

Повышение экологической безопасности формирования износостойких покрытий на поверхностях деталей типа тел вращения из стали 12Х18Н10Т с применением комбинированной технологии на основе электроискрового легирования

*В. Б. Тарельник^а, **О. П. Гапонова^б, В. Б. Лобода^а, Е. В. Коноплянченко^а,
В. С. Марцинковский^а, Ю. И. Семирненко^а, Н. В. Тарельник^а,
М.А. Микулина^а, Б. А. Саржанов^а

^аСумский национальный аграрный университет,
г. Сумы, 40021, Украина, *e-mail: tarelnik@i.ua

^бСумский государственный университет,
г. Сумы, 40007, Украина, **e-mail: gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua

Поступила в редакцию 26.12.2019

После доработки 26.03.2020

Принята к публикации 27.03.2020

Представлен анализ особенностей формирования толстослойных комбинированных электроискровых покрытий (КЭИП), полученных на цилиндрических образцах из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Образцы подвергались цементации методом электроискрового легирования (ЦЭИЛ) на установке «Элитрон-52А» и алитированию методом ЭИЛ на механизированной установке «ЭИЛ-9» при энергии разряда $W_p = 3,4$ Дж. На алитированную поверхность на этой же установке наносили покрытие электродами из твердого сплава Т15К6 при $W_p = 0,9$ и 3,4 Дж. Шероховатость КЭИП снижают обкаткой шариком и нанесением металлополимерного материала (МПМ), армированного порошком из твердого сплава ВК6. К практическому применению предложена новая технология восстановления деталей типа тел вращения, позволяющая формировать на стали 12Х18Н10Т КЭИП в последовательности: ЦЭИЛ → ЭИЛ А1 → ЭИЛ Т15К6 → МПМ (армированный ВК6), толщиной до 1,5 мм, сплошностью 100%, микротвердостью порядка 10100–9500 МПа и шероховатостью $R_a = 1,2$ мкм.

Ключевые слова: комбинированное электроискровое покрытие, металлополимерный материал, структура, микротвердость, шероховатость

УДК 621.9.048.669.268

DOI: 10.5281/zenodo.4045794

ВВЕДЕНИЕ

Промышленные предприятия, которые используют в своем производственном процессе насосное и компрессорное оборудование, центрифуги и др., сталкиваются с необходимостью защиты при эксплуатации или восстановления при ремонте поверхностей деталей, подвергаемых различным видам абразивного износа. Это, например, винтовые и цилиндрические поверхности шнеков центрифуг, подвергаемых гидроабразивному износу; ступицы рабочих колес дутьевых машин после газоабразивного износа (эрозии) и др. Наличие в рабочей среде агрессивных компонентов приводит к ускорению процесса разрушения поверхностей деталей.

Технология восстановления таких деталей включает в себя удаление изношенных участков и замену их отдельными сегментами, изготовленными, как правило, из стальных листов такой же марки. Прикрепление сегментов на

изношенные участки обычно осуществляют различными видами сварки.

Нередко с целью более эффективной защиты от абразива поверхность деталей подвергают таким видам упрочнения, как наплавка твердыми и износостойкими материалами [1–3], плазменное напыление [4, 5], химико-термическая обработка (ХТО) [6, 7] и др.

При этом удаление изношенной части детали, замена ее отдельными сегментами и упрочнение поверхностей, подвергаемых в процессе работы абразивному изнашиванию, нередко осуществляются методами, оказывающими вредное воздействие на окружающую среду.

Ремонтная сварка и наплавка деталей машин и механизмов на сегодняшний день являются одними из основных технологических методов восстановления эксплуатационных свойств деталей и упрочнения их поверхностей [8–10].

Таким образом, несмотря на наличие ряда известных способов упрочнения, восстановления и замены изнашиваемых участков поверхностей

деталей, проблема не утратила своей актуальности.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ. АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Согласно [11] газосварочное оборудование является взрывоопасным и требует строгого соблюдения мер безопасности. Оборудование для газопламенной обработки металлов должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.008 «Оборудование и аппаратура для газопламенной обработки металлов и термического напыления покрытий».

Для проведения сварочных работ на предприятиях применяется MIG/MAG сварка — дуговая сварка плавящимся металлическим электродом (проволокой) в среде инертного/активного защитного газа с автоматической подачей присадочной проволоки. Применение этой сварки сопровождается рядом экологических проблем.

Проблема фотохимических реакций в воздухе. Основным источником опасных и вредных факторов сварки в защитных газах является световое излучение ионизированного в дуге аргона. Это излучение характерно для Солнца в открытом космосе. До поверхности Земли от Солнца доходят только лучи длиной 290 нм, более короткие тормозятся атмосферой [12]. При торможении короткого ультрафиолета, излучаемого аргоном, происходят фотохимические реакции с молекулярным кислородом и азотом с образованием озона и оксида азота. Озон — O_3 , аллотропная форма кислорода, является мощным окислителем. Благодаря своей химической активности озон имеет очень низкую предельно допустимую концентрацию в воздухе (соизмеримую с ПДК боевых отравляющих веществ) $5 \cdot 10^{-8} \%$ или $0,1 \text{ мг/м}^3$, что в 10 раз больше обонятельного порога для человека. Озон раздражает слизистую оболочку глаз и дыхательных путей, повреждает ткани легких, вызывает кашель и головокружение. Окись азота (NO) на воздухе быстро окисляется в двуокись азота — NO_2 , которая и играет основную роль при отравлении окислами. Окислы азота вызывают поражение глубоких отделов воздухоносных путей и отек легких. Отравление озоном и окислами азота может привести к летальному исходу в результате паралича дыхания [13].

Проблема образования биологически активных веществ. В зону дуги при струйной защите смесью аргона и углекислого газа попадает порядка 3–6% атмосферного воздуха. В нее же выделяются растворенные в металле газы. Исследованиями [14] определено, что в зоне дуги возможен синтез биологически активных

веществ (БАВ) — CN, HCN, NO_2 , N_2O , CO, которые поступают в воздух рабочей зоны. Наименьшая концентрация БАВ образуется при сварке в чистом аргоне и при сварке в смеси $Ar+5\% O_2$. Наибольшая — при сварке в смеси $Ar+CO_2$.

Проблема образования аэрозолей неокисленных металлов (диаметр частиц аэрозолей металла составляет 0,1–0,5 мкм, а агломератов — 5–10 мкм) в струе защитного газа имеет важное значение как для обеспечения безопасности работ, так и для решения экологической безопасности сварки за счет утилизации образовавшихся высокодисперсных аэрозолей металлов. Все неокисленные металлы горючи [13].

Наплавка — это нанесение слоя металла на поверхность заготовки или изделия посредством сварки плавлением (ГОСТ 2601-84). В случае применения для этой цели сварки давлением употребляется термин наварка (плакирование). Восстановительная наплавка (наварка) применяется для восстановления первоначальных размеров изношенных или поврежденных деталей. В этом случае наплавленный металл по составу и свойствам может быть близок к основному (восстановительная размерная наплавка) или отличаться от него (восстановительная износостойкая наплавка) [14].

При выполнении сварки на работников могут воздействовать опасные и вредные производственные факторы. К вредным производственным факторам относятся (ГОСТ 12.0.003-74): повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны; повышенный уровень ультрафиолетовой и инфракрасной радиации; повышенная температура воздуха рабочей зоны; повышенный уровень шума на рабочем месте; недостаточная освещенность рабочей зоны; опасность поражения электрическим током; искры, брызги, выброс расплавленного металла и шлака. При сварке в зону дыхания работников могут поступать сварочные аэрозоли, содержащие в составе твердой фазы оксиды различных материалов и другие соединения, а также токсичные газы. Воздействие на организм выделяющихся вредных веществ может явиться причиной острых и профессиональных хронических заболеваний и отравлений [15].

На участках сварки состав и масса выделяющихся веществ зависит от свойств применяемых сварочных и свариваемых материалов. Наибольшие выделения вредных веществ характерны для ручной электродуговой сварки покрытыми электродами. При расходе 1,0 кг электродов образуется до 40 г пыли, 2 г фтори-

стого водорода, 1,5 г оксидов углерода и азота. При полуавтоматической и автоматической сварке общая масса выделяемых вредных веществ меньше в 1,5–2,0 раза. Сварочная пыль на 99% состоит из частиц размером от 10^{-3} до 1,0 мкм, около 1% пыли имеет размер частиц 1–5 мкм, частицы размером более 5 мкм составляют десятые доли процента [16].

Плазменное напыление предназначено для нанесения покрытий различного назначения посредством распыления порошковых и проволочных материалов. Обычная толщина покрытий составляет от 0,5 до 2,0 мм со средней равномерностью $\pm 20\%$. В [17] описаны основные санитарно-гигиенические и эколого-эстетические требования, предъявляемые к производственному участку плазменных покрытий: камера плазменного напыления должна быть оборудована автономной мощной вытяжной вентиляцией, предусматривающей сбор порошка в системе типа «Циклон», при этом эффективность вытяжки должна быть не менее 90%, а скорость движения отсасываемого воздуха в зоне выделения вредных веществ – не менее 1,5 м/с; интерьер участка, его стены, потолок и внутренние конструкции отдельных помещений должны иметь звукопоглощающую облицовку, быть окрашены в серый, желтый, голубой тона, поглощающие ультрафиолетовые лучи, обеспечивающие рассеянное отражение света с учетом наименьшего коэффициента отражения; участок должен быть оборудован противопожарным постом со штатным инвентарем и средствами тушения пожара; баллоны с газом (азотом, аргонном и др.) необходимо устанавливать на расстоянии не ближе 5 м от рабочего места оператора; баллоны с водородом должны находиться только с наружной стороны здания в специальной клетке, исключающей доступ посторонним лицам; на участке категорически недопустимо накопление пыли любого происхождения.

Одним из направлений увеличения сопротивления трению и изнашиванию деталей является создание методом ХТО на их поверхностях слоев химических соединений, свойства которых отличаются от свойств основных металлов. Основными методами ХТО являются: цементация, алитирование, сульфидирование и др.

Несмотря на то что в результате ХТО значительно повышается качество поверхностных слоев деталей машин, метод имеет и ряд недостатков. Это поводки и коробления; громоздкое и дорогостоящее технологическое оснащение; длительность процесса, использование энергоемкого оборудования и др. Кроме того, отдельные операции ХТО небезопасны для

окружающей среды. Так, основными недостатками цианирования являются ядовитость цианистых солей и необходимость принятия в связи с этим специальных мер по охране труда.

Согласно [18], на процесс возникновения и развития техногенного риска оказывает влияние множество факторов и условий, среди которых: отказы в работе систем и агрегатов вследствие их конструктивных недостатков, низкого качества изготовления или нарушения правил технического обслуживания; отклонения от нормальных условий эксплуатации; ошибки персонала; внешние воздействия и др. По мнению профессора Г.Т. Фрумина [19], термическая обработка и ХТО деталей относятся к наиболее распространенным факторам риска.

В последние годы для повышения качества поверхностных слоев деталей машин все большую значимость приобретает метод электроискрового легирования (ЭИЛ) – процесс взаимодействия материала анода и катода при униполярном переносе с анода на катод, который является обрабатываемой деталью [20–23]. Его специфическими особенностями, привлекающими технологов, являются: локальность действия, малые затраты энергии, отсутствие объемного нагрева материала, прочное соединение нанесенного материала с основой, простота автоматизации, возможность сочетания операций и др. [24, 25].

Несмотря на неоспоримые достоинства, метод ЭИЛ имеет и ряд недостатков (увеличение шероховатости, возникновение в поверхностном слое растягивающих остаточных напряжений, снижение усталостной прочности, лимитирование толщины формируемого слоя), которые нередко ограничивают его применение для более широкого круга деталей машин [24, 26–28].

Применяя различные электродные материалы, методом ЭИЛ можно проводить процессы, альтернативные ХТО, но со значительно меньшими затратами [29, 30]. Так, используя графитовый электрод и насыщая поверхность детали углеродом, можно осуществлять процессы, сходные с традиционной цементацией, алюминиевым электродом – алитированием [31, 32]. При этом технология ЭИЛ менее экологически и техногенно опасна.

Решению проблемы повышения толщины покрытия и качества его поверхности посвящены работы, в которых исследованы процессы нанесения покрытий, сформированных одним электродным материалом, например бронзой БрКМц3-1, при создании «бугристых» покрытий [33–35], многослойных комбинированных

электроискровых покрытий (КЭИП), в которых твердые износостойкие материалы сочетаются с мягкими антифрикционными металлами [36–41] или технология ЭИЛ совмещается с другой ремонтной технологией, например лазерной обработкой [42–44], поверхностной пластической деформацией (ППД) [45–50], нанесением металлополимерных материалов (МППМ) [51, 52] и др.

Известен способ повышения износостойкости стальных деталей методом ЭИЛ их поверхностного слоя, который включает поэтапную ЦЭИЛ, алитирование методом ЭИЛ и нанесение методом ЭИЛ покрытия электродом-инструментом, изготовленным из материала, выбранного из группы твердых износостойких металлов: Ti, V, W и их карбидов, при этом все следующие операции выполняют при одной и той же энергии разряда 3,4 Дж и производительности $2 \text{ см}^2/\text{мин}$ [53].

Энергия разряда 3,4 Дж и производительность $2 \text{ см}^2/\text{мин}$ были выбраны на основании предыдущих исследований [54] при изучении влияния режимов ЭИЛ графитовым электродом на параметры качества стальных поверхностей. При ЦЭИЛ стали 12X18H10T при энергии разряда (W_p) = 3,4 и 6,8 Дж с производительностью соответственно 2 и $2,5 \text{ см}^2/\text{мин}$ толщина упрочненного слоя составляла 101 и 115 мкм, микротвердость 8700 и 9000 МПа и шероховатость $R_a = 8,3\text{--}9,0$ и $11,0\text{--}14,2$ мкм соответственно. Таким образом, значительное увеличение энергии разряда с $W_p = 3,4$ до 6,8 Дж не приводит к существенному увеличению толщины и микротвердости упрочненного слоя, а шероховатость поверхности возрастает и сплошность уменьшается. Аналогичные результаты были получены при исследовании влияния энергии разряда и производительности ЭИЛ на параметры качества поверхностного слоя (слоя повышенной твердости, микротвердости, шероховатости, сплошности) при алитировании [32] и легировании электродом-инструментом из твердого сплава T15K6 [21].

При исследовании покрытий, сформированных, согласно [53], методом ЭИЛ на установке «Элитрон-52А» выявлена закономерность формирования многослойных покрытий в условиях чередования легирующих электродов для последовательного нанесения на подложку стали 12X18H10T. Апробированы схемы: ЦЭИЛ при $W_p = 3,4$ Дж + алитирование алюминиевым электродом марки СвА99 при $W_p = 3,4$ Дж; ЦЭИЛ при $W_p = 3,4$ Дж + ЭИЛ твердым сплавом T15K6 при $W_p = 3,4$ Дж; ЦЭИЛ при $W_p = 3,4$ Дж + алитирование алюминиевым электродом марки СвА99 при $W_p = 3,4$ Дж + ЭИЛ твердым сплавом

T15K6 при $W_p = 3,4$ Дж. Упрочненный слой покрытия, полученного в последовательности ЦЭИЛ → ЭИЛ Al, имеет микротвердость до 7500 МПа, толщину 80–120 мкм и состоит из двух твердых растворов с ОЦК и ГЦК решетками, интерметаллидного соединения ($\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$) и двух карбидов с гексагональной ($(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$) и кубической (AlFe_3C) кристаллической решеткой.

При ЭИЛ по схеме ЦЭИЛ → ЭИЛ T15K6 не удается достичь высокого значения микротвердости (H_{μ} на поверхности составляет 9000 МПа), поскольку в покрытии образуются два твердых раствора с ОЦК и ГЦК решетками, карбид титана и комплексный карбид Me_6C (типа $\text{W}_3\text{Fe}_3\text{C}$), что не обеспечивает достаточной микротвердости. Толщина слоя повышенной твердости составляет 200–220 мкм.

Покрытия, сформированные в последовательности ЦЭИЛ → ЭИЛ Al → ЭИЛ T15K6, имеют наибольшую зону повышенной твердости (320–360 мкм) и наименьшую шероховатость поверхности (7,5 мкм). За счет образования 62% (масс.) Ti и интерметаллидов обеспечивается получение максимальной микротвердости поверхностного слоя (больше 11500 МПа). ЭИЛ по описанной технологии позволяет увеличить диффузную зону углерода и алюминия, повысить твердость и толщину упрочненного слоя.

В настоящее время различают два направления в ЭИЛ: чистовое и грубое. При чистовом на катоде (детали) формируются относительно тонкие до 0,1 мм и качественные слои с высотой неровностей профиля покрытия R_z не более 40 мкм, при грубом толщина формируемого слоя может достигать 0,15–0,2 мм и более с $R_z > 80$ мкм [24]. Хотя традиционно различают установки для чистового и грубого легирования, существует ряд установок, которые могут применяться как для первого, так и для второго случаев, например «Элитрон-52».

Для проведения работ по восстановлению деталей типа тел вращения ЛуганскПТИмашем создана механизированная установка «ЭИЛ-9». Кишиневским опытным заводом Института прикладной физики Республики Молдова были разработаны механизированные установки модели «Элитрон-347», предназначенные для ЭИЛ и восстановления наружных и внутренних поверхностей деталей формы тел вращения.

Механизированные установки «ЭИЛ-9» и «Элитрон-347» содержат источник технологического тока (генератор) и электропривод с электродной головкой, монтируемой на токарно-винторезных станках. В технологических инструкциях заводов поставщиков и из опыта работы известно, что для восстановления изно-

шенных участков поверхности в качестве материалов электродов рекомендуются нержавеющие стали марок 1X18H9, 12X18H10T, металлокерамические твердые сплавы групп ВК и ТК.

Учитывая то, что электроды из твердых сплавов плохо выдерживают ударные нагрузки, для их использования применяют специальные крепления, позволяющие прибегать к электродам небольшой длины.

Толщина наносимого в процессе ЭИЛ слоя за один проход зависит от материала электрода, режима и времени обработки. При использовании в качестве электрода нержавеющей стали 12X18H10T за один проход толщина покрытия может достигать 0,6 мм на диаметр при сплошности покрытия 70%. Шероховатость поверхности в этом случае достигает 300 мкм. После пяти проходов толщина слоя достигает 2,8 мм на диаметр, сплошность снижается соответственно до 60%.

При использовании механизированных установок ЭИЛ на телах вращения толщина полученных поверхностных слоев значительно больше, чем на плоских и криволинейных поверхностях. Поэтому возникает необходимость в проведении исследований, направленных на создание толстослойных покрытий на плоских и криволинейных поверхностях, соизмеримых с покрытиями, формируемыми на поверхностях деталей тел вращения, обладающих более высоким качеством.

Таким образом, цель работы – повышение экологической безопасности и параметров качества износостойких покрытий (микротвердости, сплошности, шероховатости), сформированных методом ЭИЛ на поверхностях деталей тел вращения из стали 12X18H10T путем разработки комбинированной технологии, включающей нанесение КЭИП, поверхностное пластическое деформирование и нанесение металлоплакирующих материалов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Выше приведены результаты исследований КЭИП, сформированных при ручном ЭИЛ на установке «Элитрон-52А» в последовательности ЦЭИЛ → ЭИЛ А1 → ЭИЛ Т15К6. Для нанесения таких КЭИП механизированным способом на установке «ЭИЛ-9» в качестве материала подложки использовали цилиндрические образцы из нержавеющей стали 12X18H10T (рис. 1). Поверхности 1 и 3 перед ЦЭИЛ шлифовали до $R_a = 0,5$ мкм. Образцы закрепляли в патроне токарного станка и производили ЦЭИЛ на установке «Элитрон-52А» (три прохода при энергии разряда $W_p = 3,4$ Дж и подаче

$S = 0,03$ мм/об) (рис. 2а). В качестве электрода-инструмента применяли графитовые стержни марки МПГ-7 диаметром 4 мм и длиной 30 мм.

Используя механизированную установку «ЭИЛ-9», по цементируемой поверхности производили три прохода ЭИЛ алюминиевыми электродами диаметром 3 мм и длиной 150 мм с $W_p = 3,4$ Дж и при подаче $S = 0,05$ мм/об (рис. 2б), а затем, применяя оснастку для закрепления электродов из твердого сплава Т15К6 (рис. 2в), наносили покрытие, проводя два прохода с $W_p = 0,9$ Дж при $S = 0,03$ мм/об и два прохода с $W_p = 3,4$ Дж при $S = 0,07$ мм/об (рис. 2г,д). Первоначальное ЭИЛ при $W_p = 0,9$ Дж обеспечивает сплошность покрытия, оцениваемую визуально ~ 90%, а при $W_p = 3,4$ Дж – ~ 70%. Для увеличения сплошности поверхность сформированного покрытия обрабатывали ППД методом обкатки шариком (ОШ) (рис. 2е,ж,з) на токарном станке пружинно-штоковым приспособлением с шариковой головкой $\phi 19$ мм. Усилие обкатки составляло 1500 Н. Подача $S = 0,05–0,21$ мм/об, скорость $V = 30$ м/мин. Смазка производилась индустриальным маслом.

На покрытие из твердого сплава Т15К6, тщательно втирая, наносили МПМ (рис. 2и). В качестве армирующего материала при полимеризации использовали порошок в виде твердосплавной смеси ВК6 с размерами частиц не более 40 мкм. Порошки просушивали в сушильных шкафах при 150–200°C, просеивали через сито 0075 и небольшими порциями добавляли в двухкомпонентную эпоксидную систему, наполненную ферросиликоном марки Loctite 3478.

При этом после каждой порции образующуюся в виде пасты смесь тщательно перемешивали, доводя концентрацию перед нанесением на электроискровое покрытие ~ до 60% (вес.%). Дальнейшее увеличение концентрации затрудняло перемешивание и не гарантировало полного обволакивания отдельных частичек твердосплавной смеси металлополимерным материалом. После полимеризации слой МПМ протачивали до выступов шероховатостей покрытия из твердого сплава Т15К6 (рис. 2к).

Для проведения металлографических и дюротметрических исследований на каждой стадии нанесения КЭИП из круглых образцов вырезали отдельные сегменты и изготавливали шлифы. Поверхность шлифов подвергали химическому травлению для выявления структуры в реактиве «царская водка». После изготовления шлифы исследовали на оптическом микроскопе «Неофот-2», с помощью которого проводили оценку качества слоя, его сплошности, толщины и строения. Одновременно осуществляли дюрот-

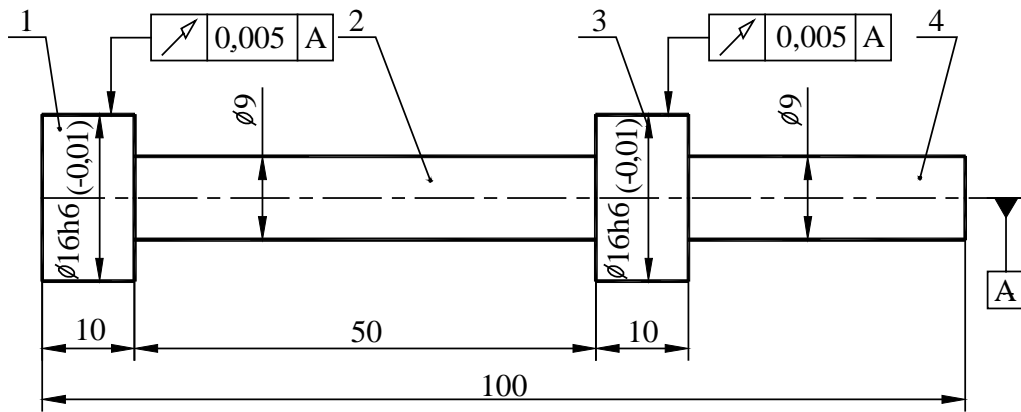


Рис. 1. Эскиз образца для отработки технологии нанесения КЭИП:
1, 3 – рабочие поверхности образца; 2, 4 – технологические поверхности.

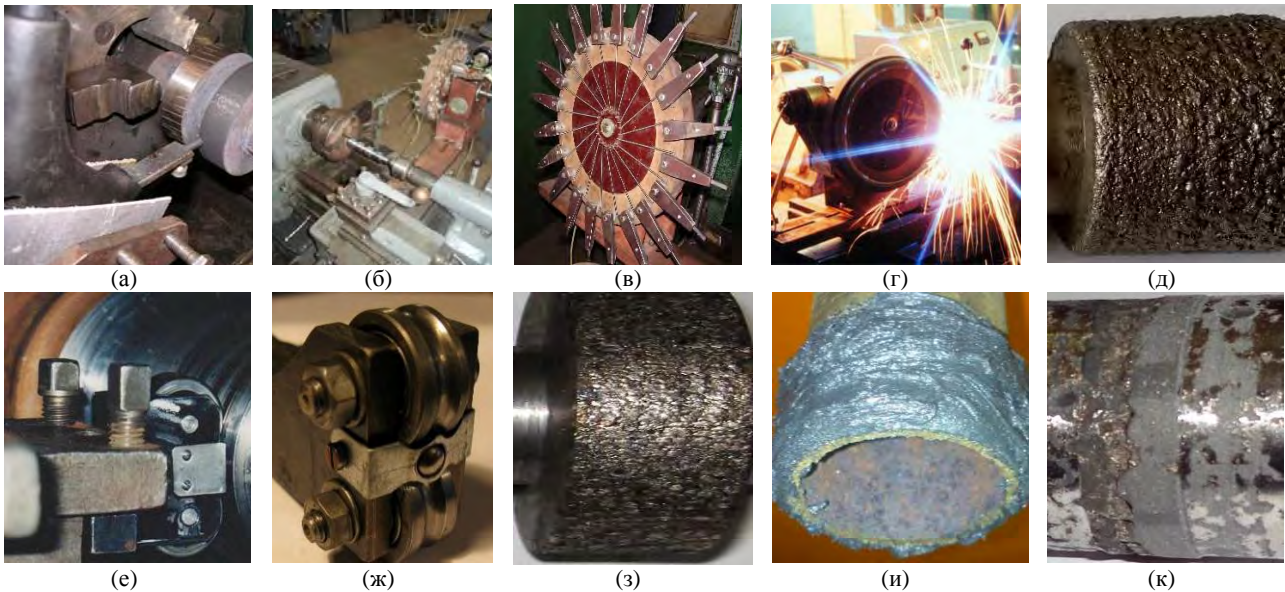


Рис. 2. Формирование на стали 12X18H10T КЭИП: (а) – ЦЭИЛ; (б) – ЭИЛ А1; (в) – приспособление для закрепления электродов из твердого сплава; (г) – ЭИЛ Т15К6; (д) – поверхность образца с КЭИП; (е) – ОШ; (ж) – приспособление для ОШ; (з) – поверхность образца после ОШ; (и) – поверхность образца с МПМ, армированным твердым сплавом ВК6; (к) – проточенная поверхность образца.

метрический анализ на распределение микротвердости по глубине шлифа от поверхности. Замер микротвердости проводили на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием алмазной пирамиды под нагрузкой 0,05 Н, согласно ГОСТ 9450-76. Сплошность покрытия оценивали металлографическим методом. Шероховатость поверхности измеряли на приборе профилографе-профилометре мод. 201 завода «Калибр» путем снятия и обработки профилограмм. База профилометрирования составляла 4 мм.

Для исследований химического состава газовой среды в зоне проведения электросварки и ЭИЛ использовалась вакуумная установка УВБЛ-4 (установка вакуумная безмасляная лабораторная), принципиальная схема которой изображена на рис. 3. Высокий вакуум 10^{-5} – 10^{-6} Па создается в вакуумной камере (9) (рис. 3) с помощью магниторазрядного высоковакуумного

насоса НМДО-0,25 (12). Измерение высокого вакуума осуществляется с помощью манометрического преобразователя типа МИД (10). Анализатор масс-спектрометра МХ7304 [55] (8) вмонтирован непосредственно в вакуумную камеру (9) для анализа в ней состава газов. С помощью дозировочного вентиля (7) в камеру можно осуществлять напуск малых количеств эталонного газа из баллона (5) или исследуемого воздуха (заменяв баллон с эталонным газом емкостью с исследуемым воздухом). Дозировочный вентиль является составной частью автоматической системы напуска СНА-1. Управление дозировочным вентилем (напуск газа) осуществляется с помощью электронного блока СНА-1.

Исследуемый газ отбирался непосредственно из зоны сваривания или зоны ЭИЛ с помощью электромеханического воздушного насоса в чистую герметичную ПЕТ-бутылку емкостью

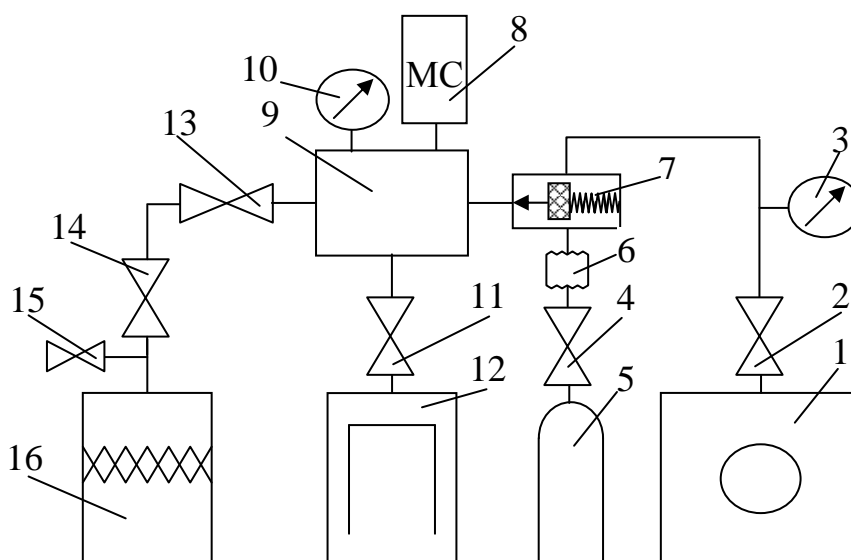


Рис. 3. Принципиальная схема вакуумной установки УВБЛ-4: 1 – механический форвакуумный насос; 2, 4 – запорные вентили; 3 – манометрический преобразователь ПМТ-4М; 5 – баллон с эталонным газом; 6 – перепускной клапан; 7 – дозировочный вентиль; 8 – анализатор масс-спектрометра МХ7304; 9 – вакуумная камера; 10 – манометрический преобразователь МИД; 11 – высоковакуумный вентиль ДУ-50; 12 – магниторазрядный насос НМДО-0,25; 13, 14 – запорный вентиль ДУ-12; 15 – предупредительный клапан; 16 – адсорбционный угольный насос.

1,5 л, которая присоединялась к вакуумной камере вместо баллона (5).

Масс-спектрометр МХ7304 принадлежит к газовым динамическим масс-спектрометрам с монополюсным анализатором, который позволяет проводить химический анализ газов в диапазоне парциальных давлений 10^3 – 10^{-10} Па и диапазоне массовых чисел 1–200 а.е.м.

С помощью масс-спектрометра МХ7304 можно проводить качественный и количественный анализ газов. Суть качественного масс-спектрометрического анализа газа состоит в установлении его химического состава (химической формулы) в результате измерений масс атомов или молекул исследуемого газа. Так, например, молекула водорода (H_2) имеет молекулярную массу 2 а.е.м., молекула водного пара (H_2O) – молекулярную массу 18 а.е.м., молекула азота (N_2) – 28 а.е.м., молекула кислорода (O_2) – 32 а.е.м., атом аргона (Ar) – 39 а.е.м., молекула углекислого газа (CO_2) – 44 а.е.м. и т.д. Определив с помощью масс-спектрометра массу молекулы неизвестного газа, тем самым можно ответить на вопрос, что это за газ (качественный анализ).

Масса иона отвечает за химический состав вещества, количество ионов данной массы отвечает за содержимое этого вещества в смеси (количественный анализ).

Нейтральные атомы и молекулы вещества превращаются в ионы (ионизируются) в источнике ионов масс-спектрометра. На выходе из источника ионы формируются в пучок, который направляется в масс-анализатор. В масс-спектрометре МХ7304 установлен открытый

источник ионов с ионизацией электронным ударом. Источник ионов вместе с монополюсным анализатором масс-спектрометра размещен в вакуумной камере вакуумной установки УВБЛ-4 и откачиваются до высокого (10^{-3} – 10^{-6} Па) вакуума.

Перед началом проведения исследований состава проб воздуха вакуумная камера (9) вместе с анализатором масс-спектрометра (8) (рис. 3) обезгаживалась нагреванием до 250–300°C на протяжении 10–15 часов и откачивалась до максимального разряжения $(2-5) \times 10^{-6}$ Па. Масс-спектр остаточной атмосферы обезгаженной вакуумной камеры представлен на рис. 4а.

Такой масс-спектр является типичным для вакуумных установок с безмасляным откачиванием с помощью магниторазрядных вакуумных насосов типа НМДО. Основными составляющими остаточной атмосферы (основными масс-спектрометрическими пиками в масс-спектрограмме остаточной атмосферы) являются пики инертных газов He и Ar, которые плохо откачиваются такими насосами, и пики водяного пара H_2O , CO и CO_2 , появляющиеся в составе остаточной атмосферы вакуумной камеры вследствие десорбции этих газов с ее стенок. Интенсивность (высота) пика пропорциональна количеству молекул (парциальному давлению) соответствующего газа. Высоту пика принято представлять величиной электрического сигнала (в вольтах или амперах), который создают ионы соответствующей массы в электрическом круге приемника ионов масс-спектрометра. Из масс-спектрограммы видно, что высоты пиков состав-

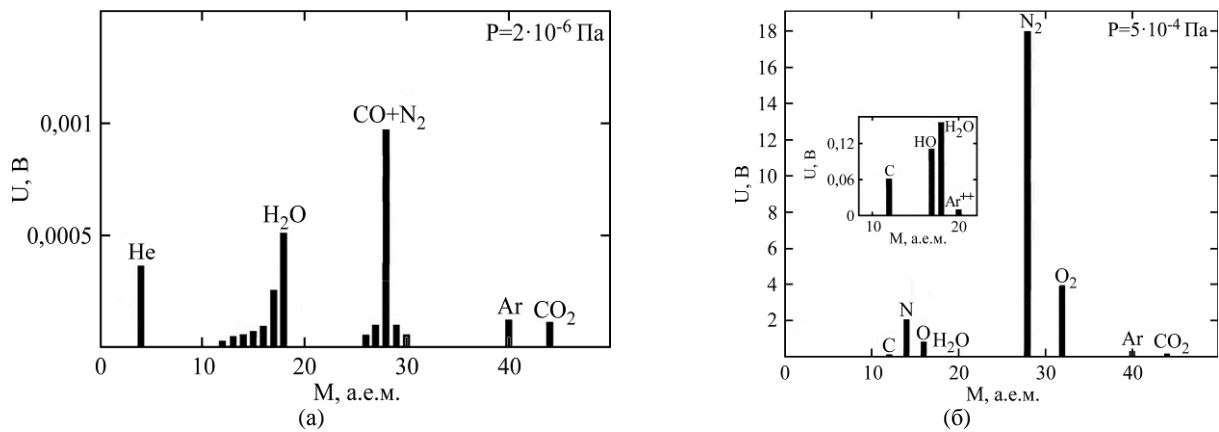


Рис. 4. Масс-спектры: остаточной атмосферы вакуумной камеры при максимальном разрежении в ней $2 \cdot 10^{-6}$ Па (а) и чистого воздуха при напуске в вакуумную камеру до давления $5 \cdot 10^{-4}$ Па (б).

ляющих остаточной атмосферы не превышают 0,001 В.

Для исследований химического состава газовой среды в зоне осуществления электро-сварки работы проводили при наплавке на сталь 12Х18Н10Т износостойкого покрытия плавящимися электродами для сварки нержавеющей и жаростойких сталей марки ОК61.30 диаметром 2,5 мм. При этом использовали ток $I = 80$ А; напряжение на дуге $U = 20-25$ В; напряжение холостого хода $U_{х.х} = 72$ В.

Для исследований химического состава газовой среды в зоне работы на установке «Элитрон-52А» ЭИЛ проводили электродом-инструментом из твердого сплава Т15К6. При этом энергия разряда составляла 3,4 Дж.

Для исследования освещенности в помещении до и после проведения сварочных работ при наплавке на сталь 12Х18Н10Т износостойкого покрытия плавящимся электродом марки ОК61.30 диаметром 2,5 мм, а также до и после ЭИЛ стали 12Х18Н10Т электродом из твердого сплава Т15К6 использовали комбинированный прибор "FLUS" ET-965.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 5 показаны микроструктура и распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя образца стали 12Х18Н10Т с КЭИП состава ЦЭИЛ + ЭИЛ А1 + ЭИЛ Т15К6 + МПМ (армированный ВК6).

Как видно из рис. 5, структура полученного покрытия состоит из нескольких зон:

1) верхний участок темного цвета толщиной ~ до 1,25 мм с микротвердостью порядка 10100–9500 МПа;

2) ниже расположена светлая зона толщиной ~ до 0,1–0,15 мм с микротвердостью, плавно снижающейся до 4000 МПа;

3) переходная зона толщиной 0,05–0,1 мм, в которой микротвердость плавно снижается до микротвердости основы (1900–1950 МПа).

В таблице представлены результаты металлографических и дюрOMETрических исследований, а также параметры шероховатости и сплошности поверхностных слоев на различных этапах нанесения КЭИП, сформированных с помощью установки с ручным вибратором модели «Элитрон-52А» и механизированной установки «ЭИЛ-9» на нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

Ранее нами показано [53], что в результате КЭИП на стали 12Х18Н10Т с использованием установки «Элитрон-52А» удалось получить поверхностные слои толщиной 320–360 мкм. Такая технология включала последовательное ЭИЛ графитовым, алюминиевым электродом и твердым сплавом Т15К6.

Использованием механизированной установки «ЭИЛ-9» при тех же режимах ЭИЛ удастся увеличить толщину покрытия до 1200–1650 мкм (таблица).

Кроме того, на всех этапах создания толстослойных покрытий измерялись толщина, микротвердость и шероховатость верхнего упрочненного слоя. Показано, что при легировании графитовым электродом (ЦЭИЛ) возможно получение слоя с поверхностной твердостью до 9600 МПа. При последующем легировании алюминиевым электродом повысить твердость и толщину слоя не удастся (7500 МПа и 80–150 мкм соответственно), однако подслоя алюминия перед легированием электродом из твердого сплава Т15К6 позволяет увеличить как толщину, так и микротвердость упрочненного слоя (1200–1650 мкм и 10070 МПа соответственно). Однако такая технология создания толстослойных покрытий приводит к заметному увеличению шероховатости поверхности ($R_a = 9,7$ мкм). Как известно, способами уменьшения шероховатости после ЭИЛ являются механическая обработка (например, шлифование), безабразивная ультразвуковая обработка (БУФО), поверхностная пластическая деформация (алмазное выглаживание, обкатка шариком и т.д.). В работе с целью снижения

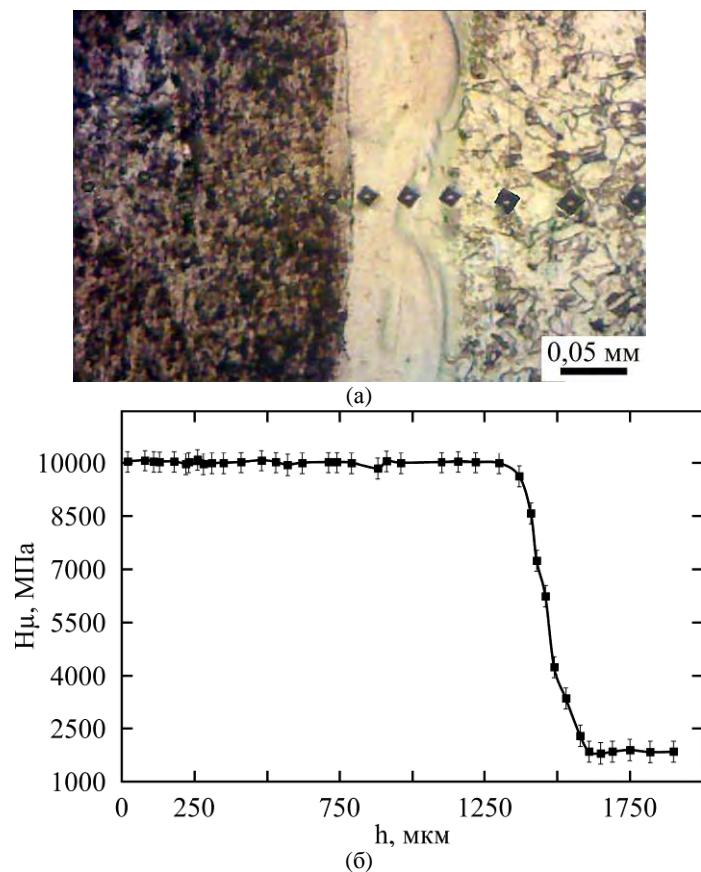


Рис. 5. Микроструктура (а) и распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя образца стали 12Х18Н10Т с КЭИП (б).

Таблица. Параметры качества поверхностных слоев на различных этапах нанесения КЭИП на сталь 12Х18Н10Т

Способ формирования покрытия	Последовательность формирования покрытия	Толщина упрочненного поверхностного слоя, мкм	Максимальная микротвердость упрочненного поверхностного слоя, МПа	Шероховатость поверхности, R_a , мкм	Сплошность, %
Формирование КЭИП*					
Элитрон-52А	С	90–160	9500	9,5	До 100
Элитрон-52А	С+Al	80–120	7500	25,5	100
Элитрон-52А	С+Al+Т15К6	320–360	10000	7,5	80
Формирование толстослойных КЭИП					
Элитрон-52А	С	90–160	9600	8,2	100
ЭИЛ-9	С+Al	80–150	7500	27,5	100
ЭИЛ-9	С+Al+Т15К6	1200–1650	10070	9,7	80
ППД	Обкатка шариком	1200–1450	10100	7,0	90
Нанесение МПМ, армированного порошком ВК6	Протачивание поверхности «как чисто»	1500	10100	1,2	100

*Данные взяты из [53].

шероховатости поверхности после ЭИЛ, создания благоприятных сжимающих напряжений сжатия применяли метод обкатки шариком (рис. 2е–з). После ОШ по сравнению с необработанной поверхностью шероховатость уменьшилась до $R_a = 7,0$ мкм (таблица).

Таким образом, предлагаемая технология КЭИП позволяет упрочнить поверхности тел вращения из стали 12X18H10T и получить толстые слои высокого качества.

Приведены сравнительные результаты влияния сварочных работ и работ на установке «Элитрон-52А» при использовании ручного ЭИЛ на изменения в составе воздуха.

Для выявления изменений в составе воздуха проведен масс-спектрометрический анализ пробы чистого атмосферного воздуха в качестве эталонного газа. В вакуумную камеру напускался чистый атмосферный воздух до давления 5×10^{-4} Па, то есть в 250 раз большего, чем остаточное давление. На рис. 4б представлен масс-спектр чистого воздуха, который в целом полностью отвечает литературным данным [56, 57]. В масс-спектре воздуха фиксируются семь основных пиков с массами: 28, 32, 14, 16 и 40 а.е.м., которые принадлежат ионам N_2^+ , O_2^+ , N^+ , O^+ и Ar^+ соответственно, и с массами 18 и 17 а.е.м., которые принадлежат ионам H_2O^+ и HO^+ соответственно. Наиболее интенсивными масс-спектрометрическими пиками являются пики молекулярного азота N_2 и молекулярного кислорода O_2 . На вставке рис. 4б показаны пики, которые принадлежат ионам C^+ , H_2O^+ , HO^+ , Ar^{++} с намного меньшей интенсивностью, чем интенсивность пиков молекулярного азота N_2 и молекулярного кислорода O_2 . Ионы HO^+ и C^+ образуются в источнике ионов масс-спектрометра в результате разложения молекул H_2O и CO_2 при их ионизации электронным ударом.

Сравнивая интенсивности масс-спектрометрических пиков остаточной атмосферы вакуумной камеры (рис. 4), можно заключить, что последние более чем в 10 000 раз превышают интенсивности масс-спектрометрических пиков остаточной атмосферы, поэтому участием остаточной атмосферы вакуумной камеры при проведении анализов состава как чистого воздуха, так и газовой среды из зоны проведения электросварки и ЭИЛ можно пренебречь.

На рис. 6 представлен масс-спектр газовой среды из зоны проведения электросварки при ее напуске в вакуумную камеру до давления $5 \cdot 10^{-4}$ Па. Как и в масс-спектре чистого воздуха, наиболее интенсивными масс-спектрометрическими пиками являются пики молекулярного азота N_2 и молекулярного кислорода O_2 .

Сравнивая масс-спектры, представленные на рис. 4б и 6а, отметим как количественные, так и качественные их отличия. Так, в газовой среде из зоны проведения электросварки наблюдается значительно большее количество углекислого газа CO_2 (масс-спектрометрический пик с массой 44 а.е.м.), и появился масс-спектрометрический пик с массой 30 а.е.м., который отвечает нестабильному иону NO.

Оба газа являются ядовитыми даже в малых концентрациях [58]. Следов озона O_3 с помощью масс-спектрометра не выявлено.

На рис. 6б представлен масс-спектр газовой среды из зоны проведения ЭИЛ при напуске в вакуумную камеру до давления 5×10^{-4} Па. Как и в масс-спектре чистого воздуха, наиболее интенсивными масс-спектрометрическими пиками в основном являются пики молекулярного азота N_2 и молекулярного кислорода O_2 . В целом масс-спектр газовой среды из зоны проведения ЭИЛ практически идентичен масс-спектру чистого воздуха. Незначительные отличия наблюдаются только в количестве водяного пара, что связано, скорее всего, с разной влажностью воздуха.

На рис. 7 изображены сравнительные характеристики освещенности в помещении до (0,465 Lux) и при ЭИЛ (0,599 Lux) стали 12X18H10T электродом из твердого сплава T15K6, а также до (0,316 Lux) и при проведении сварочных работ (6,2 kLux) при наплавке на сталь 12X18H10T износостойкого покрытия плавящимся электродом марки ОК61.30 диаметром 2,5 мм.

Таким образом, в результате исследования технологических особенностей нанесения механическим способом на сталь 12X18H10T КЭИП, сформированного в последовательности ЦЭИЛ → ЭИЛ А1 → ЭИЛ T15K6, получена возможность формировать на поверхностях тел вращения толстослойные износостойкие покрытия более экологически безопасным методом ЭИЛ. Исследования показали, что покрытия, сформированные в такой последовательности, имеют наибольшую толщину зоны повышенной твердости. Подслой из алюминия способствует увеличению толщины покрытия (до 1200–1650 мкм), а также повышению микротвердости (до 10070 МПа) за счет образования карбидов титана и интерметаллидов [53].

Для снижения шероховатости и увеличения сплошности поверхность сформированного КЭИП, согласно рекомендациям [50], подвергали ОШ $\phi 19$ мм при нагрузке на индентор $P = 1500$ Н и удельном усилии деформации $P_{cp} = 2060$ МПа. P_{cp} – удельное усилие деформации определяется по соотношению

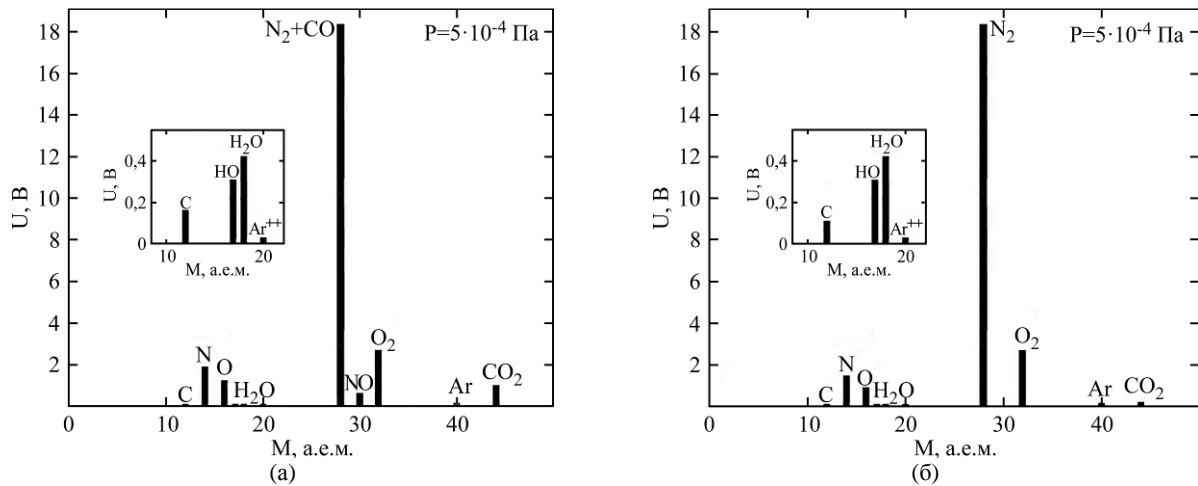


Рис. 6. Масс-спектры газовой среды: из зоны проведения электросварки (а) и ЭИЛ (б) при напуске в вакуумную камеру до давления $5 \cdot 10^{-4}$ Па.



Рис. 7. Освещенность в помещении до (а) и при (б) ЭИЛ стали 12Х18Н10Т электродом из твердого сплава Т15К6 и до (в) и при наплавке на сталь 12Х18Н10Т износостойкого покрытия электродом марки ОК61.30 \varnothing 2,5 мм.

$$P_{cp} = \frac{P}{\pi ab},$$

где P – полное усилие обкатки; a , b – полуоси контура остаточной вмятины.

Для последующего увеличения толщины КЭИП и сплошности поверхности на покрытие из твердого сплава Т15К6, тщательно втирая, наносили МПМ. В качестве армирующего материала при полимеризации использовали порошок в виде твердосплавной смеси ВК6 с размерами частиц не более 40 мкм.

Проведение сравнительных испытаний влияния сварочных работ и работ на установке

«Элитрон-52А» при использовании ручного ЭИЛ на изменения в составе воздуха и на освещенность показало, что применение технологии ЭИЛ при формировании толстослойных износостойких КЭИП с точки зрения экологической безопасности значительно превосходит наплавку износостойких покрытий плавящимся электродом.

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований к практическому применению может быть предложена новая технология восстановления и одновременного упрочнения деталей типа тел

вращения, позволяющая формировать на изнашиваемых поверхностях стали 12Х18Н10Т КЭИП, сформированные в последовательности: ЦЭИЛ → ЭИЛ А1 → ЭИЛ Т15К6 → МПМ (армированный ВК6), толщиной до 1,5 мм, сплошностью 100%, микротвердостью порядка 10100–9500 МПа и шероховатостью $R_a = 1,2$ мкм.

2. Исследование влияния сварочных работ на изменения в составе воздуха показали, что в зоне проведения электросварки при наплавке на сталь 12Х18Н10Т износостойкого покрытия плавящимся электродом марки ОК61.30 \varnothing 2,5 мм появляется значительно большее количество углекислого газа CO_2 (масс-спектрометрический пик с массой 44 а.е.м.) и образуются нестабильные ионы NO (масс-спектрометрический пик с массой 30 а.е.м.), то есть возникают газы, которые являются ядовитыми даже в малых концентрациях. Следов озона O_3 с помощью масс-спектрометра не выявлено.

3. При исследовании химического состава газовой среды в зоне проведения работ при ЭИЛ стали 12Х18Н10Т на установке «Элитрон-52А» электродом-инструментом из твердого сплава Т15К6 с энергией разряда 3,4 Дж установлено, что масс-спектр газовой среды практически идентичен масс-спектру чистого воздуха. Незначительные отличия наблюдаются только в количестве водного пара, что связано, скорее всего, с разной влажностью воздуха.

4. Исследования освещенности при ЭИЛ стали 12Х18Н10Т электродом из твердого сплава Т15К6 и проведении сварочных работ при наплавке на сталь 12Х18Н10Т износостойкого покрытия плавящимся электродом марки ОК61.30 \varnothing 2,5 мм показали ее увеличение соответственно с 0,465 до 0,599 Lux и с 0,316 Lux до 6,2 kLux.

ЛИТЕРАТУРА

- Паркин А.А., Жаткин С.С., Минаков Е.А., Семин А.Б. *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2014, **4**(22), 34–43.
- Umanskyi O., Storozhenko M., Antonov M., Terentjev O. et al. *Key Eng. Mater.* 2019, **604**, 16–19. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.799.37
- Storozhenko M.S., Umanskiy A.P., Terentiev A.E., Zakiev I.M. *Powder Metall Met Ceram.* 2017, **56**(1–2), 60–69. doi: 10.1007/s11106-017-9847-y
- Maksakova O., Simoës S., Pogrebnyak A., Bondar O. et al. *Mater Charact.* 2018, **140**, 189–196.
- Pogrebnyak A.D., Beresnev V.M., Smyrnova K.V., Kravchenko Ya.O. et al. *Mater Lett.* 2018, **211**, 316–318.
- Крашенинникова Н.Г., Капранова В.И., Алибеков С.Я., Сальманов Р.С. *Вестник технологического университета*. 2015, **18**(8), 125–127.
- Ben Slima S. *Mater Sci Appl.* 2012, **9**(3), 640–644.
- Пантелеенко Ф.И., Лялякин В.П., Иванов В.П., Константинов В.М. *Восстановление деталей машин*. Справочник. Под ред. В.П. Иванова. М.: Машиностроение, 2003. 672 с.
- Есенберлин Р.Е. *Восстановление автомобильных деталей сваркой, наплавкой и пайкой*. М.: Транспорт, 1994. 256 с.
- Коротков В.А., Михайлов И.Д., Веснин А.М., Зотов А.С. *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2008, **10**, 33–36.
- Елин А.М. *Охрана и экономика труда*. 2017, **2**(27), 24–30.
- Другов Ю.С., Березкин В.Г. *Газохроматографический анализ загрязнённого воздуха*. М.: Химия, 1981. 256 с.
- Левченко О.Г., Лукьяненко А.О., Полукаров Ю.О. *Автоматическая сварка*. 2011, **1**(693), 37–40.
- Лупачева Е.А. *Труды 1-й Международной научно-практической конференции. Защита окружающей среды, здоровье. Безопасность в сварочном производстве*. 11–14 сентября 2002 г. Одесса. С. 456–466.
- Лук'яненко Г.О. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2015, (30), 81–90.
- Брауде М.З. *Охрана труда при сварке в машиностроении*. М.: Машиностроение, 1978. 144 с.
- Елманов В.И., Терновская Г.Г. *Охрана атмосферного воздуха*. М.: Юридическая литература, 1984. 112 с.
- Гражданкин А.И., Белов П.Г. *Безопасность труда в промышленности*. 2000, (11), 6–10.
- Фрумин Г.Т. *Техногенные системы и экологический риск*. Санкт-Петербург: СпецЛит, 2018. 136 с.
- Tarel'nyk V.B., Gaponova O.P., Konoplyanchenko Ye.V., Dovzhyk M.Ya. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2016, **38**(12), 1611–1633. <https://doi.org/10.15407/mfint.38.12.1611>
- Tarel'nyk V.B., Gaponova O.P., Konoplyanchenko I.V., Dovzhyk M.Ya. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2017, **39**(3), 363–385. <https://doi.org/10.15407/mfint.39.03.0363>
- Tarel'nyk V.B., Gaponova O.P., Konoplyanchenko I.V., Herasymenko V.A. et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2018, **40**(2), 235–254. <https://doi.org/10.15407/mfint.40.02.0235>
- Михайлов В.В., Бачу К.А., Пасинковский Е.А., Перетяжку П.В. *ЭОМ*. 2006, (3), 106–111.
- Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М. *Электроискровое легирование металлических поверхностей*. Кишинев: Штиинца, 1985. 196 с.
- Михайлов В.В., Гитлевич А.Е., Верхотуров А.Д., Михайлюк А.И. и др. *ЭОМ*. 2013, **49**(5), 21–44.
- Гитлевич А.Е., Парканский Н.Я., Игнатков Д.А. *ЭОМ*. 1981, (3), 25–29.

27. Чаругин Н.В., Мещеряков Н.Г. *Физико-химическая механика материалов*. 1989, (4), 43–48.
28. Верхогуров А.Д., Подчерняева И.А., Кириленко С.В. *ЭОМ*. 1986, (1), 28–31.
29. Tarelnyk V., Martsynkovskyy V., Gaponova O., Konoplianchenko Ie. et al. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2017, **233**, 012049 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012049>
30. Tarelnyk V., Martsynkovskyy V., Gaponova O., Konoplianchenko Ie. et al. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2017, **233**, 012048 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012048>
31. Tarel'nik V.B., Paustovskii A.V., Tkachenko Yu.G., Martsinkovskii V.S. et al. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2018, **54**(2), 147–156. doi: 10.3103/S106837551802014X.
32. Kirik G.V., Gaponova O.P., Tarelnyk V.B., Myslyvchenko O.M. et al. *Powder Metall Met Ceram*. 2018, **56**, 688–696. <https://doi.org/10.1007/s11106-018-9944-6>
33. Иванов В.И. *Труды ГОСНИТИ*. 2013, **113**, 429–434.
34. Иванов В.И. *Труды ГОСНИТИ*. 2013, **113**, 450–456.
35. Алимбаева Б.Ш., Коротаев Д.Н., Машков Ю.К., Мишууров А.Ф. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2013, (11), 3–5.
36. Ярков Д. В., Мулин Ю. И. *Исследования Института материаловедения в области создания материалов и покрытий*. Владивосток: Дальнаука, 2001. С. 223–228.
37. Tarelnyk V., Martsynkovskyy V., Dziuba A. *Appl Mech Mater*. 2014, **630**, 388–396. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.630.388
38. Tarel'nik V.B., Martsinkovskii V.S., Zhukov A.N. *Chem Pet Eng*. 2017, **53**, 114–120. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0305-y>
39. Tarel'nik V.B., Martsinkovskii V.S., Zhukov A.N. *Chem Pet Eng*. 2017, **53**, 266–272. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0333-7>
40. Tarel'nik V.B., Martsinkovskii V.S., Zhukov A.N. *Chem Pet Eng*. 2017, **53**, 385–389. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0351-5>
41. Tarelnyk V., Martsynkovskyy V. *Appl Mechan Mater*. 2014, **630**, 397–412. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.630.397>
42. Лазаренко Б.Р., Михайлов В.В., Гитлевич А.Е. *Chem Pet Eng*. 1983, (2), 24–25.
43. Фельдштейн Е.Э., Кардаполова М.А., Хородыски Г.Б., Кавальчук О.В. *Трение и износ*. 2013, **34**(2), 175–180.
44. Antoszewski B., Tarelnyk V., Antoszewski. *Appl Mechan Mater*. 2014, **630**, 301–307. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.630.301>
45. Михайлюк А.И., Рапопорт Л.С., Гитлевич А.Е. *ЭОМ*. 1991, (1), 16–19.
46. Михайлюк А.И., Рапопорт Л.С., Гитлевич А.Е. *ЭОМ*. 1991, (2), 17–20.
47. Коваль Н.П., Сафронов И.И. *ЭОМ*. 1982, (3), 87–89.
48. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Konoplianchenko Ye.V., Martsynkovskyy V.S. et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol*. 2019, **41**(1), 47–69. doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.01.0047>
49. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Konoplianchenko Ye.V., Martsynkovskyy V.S. et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol*. 2019, **41**(2), 173–192. doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.02.0173>
50. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Konoplianchenko Ye.V., Martsynkovskyy V.S. et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol*. 2019, **41**(3), 313–335. doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.03.0313>
51. Tarel'nik V.B., Konoplyanchenko E.V., Kosenko P.V., Martsinkovskii V.S. *Chem Petrol Eng*. 2017, **53**(7–8), 540–546. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0378-7>.
52. Tarelnyk V., Martsynkovskyy V., Sarzhanov A., Pavlov A., et al. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2017, **233**, 012050. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012050>.
53. Тарельник В.Б., Марцинковський В.С., Гапонова О.П., Конопляченко Є.В., и др. *Способ підвищення зносостійкості сталевих деталей. Патент на корисну модель*. UA пат. 136895, 2019. Бюл. № 17. 19 с.
54. Тарельник В.Б., Білоус А.В. *Вісник Сумського національного аграрного університету «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. 2008, (2), 119–124.
55. *Масс-спектрометры типа МХ-7304*. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Книга 3. Сумы: АО "SELMI", 1984. 50 с.
56. *Каталоги мас-спектрів: режим доступу* <https://www.interanalyt.ru/equipment/mass-spectrometry/chromato-mass-spectrometers-shimadzu/item/338-biblioteki-mass-spektrov>
57. Лебедев А.Т. *Масс-спектрометрия для анализа объектов окружающей среды*. М.: Техносфера, 2013. 632 с.
58. Другов Ю.С., Березкин В.Г. *Газохроматографический анализ загрязнённого воздуха*. М.: Химия, 1981. 256 с.

Summary

The analysis of the features formation of thick combination electrospark coatings (CESC) obtained on cylindrical 12Kh18N10T stainless steel samples is presented. The samples were carbonized by combined electrospark alloying (CESA) at the Elitron-52A installation and aluminized by electrospark alloying (ESA) at the mechanized installation EIL-9 at a discharge energy of $W_p = 3.4$ J. The coatings by T15K6 alloy electrodes were deposited on aluminized surfaces at $W_p = 0.9$ and 3.4 J. The roughness of CESC was reduced by rolling and coating a metal-polymer material (MPM) reinforced with a powder hard alloy VK6. A new technology of the restoration of parts such as revolution bodies has been proposed for practical applications. It made it possible to take CESC on 12Kh18N10T steel in the sequence: CESA → ESA Al → ESA T15K6 → MPM (reinforced by VK6), up to 1.5 mm thick, 100% continuity, microhardness ~10100–9500 MPa, and roughness $R_a = 1.2$ μm.

Keywords: combined electrospark alloyed coatings, metal-polymer material, structure, microhardness, roughness