

METALLIC SURFACES AND FILMS

PACS numbers: 62.20.Qp, 68.35.Ct, 68.35.Gy, 68.55.-a, 81.15.Rs, 81.40.Pq, 81.65.Lp

Повышение качества поверхностных электроэрозионно- легированных слоёв комбинированными покрытиями и поверхностным пластическим деформированием. II. Анализ напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя после поверхностной пластической деформации электроэрозионных покрытий

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

*Сумский национальный аграрный университет,
ул. Герасима Кондратьева, 160,
40021 Сумы, Украина*

**Сумский государственный университет,
ул. Римского-Корсакова, 2,
40007 Сумы, Украина*

В работе проведён анализ напряжённо-деформированного состояния при поверхностной пластической деформации электроэрозионных слоёв с целью определения алгоритма расчёта технологических параметров поверхностной пластической деформации. Получены уравнения, позволяющие определить геометрические параметры очага деформации и его макроскопические параметры — глубину наклёпанного слоя и интенсивность деформации для различных покрытий из твёрдых и мягких металлов, а также комбинированных электроэрозионных покрытий. Разработанная математическая модель позволяет спрогнозировать эксплуатационные характеристики получаемых слоёв.

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

Sumy National Agrarian University, 160 H. 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. Vasylenko, Improvement of Quality of the Surface Electroerosive Alloyed Layers by the Combined Coatings and the Surface Plastic Deformation. II. The Analysis of a Stressedly-Deformed State of Surface Layer after a Surface Plastic Deformation of Electroerosive Coatings, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 41, No. 2: 173–192 (2019) (in Russian), DOI: [10.15407/mfint.41.02.0173](https://doi.org/10.15407/mfint.41.02.0173).

Ключевые слова: электроэрозионное легирование, комбинированное покрытие, пластическое деформирование, микротвёрдость.

В роботі проведено аналізу напружено-деформованого стану при поверхневій пластичній деформації електроерозійних шарів з метою визначення алгоритму розрахунку технологічних параметрів поверхневої пластичної деформації. Одержано рівняння, що уможливають визначити геометричні параметри осередку деформації та його макроскопічні параметри — глибину наклепаного шару й інтенсивність деформації для різних покриттів з твердих і м'яких металів, а також комбінованих електроерозійних покриттів. Розроблений математичний модель уможливає спрогнозувати експлуатаційні характеристики одержуваних шарів.

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

The stressedly deformed state after a surface plastic deformation of electroerosive coatings is analysed for the goal of determination of the algorithm for calculation of the technological parameters of a surface plastic deformation. Obtained equations allow determining the geometrical parameters of deformation zone and its macroscopic parameters—the hammer-hardened layer depth and the strain rate for various coatings of the hard and soft metals as well as combined electroerosive coatings. Developed mathematical model allows predicting the performance characteristics of coatings.

Key words: electroerosive alloying, combined coating, plastic deformation, microhardness.

(Получено 8 октября 2018 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

В части I [1] настоящей работы представлены результаты исследований закономерностей формирования структуры комбинированных электроэрозионных покрытий (КЭП), сформированных методом электроэрозионного легирования (ЭЭЛ) с использованием электродов из твёрдых износостойких и мягких антифрикционных материалов, применяемых в различной последовательности, на подложках из специальных сталей и сплавов. Выявлены зависимости качественных характеристик КЭП от технологических параметров процесса, что позволило выработать общие подходы при выборе технологии управления качеством этих слоёв, установлении структуры технологического воздействия.

Металлографические исследования КЭП показали, что для стальных подложек наиболее предпочтительными являются КЭП, сформированные в последовательности ЭЭЛ Cu + ЭЭЛ ВК8 и квазимногослойные покрытия состава ЭЭЛ ВК8 + ЭЭЛ Cu + ЭЭЛ ВК8, когда микротвёрдость поверхностного слоя находится на достаточ-

но высоком уровне, соответственно, $H_{\mu} = 12300$ и 8740 МПа, шероховатость низкая ($R_a = 0,5$ мкм), резкие перепады микротвёрдости в переходной зоне отсутствуют, микротвёрдость от максимальной на поверхности плавно снижается по мере углубления до твёрдости основного металла. При упрочнении никелевого сплава ХН58МБЮД положительные результаты (низкая шероховатость, высокая микротвёрдость и сплошность) обеспечивают КЭП, сформированные в последовательности ЭЭЛ ВК8 + ЭЭЛ ВК8 + ЭЭЛ Cu и ЭЭЛ ВК8 + ЭЭЛ ВК8 + ЭЭЛ Ni. Наиболее высокие результаты по микротвёрдости (14200 МПа) получены при ЭЭЛ стали 45 и Р6М5 композиционным электроэрозионным материалом 90% ВК6 + 10% 1М, где 1М — 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% В (% вес.).

В результате исследований, проведённых на электронном микроскопе, установлено, что КЭП, сформированное электродами из твёрдого сплава ВК8 и меди, в последовательности ВК8 → Cu → ВК8, состоит из основного элемента твёрдого сплава — вольфрама, и меди, концентрации которых равномерны по всей глубине слоя. В переходной зоне от покрытия к основе концентрации вольфрама и меди снижаются, концентрация железа увеличивается. В покрытии присутствуют поры и микротрещины.

При ЭЭЛ многокомпонентным сплавом 1М состава 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% В отмечается значительное улучшение структуры слоя (снижение пористости, отсутствие трещин). Это объясняется тем, что вольфрам, как основной компонент твёрдого сплава ВК8, не образует твёрдых растворов с железом, а никель и хром, как основные компоненты сплава 1М, неограниченно растворяются, соответственно в γ - и α -железе. Толщина слоя на данном участке составляет до 40 мкм. Покрытие состоит из элементов легирующего электрода: никеля, хрома и кремния.

Недостаточное количество данных по анализу процессов поверхностного пластического деформирования (ППД) поверхностных слоёв, предварительно упрочнённых ЭЭЛ, сдерживает развитие рассматриваемого комплекса упрочняющих технологий. Поэтому анализ напряжённо-деформированного состояния при поверхностной пластической деформации ЭЭЛ слоёв с целью определения алгоритма расчёта технологических параметров ППД, обеспечивающих требуемое упрочнение и, соответственно, эксплуатационные характеристики поверхностного слоя и самого изделия, а также экспериментальные исследования комбинированной технологии (КТ) обработки ЭЭЛ + ППД и разработка технологических рекомендаций выполнения процесса актуальны.

2. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Контактное нагружение возникает при осуществлении технологи-

ческих процессов упрочнения деталей машин ППД, при выдавливании в материале углублений различной формы, в процессе измерения твёрдости и в ряде других случаев [2]. Чаще всего в зоне силового контакта тел возникает местная упругопластическая деформация.

Однако строгая математическая теория, позволяющая решать задачи, связанные с упругопластической контактной деформацией, ещё не создана. Этим, в частности, обуславливается необходимость и практическая целесообразность разработки инженерных методов расчёта.

В работе представлена методика расчёта геометрических параметров очага деформации для поверхностных слоёв со сложной структурой, которые получают при ЭЭЛ. Она разработана на основании расчёта главных геометрических параметров очага деформации для однородных тел — инженерного метода М. С. Дрозда и базируется на понятии пластической твёрдости (НД).

Для удобства сравнения с твёрдостью по Бринеллю в [3] предложено считать значением пластической твёрдости отношение:

$$\text{НД} = \frac{P - P_0}{\pi D h}, \quad (1)$$

где P — произвольная нагрузка, P_0 — критическая нагрузка, численно равная отрезку, отсекаемому линейной аппроксимацией функции $P = f(h)$ на оси P , D — диаметр внедряемого шарика, h — глубина остаточной вмятины.

Переход от твёрдости НВ, параметра, характеризующего сопротивление металла контактному нагружению, к пластической твёрдости НД, интерпретируемой как модуль упрочнения материала, позволяет также рассматривать эту величину как характеристику сопротивления материала контактной пластической деформации. Следует отметить, что в случае ППД упрочнённых ЭЭЛ слоёв такая характеристика их физико-механических свойств физически более обоснована и удобна, поскольку фактически определяет способность слоя к упрочнению в процессе ППД и, таким образом, изменению эксплуатационных свойств данного слоя.

Ранее получено, что формирование структуры поверхностного ЭЭЛ слоя во многом зависит от твёрдости материала легирующего электрода и последовательности нанесения слоёв [4–6]. Установлено также, что в случае ЭЭЛ твёрдыми износостойкими материалами, на поверхности катода (детали) возникает так называемый белый слой, который, как правило, имеет твёрдость значительно выше твёрдости основного металла. Под белым слоем расположена переходная зона — подслой, представляющий собой область термического воздействия импульсных разрядов и диффузионного взаимопроникновения элементов анода и катода. Твёрдость этой зоны

плавно изменяется по глубине по сравнению с твёрдостью белого слоя [4–8].

В случае ЭЭЛ мягкими антифрикционными материалами микротвёрдость поверхностного слоя значительно снижается, изменяя тем самым механизм упрочнения поверхностного слоя [4–8].

Комбинированные электроэрозионные покрытия, в зависимости от последовательности нанесения твёрдых и мягких материалов, могут иметь различную микротвёрдость как на поверхности, так и по глубине. Поэтому, рассматривая КЭП с позиций последующего их упрочнения ППД, в зависимости от микротвёрдости, механизм их упрочнения может быть идентичен как упрочнению покрытий из твёрдых износостойких, так и из мягких антифрикционных материалов.

Учитывая вышесказанное, следует отметить, что повышение качества ЭЭЛ слоёв ППД (снижение шероховатости, повышение микротвёрдости и т.д.) во многом зависит от структуры легированного слоя и от правильно выбранных режимов силового воздействия на них.

Таким образом, целью работы является разработка общего подхода к комбинации технологий ЭЭЛ, формирующих поверхностные слои различной твёрдости, и ППД, базирующегося на анализе напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При ЭЭЛ как твёрдыми износостойкими, так и мягкими антифрикционными материалами, за исключением легирования углеродом (графитовым электродом), толщина изделия увеличивается за счёт переноса материала с анода (легирующего электрода) на катод (деталь) на толщину сформированного слоя (Δh_c) [9, 10], например, в случае ЭЭЛ вала его диаметр (D_v) будет увеличен на $2\Delta h_c$.

Для любого материала электрода толщину сформированного при ЭЭЛ слоя, можно найти, используя уравнение массопереноса, предложенное в [5], или измерив микрометром.

Рассмотрим изменение геометрических параметров контактирующих тел в зависимости от микротвёрдости поверхностных слоёв, сформированных ЭЭЛ (рис. 1).

При ЭЭЛ твёрдым износостойким материалом сферический индентор (рис 1, а), под воздействием приложенной к нему нагрузки P , вминает твёрдый белый слой в более мягкий переходной подслой, упрочняя при этом последний. Белый слой служит как бы передаточным звеном, увеличивая при этом радиус индентора (R_n) на толщину твёрдого белого слоя ($\Delta h_{bc} = \Delta h_t$) и уменьшая D_v на $2\Delta h_t$.

В случае ЭЭЛ мягкими антифрикционными материалами величина радиуса сферического индентора остаётся без изменений, а диаметр вала увеличивается на $2\Delta h_c$. Деформированию и упрочне-

нию в этом случае подвергаются как мягкий поверхностный слой, так и переходный слой — подслой (рис. 1, б).

В последнее время для повышения качества поверхностных слоёв подшипниковых шеек валов роторов все чаще используется легирование углеродом (графитовым электродом) с последующей обработкой ППД [11]. Легирование углеродом представляет собой метод цементации электроэрозионным легированием (ЦЭЭЛ) [12, 13].

По сравнению с обычной цементацией, способ ЦЭЭЛ обладает ря-

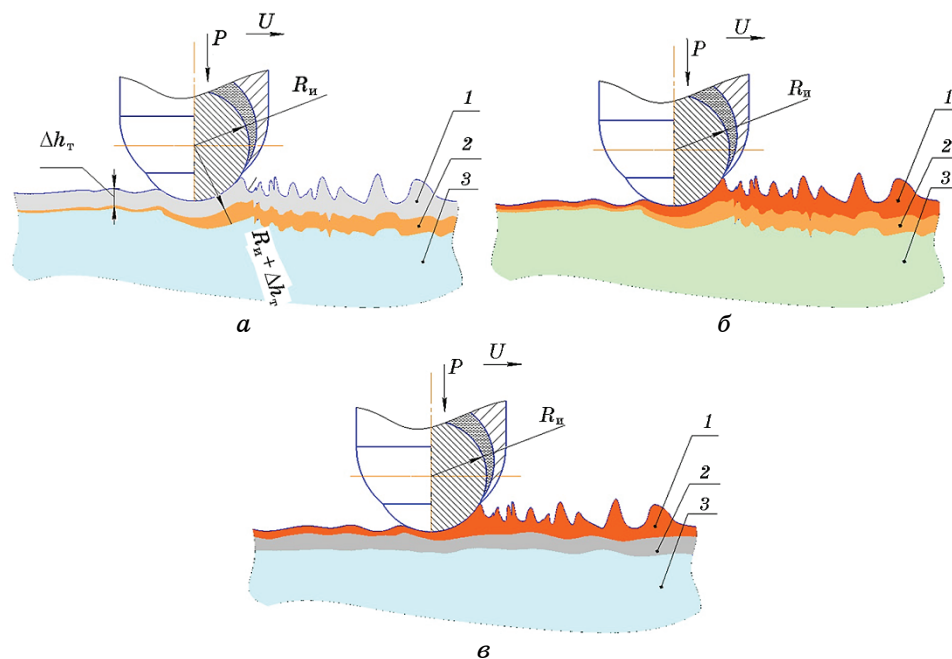


Рис. 1. Схема ППД электроэрозионных покрытий: из твёрдых износостойких материалов и после ЦЭЭЛ (а) (1 — недеформируемый белый слой, 2 — упрочнённый переходный слой, 3 — основной металл); из мягких антифрикционных металлов (б) (1 — упрочняемый мягкий поверхностный слой, 2 — упрочняемый переходный слой, 3 — основной металл); из мягких антифрикционных металлов, нанесённых на ЦЭЭЛ слой (в) (1 — упрочняемый мягкий поверхностный слой, 2 — ЦЭЭЛ слой, 3 — основной металл).

Fig. 1. Scheme of surface plastic deformation of electroerosive coatings: from hard wear-resistant materials and after carbonization by electroerosive alloying (CEEА) (а) (1—non-deformable white layer, 2—hardened transition layer, 3—base metal); from soft antifriction metals (б) (1—hardened soft surface layer, 2—hardened transition layer, 3—base metal); from soft antifriction metals deposited on the CEEА layer (в) (1—strengthened soft surface layer, 2—CEEА layer, 3—base metal).

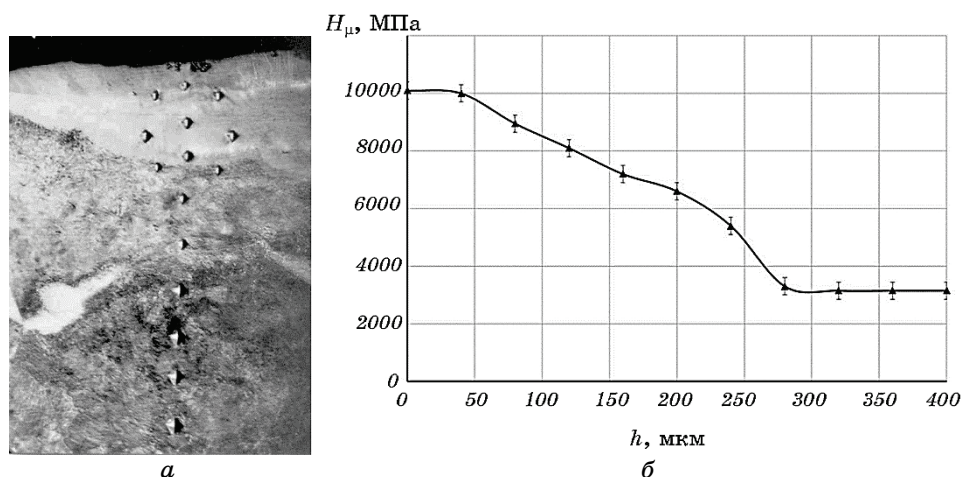


Рис. 2. Микроструктура (а) и распределение микротвёрдости в поверхностном слое (б) образца стали 40Х после ЦЭЭЛ при $W_p = 6,8$ Дж; $\times 200$.

Fig. 2. Microstructure (a) and distribution of microhardness in surface layer (b) of sample from steel 40X after CEEA at $W_p = 6.8$ J; $\times 200$.

дом достоинств, присущих методу ЭЭЛ. Это, прежде всего, возможность проведения процесса локально в заданном месте, отсутствие поводок и короблений, многократная экономия энергоресурсов, малогабаритное оборудование и др. [14–16].

При ЦЭЭЛ толщина упрочнённого слоя напрямую зависит от энергии разряда и времени легирования. С увеличением энергии разряда увеличивается не только глубина упрочнённого слоя, но и шероховатость поверхности [17, 18]. На рисунке 2 показаны структура поверхностного слоя и распределение микротвёрдости стали 40Х после ЦЭЭЛ в течение 5 мин при энергии разряда $W_p = 6,8$ Дж.

После ЦЭЭЛ с целью снижения шероховатости поверхности и повышения усталостной прочности вала производится ППД-обработка. Кроме того, при ЦЭЭЛ ранее термообработанных деталей под слоем повышенной твёрдости может возникнуть слой пониженной твёрдости так называемый «провал твёрдости», который можно устранить последующей ППД-обработкой [19, 20].

В [11] с целью повышения качества поверхности предлагается перед обработкой методом ППД на цементированный слой наносить покрытия толщиной 0,02–0,05 мм на диаметр из мягких антифрикционных материалов, например, меди, серебра и др. (рис. 3).

Как уже отмечалось, повышение качества цементированных ЭЭЛ слоёв методом ППД, а именно, снижение шероховатости, повышение микротвёрдости и т.д., во многом зависит от структуры легированного слоя и от правильно выбранных режимов силового воздей-

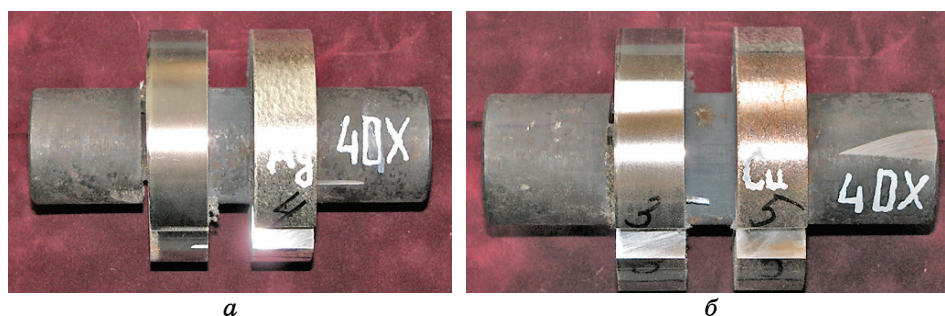


Рис. 3. Стальные образцы для исследования результатов ЦЭЭЛ и ЭЭЛ: *a* — серебром и *б* — медью.

Fig. 3. Steel samples for the study of results of CEEA and EEA with: *a*—silver and *б*—copper.

ствия на них.

Следует отметить, что структура и распределение микротвёрдости поверхностных слоёв, сформированных методом ЭЭЛ после алитирования [21, 22] (легирования алюминиевым электродом), сульфоалитирования (легирования алюминиевым электродом стальной поверхности, на которую наносили консистентное вещество в виде серной мази с содержанием серы 33,3%) [23], а также сульфоцементации (при замене алюминиевого электрода на графит-

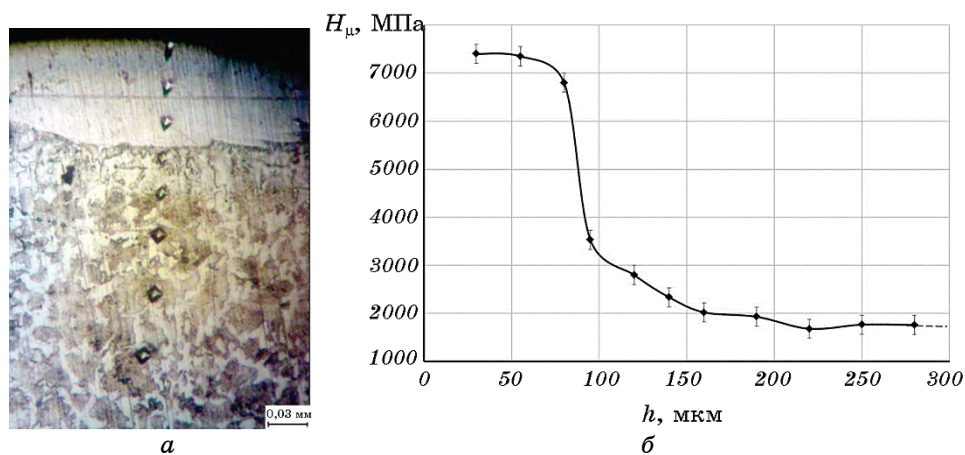


Рис. 4. Микроструктура (*a*) и распределение микротвёрдости в поверхностном слое (*б*) для образца из стали 40X после алитирования методом ЭЭЛ при $W_p = 6,8$ Дж.

Fig. 4. Microstructure (*a*) and distribution of microhardness in surface layer (*б*) for sample from steel 40X after aluminizing by EEA at $W_p = 6.8$ J.

товый) [24] аналогичны ЦЭЛ, когда упрочнение поверхностного слоя образца происходит без изменения его размеров (рис. 4–6).

Геометрические параметры контактирующих тел ниже корректируются с учётом параметра толщины твёрдого цементированного слоя ($\Delta h_{\text{ц}} = \Delta h_{\text{т}}$) и толщины слоя из мягкого антифрикционного металла ($\Delta h_{\text{с}}$).

При ППД цементированного поверхностного слоя индентор (рис. 1, а), под воздействием приложенной к нему нагрузки P , вминает твёрдый цементированный слой ($\Delta h_{\text{т}}$) в более мягкий переходный подслой, упрочняя при этом последний. Цементированный слой увеличивает радиус индентора $R_{\text{и}}$ на величину, равную $\Delta h_{\text{т}}$, и уменьшая диаметр вала на $2\Delta h_{\text{т}}$.

Толщину цементированного слоя можно определить из [25] или измерив его на шлифе образца свидетеля.

В случае ЭЛ мягкими антифрикционными материалами поверхностного слоя после ЦЭЛ микротвёрдость поверхностного

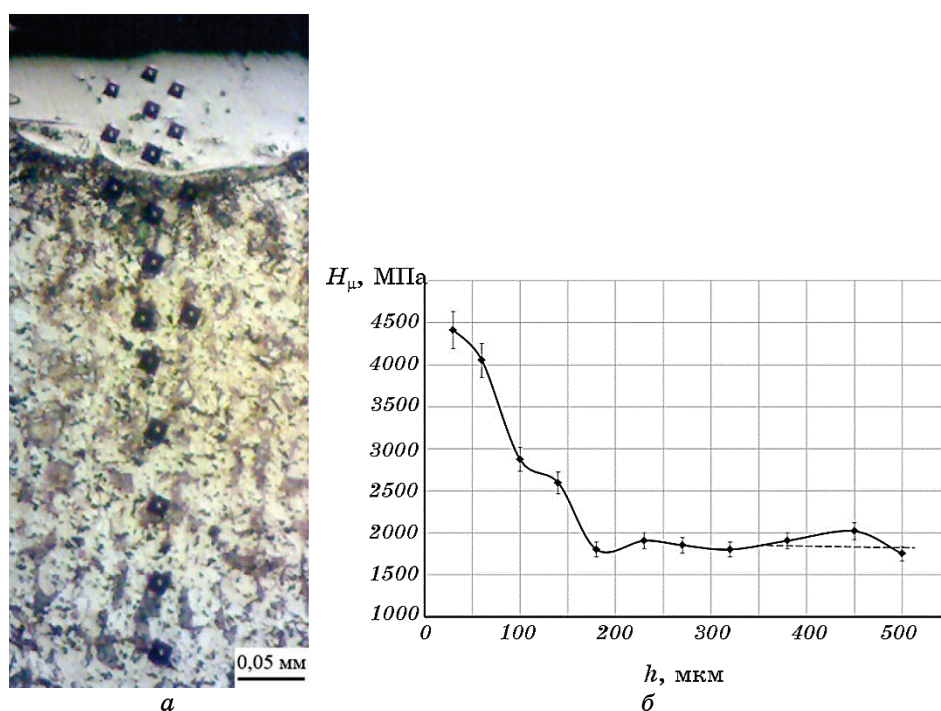


Рис. 5. Микроструктура (а) и распределение микротвёрдости в поверхностном слое (б) образца стали 20 после сульфалитирования методом ЭЭЛ при $W_p = 6,8$ Дж.

Fig. 5. Microstructure (а) and distribution of microhardness in surface layer (б) of sample from steel 20 after sulfoaluminizing by EEA at $W_p = 6.8$ J.

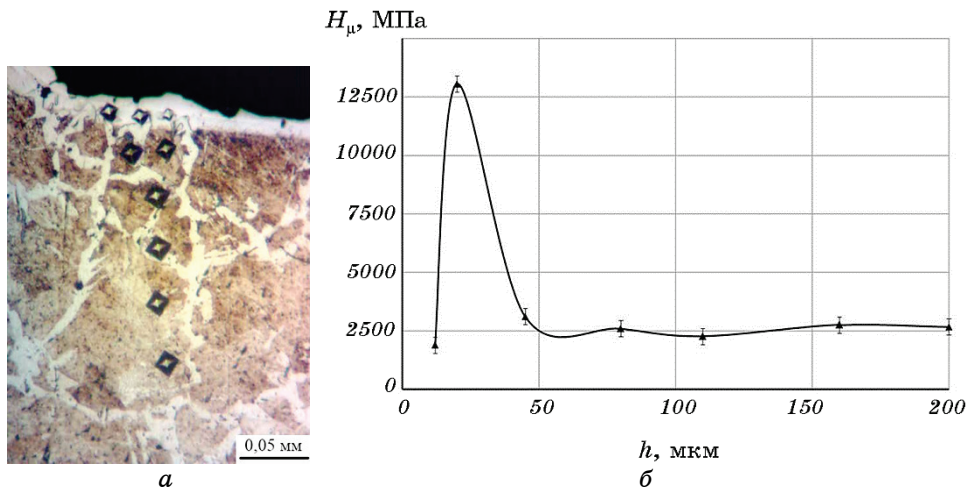


Рис. 6. Структура (а) и распределение микротвёрдости в поверхностном слое стали 40Х (б) после сульфоцементации при $W_p = 0,52$ Дж.

Fig. 6. Microstructure (а) and distribution of microhardness in surface layer of steel 40X (б) after sulfocementation at $W_p = 0.52$ J.

слоя снижается, изменяя тем самым механизм упрочнения поверхностного слоя. После ЭЭЛ мягкими металлами диаметр D_e будет увеличен на $2\Delta h_c$, а радиус индентора не изменится. Деформированию и упрочнению в этом случае подвергается мягкий поверхностный слой, а переходный, в данном случае цементированный слой, не упрочняется (рис. 1, в).

Согласно схеме контакта, приведённой на рис. 7, можно определить значения геометрических параметров контактирующих поверхностей:

$$R_{11} = R_n, R_{12} = \infty, R_{21} = R_{11}, R_{22} = R_b. \quad (2)$$

С учётом параметров ЭЭЛ слоя, приведённых выше, выражения (2) примут следующий вид.

Для твёрдых покрытий:

$$\left. \begin{aligned} R_{11} &= R_n + \Delta h_{6c} = R_u + \frac{2}{3} \Delta h_c, \\ R_{12} &= \infty, \\ R_{21} &= R_{11}, \\ R_{22} &= R_b + \Delta h_c - \frac{2}{3} \Delta h_c = R_b + \frac{1}{3} \Delta h_c. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

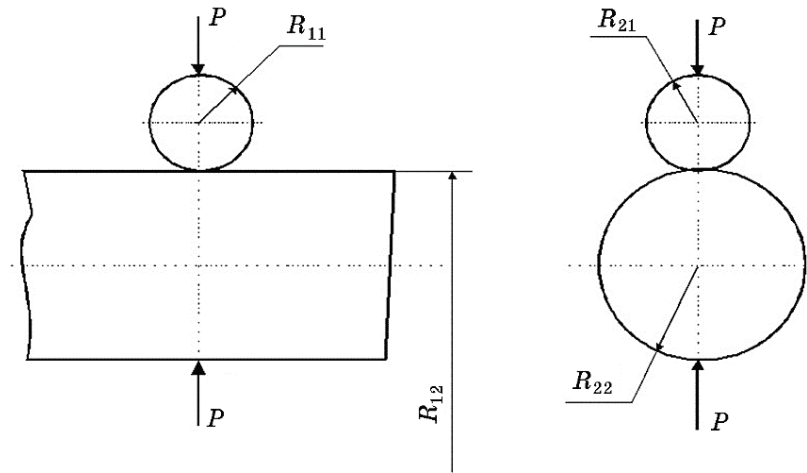


Рис. 7. Схема контакта при шлифовании вала путём обработки шариком (ОШ) и алмазного выглаживания (АВ).

Fig. 7. Contact scheme for shaft processing by running in ball (RB) and diamond smoothing (DS).

Для мягких покрытий:

$$R_{11} = R_u, R_{12} = \infty, R_{21} = R_{11}, R_{22} = R_b + \Delta h_c. \quad (4)$$

Для цементированных слоёв:

$$R_{11} = R_u + \Delta h_u, R_{12} = \infty, R_{21} = R_{11}, R_{22} = R_e - \Delta h_u. \quad (5)$$

Для цементированного слоя с покрытием из мягкого антифрикционного металла (далее мягкого покрытия) выражение (2) будет соответствовать (4).

Главные кривизны поверхностей контактирующих тел, с учётом приведённых выше корректировок, можно определить при помощи следующих соотношений.

Для твёрдых покрытий:

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{1}{2} \left(\left(R_u + \frac{2}{3} \Delta h_c \right)^{-1} + \frac{1}{\infty} \right), \\ B &= \frac{1}{2} \left(\left(R_u + \frac{2}{3} \Delta h_c \right)^{-1} + \left(R_b + \frac{1}{3} \Delta h_c \right)^{-1} \right). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Для мягких покрытий:

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{\text{и}}} + \frac{1}{\infty} \right), \quad B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{\text{и}}} + \frac{1}{R_{\text{в}} + \Delta h_c} \right). \quad (7)$$

Для цементированных слоёв:

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{\text{и}} + \Delta h_{\text{ц}}} + \frac{1}{\infty} \right), \quad B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{\text{и}} + \Delta h_{\text{ц}}} + \frac{1}{R_{\text{в}} - \Delta h_{\text{ц}}} \right). \quad (8)$$

Если $A/B \geq 0,5$, то приведённый радиус кривизны контактирующих поверхностей определяется из соотношения

$$D_{\text{пр}} = 2R_{\text{пр}} = (AB)^{-1/2} = \frac{1}{A} \sqrt{\frac{A}{B}}. \quad (9)$$

Подставляя из (5) и (6) значения A и B и проводя необходимые преобразования, получим соответственно:

– для твёрдых покрытий

$$R_{\text{пр}} = \left(R_{\text{и}} + \frac{2}{3} \Delta h_c \right) \left(1 + \left(R_{\text{и}} + \frac{2}{3} \Delta h_c \right) \left(R_{\text{в}} + \frac{1}{3} \Delta h_c \right)^{-1} \right)^{-1/2}, \quad (10)$$

– для мягких покрытий

$$R_{\text{пр}} = R_{\text{и}} \left(1 + \frac{R_{\text{и}}}{R_{\text{в}} + \Delta h_c} \right)^{-1/2}, \quad (11)$$

– для цементированных слоёв

$$R_{\text{пр}} = (R_{\text{и}} + \Delta h_{\text{ц}}) \left(1 + \frac{R_{\text{и}} + \Delta h_{\text{ц}}}{R_{\text{в}} - \Delta h_{\text{ц}}} \right)^{-1/2}. \quad (12)$$

При $A/B < 0,5$

$$R_{\text{пр}} = \frac{\omega}{2A}, \quad (13)$$

где

$$\omega = 2 \frac{A}{B} \left[n_{\text{п}} n_{\text{б}} \left(1 + \frac{A}{B} \right) \right]^{-1}, \quad (14)$$

$n_{\text{п}}, n_{\text{б}}$ — коэффициенты, зависящие от соотношения главных кривизн A/B , приводятся в справочных таблицах [3].

Учитывая значения A и B , получим:

– для твёрдых покрытий

$$R_{\text{пр}} = \omega \left(R_{\text{и}} + \frac{2\Delta h_c}{3} \right), \quad (15)$$

– для мягких покрытий

$$R_{\text{пр}} = \omega R_{\text{и}}, \quad (16)$$

– для цементированных слоёв

$$R_{\text{пр}} = \omega(R_{\text{и}} + \Delta h_{\text{ц}}). \quad (17)$$

Остаточное смещение центра контакта определяется по формуле:

$$h = \frac{P - P_0}{2\pi \text{НД} R_{\text{пр}}}, \quad (18)$$

где

$$P_0 = P_{0,10} \left(\frac{R_{\text{пр}}}{5} \right) = 11 \exp(1,9(10^{-3} \text{НД} - 1)^{0,668}) \left(\frac{R_{\text{пр}}}{5} \right)^2. \quad (19)$$

С учётом приведённых выше корректировок параметров контактирующих поверхностей определяем полное сближение α в контакте и его упругую составляющую α_y .

Сначала находим сближение тел в предположении чисто упругого контакта:

$$\alpha_0 = \frac{n_6}{2} \sqrt[3]{\frac{9\pi^2}{4} (k_1 + k_2)^2 p^2 \sum K}, \quad (20)$$

где n_6 — коэффициент, зависящий от соотношения главных кривизн A/B , который определяется по таблицам; $\sum K = 2(A + B)$ — сумма главных кривизн поверхностей тел в точке их начального контакта.

Для твёрдых покрытий

$$\sum K = 2 \left(R_{\text{и}} + \frac{2}{3} \Delta h_c \right)^{-1} + \left(R_{\text{в}} + \frac{1}{3} \Delta h_c \right)^{-1}, \quad (21)$$

для мягких покрытий

$$\sum K = \frac{2}{R_{\text{и}}} + \frac{1}{R_{\text{в}} + \Delta h_c}, \quad (22)$$

для цементированных слоёв

$$\sum K = \frac{2}{R_{\text{и}} + \Delta h_{\text{ц}}} + \frac{1}{R_{\text{в}} - \Delta h_{\text{ц}}}, \quad (23)$$

k_1 и k_2 — упругие постоянные, причём $k_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{\pi E_1}$, $k_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{\pi E_2}$,

μ_1 и μ_2 — коэффициенты Пуассона материалов индентора и контр-тела, E_1 и E_2 — их модули Юнга.

Параметр q находим из зависимости

$$q = \frac{27}{32} \left(\frac{\alpha_0}{h} \right)^3. \quad (24)$$

При $q < 1$

$$\alpha_y = \frac{2h}{3} \left[\cos \frac{1}{3} \arccos(2q - 1) - 1 \right]. \quad (25)$$

При $q \geq 1$

$$\alpha_y = \frac{2h}{3} \left[1 + 2 \sin^{-1} \left(2 \arctg \left(\sqrt[3]{\tg \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{1}{1 - 2q} \right)} \right) \right) \right]. \quad (26)$$

Следовательно, полное сближение тел в контакте $\alpha = h + \alpha_y$.

Для расчёта полуосей a и b контура остаточной вмятины находим вспомогательные полуоси h_a и h_b :

$$h_a = \frac{2R_{12}h - R_{11}\alpha_y - h^2}{2(R_{12} + R_{11} - h)} = \frac{1}{2} \left(2h - \frac{R_{11}\alpha_y}{R_{12}} - \frac{h^2}{R_{12}} \right) \left(1 + \frac{R_{11}}{R_{12}} - \frac{h}{R_{12}} \right)^{-1}, \quad (27)$$

так как $R_{12} = \infty$, то $h_a = h$ и

$$h_b = \frac{2R_{22}h - R_{21}\alpha_y - h^2}{2(R_{22} + R_{21} - h)}. \quad (28)$$

Полуоси контура остаточной вмятины находим по формулам

$$a = \sqrt{R_{11}(2h_a + \alpha_y) - h_a^2}, \quad (29)$$

$$b = \sqrt{R_{21}(2h_b + \alpha_y) - h_b^2}. \quad (30)$$

Для твёрдых покрытий:

$$a = \sqrt{\left(R_{\text{и}} + \frac{2}{3} \Delta h_c \right) (2h_a + \alpha_y) - h_a^2}, \quad (31)$$

$$b = \sqrt{\left(R_{\text{н}} + \frac{2}{3} \Delta h_c\right) (2h_b + \alpha_y) - h_b^2}. \quad (32)$$

Для мягких покрытий:

$$a = \sqrt{R_{\text{н}} (2h_a + \alpha_y) - h_a^2}, \quad (33)$$

$$b = \sqrt{R_{\text{н}} (2h_b + \alpha_y) - h_b^2}. \quad (34)$$

Для цементированных слоёв:

$$a = \sqrt{(R_{\text{н}} + \Delta h_{\text{ц}}) (2h_a + \alpha_y) - h_a^2}, \quad (35)$$

$$b = \sqrt{(R_{\text{н}} + \Delta h_{\text{ц}}) (2h_b + \alpha_y) - h_b^2}. \quad (36)$$

Основными макроскопическими параметрами очага деформации при ППД являются глубина наклёпанного слоя h_s и интенсивность деформации ε_{i0} .

Данные параметры целесообразно определять согласно соотношениям:

$$h_s = K \sqrt{\frac{P}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{\text{т}}} - \frac{1}{\text{НД}} \right)}, \quad (37)$$

где для твёрдых покрытий

$$K = 1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\sqrt{\left(R_{\text{н}} + \frac{2}{3} \Delta h_c\right) (2h_b + \alpha_y) - h_b^2}}{\sqrt{\left(R_{\text{н}} + \frac{2}{3} \Delta h_c\right) (2h_a + \alpha_y) - h_a^2}} \right)^4, \quad (38)$$

для мягких покрытий

$$K = 1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\sqrt{R_{\text{н}} (2h_b + \alpha_y) - h_b^2}}{\sqrt{R_{\text{н}} (2h_a + \alpha_y) - h_a^2}} \right)^4, \quad (39)$$

для цементированных слоёв

$$K = 1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\sqrt{(R_{\text{н}} + \Delta h_{\text{ц}}) (2h_b + \alpha_y) - h_b^2}}{\sqrt{(R_{\text{н}} + \Delta h_{\text{ц}}) (2h_a + \alpha_y) - h_a^2}} \right)^4, \quad (40)$$

ТАБЛИЦА 1. Исследуемые твёрдые, мягкие и КЭП покрытия.**TABLE 1.** The investigated hard, soft and combined erosive coatings (SEC).

Состав покрытия	Материал подложки	Твёрдость слоя НД, МПа	Толщина слоя, мкм	Оборудование
Cr	Сталь 45	3000	30	УИЛВ-8
W	Сталь 45	2800	25	УИЛВ-8
Ni	Сталь 45	2250	40	УИЛВ-8
ВК8	Сталь 45	3200	20	УИЛВ-8
Графит ЭГ-4	Сталь 45	2700	10	УИЛВ-8
Sn	Сталь 45	1000	60	УИЛВ-8
Cu	Сталь 40Х	1700	200	ЭИЛ-9
ВНС2 + Cu + ВНС2	Сталь 40Х	2540	400	ЭИЛ-9
Cu + ВК8	Сталь 45	3000	30	УИЛВ-8
In + ВК8	Сталь 45	1800	30	УИЛВ-8
Sn + Cr	Сталь 45	2000	30	УИЛВ-8
ВК8 + Cu + ВК8	Сталь 45	2500	35	УИЛВ-8

и

$$\varepsilon_{i0} = 2,4 \sqrt[3]{\left(\frac{h}{K^2 R_{np}}\right)^2 \left(\frac{B}{A}\right)^{0,2}}. \quad (41)$$

Таким образом, анализ напряжённо-деформированного состояния ЭЭЛ слоёв различной твёрдости, подвергаемых последующей ППД, а также предложенная методика (уравнения (2)–(41)) позволяют определять геометрические параметры очага деформации и его макроскопические параметры — глубину наклёпанного слоя h_s и интенсивность деформации ε_{i0} для различных покрытий из твёрдых и мягких металлов, а также КЭП.

Все необходимые для расчётов данные занесены в табл. 1, а результаты исследований — в табл. 2.

4. ВЫВОДЫ

1. Определение силовых и деформационных параметров ППД ЭЭЛ слоёв различной твёрдости, проведённое выше, позволило обобщить результаты исследований влияния ППД на микрогеометрию и микроструктуру поверхностных ЭЭЛ слоёв из твёрдых износостойких, мягких антифрикционных металлов и КЭП, сформированных как на

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчёта h_s и ε_{i0} для образцов из стали 45 и 40Х с твёрдыми, мягкими и КЭП покрытиями после ОШ и АВ.**TABLE 2.** Results of h_s and ε_{i0} calculation for samples from steel 45 and 40Kh with hard, soft and combined erosive coatings after the running in ball (RB) and diamond smoothing (DS).

Состав покрытия	Нагрузка, Н	A^1	B^1	R_{np}^2	h^3	a^4	b^4	h_s	ε_{i0}
Обкатка шариком (ОШ)									
Без упрочнения	1470	0,05	0,07	8,4	0,008	0,522	0,443	1,07	0,023
Cr	1470	0,05	0,07	8,4	0,005	0,522	0,443	0,98	0,017
W	1470	0,05	0,07	8,4	0,006	0,522	0,443	1,01	0,019
Ni	588	0,10	0,12	4,6	0,008	0,325	0,296	0,73	0,035
Cr	980	0,05	0,07	8,4	0,005	0,522	0,443	0,96	0,017
Sn	392	0,053	0,072	8,1	0,007	0,443	0,378	0,88	0,027
Cu	490	0,053	0,072	8,1	0,004	0,340	0,288	0,75	0,025
ВНС2 + Cu + + ВНС2	1470	0,053	0,072	8,1	0,005	0,522	0,433	1,08	0,017
Cu + ВК8	1470	0,053	0,073	8,1	0,005	0,520	0,441	0,98	0,018
In + ВК8	588	0,053	0,073	8,1	0,005	0,365	0,308	0,80	0,022
ВК8 + Cu + ВК8	1470	0,053	0,073	8,1	0,006	0,522	0,438	1,09	0,020
Алмазное выглаживание (АВ)									
Cr	147	0,170	0,18	2,75	0,002	0,162	0,153	0,31	0,019
Cr	147	0,250	0,27	1,9	0,003	0,134	0,118	0,31	0,032
ВК8	147	0,170	0,18	2,75	0,001	0,162	0,153	0,30	0,012
Графит Эг-4	147	0,170	0,18	2,75	0,002	0,162	0,153	0,33	0,019
Cu + ВК8	147	0,166	0,185	2,75	0,003	0,162	0,153	0,380	0,023
ВК8 + Cu + ВК8	147	0,166	0,185	2,75	0,003	0,162	0,153	0,380	0,023
Sn + Cr	147	0,166	0,185	2,75	0,004	0,162	0,153	0,424	0,030

¹ главные кривизны поверхностей контактирующих тел (A, B);² приведённый радиус кривизны контактирующих поверхностей (R_{np});³ остаточное смещение центра контакта (h);⁴ полуоси контура остаточной вмятины (a, b).

установке со средней мощностью разряда и ручным вибратором «УИЛВ-8», так и на более мощной механизированной установке «ЭИЛ-9».

2. На основании анализа напряжённо-деформированного состояния поверхностных слоёв, подвергаемых ЭЭЛ с последующим ППД, 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 широ-

ких пределах управлять качеством поверхностного слоя ответственных деталей.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, В. С. Марцинковский, Н. В. Тарельник, О. А. Василенко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **41**, № 1: 47 (2019).
2. V. Kukhar, V. Artiukh, A. Butyrin, and A. Prysiazhnyi, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, **692**: 201 (2018).
3. М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидяков, *Инженерные расчёты упруго-пластической контактной деформации* (Москва: Машиностроение: 1986).
4. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, Н. С. Евтушенко, В. О. Герасименко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **40**, № 2: 235 (2018).
5. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, Н. С. Евтушенко, В. О. Герасименко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **40**, № 6: 795 (2018).
6. V. B. Tarel'nyk, A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, E. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskiy, and B. Antoszewski, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **55**: 585 (2017).
7. А. Е. Гитлевич, В. В. Михайлов, Н. Я. Парканский, В. М. Ревутский, *Электроискровое легирование металлических поверхностей* (Кишинёв: Штинца: 1985).
8. М. А. Теслина, С. Н. Химухин, Ри Хосен, Э. Х. Ри, *Упрочняющие технологии и покрытия*, № 4: 7 (2011).
9. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, М. Я. Довжик, *Металлофиз. новейшие технол.*, **38**, № 12: 1611 (2016).
10. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, М. Я. Довжик, *Металлофиз. новейшие технол.*, **39**, № 3: 363 (2017).
11. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, A. V. Belous, E. V. Konoplyanchenko, and O. P. Gaponova, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, **54**: 147 (2018).
12. А. И. Михайлюк, А. Е. Гитлевич, А. И. Иванов, Е. И. Фомичева, Г. И. Димитрова, А. Н. Грипачевский, *Электронная обработка материалов*, №4: 23 (1986).
13. А. И. Михайлюк, А. Е. Гитлевич, *Электронная обработка материалов*, № 46: 37 (2010).
14. В. М. Ершов, *Сб. науч. тр. сотрудников ДонГТУ* (Алчевск: ДонГТУ), **31**: 219 (2011).
15. А. И. Михайлюк, В. Г. Ревенко, Н. Н. Натаров, *Физика и химия обработки материалов*, № 1: 101 (1993).
16. А. И. Михайлюк, *Электронная обработка материалов*, **39**, № 3: 21 (2003).
17. В. С. Марцинковский, В. Б. Тарельник, А. В. Білоус, *Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням*: Патент України на винахід № 82948 (Опубл. 25.03.2008).
18. В. С. Марцинковский, В. Б. Тарельник, М. П. Братуцак, *Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням*: Патент України

- на винахід, № 101715 (Опубл. 25.01.2013).
19. Н. И. Лазаренко, *Электроискровое легирование металлических поверхностей* (Москва: Машиностроение: 1976).
 20. В. И. Андреев, *Вестник машиностроения*, № 7 (1978).
 21. G. V. Kirik, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, O. M. Myslyvchenko, and B. Antoszewski, *Powder Metall Met. Ceram.*, **56**: 688 (2018).
 22. В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, А. В. Білоус, О. П. Гапонова, Є. В. Коноплянченко, Б. Антошевський, Ч. Кундера, О. М. Жуков, *Спосіб обробки поверхонь сталевих деталей: Патент України на корисну модель* № u201701845 (Опубл. 25.09.2017).
 23. L. D. Plyatsuk, V. B. Tarelnyk, Cz. Kundera, O. V. Radionov, and O. P. Gaponova, *J. Eng. Sci.*, **5**: 16 (2018).
 24. В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, А. В. Белоус, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, О. М. Жуков, *Способ сульфоцементации стальных деталей: Пат. РФ на изобр.* № 2663799 (Опубл. 09.08. 2018).
 25. А. В. Білоус, *Забезпечення якості робочих поверхонь деталей відцентрових компресорів із застосуванням інтегрованих технологій* (Автореф. дисертації ... кандидата технічних наук) (Харків: Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут: 2011).

REFERENCES

1. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, N. V. Tarelnyk, and O. O. Vasylenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 1: 47 (2019) (in Russian).
2. V. Kukhar, V. Artiukh, A. Butyrin, and A. Prysiashnyi, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, **692**: 201 (2018).
3. M. S. Drozd, M. M. Matlin, and Yu. I. Sidyakov, *Inzhenernye Raschety Uprugo Plasticheskoy Kontaktnoy Deformatsii* (Moscow: Mashinostroyenie: 1986) (in Russian).
4. 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).
5. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko, N. S. Yevtushenko, and V. O. Herasymenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 6: 795 (2018) (in Russian).
6. V. B. Tarelnyk, A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, E. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskiy, and B. Antoszewski, *Powder Metall Met Ceram*, **55**: 585 (2017) (in Russian).
7. A. Ye. Gitlevich, V. V. Mikhaylov, N. Ya. Parkanskiy, and V. M. Revutskiy, *Elektroiskrovoe Legirovanie Metallicheskih Poverkhnostey* (Kishinev: Shtiintsa: 1985) (in Russian).
8. M. A. Teslina, S. N. Khimukhin, Ri Khosen, and E. Kh. Ri, *Uprochnyayushchie Tekhnologii i Pokrytiya*, No. 4: 7 (2011) (in Russian).
9. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko, and M. Ya. Dovzhyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 12: 1611 (2016) (in Russian).
10. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, I. V. Konoplianchenko, and M. Ya. Dovzhyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 3: 363 (2017) (in Russian).

11. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, A. V. Belous, E. V. Konoplyanchenko, and O. P. Gaponova, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, **54**: 147 (2018).
12. A. I. Mikhaylyuk, A. Ye. Gitlevich, A. I. Ivanov, Ye. I. Fomicheva, G. I. Dimitrova, and A. N. Gripachevskiy, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, No. 4: 23 (1986) (in Russian).
13. A. I. Mikhaylyuk and A. Ye. Gitlevich, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, **46**: 37 (2010) (in Russian).
14. V. M. Yershov, *Sb. Nauchnykh Trudov Sotrudnikov DonGTU* (Alchevsk: DonGTU), **31**: 219 (2011) (in Russian).
15. A. I. Mikhaylyuk, V. G. Revenko, and N. N. Natarov, *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, No. 1: 101 (1993) (in Russian).
16. A. I. Mikhaylyuk, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, **39**, No. 3: 21 (2003) (in Russian).
17. V. S. Martsinkovskii, V. B. Tarelnyk, and A. V. Bilous, *Sposib Tsementatsiyi Stalevykh Detaley Elektroeroziynym Leguvannyam*: Patent of Ukraine No. 82948 (Publ. 25.03.2008) (in Ukrainian).
18. V. S. Martsinkovskii, V. B. Tarelnyk, and M. P. Bratushchak, *Sposib Tsementatsiyi Stalevykh Detaley Elektroeroziynym Leguvannyam*: Patent of Ukraine, No. 101715 (Publ. 25.01.2013) (in Ukrainian).
19. N. I. Lazarenko, *Elektroiskrovoe Legirovanie Metallicheskikh Poverkhnostey* (Moscow: Mashinostroyeniye: 1976) (in Russian).
20. V. I. Andreyev, *Vestnik Mashinostroyeniya*, No. 7 (1978) (in Russian).
21. G. V. Kirik, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, O. M. Myslyvchenko, and B. Antoszewski, *Powder Metall Met. Ceram.*, **56**: 688 (2018).
22. V. B. Tarelnyk, V. S. Martsinkovskii, A. V. Bilous, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko, B. Antoshevskiy, Ch. Kundera, and O. M. Zhukov, *Sposib Obrobky Poverkhon Stalevykh Detaley*: Patent of Ukraine na Korysnu Model No. u201701845 (Publ. 25.09.2017) (in Ukrainian).
23. L. D. Plyatsuk, V. B. Tarelnyk, Cz. Kundera, O. V. Radionov, and O. P. Gaponova, *J. Eng. Sci.*, **5**: 16 (2018).
24. V. B. Tarelnyk, V. S. Martsinkovskii, A. V. Belous, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko, and O. M. Zhukov, *Sposob Sul'fotsementatsii Stal'nykh Detaley*: Patent RF No. 2663799 (Publ. 09.08.2018) (in Russian).
25. A. V. Bilous, *Zabezpechennya Yakosti Robochykh Poverkhon' Detaley Vidtsentrovykh Kompresoriv iz Zastosuvannyam Integrovanykh Tekhnologiy* (Thesis of Dissert. ... for Cand. of Tech. Sci.) (Kharkiv: Natsional'nyy Tekhnichnyy Universytet 'Kharkivs'ky Politekhichnyy Instytut: 2011) (in Ukrainian).