

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Факультет «Материаловедение и металлургические технологии»
Кафедра «Материаловедение и физико-химия материалов»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, (к.т.н)

_____ (К.Ю. Пашкеев)
_____ 2020 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ (Винник Д.А.)
_____ 2020 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ БРОНЗОВЫХ ПОКРЫТИЙ,
НАНЕСЕННЫХ НА СТАЛЬ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ ЮУрГУ–
22.04.02.2020.150.ПЗ ВКР

Руководитель работы, (доцент, к.т.н)

_____ (Н.А. Шабурова)
_____ 2020 г.

Автор проекта

студент группы П - 243

_____ (К.П. Павлова)
_____ 2020г.

Нормоконтролер, (доцент, к.т.н)

_____ (Н.А. Шабурова)
_____ 2020 г.

Челябинск, 2020 г.

АННОТАЦИЯ

Павлова К.П. Исследование бронзовых покрытий, нанесенных на сталь лазерной наплавкой. – Челябинск: ЮУрГУ, МиМТ; 2020; 60 с. 21 ил., библиогр. список – 39 наим.

Изучены структурные, прочностные и трибологические характеристики покрытий из алюминиевой бронзы, нанесенных на сталь лазерной наплавкой, в зависимости от мощности используемого лазера. Установлено, что при увеличении мощности лазера морфология нанесенного покрытия становится более равномерной без экстремальных перепадов по высоте.

Показано, что структура покрытия соответствует структуре композиционного материала и состоит из бронзовой матрицы и дендритов железа разных размеров (в зависимости от мощности используемого лазера). Подобная структура влияет на показатели микротвердости покрытия, которые имеют разброс значений по толщине покрытия.

Результатом термического воздействия (из-за технологии нанесения покрытия) является наличие диффузионной зоны на границе контакта стали с бронзой, что должно способствовать сцеплению материала матрицы с материалом покрытия.

По результатам трибологических испытаний коэффициент сухого трения для исследованных образцов находится в пределах 0,389–0,574.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ	6
1.1. СПОСОБЫ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ.....	6
1.1.1 Способы получения слоистых композиционных материалов	8
1.1.2 Газопламенное напыление.....	10
1.1.3 Плазменное напыление	12
1.1.4 Детонационное напыление.....	15
1.1.5 Электродуговая металлизация.....	17
1.1.6 Вибродуговая наплавка.....	18
1.1.7 Лазерная наплавка	20
1.2 МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ	29
1.2.1 Технологический процесс лазерной наплавки	29
1.2.1 Подготовка поверхности напыляемых изделий	29
1.2.2 Материалы, используемые для наплавки.....	31
1.2.3 Порошковые материалы.....	33
1.2.4 Материалы, используемые для подложки	34
1.2.5 Постановка задачи	35
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	36
2.1 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	36
2.2 РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ	39
2.2.1 Внешний вид наплавленного покрытия.....	39
2.2.2 Растровая электронная микроскопия.....	40
2.2.3 Микрорентгеноспектральный анализа	44
2.2.4 Металлографическое исследование.....	47
2.2.5 Анализ микротвердости наплавленного покрытия	49
2.2.6 Анализ результатов триботехнических испытаний.....	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	52
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	53

ВВЕДЕНИЕ

Детали из медных сплавов в парах трения, а также покрытия на основе меди, нанесенные на стальные части узлов трения, нашли широкое применение в автомобиле- и машиностроении, благодаря своим трибологическим свойствам [1–6].

На настоящий момент наряду с электродуговым [7] и плазменным напылением [8], методика нанесения бронзовых покрытий с использованием аддитивных технологий считается одной из наиболее перспективных. Однако в литературе исследования по аддитивным технологиям нанесения и характеристиках получаемого покрытия весьма немногочисленны.

Согласно исследованию механических характеристик в работе [9] указывается на рост микротвердости в покрытии, полученном с использованием аддитивных технологий: показатель *HV* бронзового покрытия превышает *HV* стали в полтора-два раза.

В работе [10] было проведено сравнение характеристик покрытий из алюминиевой бронзы, нанесенных, в первом случае, плазменным напылением, а во втором – лазерной наплавкой, на сталь. При этом потери на истирание и коэффициент трения в зависимости от нагрузки у плазменного покрытия имеют внезапные изменения, поэтому стабильность такого покрытия хуже, чем лазерного.

Таким образом, для определения оптимальных технологических параметров получения покрытий с необходимыми свойствами нужно провести более детальное исследование характеристик покрытия в зависимости от мощности используемого лазера.

Целью данной работы является комплексное исследование структурных, прочностных и трибологических характеристик покрытий из алюминиевой бронзы, нанесенных с использованием аддитивных технологий на конструкционную сталь, и дальнейшее установление зависимости свойств покрытия от мощности используемого лазера.

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1.1. Способы нанесения покрытий

В настоящее время выделяют следующую классификацию покрытий по различным вариантам нанесения [7]:

Диффузионные – это покрытия, которые получают в процессе диффузии в основной металл атомов защищающего материала в твердом, жидкой или газообразном состоянии при высокой температуре. Такие покрытия применяют для повышения твердости и окалинстойкости металлов, а также износостойкости и сопротивление коррозии [7, 8].

Термомеханические – это покрываемые материалы, которые образуются под одновременным воздействием механических усилий при различных температурных режимах (термомеханическая обработка) защищаемого и защитного металла. В качестве защитного металла могут выступать: медь, латунь, нержавеющая сталь и прочие материалы для плакирования.

Химические – покрытия, образованные в результате восстановления ионов металлов. К таким покрытиям относятся: благородные металлы, переходные металлы и различных сплавов, содержащих углерод, бор или фосфор. Без таких сплавов не обходится технологии производства печатных плат, металлизация пластмасс и других материалов, например нанесение металла на керамику.

Наплавочные – покрытия, получаемые при сварке или наплавке. Такие покрытия необходимы при работе деталей в условиях неоднородных разнонаправленных напряжениях, с целью увеличить жаропрочность, износостойкость и другие эксплуатационные характеристики, либо в целях экономии [7].

Газотермические (англ. Thermal Spraying) – это такие методы получения покрытия, которые получают напылением (плазменным, газопламенным, и детонационным), где разогретые мелкие частицы распространяются сжатым газом, который выходит из сопла, затем частицы попадают на покрытую поверхность, образуя слой. Данные покрытия используют в качестве декоративных элементов, а также с целью коррозионной стойкости или для восстановления разрушенных

поверхностей, восстановления форм изделия, возникших в результате литья, повышения электропроводности и износостойкости.

Гальванические – это покрытия, образующиеся в результате электрокристаллизации. Такие покрытия получаются с очень чистым осажденным металлом с повышенными характеристиками коррозионной стойкости, а также неплохими показателями механических свойств, но основное преимущество таких покрытий заключается в экономии дорогостоящих металлов, таких как никель, хром, серебро и другие. Поэтому такие покрытия используют в декоративных целях, а также для повышения коррозионной стойкости и износостойчивости.

Контактные – такие покрытия в которых поверхностный слой образуется в итоге электрохимического вытеснения, то есть ток от внешнего источника не проходил. Хорошо известны покрытия из меди, серебра, никеля, олова на стальных изделиях. Такие покрытия получаются очень тонкими, что не очень хорошо отражается на коррозионной устойчивости. Поэтому такие покрытия чаще всего используются только в качестве декоративной отделки.

Эмалевые – покрытия, получаемые в результате нанесения на изделия неметаллического порошка, основу которого составляет двуокись кремния, с дальнейшим проплавлением при высокой температуре. Используют для предохранения устройств от коррозии растворов органических веществ, щелочей, кислот, воды, и как декор металлических конструкций.

Лакокрасочные – это покрытия, которые получают посредством нанесения одного или более слоев краски или лака на поверхность металлического изделия. Применяются в декоративных целях и для коррозионной защиты металлов.

Комбинированные – это покрытия, являющимися комбинациями гальванических, оксидных, лакокрасочных и других видов покрытий, которые наносятся на одно и то же изделие. Применяют для декоративной отделки изделий.

Вакуумноплазменные – покрытия, полученные методом парофазного осаждения. Широко применяется в машиностроении, медицине, декоративной отделке, а также в синтезе ядерного топлива [7].

1.1.1 Способы получения слоистых композиционных материалов

В рамках данной работы рассмотрим более подробно газотермические способы нанесения покрытий, так как именно эти способы нанесения применяют в аддитивных технологиях.

Обычно, создание покрытий с помощью газотермических методов состоит из следующей последовательности стадий: слипанию мелкодисперсных частиц потоком распыляемого материала. Это происходит следующим образом: поток мелкодисперсных частиц в направлении материала образует поверхность с физико-механическими свойствами распыляемого материала. Возникающие процессы адгезии в слое контакта мелкодисперсных частиц и материал, на который происходит напыление приводят к стабилизации этого покрытия. Для того чтобы возникла адгезия на границе контакта двух слоёв требуется наличие мелкодисперсных частиц в потоке и высокие температуры. Мелкодисперсные частицы, в свою очередь, могут быть получены из макрообъектов типа порошка, стержня и т.д. по средством фрагментации газом при высокой температуре. Соответственно поток газа должен обладать высокой скоростью для фрагментации частиц [8].

Покрытия, образующиеся, подобным способом называются наплавочными или газотермическими. Они применяются в качестве защитного слоя для основного материала и защищают его от абразивного износа, повышенных температур (придают жаростойкие свойства), а также могут быть использованы для починки различных изделий, которые либо испытали износ, либо изначально имели дефекты, например дефекты, возникшие при литье. Существует большое количество технологий термического напыления, которые различаются методами фрагментации частиц, типами газовых сред и т.д. Поэтому до сих пор не существует единого классификатора всех методов термического напыления

Газотермические методы нанесения покрытий подразделяются на классы по их функциональному назначению (рис.1.1) и энергетическим характеристикам (рис. 1.2) по ГОСТ 28076-89, поскольку основное отличие газотермических технологий напыления заключается в виде источника энергии.

Наплавочные материалы форменно различны (проволока, порошок, стержень). Из-за этого система способов газотермического напыления, показанная на рис. 1.2, дополняется материала для напыления с различными характеристиками (рис. 1.3) [7].

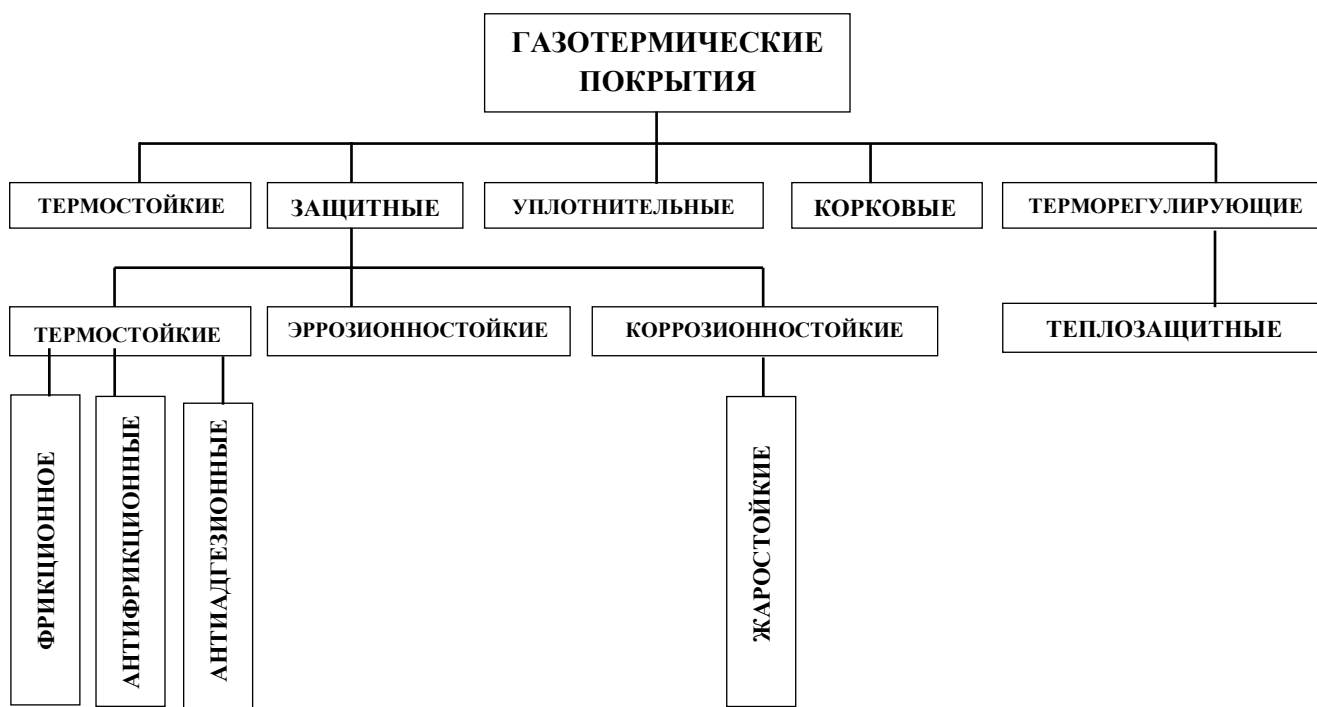


Рисунок 1.1 – Классификация газотермических способов нанесения покрытий по технологическому назначению



Рисунок 1.2 – Классификация методов газотермической обработки на основе энергетических характеристик

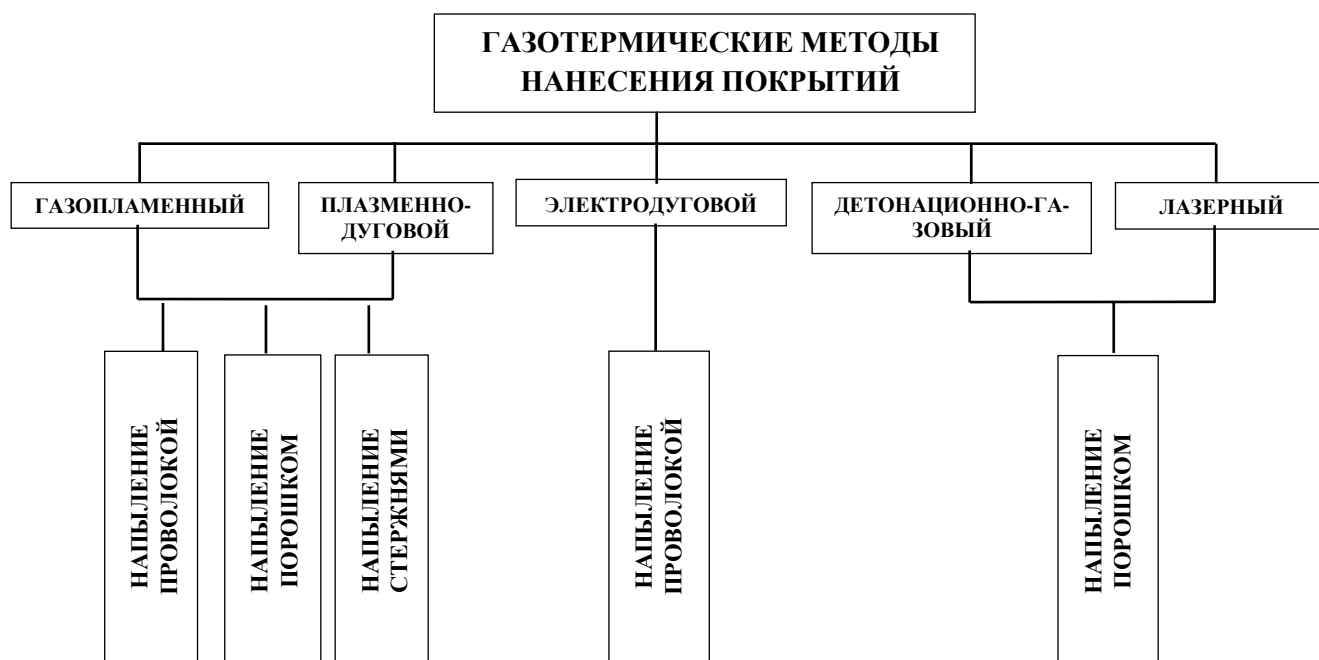


Рисунок 1.3 – Классификация методов по типу наплавляемого материала

1.1.2 Газопламенное напыление

Тепло, выделяемое при горении газов (водород, пропан и т.д.) в смесях с окислительными агентами (кислород, сжатый воздух и т.д.) применяется для газопламенного напыления покрытия (рис. 1.4), [7].

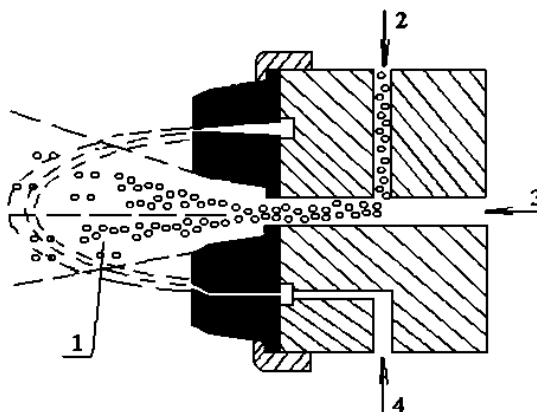


Рисунок 1.4 – Эскиз процесса нанесения газопламенного покрытия из порошка: 1-газовое пламя; 2-подача порошка; 3-подача сжатого воздуха; 4-подача горючей смеси газов

Пламя, возникающее в процессе газотермического напыления, классифицируется в зависимости от способа передачи горючего газа и окислителя в зону

горения. Продукты сгорания горючих газов имеют высокую температуру, порядка 2000-3000°C.

Ацилен-кислородное пламя имеет самый высокий удельный тепловой поток, поэтому оно является наиболее распространенным. [8].

Факел – это струя воздуха или другого газа, которая заполняет пространство при вытекании газа в безграничное пространство. В крайние части струи из окружающей среды попадает воздух или другой газ. В зависимости от роста потока и его скорости могут изменяться параметры поперечного сечения струи в сторону непрерывного роста, тогда струя принимает коническую форму. Угол равен 25°, при котором коническая струя раскрывается.

Порошок вводится, по продольному сечению оси факела пламени, нацеливая на его внутреннюю часть. Температура применения ацетилена в качестве горючего газа достигает 3200°C, а скорость потока 150–160 м/с. Попав в струю, частицы порошка плавятся или становятся сверхпластичными и набирают скорость 20–80 м/с. Скорость, с которой частицы порошка будут в полёте зависит от соотношения кислорода и горючего газа в смеси, расхода газа для продувки, расстояния от сечения сопла, расходования порошка, который вводится в пламя, его плотности, гранулометрического состава и других причин. При напылении материала в виде проволоки или прутка подача материала идёт с помощью специального электромеханического привода в центральное отверстие 3 (см. рис. 1.4). В области 1 образуются капли расплава, переносимые струей сжатого воздуха к поверхности напыляемого изделия [7].

К достоинствам газопламенного способа напыления покрытий относят:

1) большой выбор материалов для нанесения покрытия, которые плавятся без разложения при температуре до 3000°C;

2) освобождение от средств защиты оператора из-за низкого уровня шума и светового излучения;

3) высокая продуктивность процесса напыления (до 8–10 кг/ч порошков сплавов на никелевой основе) при этом сохраняется высокий коэффициент израсходования материала (более 95 %);

4) низкая стоимость и ликвидность оборудования, простое и легкое обслуживание, это позволяет не производить демонтаж изделий.

Основными недостатками газопламенного способа напыления покрытий из пористых материалов являются:

1) напыляемые материалы ограничены по температуре плавления (не больше 3000°C);

2) низкий коэффициент потребления энергии струи газового пламени для нагрева порошкового материала (2–12 %)

3) высокая пористость покрытий, что препятствует их использованию в агрессивных средах без дополнительной обработки;

4) недостаточная прочность сцепления покрытий с подложкой; [7,8].

1.1.3 Плазменное напыление

Плазменный метод один из самых универсальных и технологичных процессов газотермического способов напыления. Формирование покрытия происходит при наплавлении на поверхностном слое изделия (детали, конструкции) слоя частиц, которые были получены в процессе реагирования с струёй плазмы и которые имеют энергетический (тепловой и кинетический) запас энергии. Скорость потока колеблется в районе 1000–1500 м/с, а струя при этом имеет температуру около 5000–5500°C. Скорость 50–200 м/с характерна для частиц в струе плазмы. В зависимости от плотности и параметров материала частиц, характеристик газа, образующего плазму и силы тока дуги, изменяется скорость полета частиц. Такие плазменные струи производят в особых устройствах, плазмотронах или плазменных генераторах (рисунок 1.5).

Плазмотрон состоит из анода и катода с водяным охлаждением, разделенных изолятором.

В дуговой разряд, возбуждающийся между стержнем катода и кольцом анода (соплом) подают плазмообразующий газ (азот высокой чистоты, аргон, водород, гелий и др.), который в виде плазменной струи вытекает из сопла в результате нагрева. Порошок или проволока вводятся за анодным пятном и подается в дугу с газом образующем плазму. При данном способе порошок подается несущим газом в струю плазмы напрямую через отдельные отверстия плазмотрона (см. рис. 1.5 а). Существует два способа подачи прутков и проволоки (см. рис. 1.5 б, в).

Преимуществами метода являются:

1) можно применять разные разряды газов при образовании плазменно-дуговой струи: восстановительные (водород), природного газа, окислительные (воздух, азот), также инертные (гелий, аргон), аммиака, водяного пара, что в комбинации с использованием защитных насадок или камер с защитной средой (вакуум) способно выверять свойства среды, нагревающую движущиеся частицы порошка;

2) легко можно подобрать материалы, которые плавятся без разложения, а также с без ограничения по температуре плавления для получения покрытий;

3) процесс очень эффективный: 3–20 кг/ч для плазмотронов с мощностью 30–40 кВт и 50–80 кг/ч для плазмотронов с электрической мощностью 150–200 кВт;

4) контроль энергетических характеристики напыляемых частиц и условий создания покрытия плавной настройки режимов работы газа и электричества плазмотрона;

5) в зависимости от материала порошка коэффициент эксплуатации порошка достаточно высокий (50...70).

К недостаткам метода плазменно-дугового нанесения покрытий в открытой атмосфере относятся:

1) высокие характеристики уровня шума (110–130 дБ) и светового излучения;

2) полезное использование энергии струи плазмы на разогрев порошка имеет низкий коэффициент (2–8 %);

3) готовые покрытия имеют высокую пористость, препятствующая их использованию в агрессивных средах без дополнительной обработки;

4) прочность сцепления покрытий с подложкой невысокая для некоторых усло-

вий эксплуатации;

5) стационарный режим работы и высокая цена оборудования [8].

1.1.4 Детонационное напыление

В процессе детонационного напыления разогрев и рассеивание частиц напыляемого материала происходит благодаря энергии продуктов детонации смеси из гада. Скорость внедрения детонационной волны около 2000–4000 м/с, в то время как температура в районе 2200–5500°С это зависит от соединений в смеси. Поэтому частицы достигают скорости 600–1000 м/с. Конструкция для напыления (рисунок 1.6) представлена каналом прямоугольного или круглого сечения, с одного конца закрытый. Детонационное напыление – это периодический процесс. Горючий газ и порошок подаются в канал через особые приспособления. Для зажигания используют предохранители 3, расположенные около закрытого торца.

Детонационная пушка состоит из последующих циклов работы:

- 1) заполнение камеры горючей смесью;
- 2) инактивация и ввод напыляемого порошка;
- 3) воспламенение и прогорание смеси, приводящие к распространению детонационной волны;
- 4) образование струи частиц;
- 5) распространение детонационных продуктов и угасание ударной волны за рамки канала;
- 6) появление одиночного пятна напыления на поверхности изделия;
- 7) наполнение флегматизирующим газом канала с целью устранения продуктов горения (канал чаще всего наполняется горючей смесью после предварительной продувки, которая исключает возможность воспламенения при реагировании с горячими детонационными продуктами).

При газовой-детонационном методе нанесения покрытий формы и размеры деталей имеют ограничения только по технологическими способностям аппаратов для переноса изделий (детонационно-газовой пушки) и параметрами звукоизолированной камеры (бокса), производящей обработку. Используются следующие рабочие

газы: кислород, азот, пропан-бутан, ацетилен.

Преимуществами этой технологии являются:

- 1) потенциал производства покрытия с высокими плотностью (низкая пористость 0,5–1 %) и прочностью сцепления (10–160 МПа) и вследствие большой кинетической энергии частиц материала для напыления;
- 2) способность получения прочно скрепленных покрытий на отдельные разновидности подложек (никелевые сплавы, сталь и др.) без дробеструйной поверхностной обработки;
- 3) относительно простое строение установки.

Однако существует и ряд недостатков способа детонационного напыления:

- 1) необходимо производить изоляцию зоны обработки изделия из-за высокого уровня шума (120–140 дБ);
- 2) существуют некоторые ограничения технологии получения покрытий из-за материалов, которые содержат компоненты, активно взаимодействующие с окружающей средой (высокотемпературные потоки детонационных продуктов, которые содержат H_2O , H_2 , H , CO_2 , CO , N_2 , N , O_2 , O);
- 3) твердость поверхности для напыления не должна превышать HRC 60;
- 4) Обработка нежестких деталей технологически ограничена, поскольку высокие давления импульса вызываются, когда продукты детонации попадают на подложку [7].

1.1.5 Электродуговая металлизация

Электрическая дуга расплавляет проволоку и затем происходит распыление посредством сжатого воздуха расплавленного металла в этом и заключается процесс электрометаллизационного напыления. При данном методе (рисунок 1.7) из напыляемого материала к проволокам 1 подается напряжение от источника постоянного (сварочного) тока и происходит возбуждение электрической дуги. В промежуток дуги через сопло 2 вводится сжатый воздух, переносящий расплавленный металл проволоки посредством мелких капель к поверхности изделия [8].

Изделие располагается на расстоянии примерно 10–20 см от сопла электродугового металлизатора. Порой используется инертный газ аргон в замену сжатому воздуху. Благодаря этому удается не допустить порядочного окисления напыляемого материала и повысить качественные характеристики покрытия.

Электродуговая металлизация является высокопродуктивным способом, который превосходит газопламенное напыление и дающий возможность производить покрытия с повышенной прочностью сцепления.

К недостаткам способа нанесения покрытий методом электродуговой металлизации являются:

- 1) получаемые покрытия сильно загрязнены окислами и имеют довольно высокую пористость;
- 2) напыляемый материал склонен к окислению и перегреву;
- 3) прочность сцепления покрытий с металлом основы низкая для порядка эксплуатационных условий;
- 4) повышенный расход распыляемого материала из-за больших размеров конуса распыла [7].

Далее рассмотрим механизированные способы наплавки.

1.1.6 Вибродуговая наплавка

Разновидность дуговой наплавки металлическим электродом – вибродуговая наплавка. В процессе наплавки охлаждающая жидкость подается на наплавленную

поверхность и происходит вибрация электрода (рисунок 1.8) [8].

Механический или электромагнитный вибратор с частотой 50–100 колеб/сек приводит в действие вибрацию электрода. Проплавленный валик имеет водяное охлаждение, так происходит на проплавленной поверхности закалка.

Вибродуговая наплавка как циклический процесс состоит из трех процессов – это разряд дуги и холостой ход, короткое замыкание. При разряде дуги выделяется больше всего тепла (50–95 %).

Расплавленный металл электрода в виде капель переносится в сварочную ванну. При дальнейшем отходе электрода от детали наступает период холостого хода. При правильно подобранных режимах процесса наплавки период холостого хода отсутствует.

Автоматическая головка осуществляет процесс вибродуговой наплавки, она закрепляется вместо резцедержателя на суппорте токарного станка.

Процесс вибродуговой наплавки невозможен без постоянного тока обратной полярности, поскольку таким способом возможно достичь повышения стабильности и создание качественного наплавленного валика.

Количество охлаждающей жидкости и химический состав электрода влияет на структуру и механические свойства полученного наплавленного слоя. Поэтому используется порошковая проволока, лента и сварочная легированная или углеродистая проволока диаметром от 1,0 до 3,0 мм.

Твердость наплавленного металла также регулируют количеством и местом подачи охлаждающей жидкости. Диаметр электродной проволоки выбирают в зависимости от толщины наплавленного слоя.

В качестве охлаждающей жидкости применяют различные растворы, способствующие ионизации зоны горения дуги: 1 % хозяйственного мыла и 0,5 % глицерина; водный раствор, содержащий 5 % кальцинированной соды, водный 6 %- ный раствор кальцинированной соды; водный раствор 3–4% кальцинированной соды, 4–5 % глицерина или 20–30 %-ный раствор глицерина.

К основным преимуществам вибродуговой наплавки относятся:

- 1) Небольшая температура нагрева изделий (примерно 100°C);

- 2) небольшая зона термического влияния, что позволяет восстанавливать детали с малыми диаметрами от 12–15 мм;
- 3) толщина наплавленного слоя может достигать 0,5–3,5 мм на сторону.

Недостатками вибродуговой наплавки являются:

- 1) неравномерная твердость покрытия,
- 2) снижение усталостной прочности восстановленных деталей.

С целью повышения производительности процесса вибродуговой наплавки в качестве электродного материала применяют стальную ленту или используют многоэлектродную (двумя-тремя электродами) наплавку.

Разработаны и рекомендованы для ремонтного производства разные виды вибродуговой наплавки, такие как наплавка в разнообразных газовых средах, такие как водяной пар, углекислый газ, газозвдушная пена, поток воздуха, водородная смесь и наплавка с параллельным влиянием на наносимый металл (термомеханическая обработка при статическом или динамическом поверхностно-деформирующем усилии, ультразвуковые колебания, вводимые в сварочную ванну, электромагнитное перемешивание сварочной ванны, обработка наплавленного слоя лазером и др.) [8].

1.1.7 Лазерная наплавка

При лазерной наплавке используется луч лазера в качестве источника тепла. С помощью лазера можно проводить такие процессы как наплавка, сварка, прошивка отверстий, поверхностная термическая обработка и упрочнение, фигурный раскрой и резка материалов. В процессе лазерной наплавки порошковая смесь наносится на требуемую ремонтную деталь и затем происходит обработка поверхности лазерным излучением высокой мощности [11].

В процессе подачи наплавляемого материала в зону действия лазерного излучения, которое сфокусировано в пятно диаметром 1,0...5,0 мм на поверхности обрабатываемой подложки формируется покрытие с устойчивыми физическими и химическими характеристиками и определённой высоты. Бывают такие способы

лазерной наплавки уже с заранее нанесенным наплавленным материалом на подложку. Такое нанесение состоит из наплавочного порошка и связующих компонентов получают его либо обмазкой, либо газотермическим способом, а затем с помощью лазерного излучения производят переплавку [12].

Лазерный переплав – это процесс наплавки, в котором осуществляется предварительное напыление слоев [14]. Переходная зона связи полученного покрытия с материалом основы имеет малые размеры (от 5...10 до 50...200 мкм) [13]. Покрытие имеет высокую прочность сцепления с металлом основы и не уступает по прочности.

Способ подачи наплавочного материала к подложке основа процесса лазерной наплавки. Анализ лазерных методов наплавки и сварки дает понять, что основное достоинство материалов из порошка является в эффективное поглощение излучения лазера, поскольку подача проволоки не зависит от пространственного положения. [15].

Первоначальный этап распределения порошка на обрабатываемом изделии производится в нижнем положении. Если требуется изменить пространственное положение, то нанесение порошковых материалов производят посредством плазменного напыления [8] или газопламенного напыления [7]. Особые дозаторы применяют в процессе наплавки, когда отсутствует возможность предварительного распределения порошка по поверхности проплавляемого изделия.

Преимуществами лазерной наплавки являются:

- нанесение наплавляемых слоев возможно с заданными высотой 0,1...3,0 мм и другими свойствами [13, 14];

- сильное уменьшение эффекта расходования элементов из материала подложки в наплавленный слой, это максимально делает похожими свойства наплавленного слоя со свойствами наплавляемого материала и увеличивает точность прогнозирования результатов [13];

- образование высокодисперсных равноосных структур наплавленного металла и малая протяженность зоны термического влияния (до 0,1...0,5 мм), уменьшение

припуска под финальную механическую обработку до 0,3...0,5 мм на сторону за счет низкой шероховатости наплавленного слоя (до 200...300 мкм) [4].

К недостаткам лазерной наплавки относятся:

- в слоях наплавки присутствуют поперечные холодные трещины, которые возникают вследствие релаксации высоких внутренних напряжений от растяжения;
- из-за образования неметаллических включений могут образовываться внутренние и наружные поры, на которые также может повлиять остаточная влажность материала наплаваемого порошка, либо загрязненность наплаваемого изделия;
- лазерное оборудование довольно дорогостоящее, что плохо сказывается на стоимости процесса наплавки [13, 14].

С помощью изменения термического цикла процесса лазерной наплавки при использовании добавочного источника тепла, например, комбинацией плазменной струи лазерным излучением можно существенно уменьшить в наносимых слоях остаточные термические напряжения в комбинации с тщательным отбором наплаваемой подложки и присадочных порошков.

Методом лазерной наплавки производят стойкие к коррозии и износу аморфизированные, микрокристаллические, и аморфные покрытия из достаточно широкого спектра материалов [8].

Различия между процессами газопламенного напыления, лазерной наплавкой и лазерным порошковым напылением наглядно представлены на рисунке 1.9.

При лазерной наплавке пятно нагрева лишь немногим меньше, чем при лазерном напылении, однако в последнем случае отсутствует прямое действие излучения на подложку, что повышает локальность теплового воздействия. Прочность сцепления слоев с подложкой обратно пропорциональна высоте напыляемых слоев.

Технология прямого нанесения металла – DMD (direct metal deposition).

На данный момент широкое развитие получила технология лазерной наплавки под названием DMD (direct metal deposition), она используется для изготовления пресс-форм и штампов (рисунок 1.10) [16].

DMD технология может рассматриваться как трехмерная лазерная наплавка, а не напыление. В ходе процесса DMD лазерный пучок фокусируется на металлической заготовке — трехмерной пресс-форме (детали, приблизительно воспроизводящей форму объекта) или на поврежденной металлической детали, где создает зону расплавленного металла. Тонкая струя металлического порошка впрыскивается с помощью транспортирующего газа в зону расплава.

Цельное металлическое изделие формируется слой за слоем в процессе создается послойно в итоге перемещения излучения лазера и порошковой струи с помощью управления на компьютере по трехмерной CAD (computer aided design) модели [16].

Технология селективного лазерного плавления – SLM (selective laser melting).

Так же на сегодняшний день в аддитивном производстве получил развитие метод послойного расплавления материала порошка лазерным излучением – селективное лазерное плавление (selective laser melting – SLM) (рисунок 1.10) [14].

Первой основной стадией способа SLM является моделирование детали, а вторая стадия – это печатание самого изделия. Сначала формируется цифровая трехмерная модель детали с последующей дифференциацией на тонкие слои в особом программном продукте. Затем изделие метается.

Выравнивающее приспособление создает ровный слой порошка на поверхности подложки. Далее мощным лазерным излучением строится на этом слое сечение будущего изделия, которое соответствует данному слою, посредством системы управляющих зеркал строит.

Лазерное излучение устанавливается такой мощности, чтобы металлический порошок сплавлялся всеми частицами в одну массу. При завершении создания слоя происходит смещение рабочей платформы на высоту одного слоя вниз, платформа, подающая порошок, поднимается вверх. Затем происходит послойное наплавление

до тех пор, пока не будет получено готовое изделие [17].

При наплавке с помощью SLM сокращается число этапов, которые нужны для постобработочных работ, контролируется пространственное распределение микроструктуры и состава путем печати с отлаженными характеристиками, а также моделирование сложных составляющих компонентов в комбинации с компьютерными технологиями [18].

Преимущества SLM-процесса:

- формирование сетей поддерживающих конструкций изделия в порошковом слое требуется в зависимости от геометрической сложности изделий. В большинстве случаев формирование поддержек предупреждает провалы и деформации изделий в порошковом слое;

- рекомендуемые параметры работы установок с конкретными материалами часто продают компании-производители аддитивных систем в составе лицензий на производство материала;

- пользователи имеют возможность самостоятельно устанавливать параметры обработки, но для выбора скорости обработки, отклонений по оси Z и других параметров необходимо дополнительное обучение;

- со временем процесс производства изделий удешевится за счет уменьшения цен на материалы и установки;

- при накоплении производственного опыта, наработки базы, возможно упрощение изготовления изделий; – простота конструкции лазерной установки;

- в одном производственном цикле возможно выращивание нескольких изделий разной конфигурации;

программное обеспечение установок предлагает готовые модели оптимизации расположения деталей в рабочем объеме в виде виртуальных сборок, отображаемых на экране монитора ЭВМ установки, а процессы полностью автоматизированы;

- лазерные установки обладают высокой точностью построения, получаемая поверхность изделий высокого качества; – наличие в установках дополнительного оборудования (генератор азота, сборник порошка, порошковый сепаратор и т.д.);

- возможность изготовления изделий сложной геометрической конфигурации (с большой площадью поверхности, но малым объемом, а также сложными оболоч-

ками, внутренними охлаждающими каналами, сборные объекты), которую невозможно получить традиционными способами производства;

- высокая степень использования порошка, возможность вторичного использования порошков;

- сложные внутренние каналы могут быть сформированы при условии их последующего очищения от порошка при постобработке [17, 19].

Недостатки SLM-процесса:

- высокая сложность процесса. Для реализации полного технологического потенциала требуется глубокое понимание процессов проектирования 3D-моделей;

- существует необходимость полной стандартизации процессов, поскольку присутствуют различия в идентичных процессах, являющиеся на данный момент конкурентными преимуществами производителей установок;

- формирование дефектов при неправильной оптимизации процесса сплавления, низком качестве порошковых материалов (искажения формы изделий, трещины, остаточная пористость, сфероидизация в лунках жидкого металла);

- высокие требования к порошковому сырью. Вариации качества порошка влияют на формирование дефектов и качество поверхностей изделия;

- стоимость порошковых материалов высока (от 10000 руб/кг);

- низкая производительность процесса;

- отслеживаемость потока материалов утрачивается при смешении вторичного порошка с исходным. Учет можно вести только по отсеянному порошку;

- точность детализации при построении зависит от диаметра пятна луча, диаметру порошковых частиц, расположению детали в рабочем объеме. Высокая скорость процесса, увеличенный диаметр пятна лазера обеспечивают увеличение производительности в ущерб качеству получаемого изделия;

- для эффективной и безопасной эксплуатации установок требуются специалисты высокого профиля;

- для готовых изделий характерна анизотропия свойств, ограничивающая применение в особо ответственных отраслях промышленности. Присутствие остаточных внутренних напряжений, для их снятия необходимо проводить термическую

обработку

– готовые детали необходимо навлекать постобработочным операциям, таким как химическое травление, механическая обработка поверхностей [17, 19].

Благодаря исследованию процессов гибридного и лазерного нанесения и упрочнения покрытий данные покрытия применяют в качестве защиты от коррозии и повышения стойкости к износу с высоким уровнем физико-механических характеристикам, создание тонких покрытий (например, алмазных и алмазоподобных), синтез трехмерных объектов, отличающихся специальными свойствами.

Перспективы дальнейшего развития лазерно-плазменных (лазерно-дуговых) процессов модифицирования поверхностей и нанесения покрытий связаны с устранением недостатков, присущих каждой из составляющих в отдельности (лазерному и дуговому тепловым источникам), а также с повышением эффективности их взаимодействия [16].

Сравнивая, основные величины процессов газотермического и лазерного нанесения покрытий (таблица 1) можно понять следующее. Существуют некоторые требования к большей части явлений плазменного напыления, такие как: предварительная (чаще всего струйно-абразивной) подготовка испытываемой поверхности, применение в ряде случаев подслоев и заданная величина пористости (микропористости) покрытий [16].

Лазерные и лазерно-плазменные наплавочные процессы уменьшают разогрев изделия, увеличивает прочность сцепления наплавленных слоев с материалом подложки, поэтому существует возможность отказа от наплавки промежуточных слоев и упрощение подготовки обрабатываемого поверхностного слоя.

Однако в лазерных процессах наплавки есть и определенные недостатки: напряженное состояние наплавленных слоев, наличие в них пор и микротрещин. Перспективы дальнейшего развития лазерно-плазменных (лазерно-дуговых) процессов модифицирования поверхностей и нанесения покрытий связаны с устранением недостатков, присущих каждой из составляющих в отдельности (лазерному и дуговому тепловым источникам), а также с повышением эффективности их взаимодействия [16].

Таблица 1 – Сопоставление характеристик процессов газотермического и лазерного нанесения покрытий

Характеристики процесса нанесения покрытий	Газотермическое напыление	Лазерное нанесение покрытий
Тепловой источник	Газовое пламя, электрическая дуга или плазма	Лазерное излучение высокой интенсивности
Связь покрытия с основой	Механическая связь низкой или умеренной прочности*	Высокопрочная металлургическая связь
Структура покрытия	Чешуйчатая; от пористой до почти плотной*	Плотные; слои без трещин и пор
Тепловая нагрузка на рабочую зону	Низкая температура нагрева*	Незначительный нагрев
Смешение с металлом основы	Отсутствует	Незначительное
Толщина покрытия	От 0,05 до нескольких миллиметров	0,5...3,0 мм
Материал покрытий	Широкая номенклатура металлов, сплавов, твердых металлов, керамик и полимеров*	Металлы и сплавы; сплавы с твердыми частицами; твердые металлы; керамика
Производительность	От низкой до высокой*	От низкой до умеренной/ (высокой)*
Себестоимость	От низкой до высокой*	От умеренной до высокой *
В зависимости от типа процесса.		

1.2 Материалы, используемые в аддитивных технологиях

1.2.1 Технологический процесс лазерной наплавки

Технологический процесс лазерной наплавки покрытий в общем виде состоит из следующих этапов:

- подготовка напыляемой поверхности;
- подготовка напыляемого материала;
- нанесение покрытия и контроль качества напыления;
- последующая обработка напыленного покрытия и выходной контроль [8].

К процессу наплавки предъявляют следующие требования:

– обеспечение прочного и надёжного сцепления основного и присадочного металлов.

– исключение образования пор и трещин.

– снижение остаточных напряжений и деформаций.

– уменьшение перемешивания металла основы с металлом наплавки.

– обеспечение проведения наплавки с минимальной глубиной проплавления основы.

– увеличение коэффициента использования присадочного металла.

– снижение стоимости процесса.

– повышение производительности и комфортности труда [20].

1.2.1 Подготовка поверхности напыляемых изделий

Качественная обработка поверхности изделий перед напылением во многом гарантирует высокую адгезионную прочность покрытий. Поверхность изделий обычно содержит различные виды загрязнений:

– физические или механические (пыль, абразив, коррозию);

– органические (смазки, лакокрасочные покрытия и т.п.);

– химические связанные и растворимые (соли, кислоты, оксиды, нитриды и др.);

– газообразные загрязнители, адсорбированные поверхностью.

Особенно неблагоприятное воздействие оказывают органические и химические связанные загрязнения. Подготовку напыляемой поверхности следует проводить с таким расчетом, чтобы наряду с очисткой осуществлялся и процесс ее активации, т.е. выведение из состояния термодинамического равновесия. Для этого необходимо разорвать связи между поверхностными атомами основы и инородными атомами, повысить энергию поверхностных атомов до уровня обеспечения их химического взаимодействия с напыляемыми частицами.

Кроме того, подготовка поверхности должна обеспечивать улучшение механического закрепления наплавленных частиц, что создается созданием шероховатости на напыляемой поверхности в пределах $Ra = 20-80$. Наличие на поверхности напыления гребешков (выступов) увеличивает контактную температуру на выступах. При этом возрастает суммарная поверхность взаимодействия покрытия и подложки. Элементы «анкерного» зацепления усиливают фактор механического взаимодействия [8].

Практически предварительная подготовка проводится обезжириванием, механическими способами и абразивоструйной очисткой. Обезжиривание ведут в ваннах или применяют местное обезжиривание – протиркой. Используют щелочные растворы или органические растворители – керосин, бензин, толуол, хлорированные углеводороды и т.п. В особо ответственных случаях используют электрохимическое обезжиривание в щелочных растворах и ультразвуковую очистку. Для капиллярного удаления адсорбированной жидкой смазки используют выжигание с нагревом в печи до $150-200^{\circ}\text{C}$.

Механическая очистка – крацевание вращающимися металлическими щетками, обработка ленточным абразивом.

Абразивоструйная очистка (дробеструйная обработка) относится к наиболее распространенному методу подготовки поверхности при лазерной наплавке. В некоторых случаях она может заменять обезжиривание и механическую очистку. Обработку проводят струей сжатого воздуха с абразивными частицами в защитных камерах. Направленный скоростной поток создается пистолетом

инжекционного типа. Процесс ведут вручную, так и с применением автоматического перемещения обрабатываемой поверхности. В качестве абразивных частиц используют электрокорунд, карбид кремния, дробь чугунную (ДЧК) и стальную (ДСК). Размер абразивных частиц составляет 0,5–2 мм [7, 8].

1.2.2 Материалы, используемые для наплавки

Процесс наплавки представляет собой плавление и дальнейшую кристаллизацию на поверхности обрабатываемого изделия присадочного материала. При этом происходит частичное оплавление поверхности детали, образование ванн, в которых и протекает кристаллизация.

После наплавки на поверхности изделия можно выделить две зоны: зону сплавления (зона сварочной ванны) и зону термического влияния. В зоне сплавления происходит перемешивание присадочного материала и металла основы. Зона термического влияния представляет собой участок, примыкающий к сварочной ванне, в пределах которого в результате разогрева произошли фазовые и (или) структурные превращения. Наплавка позволяет экономить дорогостоящие материалы для изготовления деталей. Наплавку в зависимости от технологической задачи производят различными металлами и сплавами (стали, чугуны, цветные сплавы и др.).

Углеродистые стали с содержанием углерода до 0,3–0,4 масс. % применяют для наплавки деталей, подвергающихся незначительным абразивным воздействиям и усталостному износу в условиях трения скольжения и качения при работе в неагрессивных средах (валы, цапфы, ходовые колеса, опорные катки, ножи и т. п.).

Углеродистые и низколегированные стали с содержанием углерода более 0,4 масс. %, а также стали, дополнительно легированные никелем, хромом, ниобием, вольфрамом и другие, используются для наплавки деталей, работающих в условиях интенсивных абразивных и абразивно-ударных воздействий в малоактивных коррозионных средах (ножи рубительных машин, гарнитуры размольных мельниц, бронзовые муфты и т. п.).

Хромистые стали, характеризующиеся высокой прочностью и коррозионной стойкостью в ряде агрессивных сред, применяются для наплавки деталей, подвергающихся коррозионно-металлическому, коррозионно-абразивному, газо- и гидроабразивному, а также кавитационному изнашиванию.

Хромоникелевые аустенитные стали с высокой стойкостью против коррозии и низкой твердостью применяются при наплавке деталей, работающих в агрессивных средах при небольших механических воздействиях (плунжеры, корпуса и крыльчатки насосов для перекачки жидкостей, не содержащих абразивных частиц, детали запорной и регулирующей аппаратуры и т. п.).

Дисперсионно-твердеющие стали наплавляют на поверхность вырубных, прошивных и разделительных штампов со сложной гравюрой рабочей поверхности, что приводит к увеличению стойкости в 3–6 раз по сравнению с термически упрочненным ненаплавленным инструментом.

Высокохромистые чугуны применяются для защиты от кавитационного и абразивного изнашивания в агрессивных средах. Никелевые и кобальтовые сплавы используются для защиты от абразивного воздействия в агрессивных средах.

Медь и медные сплавы применяются для наплавки деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания, ударных нагрузок, повышенных температур и в агрессивных средах (электрические контакты, детали судов, работающих в условиях морской воды и кавитации и т. п.).

Твердые сплавы на основе вольфрама (релит, вокар, воломит) используются для создания особо износостойких наплавочных покрытий, работающих в условиях абразивного износа с ударными нагрузками.

Порошковые угольно-металлические смеси (C-Cr-Fe, C-B-Cr-Fe, C-Cr-W-Fe) применяют для восстановления изношенных поверхностей деталей, работающих в условиях умеренных ударных нагрузок [7].

1.2.3 Порошковые материалы

Развитие аддитивных технологии и их распространение в массовом производстве началось с их применения на классических и отчасти стандартных порошковых материалах. На сегодня широкое распространение получила лазерная наплавка с использованием присадочных порошковых материалов, которые подаются непосредственно в зону действия лазерного излучения посредством специальных порошковых дозаторов различных конструкций [22].

Среди порошковых материалов особое распространение получили:

- сплавы на железной основе марок 304L, 310S, 316L, 410, 430, 434, 904L, 17-7PH, различные марки быстрорежущих сталей и др.;
- сплавы на никелевой основе марок: Inconel 625, Inconel 718, Inconel 936 и др.;
- сплавы на кобальтовой основе марок: Co212, Co512, KX28M6 и др.;
- сплавы на основе меди: алюминиевые и фосфористые бронзы;
- сплавы на основе титана: Ti64 или BT6.

Так же известен опыт по получению опытных изделий из порошков чистых тантала, вольфрама, карбида вольфрама и молибдена высокой сферичности.

Основными требованиями к порошковым металлическим материалам для аддитивных технологий являются:

- стабильная текучесть на требуемом по технологии печати уровне; - высокий уровень сферичности порошка; Особенности материалов и технологий аддитивного производства изделий;
- соответствие порошка требованиям по гранулометрическому распределению (как правило, применяемый фракционный интервал порошкового материала варьируется в диапазоне 20–150 мкм);
- соответствие порошка требованиям по химическому составу;
- низкое содержание кислорода;
- низкое содержание азота;
- высокий уровень насыпной плотности;
- высокий уровень плотности утряски;

– высокий уровень истинной плотности порошка, показывающий наличие внутренних пор и несплошностей в порошке [23].

1.2.4 Материалы, используемые для подложки

В качестве подложки используются разнообразные износостойкие материалы, состав которых варьируется от сплавов на основе железа с общим содержанием легирующих элементов 1,5-2%, до сплавов на основе никеля, кобальта и вольфрама, концентрация которых достигает 90-96%.

При выборе материала необходимо учитывать разницу между температурой плавления материала подложки, которую применяют для получения слоистого композиционного материала и температуры плавления наплавляемой шихты, поскольку данный показатель влияет на глубину проплавления металлической подложки.

Металлическая подложка должна соответствовать требованиям высокой прочности, достаточной жесткости, хорошей теплопроводностью. При этом материал подложки должен хорошо свариваться и обрабатываться резанием при низкой себестоимости.

Одним из основных назначений металлической подложки является свойство сцепления с наплавляемым материалом, таким образом, материал подложки должен выполнять функцию связующего слоя с последующими порциями наплавляемого материала. Это достигается путём подбора как технологических, так и физико-химических свойств процесса и материалов, соответственно.

1.2.5 Постановка задачи

Таким образом, рассмотрев вышеуказанные способы нанесения покрытий, можно прийти к выводу о том, что лазерная наплавка является высокотехнологичным способом нанесения слоистого композиционного покрытия, однако до сих пор не проводилось исследования о том, как мощность лазерного излучения может повлиять на структурные, прочностные и трибологические характеристики покрытий из алюминиевой бронзы.

Гипотеза исследования состоит в предположении о том, что полученное с помощью аддитивных технологий покрытие из алюминиевой бронзы будет обладать повышенными антифрикционными свойствами, это позволит уменьшить износ деталей в узлах трения.

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:

- определение типа подложки и материала наплавляемого порошка, подготовка образцов для лазерного напыления.

- подбор технологических параметров нанесения покрытий.

- проведение триботехнических испытаний для каждого из наплавленных образцов в зависимости от мощности лазерного излучения.

- оценка качества наплавленных структур с помощью макро-и микроанализа.

- исследование зон контакта подложек и наплавленных покрытий методами оптической и электронной микроскопии.

- исследование степени диффузионного насыщения матрицы подложки наплавляемым порошком с помощью количественного микрорентгеноспектрального анализа

- сопоставление результатов триботехнических испытаний, макро-и микроанализа структур образцов с технологическими режимами лазерной наплавки.

- обобщение результатов исследования.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Материалы и методы исследования

В качестве материала покрытия был выбран порошок алюминиевой бронзы Cu–10Al–3Fe составом, приведенным в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав порошка алюминиевой бронзы масс. %

Al	Fe	Mn	Si	Sn	Cu
8.5-10	2-4	≤ 0.5	≤ 0,25	≤ 0,6	ост.

Согласно литературным данным [24] данная бронза имеет хорошие показатели по износостойкости. В качестве материала подложки была выбрана низколегированная конструкционная сталь состава, приведенного в таблице 3.

Таблица 3 – Химический состав материала подложки масс. %

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P
0,34	0,38	0,68	1,47	1,53	0,25	0,017	0,035

Для нанесения покрытия использовали комплекс лазерной наплавки металлов FL-Clad-R-4. Технологические параметры процесса приведены в таблице 4.

Исследование структуры на поперечных шлифах образцов проводили на оптическом инвертированном металлографическом микроскопе Axio Observer D1.m, оснащенный программно-аппаратным комплексом для анализа изображений Thixomet Pro.

Также исследование шлифов образцов проводили на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JSM-7100F фирмы JEOL (Япония), оснащенный энергодисперсионным спектрометром фирмы Oxford Instruments (Великобритания) для проведения качественного и количественного микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) (рисунок 2.1).

Таблица 4 – Технологические параметры

нанесения покрытия

№ п/п	Число циклов	Мощность лазера (Ватт)	Скорость перемещения лазера (мм/с)	Диаметр пятна (мм)	Расход порошка (г/мин)
1	2	600	12	2	15
2	2	1000			
3	2	1400			
4	1	1800			
5	1	2200			

Измерение микротвердости покрытия и подложки проводили на микротвердомере FM-800 (рисунок 2.2) при нагрузке 25 г не менее чем на десяти точках для каждого из образцов.

Триботехнические испытания проводили на машине трения ИИ 5018 (Россия) (рисунок 2.3) по схеме «подвижный ролик – неподвижный ролик (испытываемый материал)». Материал ролика установки был из стали марки 40Х, радиус ролика установки составлял 45 мм, скорость вращения равнялась 300 об/мин, испытания проводились в условиях сухого трения не менее чем на трех участках для каждого из образцов.

Результаты и их обсуждение

2.2.1 Внешний вид наплавленного покрытия

Внешний вид полученного покрытия приведен на рисунке 2.4. По мере увеличения мощности лазера (от рис. 2.4 а к рис. 2.4 д) морфология покрытия изменяется: оно покрывает большую площадь материала подложки, становится более плотным и гладким, шероховатость покрытия снижается.

2.2.2 Растровая электронная микроскопия

С использованием РЭМ на поперечных шлифах образцов были изучены места контакта стали и бронзового покрытия, а также структура полученной наплавки (рисунки 2.5–2.7).

Очевидно, что зона контакта в процессе наплавки подвергалась воздействию высоких температур, что способствовало сплавлению (смешению) материала подложки (темно-серые участки) с материалом покрытия (светло-серые участки). Это привело к образованию структуры, характерной для композиционного материала: участки, обогащенные железом, встречаются как в контактной зоне, так и по толщине покрытия.

Такой структуры не наблюдается для других методов нанесения бронзового покрытия: и в работе [25], и в работе [26] отмечается слоистый характер полученного покрытия из бронзы Cu–10Al–1Fe без выделения дополнительных частиц железа. Зато подобное «смешение» в контактной зоне наблюдается авторами работы [27] при нанесении кремниевой бронзы на сталь Shaped Metal Deposition методом.

Выделение избыточного железа в наших экспериментальных образцах, как в контактной зоне, так и по толщине покрытия, можно объяснить следующим образом. При нанесении покрытия под действием лазера происходит нагрев и расплавление не только порошка алюминиевой бронзы, но и верхнего слоя стальной подложки, в результате чего в зоне контакта образуется расплав системы Cu–Fe.

Следует отметить, что система Cu–Fe характеризуется отсутствием интерметаллических соединений, неограниченной растворимостью в жидком состоянии, и ограниченной растворимостью в твердом [28, 29].

Таким образом, при последующем остывании ванны расплава от подложки к расплаву в первую очередь начинают расти дендриты более тугоплавкого железа, а только затем происходит кристаллизация основного покрытия. На рисунках 2.6г и 2.6е в контактной зоне (в зоне перегрева) также можно наблюдать и выделение прослоек меди по границам зерен в стали.

С увеличением мощности лазера толщина подплавляемой подложки увеличивается, и покрытие обогащается частицами железа. Структура покрытия с увеличением мощности лазера становится более равномерной, но, в тоже время, и более грубой: дендриты железа, пронизывающие бронзу, становятся крупнее, прослойки на основе меди занимают меньшую площадь.

Интересна структура на рисунках 2.7а и 2.7г, отличающаяся появлением так называемых «сферул» железа. Подобные выделения характерны для процессов метастабильного состояния жидкой фазы, а также неравновесной кристаллизации в системе Cu–Fe [30-34]. Выделение сферических частиц железа в исследуемых образцах согласуется с экспериментальными данными [35, 36] по структуре покрытия из алюминиевой бронзы, полученного лазерной наплавкой.

Для образцов № 3–5 отмечается наличие единичных трещин, начинающихся в зоне контакта, и идущих вглубь металла подложки не более чем на 300 мкм. Следует отметить, что трещины не полые, а заполнены бронзой, что должно снизить негативные последствия их образования.

2.2.3 Микрорентгеноспектральный анализ

Усредненные составы полученного композиционного покрытия согласно микрорентгеноспектральному анализу (МРСА) приведены в таблице 5. С увеличением мощности лазера концентрация железа в объеме покрытия растет, а концентрация меди падает, что можно соотнести со структурой, так как при увеличении мощности лазера количество дендритов железа в структуре покрытия возрастает.

Таблица 5 – Усредненные составы полученного композиционного покрытия (согласно МРСА), масс. %

№ п/п	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	7,49	0,07	0,11	12,87	79,46
2	7,71	0,09	0,12	18,25	73,83
3	7,96	0,09	0,06	24,25	67,64
4	5,91	0,11	0,20	35,22	58,56
5	4,98	0,14	0,31	44,95	49,62

В связи с тем, что технология нанесения покрытия использует термические воздействия, то можно предположить возможность возникновения диффузионного слоя на границе стальной подложки и бронзового покрытия с образованием твердых растворов, имеющих место в системе Cu–Al–Fe [37, 38, 39].

В ходе настоящего исследования на участках шлифов, отвечающих месту контакта стали и бронзового покрытия, был проведен МРСА, подтвердивший диффузию меди и алюминия из бронзы в сталь.

Наличие диффузионной зоны должно способствовать сцеплению материала покрытия с материалом подложки, тем самым обеспечив хорошие адгезионные свойства.

Диффузионная зона в экспериментальных образцах по ширине зависит от мощности лазера и составляет порядка 5 мкм для образца № 1 и 30 мкм для образца № 5 (рисунок 2.8).

Такие значения ширины диффузионной зоны выше, чем для покрытия, нанесенного электродуговым методом: согласно работе [25] диффузия меди из бронзового покрытия в сталь составила порядка 3 мкм, а диффузия алюминия не превысила 10 мкм.

По результатам исследования также была обнаружена диффузия алюминия и меди в дендриты железа, пронизывающие структуру самого покрытия.

2.2.4 Металлографическое исследование

При исследовании поперечных шлифов экспериментальных образцов на оптическом микроскопе были определены толщины наплавленной алюминиевой бронзы. Для образцов № 1–3 вследствие неравномерности получаемого покрытия было проведено по два цикла лазерной наплавки и толщины наплавленной бронзы в среднем составили:

- для образца № 1 – 95 мкм;
- для образца № 2 – 1115 мкм (наиболее неравномерное по толщине покрытие с минимальным значением порядка 100 мкм);
- для образца № 3 – 1896 мкм.

Для образцов № 4 и 5 (с равномерным слоем бронзового покрытия при проведении одного цикла наплавки) в среднем толщины покрытия составили 936 и 1047 мкм соответственно.

На рисунке 2.9 приведены для сравнения профили покрытия на образцах № 2 и 5.

Видно, что при использовании небольшой мощности лазера в 1000 Вт (см. рис. 2.5 а) покрытие получается бугристым, разница по толщине (на гребне и во впадине) полученной наплавки может отличаться практически в пять раз. В то время как при увеличении мощности лазера вдвое (см. рис. 2.5 б) покрытие становится более равномерным по толщине (разница не превышает 16 %). Подобную тенденцию в технологии нанесения покрытий с использованием аддитивных технологий отмечали и авторы работы [9].

Шлифы образцов после травления исследовались с использованием оптической микроскопии для определения термического влияния на структуру материала подложки (стали). В ходе исследования были оценены размеры зоны термического влияния (ЗТВ): для образца № 1 ширина ЗТВ составляет порядка 800 мкм; № 2 – 1167 мкм; № 3 – 1191 мкм; № 4 – 1473 мкм; № 5 – 1892 мкм.

Согласно результатам оптической микроскопии ЗТВ имеет Видманштеттову структуру, характерную для ускоренного охлаждения перегретой стали. Наблюдаемое строение ЗТВ сопоставимо со структурой сварных соединений. Полученные данные о ЗТВ экспериментальных образцов можно сопоставить с результатами работы [35], где в зоне, граничащей с наплавленным бронзовым покрытием, микротвердость стали показывает максимум и составляет порядка 600 *HV*, что косвенно свидетельствует об образовании зоны термического влияния с неравновесной кристаллизацией.

По мере увеличения мощности лазера ширина ЗТВ растет, а структура становится более грубой (рисунок 2.10). Так для образца № 1 размеры кристаллов в ЗТВ приближаются к 30 мкм, а для образца № 5 – к 100 мкм. В то время как для основного металла (под ЗТВ) характерна ферритно-перлитная структура с размерами зерна порядка 10–15 мкм.

2.2.5 Анализ микротвердости наплавленного покрытия

Микротвердость наплавленного покрытия для исследованных образцов характеризуется разбросом полученных значений *HV* по ширине покрытия, что хорошо согласуется с наблюдаемой структурой.

Для образца № 1 характерно малое сплавление материала подложки с материалом покрытия, поэтому в верхней части покрытия показатель микротвердости составил всего 151 *HV*; при измерении микротвердости по направлению к подложке показатель *HV* растет и в зоне образования дендритов железа (почти у контактной зоны, см. рис. 4а) достигает максимума в 270 *HV*.

Для образцов № 2–5 структура покрытия по всей ширине соответствует структуре композиционного материала, однако, как отмечалось выше, по мере увеличения мощности лазера структура становится равномерней, что можно проследить и по микротвердости. Результаты измерения микротвердости приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Разброс значений микротвердости образцов

образец № 2	образец № 3	образец № 4	образец № 5
173 до 382	от 191 до 368	от 216 до 347	от 232 до 328

Микротвердость основного металла (замеры проводились после зоны ЗТВ) для всех образцов в среднем составляет 202 HV, что характерно для используемой в качестве материала подложки марки стали.

Для всех образцов средний показатель микротвердости покрытия выше, чем у материала покрытия самого по себе (HV алюминиевой бронзы составляет 160) и выше, чем у материала подложки (используемой конструкционной стали), что характерно для композиционных материалов.

Согласно работе [26], микротвердость покрытия из алюминиевой бронзы, нанесенной плазменным напылением на сталь, в зависимости от условий напыления варьировалась от 100 до 160 HV, что в среднем в полтора раза меньше, чем для наших экспериментальных образцов. А в работе [35] микротвердость покрытия из той же марки алюминиевой бронзы, наплавленной лазером на сталь, составила в среднем 200–220 HV.

2.2.6 Анализ результатов триботехнических испытаний

Результаты триботехнических испытаний приведены в таблице 7. Коэффициент трения приведен для разных нагрузок в 200, 300 и 400 Н; интенсивность изнашивания приведена для длины пути трения в 70 м. Для образца № 1 особенности нанесенного покрытия (его неравномерность и несплошность) не позволили провести испытания без значительной погрешности, поэтому результаты для этого образца в таблице 7 не приведены.

Таблица 7 – Коэффициент сухого трения и интенсивность изнашивания

покрытия экспериментальных образцов

№ п/п	Коэффициент трения			Интенсивность изнашивания
	200 Н	300 Н	400 Н	
2	0,389	0,537	0,545	$6,96 \times 10^{-5}$
3	0,422	0,563	0,563	$5,79 \times 10^{-5}$
4	0,539	0,548	0,568	$4,62 \times 10^{-5}$
5	0,541	0,548	0,574	$4,25 \times 10^{-5}$

Коэффициент сухого трения для исследованных образцов составил 0,389–0,574, что в несколько раз больше, чем для образцов, покрытие которых проводилось плазменным напылением (согласно [26] коэффициент трения при нагрузке 100 Н составил от 0,02 до 0,08). Однако наши данные сопоставимы с данными [35], где для полученного лазерной наплавкой бронзового Cu–10Al–1Fe покрытия на стали коэффициент сухого трения варьировался от 0,58 до 0,79 в зависимости от параметров проводимой наплавки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучены технологические процессы нанесения покрытий конструкционных материалов, а также современные разработки в области применения аддитивных технологий для получения износостойких покрытий из алюминиевой бронзы.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) Структура покрытия из алюминиевой бронзы, нанесенной на сталь с использованием аддитивных технологий, соответствует структуре композиционного материала;

2) Увеличение мощности лазера делает профиль покрытия более однородным по толщине, плотным и гладким, а структуру более равномерной, но, в то же время, и более грубой;

3) Термическое воздействие при нанесении покрытия способствует диффузии алюминия и меди из бронзы в сталь с образованием диффузионной зоны шириной 5–30 мкм, что должно способствовать сцеплению материала покрытия с материалом подложки;

4) При нанесении покрытия наблюдаемый перегрев влияет на материал подложки (стали) с образованием участков Видманштеттовой структуры, протяженность которых по толщине металла зависит от мощности лазера;

5) Микротвердость нанесенного покрытия в 1,5–2,5 раза выше, чем микротвердость алюминиевой бронзы или используемой марки стали в чистом виде;

6) Абсолютные значения твердости по толщине покрытия согласуются с его структурой, то есть наблюдаются колебания;

7) По результатам триботехнических испытаний данное покрытие не может рассматриваться как антифрикционное, а скорее, как перспективный материал для покрытия, например, тормозных колодок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Prasad, B.K. Sliding wear behaviour of bronzes under varying material composition, microstructure and test conditions // *Wear*. – 2004. – Vol. 257. – P. 110–123.
2. Ghorbani, M. Wear and friction characteristics of electrodeposited graphite–bronze composite coatings / M. Ghorbani, M. Mazaheri, A. Afshar // *Surface and Coatings Technology*. – 2005. – Vol. 190. – P. 32–38.
3. Kimura, T. Sliding wear characteristic evaluation of copper alloy for bearing / T. Kimura, K. Shimizu, K. Terada // *Wear*, 2007. – Vol. 263. – P. 586–591.
4. Ünlü, B.S. Investigation of tribological and mechanical properties of metal bearings // *Bull. Mater. Sci.* – 2009. – Vol. 32, №. 4. – P. 451–457.
5. Gao F. Tribological behavior of T–401/tin-bronze composite coating deposited by HVOF on the bushing of planet journals / F. Gao, R. Liu, X.J. Wu // *Wear*. – 2010. – Vol. 269. – P. 724–732.
6. Equey, S. Wear and frictional mechanisms of copper-based bearing alloys / S. Equey, A. Houriet, S. Mischler // *Wear*. – 2011. – Vol. 273. – P. 9–16.
7. Защитные покрытия : учеб. пособие / М. Л. Лобанов, Н. И. Кардолина, Н. Г. Россина, А. С. Юровских. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 200 с.
8. Щербаков, Ю. В. Современные способы восстановления и упрочнения деталей : учебное пособие / Ю. В. Щербаков, А. М. Кашфуллин;. – Пермь : ИПЦ «Прокрость», 2018. – 191 с.
9. Schmidt, M. Direct laser deposition of Cu alloy on forming tool surfaces – Process window and mechanical properties / M. Schmidt, R. Kolleck, A. Grimm, R. Veit, K. Bartkowiak // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2010. – Vol. 59. – P. 211–214.
10. Wang, H. Study on friction and wear properties of plasma and laser coatings of aluminium bronze powder / H. Wang, Z. Wang, Y. Lu, Y. Li, G. Tian // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vols. 148–149. – P. 621–627.
11. Хаскин, В. Ю. Процессы упрочнения и нанесения покрытий с использованием лазерного излучения: (обзор) / В. Ю. Хаскин // *Автомат. сварка*. – 2008. – № 12. – С. 24–32.

12. Pokhmurska, H. V. Wear resistance of laser-modified arc-sprayed coatings made of FMI-2 powder wires / H. V. Pokhmurska, V. M. Dovichnyk, M. M. Student // Mater. Sci. — 2003. — 39, № 4. — P. 533–538.
13. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца, – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
14. Технологические лазеры: справ.: в 2 т. / под ред. Г. А. Абильситова, – М.: Машиностроение, 1991. – Т. 1: Расчет, проектирование и эксплуатация. – 432 с.
15. Laserstrahlschweißen mit pulverförmigem Schweißzusatz / Edelstahl-Mechanik GmbH // Praktiker. – 2007. – № 3. – S. 68 – 69.
16. Плешка, Е.Д. Лазерное упрочнение легированных железных покрытий / Е.Д. Плешка // Электронная обработка материалов. – 2007. №. 4. – С. 79-85.
17. Литунов, С.Н. Обзор и анализ аддитивных технологий: Часть 1 [Текст] / С.Н. Литунов, В.С. Слободенюк, Д.В. Мельников // Омский научный вестник. – 2016. – № 1 (145). – С. 12-17.
18. Чемодуров, А.Н. Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения [Текст] / А.Н. Чемодуров // Известия ТугГУ. Технические науки. – 2016. – № 8. – С. 210-217.
19. Milewski, J.O. Additive Manufacturing of Metals. From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry. Springer Series in Materials Science [Text] // J.O. Milewski. – Cham: Springer International Publishing AG. – 2017. P – 343.
20. Морунов, И. В. Принцип лазерной наплавки порошковыми материалами в среде защитных газов коррозионно-стойких сталей / И. В. Морунов, С. Е. Крылова, С. П. Оплеснин // Сварка. Реновация. Триботехника: тезисы докладов VII Уральской научно-практической конференции. – 2017. – С. 27-31.

21. Тарасова, Т.В. Формирование покрытий методом лазерной наплавки порошков титана и карбида кремния на поверхность малоуглеродистой стали / Т. В. Тарасова, Е. В. Попова // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2013. – Т. 35. – № 11. – С. 1487-1500.
22. Zeng Xiaoyan. Investigation of auto-feeding powder apparatus and technology for laser cladding / Zeng Xiaoyan, Zhu Beidi, Tao Zengyi, Fang Dachun, Cui Kun (Huazhong University of Science and Technology, Wuhan) // *Chinese Journal of Lasers*. – 1993. – № 3. – P. 210–214.
23. Кубанова, А. Н., Особенности материалов и технологий аддитивного производства изделий / А.Н. Кубанова, А.Н. Сергеев, Н.М. Добровольский, А.Е. Гвоздев, П.Н. Медведев, Д.В. Малий // *Чебышевский сборник*. – 2019. – №3 (71). С. 452 – 473.
24. Yasar, M. Investigation of wear behaviors of C95200–C95300 Cu–Al–Fe alloys / Yasar M., Demiral M., Ozyurek D., Unal M. // *Industrial Lubrication and Tribology*. – 2009. Vol. 61, №1. P. 40–46.
25. Zhang, Z. High temperature performance of arc-sprayed aluminum bronze coatings for steel / Z. Zhang, D. Li, S. Wang // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. – 2006. Vol. 16. – P. 868–872.
26. Alam, S. Friction and wear characteristics of aluminum bronze coatings on steel substrates sprayed by a low pressure plasma technique / S. Alam, S. Sasaki, H. Shimura. // *Wear*. – 2001. Vol. 248. –P. 75–81.
27. Liu, L. Additive manufacturing of steel–bronze bimetal by shaped metal deposition: interface characteristics and tensile properties / L. Liu, Z. Zhuang, F. Liu, M. Zhu // *Int. J. Adv. Manuf. Technol*. – 2013. – Vol. 69. – P. 2131–2137.
28. Hasebe, M. Calculation of phase diagrams of the iron–copper and cobalt–copper systems / M. Hasebe, T. Nishizawa // *Calphad*. – 1980. – Vol. 4. – №2. –P. 83–100.
29. Chen, Q. The Fe–Cu system: a thermodynamic evaluation / Q. Chen, Z. Jin // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 1995. – Vol. 26A. –P. 417–426.

30. Wang, C.P. Formation of core-type macroscopic morphologies in Cu–Fe base alloys with liquid miscibility gap / C.P. Wang, X.J. Liu, Y. Takaku, I. Ohnuma, R. Kainuma, K. Ishida // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2004. – Vol. 35A. – P. 1243–1253.
31. He, J. Behavior of Fe-rich phase during rapid solidification of Cu–Fe hypoperitectic alloy / J. He, J. Zhao // *Materials Science and Engineering A*. – 2005. – Vol. 404. –P. 85–90.
32. He, J. Solidification microstructure and dynamics of metastable phase transformation in undercooled liquid Cu–Fe alloys / J. He, J. Zhao, L. Ratke // *Acta Materialia*. – 2006. – Vol. 54. –P. 1749–1757.
33. Liu, S. Novel insight into evolution mechanism of second liquid-liquid phase separation in metastable immiscible Cu–Fe alloy / S. Liu, J. Jie, B. Dong, Z. Guo, T. Wang, T. Li // *Materials and Design*. – 2018. – Vol. 156. – P. 71–81.
34. Liu S., Jie J., Guo Z., Yin G., Wang T., Li T. Solidification microstructure evolution and its corresponding mechanism of metastable immiscible Cu₈₀Fe₂₀ alloy with different cooling conditions / S. Liu, J. Jie, Z. Guo, G. Yin, T. Wang, T. Li // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2018. – Vol. 742. –P. 99–106.
35. Freiße, H. Investigations on dry sliding of laser clad aluminum bronze / H. Freiße, A. Langebeck, H. Köhler, T. Seefeld, F. Vollertsen // *Manufacturing Rev.* – 2016. – Vol. 3, 13.
36. Dai, X. Formation mechanism and improved properties of Cu₉₅Fe₅ homogeneous immiscible composite coating by the combination of mechanical alloying and laser cladding / X. Dai, M. Xie, S. Zhou, C. Wang, M. Gu, J. Yang, Z. Li // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2018. – Vol. 740. – P. 194–202.
37. Ohtani, H. Solid/liquid equilibria in Fe–Cu based ternary systems / H. Ohtani, H. Suda, K. Ishida // *ISIJ International*. – 1997. – Vol. 37, №3. –P. 207–216.
38. Miettinen, J. Thermodynamic description of the Cu–Al–Fe system at the Cu–Fe side // *Calphad*. – 2003. – Vol. 27, №1. –P. 91–102.
39. Raghavan, V. Al–Cu–Fe (aluminum–copper–iron) // *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. – 2005. – Vol. 26, №1. –P. 59–64.