой	слой	подслой
Покрытия из твёрдых износостойких металлов							
Cr	«УИЛВ-8» ОШ 1700	0,5	8000	4000	8000	4500	
	«УИЛВ-8» АВ 1330	0,4	8000	4000	8000	4500	
W	«УИЛВ-8» ОШ 1380	0,6	7800	4300	7800	5000	
	«УИЛВ-8» АВ 1620	0,6	7800	4300	7800	5000	
Ni	«УИЛВ-8» ОШ 1700	0,5	2000	2000	3000	5500	
Покрытия из мягких антифрикционных металлов							
Sn	«УИЛВ-8» ОШ 750	0,5	800	1500	1500	2300	
Cu	«УИЛВ-8» ОШ 1000	0,1	1600	2000	3000	2500	
Cu	«ЭИЛ-9» ОШ 1250	0,5	1300	2100	2500	3000	
Комбинированные электроэррозионные покрытия							
In+BK8	«УИЛВ-8» ОШ 1000	0,1	1970	3500	5000	5000	
Cu+BK8	«УИЛВ-8» ОШ 1300	0,1	10490	2500	10490	3300	
Cu+BK8	«УИЛВ-8» АВ 1000	0,1	10490	2500	10490	3200	
BK8+Cu+BK8	«УИЛВ-8» ОШ 1300	0,1	8100	2800	8100	3500	
BK8+Cu+BK8	«УИЛВ-8» АВ 1000	0,1	8100	2800	8100	3500	
BNC2+Cu+BNC2	«ЭИЛ-9» ОШ 2500	1,0	3500	2500	4000	3000	

слоя и подслоя покрытий, сформированных твёрдыми износостойкими, мягкими антифрикционными металлами и КЭП.

Согласно [3], при выглаживании металлопокрытий оптимальная величина нормальной силы (P) зависит от толщины покрытия, физико-механических свойств материалов основы и покрытия, а также прочности сцепления покрытия с основой. При выглаживании мягких покрытий (серебро, кадмий и др.) нормальная сила выглаживания в основном определяется свойствами самого покрытия. Для твёрдых покрытий P зависит не только от свойств покрытий, но и от его толщины и свойств основы. При толщине покрытия до 10 мкм доминирует основа, свыше 10 мкм наблюдается совместное влияние основы и покрытия, а при толщинах более 80 мкм в основном проявляется влияние только покрытия.

Таким образом, для обобщения и упрощения выбора наиболее рационального усилия деформации предлагается все ЭП, в зависи-

мости от микротвёрдости упрочняемого слоя, разбить на три группы: мягкие (<2000 МПа), средние (2000–3000 МПа) и твёрдые (>3000 МПа). Для мягких покрытий рекомендуются $P_{cp} = 750$ –1250 МПа, средних — 1300–1500 МПа и твёрдых — 2500–3000 МПа. Мягкие покрытия рекомендуется упрочнять ОШ. Покрытия средней твёрдости и твёрдые 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[4, 5]. Процессы нагрева и охлаждения материала электродов в зоне импульсного разряда обусловливают появление в слоях, полученных ЭЭЛ, значительных напряжений. Фазовые превращения в металлах и сплавах, сопутствующие ЭЭЛ, также приводят к образованию в них напряжённого состояния. Измерение остаточных напряжений в слое ЭЭЛ показывает наличие в большинстве случаев значительных растягивающих напряжений [6].

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 счёт применения КЭП обусловливает необходимость дальнейшего изучения остаточных напряжений, возникающих в покрытиях, сформированных как за счёт мягких антифрикционных металлов, так и твёрдых износостойких материалов.

На рисунке 16 отображены результаты измерения осевых остаточных напряжений в поверхностных слоях стали 45 с ЭП из меди и КЭП, сформированного в последовательности $Cu \rightarrow Cr$, а также влияния ППД на величину и знак этих напряжений.

ЭЭЛ стали 45 медью приводит к формированию в её поверхностном слое растягивающих напряжений с глубиной залегания до 0,1 мм и максимальной величиной на поверхности до 170 МПа. Нанесение на сталь 45 КЭП, сформированного в последовательности $Cu \rightarrow Cr$, 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 $Cu \rightarrow Cr$ деформационные кривые значительно изменяются, так как деформации имеют отрицательный знак (рис. 16), что определяет наличие в поверхностном слое благоприятных напряжений сжатия.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что нанесение на сталь 45 методом ЭЭЛ мягких антифрикционных и КЭП обусловливает наличие в поверхностном слое не-

благоприятных растягивающих напряжений. Применение в качестве предварительного покрытия из меди снижает величину растягивающих напряжений при ЭЭЛ твёрдым износостойким металлом хромом с 250 МПа до 210 МПа. Последующее ППД как мягких антифрикционных, так и КЭП формирует в поверхностном слое благоприятные сжимающие напряжения, которые полностью нейтрализуют растягивающие, образованные ЭЭЛ.

Упрочнение поверхности (например, наклёт, азотирование, цементация) обусловливает эффективное повышение усталостной прочности деталей.

В связи с тем, что при ЭЭЛ возможно существенное упрочнение поверхности, следовало бы ожидать и увеличения усталостной прочности. Однако установлено, что ЭЭЛ снижает усталостную прочность по причине накопления в поверхностных слоях растягивающих напряжений.

Снижение уровня остаточных напряжений при применении КЭП, состоящих из мягкого антифрикционного металла и твёрдого износостойкого материала, по сравнению с покрытиями, состоя-

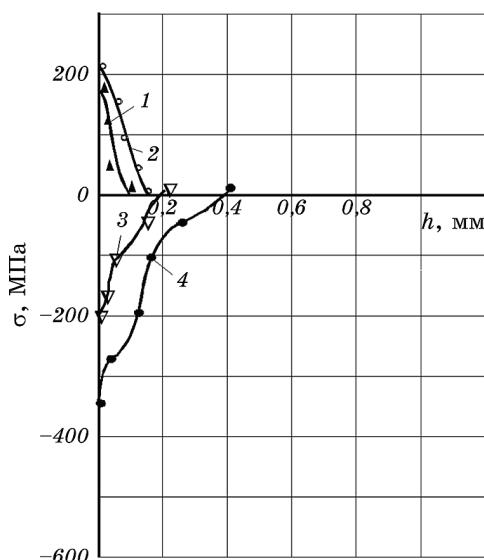


Рис. 16. Влияние ППД на распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя стали 45 с электроэррозионным покрытием из меди, сформированного в последовательности $\text{Cu} \rightarrow \text{Cr}$: 1 — ЭИЛ Cu; 2 — ЭИЛ Cu+Cr; 3 — ЭИЛ Cu+ППД; 4 — ЭИЛ Cu+Cr+ППД.

Fig. 16. Influence of SPD on the distribution of residual stress over the depth of the surface layer of steel 45 with an EEC from copper formed in the operating sequence $\text{Cu} \rightarrow \text{Cr}$: 1—EEA Cu; 2—EEA Cu+Cr; 3—EEA Cu+SPD; 4—EEA Cu+Cr+SPD.

щими только из твердого износостойкого материала, например, Cu \rightarrow Cr и Cr, обуславливает проведение испытаний этих покрытий на усталостную прочность (рис. 17).

При испытании натурных валов с КЭП Cu \rightarrow 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 \rightarrow Cr увеличивает их усталостную прочность на 16–20% выше базового варианта (образцов без покрытия).

Увеличение предела выносливости натурных валов за счёт 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 микротрецина, развиваясь вглубь и «натыкаясь» на мягкую составляющую КЭП, временно «затухает» (релаксирует), увеличивая тем самым уст-

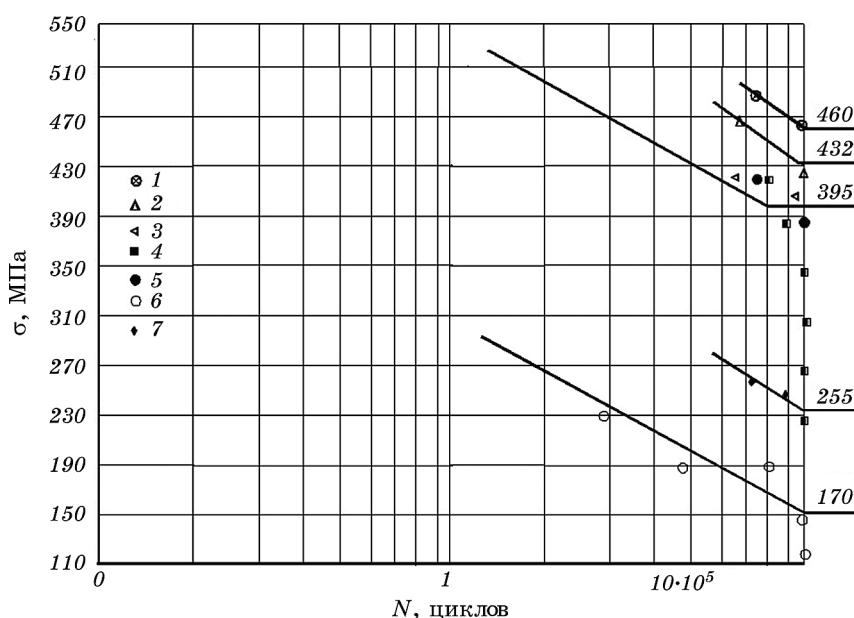


Рис. 17. Усталостная прочность натурных образцов из стали 45 после ЭЭЛ и ППД: 1 — ЭЭЛ Cu \rightarrow ЭЭЛ Cr \rightarrow ОШ; 2* — ЭЭЛ Cr \rightarrow АВ; 3 — ЭЭЛ Cu \rightarrow ОШ; 4 — без упрочнения; 5* — ЭЭЛ Cr \rightarrow ОШ; 6* — ЭЭЛ Cr; 7 — ЭЭЛ Cu \rightarrow ЭЭЛ Cr (* — данные взяты для сравнения из [7]).

Fig. 17. Endurance strength of full-scale specimens of steel 45 after EEA and SPD: 1—EEA Cu \rightarrow EEA Cr \rightarrow RB; 2*—EEA Cr \rightarrow DS; 3—EEA Cu \rightarrow RB; 4—without hardening; 5*—EEA Cr \rightarrow RB; 6*—EEA Cr; 7—EEA Cu \rightarrow EEA Cr (*—data taken for comparison from [7]).

лостную прочность вала. Предел выносливости натурных образцов с покрытием из мягкого антифрикционного металла меди и последующей ППД находится на уровне образцов без покрытия, поэтому данный комплекс упрочняющих технологий можно рекомендовать к практическому применению.

3. ВЫВОДЫ

1. Для обобщения и упрощения выбора наиболее рационального усилия деформации предлагается все электроэррозионные покрытия, в зависимости от микротвёрдости упрочняемого участка покрытия, разбить на три группы: мягкие (<2000 МПа), средние ($2000\text{--}3000$ МПа) и твёрдые (>3000 МПа). Для мягких покрытий рекомендуются удельные усилия деформации $P_{cp} = 750\text{--}1250$ МПа, средних — $1300\text{--}1500$ МПа и твёрдых — $2500\text{--}3000$ МПа.
2. Применение КЭП, сформированных за счёт 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.
3. 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.
4. Эффективность ППД как метода снижения уровня шероховатости поверхности зависит от удельного усилия обкатки и способа ЭЭЛ.
5. Найдены зависимости твёрдости поверхностных слоёв от удельного усилия деформации, которое рассчитано по геометрическим параметрам очага деформации, определённым на основании анализа напряженно-деформированного состояния при ППД. Согласно зависимости $H_\mu = f(P_{cp})$ получено, что рациональными удельными усилиями ППД являются 1000 МПа для алмазного выглаживания и 1500 МПа для обкатки шариком.
6. Выявлено, что наиболее эффективно ППД, с точки зрения деформационного упрочнения, при уменьшении исходной твёрдости зоны термического влияния или наличии мягкого подслоя после ЭЭЛ.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, Н. С. Евтушенко, В. О. Герасименко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **40**, № 2: 235 (2018).

2. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, Н. С. Евтушенко, В. О. Герасименко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **40**, № 6: 795 (2018).
3. Л. А. Хворостухин, С. В. Шишкин, А. П. Ковалев, Р. А. Ишмаков, *Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением* (Москва: Машиностроение: 1988).
4. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, М. Я. Довжик, *Металлофиз. новейшие технол.*, **38**, № 12: 1611 (2016).
5. G. V. Kirik, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, O. M. Myslyvchenko, and B. Antoszewski, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **56**, Iss. 11–12: 688 (2018).
6. А. Е. Гитлевич, В. В. Михайлов, Н. Я. Парканский, В. М. Ревутский, *Электроискровое легирование металлических поверхностей* (Кишинёв: Штингца: 1985).
7. В. Б. Тарельник, *Зміцнення поверхневих шарів інструментта та важкоанавантажених деталей електроерозійним легуванням з наступною пластичною деформацією* (Автореф. дис. канд. техн. наук) (Луганськ: Східноукраїнський ун-т: 1994).

REFERENCES

1. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, I. V. Konoplianchenko, N. S. Evtushenko, and V. A. Herasymenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 2: 235 (2018) (in Russian).
2. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, I. V. Konoplianchenko, N. S. Evtushenko, and V. A. Herasymenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 6: 795 (2018) (in Russian).
3. L. A. Khvorostukhin, S.V. Shishkin, A.P. Kovalev, and R. A. Ishmakov, *Povyshenie Nesushchey Sposobnosti Detaley Mashin Poverkhnostnym Uprochneniem* (Moscow: Mashinostroenie: 1988) (in Russian).
4. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko, and M. Ya. Dovzhyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 12: 1611 (2016) (in Russian).
5. G. V. Kirik, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, O. M. Myslyvchenko, and B. Antoszewski, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **56**, Iss. 11–12: 688 (2018).
6. A. E. Gitlevich, V. V. Mikhaylov, N. YA. Parkanskiy, and V. M. Revutskiy, *Elektroiskrovoe Legirovanie Metallicheskikh Poverkhnostey* (Kishinev: Shtintsa: 1985) (in Russian).
7. V. B. Tarelnyk, *Zmitsnennya Poverkhnevykh Shariv Instrumenta ta Vazhkonavantazhenykh Detaley Elektroeroziynym Leguvannym z Nastupnoyu Plastychnoyu Deformatsiyeyu* (Thesis of Disser. ... for the Degree of Cand. Tech. Sci.) (Lugansk: East Ukrainian University: 1994) (in Ukrainian).