



УДК 621.9.048.7+621.78

**А.В. Алифанов, В.Н. Алехнович,
А.М. Милюкова, А.И. Михлюк, О.А. Толкачева**
Государственное научное учреждение
«Физико-технический институт НАН Беларуси»
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: alifanov_aav@mail.ru
Дата поступления 31.05.2019

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОСТОЯННО-ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ НА КАЧЕСТВО НАНЕСЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Аннотация

Предлагаемый постоянно-импульсный способ нанесения упрочняющих покрытий на стальные детали с помощью разработанного плазмотрона позволяет интенсифицировать диффузионный процесс наплавляемого материала, повысить адгезию и, соответственно, прочность нанесенных покрытий. Разработанный надежный в эксплуатации плазмотрон оснащен модернизированным порошковым питателем. Особенностью разработанной конструкции плазмотрона является то, что питатель может осуществлять подачу порошка к плазмотрону или в постоянном режиме, или в импульсном режиме определенными порциями. Постоянно-импульсный способ нанесения покрытий снижает термическую нагрузку на упрочняемую деталь, при этом увеличивается скорость диффузии наплавляемого износостойкого материала, что позволяет осуществлять наплавку тонкостенных деталей без их проплавления.

Ключевые слова: плазменная наплавка, упрочняющие покрытия, постоянно-импульсный режим, адгезия, диффузия, прочность.

Введение

Целью данного исследования является разработка процесса плазменной наплавки высокопрочных самофлюсующихся порошковых материалов на стальные, в том числе тонкостенные, изделия с использованием постоянно-импульсного режима работы плазмотрона. Такой режим работы позволяет уменьшить опасность проплавления наплавляемого тонкостенного изделия, уменьшить термические поводки, повысить качество наплавленного слоя.

Для достижения поставленной цели в лаборатории объемных гетерогенных систем Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси разработан специальный наплавочный плазмотрон [1, 2]. Для создания условий, способствующих интенсификации диффузии наплавляемых элементов вглубь упрочняемой детали, получения тепловых волн в

наплавляемом материале, был разработан источник питания плазмотрона, позволяющий получить на выходе постоянно-импульсное напряжение [3]. Разработанный источник питания содержит независимые друг от друга источники дежурной и основной дуги, блоки высоковольтного и высокочастотного поджига дежурной дуги. Напряжение питания основной дуги прикладывается между катодом и анодом плазмотрона.

Напряжение питания дежурной дуги прикладывается между катодом плазмотрона и упрочняемой деталью. Режим работы плазмотрона с использованием дежурной дуги позволяет повысить стабильность работы плазмотрона. Разработанный источник питания основной дуги позволяет обеспечить постоянный или постоянно-импульсный режим работы плазмотрона, обеспечивающий стабильную работу на минимальном токе с одной стороны, с другой стороны – для обеспечения высокого качества наплавки, сведения к минимуму

опасности проплавления тонкостенных упрочняемых поверхностей и возникновения термических поволок. Для питания плазмотрона используется наряду с постоянной составляющей напряжения и импульсная составляющая.

Значение частоты следования и длительность импульсной составляющей, питающей плазмотрон в источнике питания, регулируются и устанавливаются оператором в ручном или автоматическом режиме.

Методы исследований

Температура на поверхности образцов измерялась модернизированной головкой АПИР на базе полупроводникового диода и пирометра TemPro. Температура в теле образца определялась с помощью хромель-алюмелевой термопары и последующей регистрацией милливольтметром. Напряжение, ток дуги регистрировались стрелочными приборами, а расход плазмообразующего газа — газовым ротаметром. Для регистрации изменения элементного состава легирующих элементов по глубине было предложено использовать метод «косого шлифа». С этой целью был изготовлен косой шлиф переходной зоны (с углом скоса около 3 градусов), что повышает точность исследований за счет увеличения длины переходной зоны в 18–20 раз. Исследование поэлементного состава легирующих элементов вглубь по поверхности косого шлифа осуществлялось на электронном микроскопе микрозондом.

Основные положения

Исследование постоянно-импульсных тепловых потоков в теле упрочняемого металла при работе плазмотрона [1, 3, 4–6].

При выполнении работы были проведены исследования нагрева металлического образца из стали Ст3 диаметром 40 мм и длиной 30 мм. Измерение температуры осуществляется в двух местах: на поверхности в центре образца и глубине 2,0 мм от обрабатываемой поверхности. Зависимость скорости нагрева образца плазменной струей мощностью 1,5 кВт на поверхности и на глубине 2,0 мм приведена на рисунке 1.

При постоянно-импульсном нагреве на поверхности и глубине возникают тепло-

вые волны. Так, наличие импульсной составляющей тока плазмотрона с частотой следования импульса 1 импульс за секунду, колебания температуры на нагреваемой поверхности образца относительно максимального значения изменяются на ± 150 °С. Увеличение частоты следования импульсов в 5 раз (5 импульсов за секунду) приводит к уменьшению колебания температуры на поверхности образца на ± 5 °С, а при увеличении частоты следования импульсов в 10 раз (10 импульсов за секунду), колебания температуры на поверхности образца исчезают. Колебания же температуры на глубине 2,0 мм наблюдаются только при частоте следования 1 импульс за секунду.

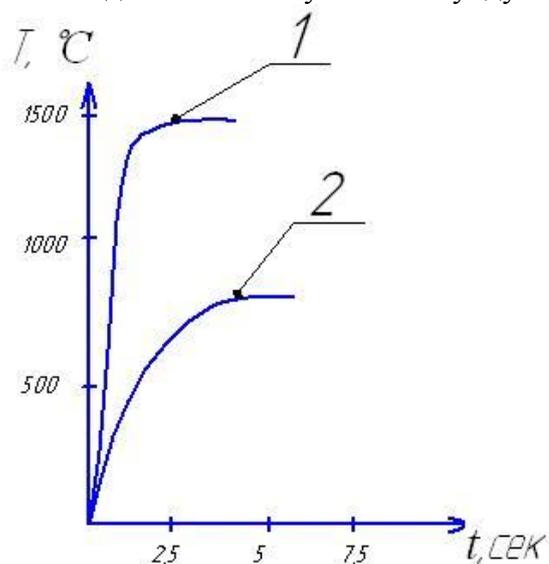


Рисунок 1. Зависимость скорости нагрева образца плазменной струей на поверхности и на глубине 2,0 мм: 1 — на поверхности образца, 2 — на глубине 2,0 мм от нагреваемой поверхности

Исследование влияния режимов плазменной наплавки с использованием постоянно-импульсной плазмы на адгезионную прочность нанесенных покрытий и диффузию наплавляемого материала в упрочняемое тело [7–11].

Прочность сцепления наплавляемого порошкового материала и диффузия элементов в упрочняемую поверхность в процессе плазменной наплавки имеет важное практическое значение. Изучение особенностей нагрева плазмотроном, работающем на постоянном и постоянно-импульсном

напряжении, позволяет получить различные особенности нагрева упрочняемой поверхности.

В процессе выполнения работы была установлена зависимость напряжения на дуге от силы тока дуги и расхода плазмообразующего газа аргона (рисунки 2 и 3 соответственно).

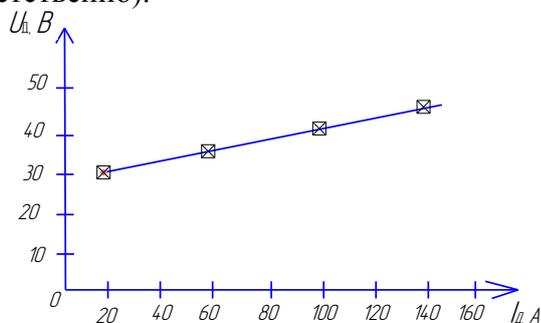


Рисунок 2. Зависимость напряжения на дуге от силы тока дуги

Установлено, что напряжение дуги зависит от силы тока дуги линейно (рисунок 2), а изменение расхода газа (аргона) через плазматрон имеет криволинейную зависимость от напряжения на дуге (рисунок 3). Работа плазматрона с расходом плазмообразующего газа менее 40 литров за час приводит к нестабильному режиму (возможно горение дуги внутри плазматрона).

Увеличение расхода плазмообразующего газа (аргона) более 90–100 литров за час приводит к изменению характера истечения газовой струи плазматрона с ламинарного на турбулентное. Зависимость увеличения напряжения на дуге от расхода плазмообразующего газа (аргона) показана на рисунке 3.

Для исследования диффузии легирующих элементов в упрочняемый образец в процессе плазменной наплавки были проведены исследования изменения элементарного состава системы «покрытие-подложка» в переходной зоне.

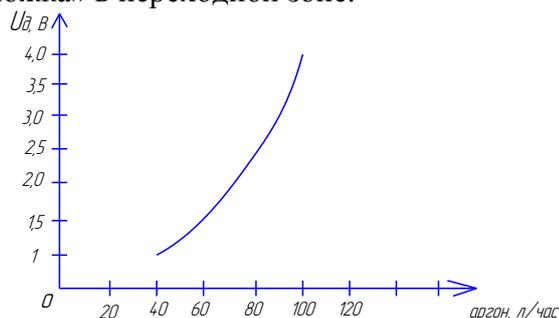


Рисунок 3. Зависимость увеличения напряжения U_d на дуге от расхода плазмообразующего газа (аргона)

Полученные данные позволили сделать выводы об отсутствии аномальной диффузии легирующих элементов наплавленного материала в материал подложки при работе плазматрона на постоянном напряжении.

Установлено, что в случае использования для питания плазматрона постоянно-импульсного напряжения, имеющего крутой передний фронт, достаточные длительность и интенсивность, происходит локальный кратковременный разогрев подложки в отдельных точках действия плазменной дуги до температуры 0,57–0,78 температуры плавления металла основы. Данное обстоятельство позволяет увеличить энергию легирующих элементов: скорость диффузии и силу сцепления наплавляемого слоя с основой в отдельных точках.

Плазменная струя, выходя из анодного сопла плазматрона, стремится расширяться и на расстоянии больше, чем 25–30 мм защитный газ аргон из плазматрона смешивается с воздухом, теряя свои защитные свойства и вызывая образование окисных пленок на обрабатываемой поверхности. Данное обстоятельство ухудшает качество наносимого покрытия и сцепление наносимого материала с материалом подложки, т.е. ухудшает адгезию.

Поэтому для сохранения качества покрытия и обеспечения его адгезии к подложке, процесс нанесения покрытия необходимо осуществлять на расстоянии не более 20 мм при ламинарном истечении плазменной струи из плазматрона.

Большое значение на условия формирования наплавленного слоя оказывает температура предварительного подогрева обрабатываемой поверхности. Значительное повышение температуры напыляемой поверхности может вызвать термические повреждения и ее проплавление. Использование защитного газа аргона позволяет ограничить нагрев наплавляемой поверхности до 150–170 °С.

При ударе о поверхность образца сферические частицы сильно деформируются и

затвердевают, приобретая форму тонкого диска. Высокая скорость деформации и растекание расплавленной частицы приводит к образованию прочного физического и химического контакта. Прочное сцепление происходит только при подогреве подложки до определенной температуры.

Исследование влияния режимов плазменной наплавки на структуру, твердость и пористость наносимых покрытий.

Проведены исследования влияния режимов плазменной наплавки на структуру, твердость и пористость наносимых покрытий. Для наплавки на образцы из стали 65Г и 60ПП использовали самофлюсующиеся износостойкие материалы ПГ-10Н-01, ПГ-12Н-01.

На рисунке 4 представлены внешний вид макро- и микрошлифы из наплавлен-

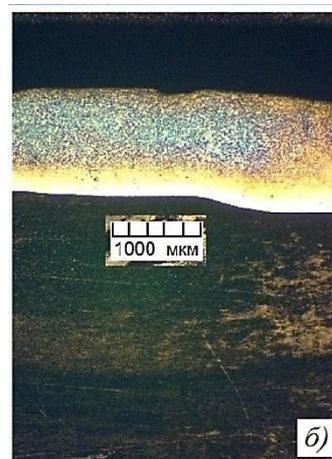
ного на стальные образцы самофлюсующегося порошкового сплава на никелевой основе марки ПГ-10Н-01.

Режим наплавки и результаты измерений твердости ($H_{\mu 1}$, $H_{\mu 2}$) приведены в таблице 1, где $G_{\text{пг}}$, $G_{\text{тг}}$, $G_{\text{зг}}$, соответственно, объёмные расходы плазмообразующего, транспортирующего и защитного газов (аргон); $G_{\text{п}}$ — массовый расход порошкового присадочного материала, $I_{\text{д}}$ — величина тока дуги, А; $U_{\text{д}}$ — величина напряжения на дуге, В. Измерения $H_{\mu 1}$ выполнялись на шлифованной поверхности наплавленного слоя твердомером ТК-2М, а $H_{\mu 2}$ — в поперечном сечении (шлифе) с помощью ультразвукового измерителя твердости МЕТ У1А.

Таблица 1

Параметры режима наплавки

| $I_{\text{д}}$, А | $U_{\text{д}}$, В | $G_{\text{пг}}$, л/мин | $G_{\text{тг}}$, л/мин | $G_{\text{зг}}$, л/мин | $G_{\text{п}}$, г/мин | $H_{\mu 1}$, HRC | $H_{\mu 2}$, HRC |
|-----------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
| 60 | 30 | 2,8 | 2,3 | 9,4 | 4 | 47-52 | 48-50 |



х4

Рисунок 4. Макро- и микрошлифов наплавки: а — внешний вид макрошлифов; б — микрошлиф с использованием травителя «марбле»; в — микрошлиф с использованием травителя «ниталь»

В обоих случаях получены близкие по значениям величины H_{μ} , однако полученные значения меньше регламентированной твердости порошкового сплава ПГ-12Н-01 (56-62 HRC). Возможно, данные различия связаны с неоднородным распределением микротвердости по глубине наплавленного слоя (рисунок 5), небольшой его толщиной и относительно «мягкой» подложкой из

стали 65Г (≈ 30 HRC). Граница раздела покрытия и основного металла располагается на расстоянии примерно 2 мм от поверхности вдоль линии измерения микротвердости слоя (линия МН на рисунке 5). С учётом глубины проплавления основного металла 0,3 мм толщина наплавленного покрытия составляет примерно 1,7 мм при ширине зоны наплавки 9 мм.

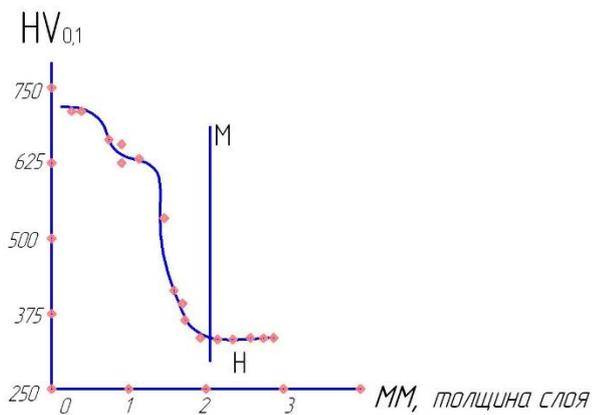


Рисунок 5. Распределение микротвердости при увеличении расстояния от поверхности наплавленного слоя вглубь основы

Справа от разграничительной линии МН регистрировались значения микротвердости основного металла, изменяющиеся в пределах 360–260 HV_{0,1} при увеличении расстояния от 2 до 4 мм. Слева от линии МН, по направлению к поверхности наплавленного слоя, микротвердость увеличивается почти в два раза при уменьшении расстояния от 2 до 1,3 мм.

Основной причиной такого распределения микротвердости на этом участке, по-

видимому, является значительное разбавление материала покрытия основным металлом, а также наличие на поверхности подложки обезуглероженного слоя. При дальнейшем уменьшении расстояния до поверхности наплавленного слоя ($h < 1,3$ мм) измеренная микротвердость увеличивается с 620 HV_{0,1} до ≈ 740 HV_{0,1} причем наблюдается ее «ступенчатое» распределение, причина которого заключается в текстурированности данного участка покрытия.

Исследовано влияние расстояния от сопла плазмотрона до поверхности подложки $l_{\text{сп}}$ на размеры и микротвердость наплавленных слоёв. При скорости перемещения плазмотрона $v = 1200$ мм/мин и расстоянии $l_{\text{сп}} = 8–12$ мм формировались отдельные дорожки шириной 3–3,5 мм (рисунок б) и длиной 50 мм; максимальная толщина покрытий при этом не зависит от величины расстояния от сопла до подложки и составляет примерно 200 мкм. Наличие на периферии наплавленных валиков отдельных частиц нерасплавленного порошка (рисунок б) свидетельствует о том, что размеры зоны ввода присадочного порошкового материала больше размеров сварочной ванны (ванны расплавленного металла).

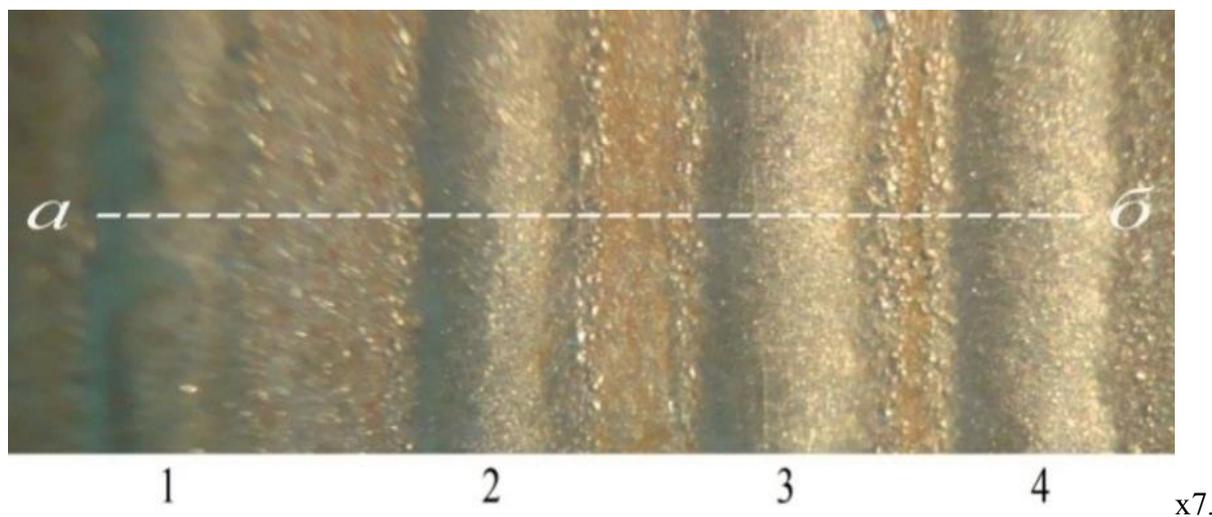


Рисунок 6. Вид (фрагмент) наплавленного материала на сталь 60ПП:

$a—b$ — линия разреза,
 1 — $l_{\text{сп}} = 9$ мм; 2 — $l_{\text{сп}} = 10$ мм;
 3 — $l_{\text{сп}} = 11$ мм; 4 — $l_{\text{сп}} = 12$ мм

Шлиф (для исследований) вырезался по линии *a—б* (рисунок 6), перпендикулярно поверхности наплавки, и протравливался в нитале. Распределение микротвердости при увеличении расстояния от поверхности наплавленного покрытия имеет немонотонный характер (рисунок 7). Причем, максимальная микротвердость наплавленного порошкового сплава ПГ-10Н-01 превышает $725 \text{ HV}_{0,1}$.

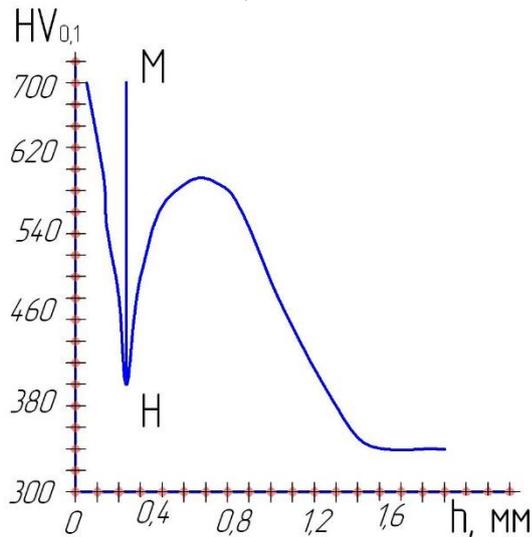


Рисунок 7. Распределение микротвердости при увеличении расстояния от поверхности наплавленного слоя вглубь основы

Уменьшение микротвердости составляет для сталей 65Г и 60ПП, соответственно, $260 \text{ HV}_{0,1}$ и $410 \text{ HV}_{0,1}$ в переходном слое (подслое) между покрытием и основным металлом. Это связано, по-видимому, с наличием в этой области обезуглероженного слоя, не полностью удалённого в процессе предшествующей обработки. При увеличении расстояния вглубь образца, т. е. вправо от разграничительной линии МН, регистрируется возрастание микротвёрдости с максимумом при $h = 0,6–0,7$ мм, а затем уменьшение до величины, характерной для исходного металла ($260–350 \text{ HV}_{0,1}$). Измеренные значения микротвёрдости в максимуме распределения ($590–620 \text{ HV}_{0,1}$) свидетельствуют о протекании процессов перекристаллизации в этой области, связанных с релаксацией тепла источника нагрева.

Формирование зон с повышенной микротвёрдостью на расстояниях $h = 0,5–$

$1,0$ мм от поверхности наплавленного покрытия не только увеличивает твёрдость и суммарную глубину упрочнения, но и повышает вероятность возникновения поперечных трещин, зарождающихся в основном металле и продолжающихся в покрытии.

Работоспособность деталей в условиях абразивного и других видов износа зависит от характеристик композиции «покрытие–основной металл», сформированной в приповерхностных слоях в результате плазменно-порошковой наплавки. Наличие слоя с пониженной микротвердостью на границе «покрытие-подложка», с одной стороны, уменьшает износостойкость всей композиции «покрытие-основной металл», но с другой стороны этот слой обладает демпфирующими свойствами, что очень важно при работе упрочнённой детали в условиях ударно-абразивного воздействия. Его плотность растёт, пористость уменьшается, структура становится более однородной. С одной стороны, порошки, имеющие размеры частиц менее 20 мкм , сложно получать (просеивать) и транспортировать в плазменную струю, т.к. мелкодисперсные частицы комкуются и слипаются из-за влажности и сил межмолекулярного сцепления. С помощью сит можно просеивать частицы размерами более 40 мкм . С другой стороны, большая поверхностная площадь мелкодисперсного порошка будет содержать большее количество окислов на поверхности частиц. При использовании порошков, имеющих разный гранулометрический состав, однородность покрытия нарушается из-за большого различия в размерах частиц и, соответственно, разная степень их расплавления и скорости движения в плазменной струе, негативно скажется на пористости покрытия. Использование постоянно-импульсного напряжения для питания плазмотрона (модуляция тока плазмотрона) позволяет интенсифицировать теплообмен между плазмой и напыляемой частицей (скорость плазменной струи будет переменного-модулированной). Предварительный подогрев напыляемого материала позволяет повысить адгезию покрытия к ос-

нове. Адгезия и пористость наносимых покрытий определяется особенностями и режимами плазменной наплавки порошковых материалов.

В процессе наплавки порошковых материалов, напыляемый слой формируется путем укладки друг на друга частиц материала покрытия, находящихся в оплавленном или расплавленной состоянии. При образовании покрытия частицы деформируются, растекаются и затвердевают. Анализ деформирования показывает, что наносимые частицы располагаются на уже закристаллизовавшиеся и остывшие до температуры подложки частицы предыдущего слоя. В целом покрытие можно представить, как материал, состоящий из деформированных частиц, соединённых между собой по контактной поверхности, имеющей определённую площадь. Участки схватывания не заполняют всю площадь контакта между частицами, поэтому плотность покрытия ниже плотности материала основы. Данное обстоятельство объясняет наличие пор в наплавленном материале. Размеры напыляемых частиц, а также способность деформироваться на подложке в значительной мере определяют свойства плазменного покрытия и его пористость. С уменьшением размеров напыляемых частиц увеличивается плотность и, соответственно, уменьшается пористость материала покрытия. Установлено, что образованию микротрещин и пор способствует резкое охлаждение напыляемых частиц в процессе формирования покрытия, а также перегрев наплавленного слоя (выше температуры плавления).

Выводы

Известно, что недостаточная износостойкость узлов трения во всех отраслях машиностроения бывшего СССР приводила к ежегодным убыткам, составляющим 18 млрд. рублей [15]. В США подобные потери в результате естественного изнашивания и коррозии составляли (в конце 90-х годов 20 века) ежегодно около 70 млрд. долларов или 4,2 % валового национального продукта [16]. Поэтому во всех промышленно развитых странах большое внимание уделяется развитию и применению различных методов повышения износостойкости

и коррозионностойкой деталей машин, механизмов и строительных металлических конструкций. В области машиностроения часто предполагают применение плазменной наплавки, причем идет непрерывная работа по усовершенствованию, как самих процессов наплавки, так и соответствующего оборудования.

Предлагаемый постоянно-импульсный способ нанесения упрочняющих покрытий позволяет интенсифицировать диффузионный процесс наплавленного материала в поверхность упрочняемой стальной детали, повысить адгезию и, соответственно, прочность нанесенных покрытий. Исследовано влияние режимов постоянно-импульсной наплавки на эти факторы, что позволяет выбирать наиболее рациональные режимы, обеспечивающие высокое качество упрочняющих покрытий и значительно продлить срок их эксплуатации.

Библиографический список

1. Алифанов, А.В. Разработка конструкции плазмотрона на постоянно-импульсном напряжении для наплавки высокопрочных порошковых материалов/А.В. Алифанов [и др.]//Техника и технологии, инновации и качество: Материалы 4-ой МНТК – 19.12.2017, г. Барановичи. – Барановичи, РИО БарГУ, 2018. – С.131-133.
2. Алехнович, В.Н. Разработка наплавочного плазмотрона, работающего на постоянно-импульсном напряжении/ В.Н. Алехнович, А.В. Алифанов, А.М. Милюкова, О.А. Толкачева// Вестник БарГУ. Серия Технические науки. – Выпуск 7. –2019.
3. Алифанов, А.В. Разработка порошкового питателя, позволяющего осуществлять работу наплавочного плазмотрона в постоянно-импульсном режиме// А.В. Алифанов, В.Н. Алехнович, А.М. Милюкова, О.А. Толкачева// Вестник БарГУ. Серия Технические науки. – Выпуск 7. –2019.
4. Фрумин, И.И. Современные типы наплавленного металла и их классификация/ И.И. Фрумин // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавленный металл: сб. науч. тр. –

- Киев: Наукова думка, 1977. №1. – С. 13 – 17.
5. Плазменное поверхностное упрочнение/Л.К. Лещинский [и др.] – Киев: Техника, 1990. – 195 с.
 6. Астапчик С.А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С.А. Астапчик, В.С. Голубев, А.Г. Маклаков. – Минск: Беларус. наука, 2008 – 252 с.
 7. Кудинов, В.В. Нанесение покрытий плазмой /В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белашенко, О.П. Солоненко// М., 1990. – 244 с.
 8. Плазменное напыление [Электронный ресурс]. — <http://weldzone.info/oborudovanie/machines/95-plasma-welding>. – Дата доступа: 12.10.2017.
 9. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин/ И.Н. Шило [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2010. – 320 с.
 10. Рябцев, И.А. Наплавка деталей машин и механизмов / И.А. Рябцев, Киев: Эко-технология 2004 г.– 160 с.
 11. Электродуговая наплавка металлоповерхностей в среде защитного газа с поперечными колебаниями электрода / В.С. Ивашко [и др.] // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин : материалы 10-й Международ. науч.-практ. конф., 15–18 апр. 2008 г.: в 2 ч. – СПб. – Ч. 1. – С. 126–132.
 12. Изменение структуры поверхности углеродистых сталей при лазерном модифицировании / В.И. Гуринович [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр.: в 2 кн. – Минск, 2013. – Кн. 2. – С. 169–176.
 13. Сидоров, А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А.И. Сидоров. – М.: Машиностроение, 1988. – 188 с.
 14. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки под. ред. В.С. Степанина, Н. Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
 15. Семенов, А.П. О перспективах применения в машиностроении вакуумных ионно-плазменных и газотермических покрытий / А.П. Семенов, Н.А. Воронин // Вестник машиностроения. – 1982. – №1. С. 42-44.
 16. Емельянов, В.А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий / В.А. Емельянов, И.А. Иванов, Ж.А. Мрочек // Минск: НПО «Интеграл», 1998 г. – 285 с.

Information about the paper in English

**A.V. Alifanov, V.N. Alekhovich, A.M. Milyukova,
A.I. Mikhlyuk, O.A. Tolkacheva**

Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus

E-mail: alifanov_aav@mail.ru

Received 31.05.2019

**UNDERSTANDING THE RELATIONSHIP BETWEEN THE CONTINUOUS/PULSE PLASMA COATING
MODES APPLIED AND THE QUALITY OF RESULTANT COATINGS**

Abstract

The proposed hard-facing technique, which relies on the use of a specially designed plasmatron, can help intensify the diffusion process of the facing material and enhance the adhesion and, thus, the strength of resultant coatings. The developed high-reliability plasmatron has an improved powder feeder. The plasmatron is specifically designed to enable either a continuous powder feed, or the powder can be fed in a pulse, or dosing, mode. The continuous/pulse mode helps reduce the heat impact on the target part and, at the same time, increase the diffusion rate of the hard-facing material. This also saves the need for melting thin-walled parts before hard-facing.

Keywords: plasma-jet hard-facing, hard-face coatings, continuous/pulse mode, adhesion, diffusion, strength
