

УДК: 621.9.048.669.268

В.Б. Тарельник¹, О.П. Гапонова², А.В. Радионов³Сумський національний аграрний університет¹Сумський державний університет²ООО «НПВП «Феррогродинамика»³**ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

В работе рассмотрены особенности формирования электроэрозионных покрытий стальных деталей алюминием (алитирование), серой (сульфидирование) и углеродом (цементация), которые могут применяться с целью повышения твердости, износостойкости, предотвращения схватывания при трении и для улучшения сопротивления атмосферной коррозии поверхностей деталей. При электроэрозионном легировании графитовым электродом стальных деталей с энергией разряда $W_p = 0,52 - 6,8$ Дж и производительностью 1,0 - 3,0 см²/мин на поверхность детали, подлежащую алитированию, наносят консистентное вещество, содержащее серу и алюминиевую пудру, после чего, не дожидаясь высыхания консистентного вещества, проводят процесс легирования, причем, применяют консистентное вещество с содержанием алюминиевой пудры не более 56%. Проведен металлографический и дюрометрический анализ поверхностных слоев углеродистых сталей после одновременного алитирования, сульфидирования и цементации методом ЭЭЛ. Показано, что структура слоя состоит из трех участков: «белого» слоя, диффузной зоны и основного металла. С увеличением энергии разряда снижаются такие качественные параметры поверхностного слоя, как толщина, микротвердость и сплошность «белого» слоя, шероховатость поверхности увеличивается.

Ключевые слова: электроэрозионное легирование, поверхностный слой, алитирование, сульфидирование, цементация, микротвердость, микроструктура.

В.Б. Тарельник, О.П. Гапонова, О.В. Радіонов

ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ІНТЕГРОВАНІХ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ

У роботі розглянуті особливості формування електроерозійних покриттів сталевих деталей алюмінієм (алітування), сіркою (сульфідуювання) і вуглецем (цементация), які можуть застосовуватися з метою підвищення твердості, зносостійкості, запобігання схоплюванню при терті і для поліпшення опору атмосферній корозії поверхонь деталей. При електроерозійному легуванні графітовим електродом сталевих деталей з енергією розряду $W_p = 0,52 - 6,8$ Дж і продуктивністю 1,0 - 3,0 см² / хв на поверхню деталі, що підлягає алітуванню, наносять консистентну речовину, що містить сірку і алюмінієву пудру, після чого, не чекаючи висихання консистентної речовини, проводять процес легування, причому, застосовують консистентну речовину з вмістом алюмінієвої пудри не більше 56%. Проведений металогіфічний і дюрометричний аналіз поверхневих шарів вуглецевих сталей після одночасного алітування, сульфідуювання і цементации методом ЕЕЛ. Показано, що структура шару складається з трьох ділянок: «білого» шару, дифузійної зони і основного металу. Зі збільшенням енергії розряду знижуються такі якісні параметри поверхневого шару, як товщина, микротвердість і суцільність «білого» шару, шорсткість поверхні збільшується.

Ключові слова: електроерозійне легування, поверхневий шар, алітування, сульфідуювання, цементация, микротвердість, микроструктура.

V.B. Tarellyk, O.P. Gaponova, A.V. Radionov

INCREASING THE LEVEL OF ENVIRONMENTAL SAFETY IN USING INTEGRATED METHODS OF INCREASING THE QUALITY OF STEEL PARTS

The features of the formation electroerosion coatings of steel parts by aluminum (aluminizing), sulfur (sulphiding) and carbon (cementation), which can be used to increase hardness, wear resistance, prevent frictional friction and improve the resistance of atmospheric corrosion of the surfaces of parts are considered. During electroerosion alloying with a graphite electrode of steel parts with a discharge energy of $W_p = 0.52 - 6.8$ J and a productivity of 1.0 - 3.0 cm² / min, a consistent substance containing sulfur and aluminum powder is applied to the surface of the part to be aluminized, after which, without waiting for the drying of the consistency substance, the alloying process is carried out, moreover, a consistent substance with an aluminum powder content of not more than 56% is used. Metallographic and durometric analysis of surface layers of carbon steels after simultaneous aluminizing, sulphiding and cementation by the EEL method was carried out. It is shown that the structure of the layer consists of three sections: "white" layer, diffuse zone and base metal. With an increase in the discharge energy, such qualitative parameters of the surface layer as the thickness, microhardness and continuity of the "white" layer decrease, the surface roughness increases.

Key words: electroerosion alloying, surface layer, aluminizing, sulphiding, cementation, microhardness, microstructure.

Постановка проблеми.

Химико-термическая обработка (ХТО), на сегодняшний день является одним из наиболее эффективных методов упрочнения поверхности деталей для повышения их долговечности. Процессы ХТО в зависимости от насыщающего элемента делят на однокомпонентные, в которых насыщение проводится одним компонентом, например, углеродом (цементация), азотом

(азотирование), алюминием (алитирование) и др., и многокомпонентные, при котором металл насыщают одновременно несколькими элементами, например, углеродом и азотом (нитроцементация), бором и алюминием (бороалитирование) и др.

Несмотря на то, что в результате ХТО значительно повышается качество поверхностных слоев деталей машин, метод имеет и ряд недостатков. Это объемный нагрев детали, приводящий к изменению ее структуры и начальных геометрических параметров (поводки и коробления); громоздкое и дорогостоящее технологическое оснащение; длительность процесса, использование энергоемкого оборудования и др. Кроме этого отдельные операции ХТО небезопасны для окружающей среды. Так, основным недостатком цианирования является ядовитость цианистых солей и необходимость в связи с этим принятия специальных мер по охране труда.

В последние годы, для повышения качества поверхностных слоев деталей машин, все большую значимость приобретает метод электроэрозионного легирования (ЭЭЛ) – процесс перенесения материала на поверхность изделия искровым электрическим разрядом. Его специфическими особенностями, которые привлекают технологов, являются: экологическая безопасность, локальность действия, малая затрата энергии, отсутствие объемного нагрева материала, прочное соединение нанесенного материала с основой, простота автоматизации, возможность сочетания операций. Используя различные электродные материалы методом ЭЭЛ можно проводить процессы, альтернативные ХТО, но со значительно меньшими затратами. Так, используя графитовый электрод и насыщая поверхность детали углеродом можно осуществлять процесс цементации, ЭЭЛ алюминиевым электродом – процесс алитирования и др.

Таким образом, проблема разработки энергоэффективных, энергосберегающих и при этом экологически чистых технологий формирования поверхностных слоев деталей, альтернативных химико-термической обработке, в достаточной степени сохраняющих ее достоинства и лишенных недостатков является весьма актуальной.

Анализ последних исследований и публикаций.

В [1] описан способ сульфидирования, который представляет собой термохимический процесс обработки изделий, изготовленных из сплавов на основе железа, для обогащения поверхностных слоев серой. Эффект сульфидирования сводится к созданию на поверхности детали пленки сульфидов. Сульфиды повышают поверхностную активность металлов и сплавов, а также обеспечивают смачивание поверхностно активными веществами и улучшают сопротивление схватыванию. Сульфидная пленка, имеющая меньшую прочность, чем основной металл, легко разрушается при трении и отделяется от основания без пластического его деформирования, предотвращая схватывание поверхностей трения. Пленка сульфида железа (FeS) повышает износостойкость трущихся поверхностей и улучшает их прирабатываемость. Ферросульфидное покрытие обладает довольно высокой пористостью и впитывает большое количество смазки, сообщая материалу свойство самосмазывания.

В работе [2] предложен способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием (ЦЭЭЛ), который имеет ряд достоинств, основными из которых являются: достижение 100% сплошности упрочненного поверхностного слоя; повышение твердости поверхностного слоя детали за счет диффузионно-закалочных процессов; возможность осуществления легирования в строго указанных местах без необходимости в одновременной защите остальной поверхности детали; отсутствие объемного нагрева детали, а, следовательно, поводок и короблений; простота применения технологии; гибкая привязка к имеющемуся оборудованию; процесс упрочнения не требует специальной подготовки и высокой квалификации рабочего и т.д. При ЦЭЭЛ стальных деталей толщина упрочненного слоя зависит от энергии разряда и времени легирования (производительности процесса). С увеличением энергии разряда и времени легирования толщина упрочненного слоя увеличивается. Однако при этом возрастает и шероховатость поверхности.

Известен также способ ЦЭЭЛ [3], в котором с целью снижения шероховатости поверхности деталей машин, с сохранением высокого качества поверхностного слоя (отсутствие микротрещин, наличие слоя повышенной твердости, высокая сплошность покрытия и др.), расширения области применения процесса ЭЭЛ, предлагается после ЭЭЛ углеродом (графитовым электродом) производить легирование этим же электродом, но поэтапно, снижая на каждом этапе энергию разряда.

С целью повышения твердости, износостойкости и для улучшения сопротивления атмосферной коррозии стальных деталей нередко применяется способ алитирования [4], который включает нанесение алюминиевого слоя на стальную поверхность (обычно напылением), обмазку

и отжиг. Распыл частиц алюминия должен быть крупным, что ускоряет диффузию алюминия в поверхностный слой металла при отжиге. Обмазку наносят на поверхность сплошным слоем в два три приема и строго соблюдают режим термодиффузионной обработки, сохраняющей слой обмазки. После нанесения алюминиевого покрытия и обмазки проводят термодиффузионное насыщение поверхностного слоя – деталь подвергают отжигу. Начальная температура 600-650°C, затем ведется быстрый нагрев до 900-950°C с выдержкой 2,5-3,5 ч, после чего деталь медленно охлаждают вместе с печью до температуры 500-550°C, а затем на воздухе. Толщина наносимого покрытия расплавленным алюминием зависит от температуры эксплуатации детали: для температуры 700-800°C толщина покрытия составляет 0,2-0,3 мм, а для температуры 900-1000°C - 0,5-0,7 мм. После металлизации алюминием деталь покрывают 10-20% раствором хлористого алюминия, затем обмазывают жидким стеклом, посыпают кварцевым песком и просушивают при температуре 100°C. Просушенную деталь вновь обмазывают жидким стеклом и снова сушат. При температуре 600-700°C деталь загружают в печь и нагревают до температуры 1200-1250°C с выдержкой 14-40 мин, после чего медленно охлаждают сначала в печи до температуры 800°C, а затем на воздухе. Наряду с положительными результатами, выше описанная технология имеет ряд недостатков: высокая себестоимость и трудоемкость процесса; необходимость контроля на всех этапах технологии; нагревание всей детали, и соответственно, структурные изменения металла; поковки и коробления; длительность процесса более 8 часов; большой расход электроэнергии; отрицательное воздействие на экологию и др.

В соответствии с работой [5], электроискровым осаждением титана на алюминий и алюминия на титан созданы покрытия, содержащие интерметаллиды системы Ti-Al. Применяя методы электронной микроскопии, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализов, изучены структура и состав покрытий. Установлено, что независимо от длительности и частоты разрядных импульсов, формируемый в аргоне поверхностный слой, в основном, содержит интерметаллид α -TiAl₃. Фазы γ -TiAl и α_2 -Ti₃Al могут быть получены при осаждении алюминия на титан с последующим нанесением второго слоя титана. При формировании электроискровых покрытий в воздухе дополнительно образуются оксид алюминия и нитрид титана. Данная технология также выполняется в защитной среде, например, аргона и применяется только для деталей из титана.

Авторы работы [6] предлагают способ алитирования электроэрозионным легированием (ЭЭЛ) алюминиевым электродом стальных деталей при энергии разряда $W_p = 0,52 - 6,8$ Дж и производительности 1,0 – 3,0 см²/мин. Способ обеспечивает формирование так называемого белого (алитированного) слоя толщиной 70 – 130 мкм, микротвердостью 5000 – 7500 МПа, шероховатостью (Ra) 6-9 мкм и сплошностью 95 – 100%. Следует отметить, что при данном способе обработки максимальная микротвердость поверхностного слоя получена при наибольшей энергии разряда $W_p = 6,8$ Дж и равна 5000 – 7500 МПа, соответственно, на подложках из стали 20 и 40, что не всегда достаточно для защиты от разрушения поверхностей стальных деталей, подвергаемых воздействию различных видов износа (абразивного, кавитации, фреттинг коррозии и др.). Кроме того, при сухом (без смазки) контакте алитированной таким способом поверхности детали возможно схватывание, заедание, микросваривание и вырыв отдельных участков поверхности.

В работе [7] рассмотрен способ сульфоцементации электроэрозионным легированием графитовым электродом стальной поверхности изделия, при котором непосредственно перед легированием графитовым электродом на стальную поверхность наносят консистентное вещество, содержащее серу. При этом одновременно протекает два процесса цементации и сульфидирование. Основным недостатком данного способа является: невозможность обеспечения защиты детали от окисления при высоких температурах (700 – 900 °C и выше), так же, как и от атмосферной коррозии и морской воды.

Анализ литературы показал, что возникает необходимость в решении задачи, направленной на создание нового способа получения комплексных C-S-Al-покрытий стальных деталей методом электроэрозионного легирования графитовым электродом, лишённого указанных выше недостатков и обеспечивающего повышение твердости и износостойкости деталей, предотвращающего схватывание при трении и улучшающего сопротивление атмосферной коррозии.

Постановка заданий. Таким образом, целью работы является разработка нового способа обработки стальных деталей методом электроэрозионного легирования – получение комплексных C-S-Al-покрытий, обеспечивающего повышение твердости и износостойкости деталей,

предотвращающего схватывание их при трении и улучшающего сопротивление атмосферной коррозии.

Методика исследований. С целью определения влияния энергетических параметров оборудования ЭЭЛ на качественные параметры покрытий, изготавливали образцы из стали 20 и 40 размером 15x15x8 мм, на которые наносили консистентное вещество в виде серной мази с содержанием серы 33,3%. Перед нанесением в серную мазь добавляли алюминиевую пудру марки ПАД-0 (ГОСТ 5494-95). Максимальное количество пудры составляло 56%. Дальнейшее увеличение количества пудры приводило к снижению адгезии с поверхностью, подлежащей алитированию. После этого, не дожидаясь высыхания консистентного вещества, производили ЭЭЛ графитовым электродом марки ЭГ-4 на установке модели «Элитрон – 52А» с применением различных режимов. Кроме этого на образцах стали 20 проводили поэтапное снижение энергии разряда с $W_p = 6,8$ до 2,6 и 0,52 Дж.

Каждому режиму ЭЭЛ соответствовала своя энергия разряда и производительность – площадь сформированного покрытия в единицу времени (табл. 1).

Таблица 1.

Зависимость производительности ЭЭЛ от энергии разряда

Энергия разряда (W_p), Дж	0,52	1,3	2,6	4,6	6,8
Производительность, $см^2/мин$	1,0-1,3	1,3-1,5	1,5-2,0	2,0-2,5	2,5-3,0

Следует отметить, что снижение производительности ЭЭЛ влечет за собой снижение качественных параметров поверхностного слоя, то есть, появление прижогов, а главное, разрушение сформированного слоя, что особенно сказывается на более «грубых» режимах при энергии разряда $W_p > 1$ Дж. Увеличение производительности приводит к снижению сплошности покрытия.

Металлографический анализ покрытий выполняли с помощью оптического микроскопа МИМ-7, дюраметрические исследования проводили на приборе ПМТ-3. Шероховатость поверхности после ЭЭЛ определяли на профилографе-профилометре мод. 201 завода «Калибр» путем снятия и обработки профилограмм.

Для исследования распределения серы по глубине слоя проводился локальный микрорентгеноспектральный анализ, для этого использовался оснащенный рентгеноспектральным микроанализатором электронный микроскоп ISIS 300 Oxford Instruments.

Изложение основного материала. В результате предыдущих исследований нами предложен новый способ, состоящий в одновременном насыщении стали углеродом, серой и алюминием, методом ЭЭЛ поверхностей стальных деталей, который может быть применен с целью повышения их твердости, износостойкости, предотвращения схватывания при трении и для улучшения сопротивления атмосферной коррозии. Перед ЭЭЛ алюминиевым электродом стальных деталей с энергией разряда $W_p = 0,52 - 6,8$ Дж и производительности 1,0 - 3,0 $см^2/мин$ на поверхность детали, подлежащую алитированию, наносят консистентное вещество, содержащее серу и алюминиевую пудру, после чего, не дожидаясь высыхания консистентного вещества, проводят процесс алитирования методом ЭЭЛ алюминиевым электродом, причем, применяют консистентное вещество с содержанием алюминиевой пудры не более 56 % [8]. Там же для практического применения рекомендуются режимы (энергия разряда $W_p = 2,6-6,8$ Дж и производительность 2,0-3,0 $см^2/мин$), которые обеспечивают формирование «белого» слоя толщиной 110-240 мкм, микротвердость 4200-5400 МПа, шероховатость (Ra) 3,7-7,3 мкм и сплошность 100%.

На рис. 1 показана микроструктура сформированного поверхностного слоя на образце из стали 20, покрытого консистентным веществом, содержащим 33,3% серы и 56% алюминиевой пудры при ЭЭЛ алюминиевым электродом с энергией разряда $W_p = 6,8$ Дж (а) и распределение микротвердости по мере углубления с поверхности (б).

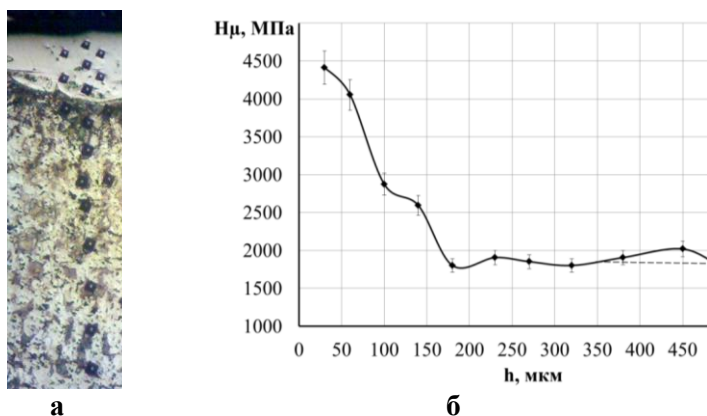


Рис. 1. Микроструктуры (а) и распределение микротвердости в поверхностном слое (б) образца стали 20 после ЭЭЛ алюминием.

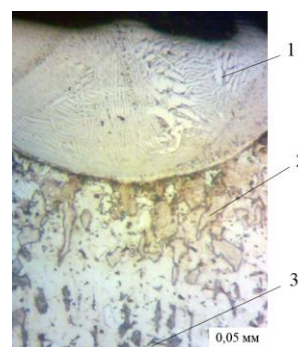


Рис. 2. Микроструктура образца 2-й серии стали 20: 1, 2, 3 – зоны в области кратера

Характерной особенностью структуры, сформированной поверхности, является массивный «белый» слой, толщина которого на отдельных участках составляет от 160 до 200 мкм (рис. 1, а). Микротвердость на поверхности составляет порядка 5000 МПа. По мере углубления микротвердость плавно снижается и на глубине 170 мкм переходит в микротвердость основы (1700 МПа).

Замена легирующего электрода (алюминия) на графит влечет за собой значительные изменения микроструктуры, сплошности и микротвердости поверхностного слоя.

Микроструктурный анализ показал, что в поверхностном слое наблюдается образование отдельных лунок, глубиной до 150 мкм.

Как показано в работе [9] при прохождении электроискрового разряда в металле образуется лунка – кратер, глубина и диаметр которой зависят от параметров электроискрового воздействия. Искровой разряд сопровождается выделением тепла, скорость нарастания температуры составляет 10^5 °С/сек, что характерно только для взрывных процессов [10].

По данным работы [11], около 25% объема металла электроэрозионных кратеров приобретает температуру кипения, мгновенные давления на поверхности достигают сотен тысяч атмосфер.

На образце стали 20 в области кратера различается три зоны (рис. 2).

Первая зона – оплавления, плохо травится, металл этой зоны при ЭЭЛ находился в жидком состоянии. Она состоит из столбчатых кристаллов, большая скорость кристаллизации определила анизотропию роста кристаллов, т.е. преимущественный рост главных осей дендритов, ориентированных в направлении отвода тепла. Толщина слоя столбчатых кристаллов на боковой поверхности растет от дна к выходу лунки [12].

Вторая – переходная зона прилегает к первой, состоит из зерен сложной формы – зона термического влияния. Третья – зона исходного металла прилегает к первым двум, имеет исходную структуру.

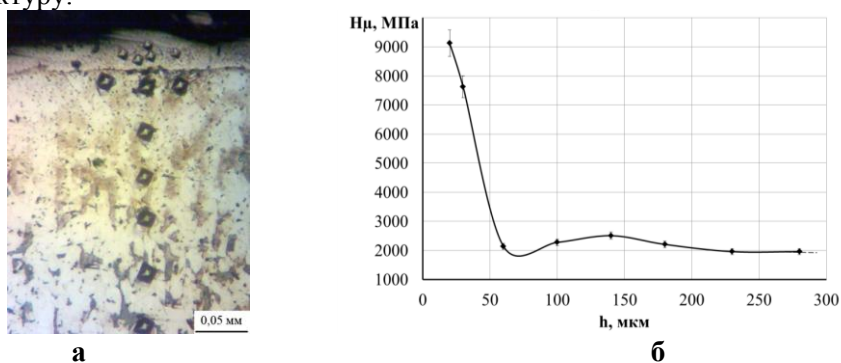


Рис. 3. Микроструктура (а) и распределение микротвердости в поверхностном слое (б) образца стали 20 после ЭЭЛ графитом

При ЭЭЛ стали 20 графитом, по сравнению с обработкой алюминием, с энергией разряда $W_p = 6,8$ Дж/см² сплошность «белого» слоя, как и его толщина снижаются, соответственно до 50 % и

60 мкм. В свою очередь микротвердость на поверхности повышается до 9000 МПа (рис. 3 и табл. 2).

В табл. 2 приведены качественные параметры поверхностных слоев стали 20 и стали 40 при сульфоцементоалитировании методом ЭЭЛ с энергией разряда 0,52; 2,60 и 6,80 Дж.

Таблица 2.

Качественные параметры поверхностных слоев стали 20 и стали 40 при сульфоцементоалитировании методом ЭЭЛ

Энергия разряда, Дж	Толщина белого слоя, мкм	Микротвердость белого слоя, МПа	Шероховатость, мкм			Сплошность белого слоя, %
			Ra	Rz	Rmax	
Сталь 20						
0,52	150	9300±50	2,1	3,9	8,9	90
2,60	110	9200±70	4,2	8,7	30,2	80
6,8	до 60	9000±50	8,5	10,2	62,4	50
Поэтапно 6,8 и 2,6	до 60	9000±50	4,3	8,4	32,3	70
Поэтапно 6,8; 2,6 и 0,52	до 60	9000±50	2,6	4,4	11,5	80
Сталь 40						
0,52	до 180	9500±50	1,9	3,8	8,7	90
2,60	до 130	9300±50	3,9	8,5	15,3	80
6,8	до 80	9100±50	7,8	11,3	58,1	60

В работе [13] показано, что при электроискровой обработке сплавов на основе железа возникает значительное уменьшение размеров блоков субструктуры, увеличение плотности дефектов и возрастание микроискажений в зоне термического влияния. Такие изменения в микроструктуре и субструктуре стали приводит к заметному повышению микротвердости «белого слоя» (рис. 3). Определенную роль в повышении твердости могут играть элементы атмосферы (азот, кислород), которые, переходя под действием электрических разрядов в активное состояние, могут взаимодействовать с поверхностными слоями и упрочнять материал.

Следует отметить, что при одновременном насыщении стали углеродом, серой и алюминием, методом ЭЭЛ с меньшей энергией разряда приводит к снижению величины шероховатости поверхности и повышению сплошности покрытия (см. табл. 2).

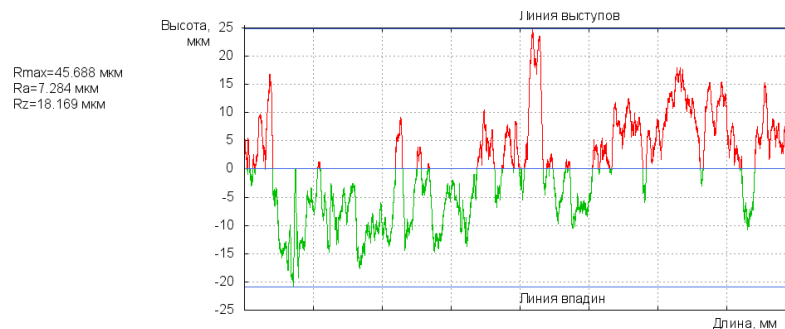


Рис. 4. Профилограмма поверхностного слоя образца из стали 20 при ЭЭЛ графитовым электродом

На рис. 4 представлена профилограмма участка сульфоалитированной поверхности образца стали 20 при ЭЭЛ графитовым электродом с энергией разряда $W_p = 6,8$ Дж.

Таблица 3.

Содержание серы в поверхностном слое стали 20 при одновременном насыщении стали углеродом, серой и алюминием методом ЭЭЛ

Глубина измерения, мкм	20	40	60	80	100	120	140	160	180
Наличие серы, %	0,21	0,15	0,12	0,09	0,08	0,05	0,05	0,03	0,03

Наличие в консистентном веществе серы способствует процессу сульфидирования. В табл. 3 представлено изменение содержания серы по мере углубления от поверхности при сульфоалитировании стали 20 методом ЭЭЛ с энергией разряда 6,80 Дж.

Выводы. 1. Рассмотрены возможности применения экологически чистого процесса одновременного насыщения углеродом, серой и алюминием стальных поверхностных слоев деталей машин методом электроэрозионного легирования.

2. Проведен металлографический и дюрометрический анализ особенностей поверхностных слоев углеродистых сталей после одновременного насыщения стали углеродом, серой и алюминием методом ЭЭЛ. Показано, что структура слоя состоит из трех участков: «белого» слоя, диффузной зоны и основного металла. С увеличением энергии разряда снижается толщина, микротвердость и сплошность «белого» слоя, а шероховатость поверхности возрастает.

3. Наличие в консистентном веществе серы способствует процессу сульфидирования. Содержание серы по мере углубления с поверхности при сульфидировании стали 20 методом ЭЭЛ графитовым электродом с энергией разряда 6,80 Дж снижается и на глубине 160 мкм соответствует ее количеству в основе.

4. Сравнительный анализ влияния подложки на качественные параметры поверхностного слоя электроэрозионных покрытий показал, что при замене стали 20 на сталь 40 увеличивается толщина «белого» слоя и переходной зоны, т.е. глубина зоны повышенной твердости, а также величина ее микротвердости. Шероховатость поверхности и сплошность «белого» слоя изменяются незначительно.

5. Одновременное насыщение стали углеродом, серой и алюминием методом ЭЭЛ с меньшей энергией разряда снижает величину шероховатости поверхности и повышает сплошность покрытия.

Список используемой литературы:

1. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / В. Д. Зозуля, Е. Л. Шведков, Д. Я. Ровинский, Э. Д. Браун. – Киев: Наук. думка, 1990. – 264 с.
2. Способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием. Пат. 2337796. Российская Федерация. МПК В 23Н 9/00 / Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Белоус А.В.; Заявлено 05.10.2006; Опубликовано 10.04.2008, Бюл. № 31. с.3.
3. Патент Российской Федерации на изобретение № 2468899. МПК В 23Н 9/00. Способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием /Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., М.П. Братушак/ Оpubл. 10.12. 2012, Бюл. № 34
4. Елизаветин М. А. Технологические способы повышения долговечности машин / М. А. Елизаветин, Э.А. Сателъ. – М.: Машиностроение, 1969. – 400 с.
5. Пячин С. А. Формирование и исследование электроискровых покрытий на основе алюминидов титана / С. А. Пячин, А. А. Бурков, В. С. Комарова // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2013. - № 6. – С. 16–24.
6. Патент України на корисну модель UA 119316 U МПК (2017.01) C23C 10/48 (2006.01) B23H 9/00. Спосіб обробки поверхонь сталевих деталей / Тарельник В.Б. Марцинковський В.С. Білоус А.В. Гапонова О.П. Коноплянченко Є. В. Антошевський Б. Кундера Ч. Жуков О.М. – № u201701845; заявл. 27.02.2017; опубл. 25.09.2017. – Бюл. № 18/2017
7. Патент України на корисну модель UA 119318 U МПК (2017.01) B23H 1/00 B23H 9/00 C23C 8/60 (2006.01). Спосіб сульфодіаментування сталевих деталей / Тарельник В.Б. Марцинковський В.С. Білоус А.В. Гапонова О.П. Коноплянченко Є.В. Антошевський Б. Кундера Ч. Жуков О.М. – № u201701847; заявл. 27.02.2017; опубл. 25.09.2017. – Бюл. № 18/2017.
8. Ecologically Safe Process for Sulfo-Aluminizing Steel Parts / L. D. Plyatsuk, V. B. Tarelnyk, Cz. Kundera, O. V. Radionov, O. P. Gaponova // Journal of Engineering Sciences. – 2018. – Vol. 5, Issue 1. – P. 16-20.
9. Химухин, С. Н. Структура и свойства металлов и сплавов при электроискровом воздействии : монография / С. Н. Химухин, Хосен Ри, Э. Х. Ри. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – 127 с.
10. Ставицкая Н. Б. Исследование форм и размеров лунок, образованных на различных материалах искровыми разрядами / Н. Б. Ставицкая, Б. И. Ставицкий // Электронная обработка материалов. – 1980. - № 1. – С. 9-13.
11. Палатник Л.С. Фазовые превращения при электроискровой обработке металлов и опыт установления критерия наблюдаемых взаимодействий // ДАН СССР. – 1953. – № 89. – С.455-458.
12. Иерусалимская А.Н. Структурные изменения вещества при воздействии световых импульсов ОКГ / А. Н. Иерусалимская, В. И. Самойлов, П.И Уляков // Физика и химия обработки материалов. – 1968. – № 4. – С. 26-34.
13. Химухин С. Н. Структура и свойства металлов и сплавов при электроискровом воздействии : монография / С. Н. Химухин, Хосен Ри, Э. Х. Ри. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – 127 с.

Рецензенти:

Залога В.О., завідуючий кафедрою «Технологія машинобудування, верстати та інструменти», доктор технічних наук, професор, Сумський державний університет

Пермяков О.А., доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Стаття надійшла до реакції 14.06.2018