

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 9 (81)
сентябрь
2011

Издается с января 2005 г.

Главный редактор
д-р техн. наук,
Ю.В. ПАНФИЛОВ

**Председатель редакционного
совета**

д-р техн. наук, заслуженный
деятель науки и техники РФ
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

**Заместитель главного
редактора**

д-р физ.-мат. наук
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

**Заместители председателя
редакционного совета:**

д-р техн. наук
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН

д-р техн. наук
А.В. КИРИЧЕК

д-р техн. наук
О.В. ЧУДИНА

Редакционный совет:

Ю.П. АНКУДИМОВ

А.П. БАБИЧЕВ

В.П. БАЛКОВ

В.М. БАШКОВ

А.И. БЕЛИКОВ

С.Н. ГРИГОРЬЕВ

В.А. ЗЕМСКОВ

С.А. КЛИМЕНКО

В.А. ЛАШКО

В.А. ЛЕБЕДЕВ

В.В. ЛЮБИМОВ

Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО

Х.М. РАХИМЯНОВ

Б.П. САУШКИН

В.П. СМОЛЕНЦЕВ

А.М. СМЫСЛОВ

Г.А. СУХОЧЕВ

В.П. ТАБАКОВ

В.А. ШУЛОВ

М.Л. ХЕЙФЕЦ

Редакция:

Е.П. ЗЕМСКОВА

Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Журнал распространяется по подписке,
которую можно оформить в любом
почтовом отделении (индексы
по каталогам: "Роспечать" 85159,
"Пресса России" 39269, "Почта России"
60252) или в издательстве.

Тел.: (499) 269-52-98, 269-66-00,
268-40-77.

Факс: (499) 269-48-97.

E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован
в Министерстве РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств
массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации
ПИ № 77-17733 от 09.03.04 г.

СОДЕРЖАНИЕ



МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Кузнецов В.П., Макаров А.В., Поздеева Н.А., Саврай Р.А.,
Юровских А.С., Малыгина И.Ю., Киряков А.Е. Повышение прочности,
теплостойкости и износостойкости деталей из цементованной стали 20X
наноструктурирующим фрикционным выглаживанием на токарно-фрезерных
центрах 3



ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Агеев Е.В., Семенихин Б.А., Агеева Е.В., Латыпов Р.А. Оценка эффективности
применения твердосплавных порошков, полученных электроэрозионным
диспергированием отходов твердых сплавов, при восстановлении
и упрочнении деталей композиционными гальваническими покрытиями 14

Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Мельшанов А.Ф., Москвитин Г.В.,
Пугачёв М.С. Свойства медных покрытий, нанесенных газодинамическим
напылением 17

Григорьев С.Н., Фоминский В.Ю., Романов Р.И., Калустян Г.Г., Бычкова М.Я.
Влияние режимов импульсного лазерного осаждения на трибомеханические
свойства тонкопленочных покрытий Mo-Se-Ni-C 23



ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Смоленцев В.П., Кузнецов И.Ю., Осеков А.Н. Технология формирования
теплообменных локальных поверхностей с использованием электрических
методов обработки 32



ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Бабичев А.П., Иванов В.В., Худoley С.Н. Исследование процесса
формирования нанопрофиля цинкового покрытия
при вибрационной механохимической обработке углеродистых сталей 41



ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ

Панфилов Ю.В., Клименко С.А. Отчет о XI Международной научно-технической
конференции "Инженерия поверхности и реновация изделий" 46

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов,
публикуемых в журнале "Упрочняющие технологии и покрытия", допускаются
со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий
для публикации трудов соискателей ученых степеней

УДК 620.17:669.11.14:553.65

В.Е. Архипов, А.Ф. Лондарский, А.Ф. Мельшанов, Г.В. Москвитин, М.С. Пугачёв
(Учреждение РАН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова, г. Москва)
E-mail: mnsy@mail.ru

Свойства медных покрытий, нанесенных газодинамическим напылением

Получена модель влияния основных технологических параметров напыления на структуру и свойства покрытия. Показано, что основным механизмом формирования структуры и свойств при напылении с низкой температурой потока воздуха является деформация пластичных частиц меди корундом, а при использовании высокой температуры напыления на структуру и свойства покрытия меди также оказывает влияние температура потока воздуха. Получены зависимости твердости и толщины наносимого покрытия от технологических параметров напыления (температуры, расстояния до напыляемой поверхности, скорости перемещения сопла относительно поверхности и числа циклов напыления (времени обработки)). Показана возможность формирования слоя меди твердостью до ≈ 1250 МПа, что соответствует твердости латуни со степенью деформации 30...50 %. Сформированы возможные области применения технологии газодинамического напыления меди в машиностроении.

Ключевые слова: пластическая деформация, покрытие, твердость, наклеп, сопло, удельное электрическое сопротивление.

A sample piece of agency of the basic technological parameters of a spraying on structure and properties of covering is obtained. It is displayed, that the basic mechanism of shaping of structure and properties at a spraying with low temperature of a stream of air is the strain of plastic corpuscles of cuprum corundum. And at use of a heat of a spraying on structure and properties of covering of cuprum as the temperature of a stream of air exercises influence. Dependences of hardness and width of a plotted covering on technological parameters of a spraying are gained (temperatures, distances to a plotted surface, speed of migration of a nozzle concerning a surface and a cycling of a spraying (processing time)). Possibility of shaping of a stratum of cuprum with hardness to ≈ 1250 МПа is displayed, that matches to hardness of yellow metal with an amount of reduction of 30...50 %. Possible areas of application of production engineering gas-dynamic cuprum dusting in engineering industry are generated.

Keywords: flowage, covering, hardness, cold-work, nozzle, specific electric resistance.

Газодинамические установки (ГДУ) представляют собой малогабаритные устройства, в которых за счет использования аэродинамического сопла можно получать струю газа – воздуха со сверхзвуковой скоростью. При введении в струю воздуха твердых частиц, например корунда, можно проводить подготовительные операции по очистке поверхности от разнообразных загрязнений или, используя пластичные частицы (меди, цинка, алюминия), наносить на поверхность изделий разнообразные по свойствам защитные, декоративные или токопроводящие покрытия [1, 2].

Несмотря на то что возможность напыления качественных покрытий с помощью ГДУ получила экспериментальное и практическое обоснование в начале 2000-х годов, этот метод уже нашел применение для восстановления изношенных поверхностей деталей, а также устранения брака, допущенного при механической обработке или литье изделий [2].

Между тем есть области машиностроения, где использование газодинамического нанесения покрытия, например медного, позволит решить не только задачи повышения ресурса деталей, но и улучшения экологической безопасности производства. Повышение ресурса может быть обеспечено нанесением каче-

ственного медного покрытия толщиной 10^{-4} м и более на сопряженные поверхности деталей. В этом случае целесообразно рассчитывать на улучшение прирабатываемости рабочей поверхности детали, например шестерен, и повышение триботехнических характеристик узлов трения.

Коэффициент трения скольжения меди по среднеуглеродистой стали при сухом трении пар или использовании смазки не уступает таким сопряжениям, как латунь–сталь или бронза–сталь, которые достаточно широко используются в машиностроении [3]. Например, на металлургических предприятиях применяют подшипниковые узлы трения – скольжения, в которых одна из деталей изготовлена из дефицитных цветных металлов и сплавов (медь, бронза, латунь), а другая – из стали. Обычно это пары трения типа стальной вал – бронзовая втулка, стальная пята – латунный подпятник, стальная вилка шарнира – бронзовый вкладыш и т.п. [4].

Решение проблемы повышения экологической безопасности производства может быть обеспечено за счет замены вредных технологических процессов. Например, медные покрытия на деталях из электро-технической стали получают с использованием галь-

ванического метода осаждения. При этом процесс проводят последовательно в две стадии в цианистых и сернокислотных ваннах, что создает проблемы по дополнительной защите персонала и дальнейшей утилизации отходов производства.

В данной работе рассмотрены вопросы повышения качества и проведена оценка влияния основных технологических параметров газодинамического напыления на структуру и свойства медного покрытия, формируемого на поверхности стали.

При проведении экспериментов по напылению медного покрытия использовали ГДУ мод. ДИМЕТ-404, изготовленную ООО "Обнинским центром порошкового напыления", которая позволяет проводить обработку поверхности как твердыми, так и пластичными частицами с подогревом потока воздуха. Для напыления применяли порошок марки С-01-01 производства Обнинского центра порошкового напыления, содержащий частицы технически чистой меди и корунда (ТУ 1793-021-40707672-00) [2]. Покрытие наносили на плоские образцы толщиной 50 мм, изготовленные из среднеуглеродистой конструкционной стали 45 в состоянии поставки.

Основные изменяемые технологические параметры газодинамического напыления: расстояние от сопла до напыляемой поверхности L ; температура потока воздуха T ; расход порошка m и скорость перемещения сопла относительно поверхности образца v . Давление воздуха p при проведении экспериментов поддерживали постоянным $6 \cdot 10^5$ Па.

Температуру потока воздуха измеряли термопарой, расположенной от среза сопла на расстоянии 10 и 20 мм, при разном положении регулятора температуры на блоке управления установки ДИМЕТ-404. Термопару, изготовленную из сплава хромель–алюмель, закрепляли в специальной глине, которую высушивали при комнатной температуре и размещали так, чтобы спай термопары находился вдоль направления и по центру потока воздуха. Расход порошка контролировали за счет взвешивания отобранных проб на электронных весах с точностью $0,01 \cdot 10^{-3}$ кг.

Состояние тонкой структуры меди в зависимости от параметров напыления оценивали на основе измерения удельного электрического сопротивления (УЭС) по схеме двойного моста [5]. Как известно, УЭС материала не зависит от размеров образца и определяется его химическим составом и состоянием структуры.

Согласно правилу Матиссена, УЭС чистых металлов и твердых растворов низкой концентрации можно представить в виде [5]:

$$\rho = \rho_0 + \rho_t, \quad (1)$$

где ρ_0 — остаточное сопротивление;

ρ_t — часть сопротивления, зависящая от температуры.

Считается, что возрастание электрического сопротивления при пластической деформации обусловлено увеличением искажения кристаллической решетки. Кроме того, так как остаточное сопротивление обусловлено наличием примесей и дефектов строения, то любое воздействие на материал, которое повышает их число, приводит к увеличению удельного сопротивления.

Метод исследования медного покрытия с помощью измерения УЭС был выбран из предположения, что при газодинамическом напылении частицы меди могут подвергаться пластической деформации при соударении с подложкой и частицами корунда [2]. В таком случае пластическая деформация меди должна приводить к увеличению точечных (вакансии и внедренные атомы) и протяженных (дислокаций) дефектов, наличие которых приводит к искажению решетки и повышению уровня микронапряжений [6].

При исследовании УЭС и оценке результатов следует учитывать, что основной вклад в его повышение вносят вакансии и межузельные атомы, а влияние границ зерен и дислокаций незначительно [5]. Причем при нагреве металлов проходят процессы возврата, при которых точечные дефекты аннигилируют и их влияние на УЭС можно не учитывать. В этом случае разницу в величине электрического сопротивления можно отнести за счет наличия таких дефектов в структуре, как поры или другие несовершенства, приводящие к локальному разрыву металла и увеличению удельного сопротивления.

Таким образом, в результате исследования УЭС предполагалось оценить влияние технологических параметров напыления на дефектность макро- и микроструктуры формируемого на поверхности медного покрытия (поры, дефекты структуры, границы раздела).

Твердость измеряли при нагрузке HV 0,05/10 (ГОСТ 2999–75) по толщине нанесенного медного покрытия на специально подготовленных образцах. На этих же образцах (шлифах) визуально оценивали наличие дефектов в покрытии и разрывов на границе медь–сталь. Кроме того, на инструментальном микроскопе проводили измерение толщины медного покрытия с точностью 10^{-5} м. Динамику роста толщины медного покрытия оценивали как функцию технологических параметров напыления, а также времени обработки, которое варьировали за счет изменения числа перемещений (циклов N) сопла относительно обрабатываемой поверхности без изменения траектории движения.

Зависимость температуры воздуха от расстояния до сопла

Положение регулятора температуры	Температура воздуха T , °С, на расстоянии от сопла L , мм	
	10	20
1	180	180
2	270	–
3	360	340
4	450	–
5	540	500

Примечание. Измерение проводили после включения регулятора температуры на соответствующую позицию и нахождения спая термопары под воздействием потока воздуха в течение 30...40 с.

Измерение температуры потока воздуха показало, что она меняется достаточно равномерно при изменении положения регулятора температуры на блоке управления установки ДИМЕТ-404. Перевод температурного режима на следующую позицию приводит к повышению температуры воздуха на 90 °С (таблица). С увеличением расстояния от сопла до поверхности происходит незначительное падение температуры воздуха.

Предварительные эксперименты по исследованию режимов и параметров работы ГДУ, а именно температуры и расхода порошка, показали, что для получения стабильных физико-механических характеристик покрытия важно учитывать и соблюдать следующее правило. При установлении температурного режима на блоке управления и наличии сигнальной индикации о готовности к работе необходимо выждать не менее 30 с, перед тем как осуществить процесс напыления.

Этого периода времени достаточно для того, чтобы температура воздуха стала максимальной и стабильной.

Разница в температуре, измеренной в момент когда на блоке температурного режима "загорелся" сигнал достижения температуры и после выдержки в течение 30 с может достигать 100 °С и более. Особенно учитывать данный фактор важно при напылении покрытий из материалов, свойства которых существенно зависят от температуры.

Расход порошка не имеет линейной зависимости от положения регулятора подачи порошка на блоке управления. При положении регулятора на минимальном значении расход порошка очень неравномерен, что может оказывать значительное влияние на толщину, свойства и качество наносимого покрытия.

Цель работы – на основе полученных результатов разработать модель формирования покрытия газоди-

намическим напылением, которая показывала бы влияние основных факторов на структуру и свойства меди.

Установлено, что основным фактором, влияющим на структуру и свойства медного покрытия, нанесенного на сталь, является температура потока воздуха, который носит многокомпонентный характер. Повышение температуры оказывает влияние на скорость потока воздуха и, следовательно, частиц меди и корунда, вводимых в поток.

Повышение энергии частиц может сопровождаться более сильным соударением их между собой и подложкой, что должно приводить к увеличению степени деформации пластичных частиц и существенному наклепу меди [6]. Однако повышение температуры воздуха может приводить к более значительному прогреву частиц металла и реализации процесса деформирования в пластичном состоянии. В этом случае эффект упрочнения (наклеп) при деформации нагретых частиц будет не столь ощутимым (число микродефектов, микронапряжения и т.д.). Кроме того, нельзя исключать возможного влияния температуры потока воздуха на структуру и свойства медного покрытия за счет прохождения процессов, характерных для металлов, подвергнутых деформации при последующей термической обработке (отпуске) [7].

Если рассматривать основные исследуемые технологические параметры напыления, то можно отметить следующее:

1. Увеличение температуры потока воздуха T должно сопровождаться повышением скорости частиц, а также возрастанием влияния теплового потока на частицы и наносимый слой.

2. Увеличение скорости перемещения сопла относительно поверхности v не должно влиять на энергию частиц, но должно уменьшать время обработки и, соответственно, снижать тепловое воздействие на медное покрытие.

3. Увеличение дистанции напыления L должно приводить к снижению скорости и энергии частиц и уменьшать влияние потока тепла на покрытие.

Визуальная оценка медного покрытия, нанесенного на поверхность образца при перемещении сопла относительно поверхности, позволяет определить, что он имеет форму сегмента красноватого оттенка. При напылении с температурой нагрева ≈ 540 °С на поверхности нанесенного слоя наблюдается рыхлый слой оксидов меди. При продолжении напыления форма слоя начинает приближаться к треугольной и достигает ее при пяти перемещениях сопла относительно поверхности (циклов напыления) без изменения траектории движения (рис. 1, см. с. 3 обложки).

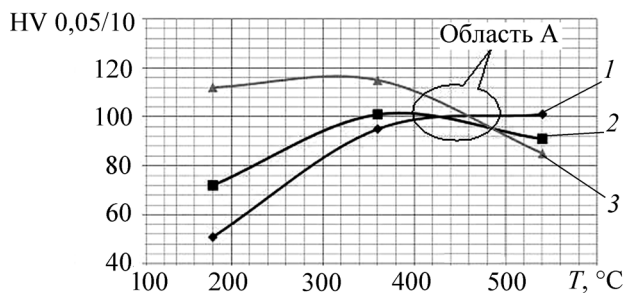


Рис. 2. Зависимости твердости покрытия от температуры воздуха ($L = 10$ мм) при числе циклов напыления: 1 – 1; 2 – 3; 3 – 5

При возрастании температуры потока воздуха от 180 до 540 °С при постоянном времени напыления твердость медного покрытия существенно повышается с 480 до 980 МПа соответственно (рис. 2). Выявлено, что с увеличением скорости потока воздуха за счет возрастания энергии твердых и пластичных частиц свойства медного покрытия значительно меняются.

Более значительная энергия соударения должна приводить к повышению деформации частиц меди и, соответственно, увеличению степени наклепа, т.е. проявляется влияние такого технологического параметра процесса, как температура на свойства формируемого медного покрытия через возрастание скорости потока воздуха и, соответственно, частиц.

Однако с увеличением времени напыления (три и, особенно, пять проходов – циклов) зависимость твердости меди от температуры напыления имеет несколько иной характер. При использовании температуры потока воздуха 180 °С твердость меди значительно возрастает и достигает 1117 МПа. Так как скорость и энергия частиц не меняются при постоянной температуре напыления, то повышение твердости может быть обусловлено только неоднократным воздействием на медь частицами корунда и ее наклепом. При этом неоднократное воздействие (удары частицами корунда) производится по меди, имеющей минимальную температуру нагрева. В данном случае выявлена зависимость твердости меди от времени обработки при низкой температуре напыления.

Аналогичная, но не столь существенная тенденция повышения твердости меди при возрастании времени обработки наблюдается при напылении с температурой ≈ 360 °С. Дальнейшее повышение температуры напыления до ≈ 540 °С приводит к снижению твердости медного покрытия. При этом снижение твердости более существенно при увеличении времени (числа циклов) напыления.

В этом случае можно сделать предположение о том, что на снижение твердости медного покрытия

могут оказывать влияние два фактора: нагрев частиц меди в потоке горячего воздуха и прохождение деформации в пластичном состоянии; тепловое воздействие потока воздуха на медное покрытие и прохождение в нем процессов, присутствующих в деформированных металлах при последующей термической обработке [7].

Теплопроводность в твердых телах описывается уравнением, в котором кроме геометрических и теплофизических характеристик и параметров материалов присутствуют градиент температуры ΔT и время t [8]. При повышении температуры внешней среды градиент температуры ΔT между медью и потоком воздуха возрастает, частицы меди должны прогреваться в большей степени за время нахождения в нагретой среде. Однако при этом повышается скорость воздушного потока и, соответственно, частиц, что приводит к уменьшению нахождения их в потоке тепла и времени нагрева и прогрева t .

В таком случае с достаточной степенью вероятности можно сказать, что если частицы меди при повышении температуры воздушного потока имеют дополнительный прогрев, то он должен быть весьма незначительным. Кроме того, как показано в ряде исследований, температура газа в сопле значительно снижается за счет адиабатического расширения. Снижение температуры нивелирует возможное влияние предварительного нагрева газа, что в итоге не приводит к дополнительному прогреву частиц меди при напылении с использованием высоких температур [1].

В этом случае понижение твердости меди при высокой температуре напыления происходит только за счет теплового воздействия потока воздуха на покрытие и прохождения в нем процессов, происходящих в металлах, подвергнутых последующей термической обработке (отпуску).

На основе анализа дюрOMETрических результатов выявлена зависимость твердости меди от времени напыления при высокой температуре потока воздуха.

Предварительная оценка результатов дюрOMETрического исследования меди показала, что при низкой температуре напыления основным механизмом формирования структуры и свойств медного покрытия является деформация твердыми частицами пластичных. При более высокой температуре напыления на свойства формируемого покрытия оказывает влияние не только деформация твердыми частицами пластичных частиц, но и прогрев наносимого покрытия потоком воздуха.

Полученные результаты показывают наличие технологических параметров напыления (температура ≈ 450 °С), при которых твердость медного покрытия не зависит от времени (числа циклов) обработки (см. рис. 2, область А). То есть, при использовании таких

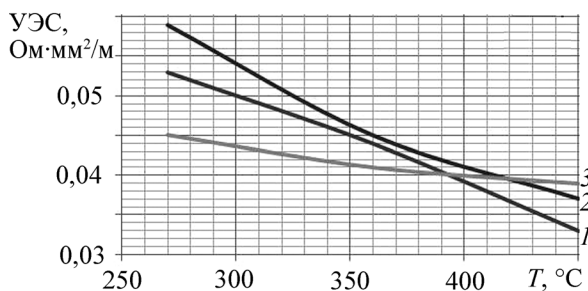


Рис. 3. Зависимости УЭС меди от параметров напыления:
 1 — $v = 0,01$ м/с, $L = 10$ мм; 2 — $v = 0,01$ м/с, $L = 20$ мм;
 3 — $v = 0,02$ м/см, $L = 10$ мм

режимов можно получать покрытия разной толщины с одинаковыми свойствами (механическими характеристиками).

Исследование УЭС медного покрытия, напыленного в три прохода с расходом порошка 0,4 г/с, показало, что оно снижается при повышении температуры напыления (рис. 3, линия 1).

Как видно из представленных результатов, тепловое воздействие потока воздуха оказывает существенное влияние на УЭС. При одинаковом времени обработки повышение температуры напыления с 270 до 360 °C приводит к уменьшению УЭС, что может быть обусловлено только тепловым влиянием потока воздуха на состояние тонкой структуры покрытия.

Еще более заметно влияние теплового потока на состояние тонкой структуры меди при дальнейшем повышении температуры напыления. В слое меди при увеличении температуры напыления происходят процессы, характерные для деформированных металлов, подвергнутых отпуску, что в итоге приводит к получению равновесной структуры с минимумом микродефектов в решетке и, соответственно, понижению уровня микронапряжений в сравнении со структурой, полученной при использовании низких температур [7].

Измерение УЭС покрытия, нанесенного с увеличенной дистанцией напыления при разной температуре потока воздуха, показало аналогичную зависимость, т.е. его снижение при повышении температуры напыления. Причем при напылении с более дальней дистанции УЭС меди имеет более высокое значение с использованием как низкой, так и высокой температуры потока воздуха (см. рис. 3, линия 2).

В соответствии с выявленными и приведенными выше закономерностями более высокое сопротивление меди при напылении при 450 °C может быть связано с понижением температуры газового потока и меньшим тепловым влиянием его на структуру и свойства покрытия.

УЭС меди, полученные при использовании средней температуры напыления, мало отличаются, что может служить косвенным подтверждением незначительных изменений в условиях напыления.

В соответствии с выявленными выше закономерностями влияния температуры на формирование покрытия, увеличение скорости перемещения сопла относительно поверхности образца фактически должно снижать время напыления и, соответственно, воздействие твердыми частицами, а также уменьшать влияние теплового потока воздуха при высоких температурах нанесения меди.

Проведенные исследования УЭС показали, что при напылении при низкой температуре оно становится ниже, что может свидетельствовать об уменьшении деформации и наклепа. При использовании более высоких температур УЭС меди выше, что может трактоваться как снижение теплового влияния и, соответственно, замедление процессов, происходящих при отпуске деформированных металлов (см. рис. 3, линия 3).

Последующая дополнительная тепловая обработка воздухом (температура 360°, $N = 15; 20$) медного покрытия, нанесенного при температуре 360 °C и дистанции 10 мм, незначительно влияет на УЭС. Иначе говоря, длительное тепловое воздействие при данной температуре не сказывается на тонкой структуре и свойствах формируемого медного покрытия.

Тепловая обработка аналогичного образца воздухом (температура 450 °C, $N = 15; 20$) позволяет понизить УЭС до 0,034 Ом·мм²/м, т.е. до значения, которое имеет медное покрытие, нанесенное на поверхность стали при температуре 450 °C.

Таким образом, влияния воздушного потока температурой 360 °C не достаточно для прохождения определенных процессов в слое меди и получения равновесной структуры с минимальными микронапряжениями. В таком случае можно предположить, что напыление с температурой более 400 °C позволяет получить покрытие с достаточно равновесной структурой и минимальными напряжениями и, соответственно, обладающего более высокими механическими характеристиками, чем напыление при более низкой температуре, например ниже 300 °C.

Предварительные испытания прочности медного покрытия на срез, которые проводили для оценки схемы и параметров нагружения на образцах после напыления при температурах 180, 360 и 540 °C, позволили выявить отмеченные выше тенденции. Так, прочность покрытия, нанесенного при 360 °C, значительно ниже, чем покрытия, нанесенного при температуре 540 °C. В данном случае получено качествен-

ное подтверждение того, что напыление при повышенных температурах (более 400 °С) позволяет получить медное покрытие с более высокими механическими характеристиками за счет формирования равновесной структуры с минимумом напряжений.

Термическая обработка медного покрытия, полученного при напылении с дистанций 10 и 20 мм и температуре 360 °С, в печи при температуре ≈ 475 °С и выдержке 4 ч приводит к значительному снижению УЭС до 0,024 Ом·мм²/м. По-видимому, в этом случае процессы стабилизации тонкой структуры меди прошли полностью и величина остаточного сопротивления характеризует только наличие макродефектов (пор, границ и т.д.).

Следует отметить, что твердость наклепанной меди при определенных режимах напыления приближается к твердости латуни, имеющей степень деформации 30...50 % (ГОСТ 15527–2004, ГОСТ 17711–93).

Отметим также, что толщина формируемого покрытия зависит от всех приведенных выше параметров напыления: температуры, расхода порошка, расстояния от сопла и скорости перемещения сопла относительно поверхности (рис. 4).

В структуре меди наблюдаются дефекты, имеющие размер порядка $(10...15) \cdot 10^{-6}$ м по двум координатам и значительно меньший по третьей. Их формирование происходит за счет статистически неравномерного воздействия частицами корунда на медь и, как следствие, недостаточного уплотнения покрытия по объему.

К данному выводу подталкивают исследования структуры слоя меди, полученного при напылении с дистанции 30 мм и, особенно, 40 мм. Если при напы-

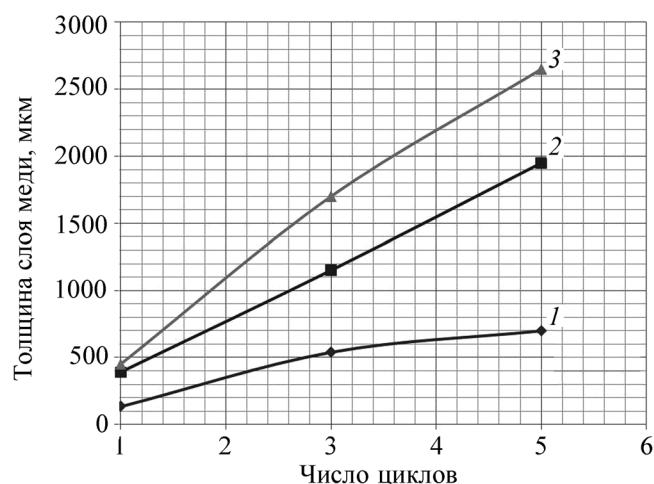


Рис. 4. Зависимости толщины покрытия от числа циклов напыления при температуре воздуха:
1 – 180 °С; 2 – 360 °С; 3 – 540 °С

лении с незначительной дистанции точечные дефекты имеют достаточно равномерное размещение по слою, то при увеличении расстояния до напыляемой поверхности они объединяются в большие по размеру участки и их число становится достаточно велико. При этом структура становится настолько хрупкой, что попытка измерить твердость при нагрузке HV 0,05/10 приводит к разрушению покрытия. С увеличением дистанции напыления энергия твердых частиц понижается настолько, что ее становится недостаточно для деформации пластичных частиц и формирования целостной металлической основы.

Как показывают теоретические модели и практические результаты, наличие незначительных по величине дефектов (полостей) в структуре может благоприятно отразиться на повышении триботехнических характеристик медного покрытия за счет формирования на поверхности трения так называемых "масляных карманов" [9].

Выводы

1. На формирование структуры и свойств медного покрытия, полученного при газодинамическом напылении с температурой ≈ 300 °С, основное влияние оказывают скорость и энергия частиц с учетом времени обработки.

2. На формирование структуры и свойств медного покрытия, полученного при напылении с температурой ≈ 400 °С, влияние оказывают скорость и энергия частиц, а также тепловое воздействие нагретого воздуха с учетом времени обработки.

3. С использованием ГДУ можно наносить покрытия твердостью до ≈ 1260 МПа, что соответствует твердости латуни, подвергнутой обработке со степенью деформации 30...50 %.

4. В структуре упрочненной меди выявлены дефекты, имеющие размер по двум координатам порядка $(10...15) \cdot 10^{-6}$ м, что с учетом высокой твердости можно рассматривать как положительный элемент повышения триботехнических характеристик поверхности за счет формирования "масляных карманов".

5. Твердость и толщину покрытия меди можно изменять и регулировать при помощи таких технологических параметров напыления, как температура воздуха, расстояние от среза сопла до напыляемой поверхности, расход порошка, скорость перемещения сопла относительно поверхности и время напыления.

6. Показано, что процесс газодинамического нанесения медного покрытия на сталь может оказаться весьма перспективным для создания опорных поверхностей трения, а также замены гальванических методов осаждения меди.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каширин А.И., Шкодкин А.В. Метод газодинамического напыления металлических покрытий: развитие и современное состояние // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 12. С. 22–33.
2. Димет. Применение технологии и оборудования. www.dimet-r.narod.ru.
3. DPVA – инженерный справочник. www.dpva.info/GuidePhysics/Frication.
4. Пара скольжения – подшипниковый узел. www.ausferr.ru.
5. Лифшиц Б.Г., Крапошин В.С., Липецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов. М.: Мир, 1982. 447 с.
6. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
7. Колачев Б.А., Габидуллин Р.М., Пигузов Ю.В. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов: учеб. пособие для вузов. М.: Металлургия, 1980. 280 с.
8. Кухлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир, 1985. 506 с.
9. Гаркунов Д.Н. Триботехника. М.: МСХА, 2001. 456 с.

УДК 621.793.79

С.Н. Григорьев (МГТУ "Станкин"),
 В.Ю. Фоминский, Р.И. Романов, Г.Г. Калустян
 (Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"),
 М.Я. Бычкова (Национальный исследовательский технологический университет "МИСЦ")
 E-mail: VYFominskiy@mephi.ru

Влияние режимов импульсного лазерного осаждения на трибомеханические свойства тонкопленочных покрытий Mo–Se–Ni–C*

Показано, что бомбардировка высокоэнергетичными атомами является важным фактором получения качественных твердосмазочных покрытий Mo–Se–Ni–C при использовании метода импульсного лазерного осаждения. Установлено, что легирование углеродом до ~ 20 % ат. оказывало положительное влияние на трибологические свойства покрытий в атмосфере сухого воздуха, а высоколегированные углеродом слои предпочтительны для функционирования в воздушной атмосфере с повышенной влажностью. Приведены результаты исследования структурно-фазового состояния сформированных нанокompозитных покрытий.

Ключевые слова: нанокompозитные покрытия, диселенид молибдена, алмазоподобный углерод, механические свойства, коэффициент трения, наноструктура.

It was demonstrated that high-energy atoms bombardment during pulsed laser deposition of Mo–Se–Ni–C coatings resulted in improved tribomechanical properties of the solid self-lubricating coatings. Alloying with carbon (~ 20 % at.) influenced positively on the tribological properties of the coatings in a relatively dry testing environment is stated. It was necessary to increase the carbon concentration in the coatings to realize enhanced performance in air of high humidity. The chemical and nanostructural characterization of the coatings was performed.

Keywords: nanocomposite coatings, molybdenum deselenide, diamondlike carbon, mechanical properties, coefficient of friction, nanostructure.

Введение

Дихалькогениды переходных металлов (ДПМ), такие как дисульфиды и диселениды молибдена и вольфрама, хорошо известны как твердые самосмазывающиеся материалы, уникальные антифрикционные свойства которых определяются экстремальной анизотропией кристаллической решетки. Коэффициент трения в условиях вакуума для качественных покрытий, обладающих оптимальной структурой, химическим составом, плотностью, не превышает 0,001. Однако присут-

ствие в зоне трения кислорода или паров воды оказывает сильное негативное действие на трибологические свойства чистых ДПМ-покрытий. Другой часто проявляющийся недостаток этих покрытий связан со слабой адгезией и невысокой твердостью, что препятствует их практическому применению в условиях высоких контактных нагрузок.

Один из наиболее эффективных методов улучшения трибологических свойств во влажной атмосфере заключается в легировании ДПМ-материалов такими металлами, как Ti, Au, Cr, Ni и др. [1, 2]. Для повышения прочностных характеристик самосмазывающихся покрытий активно разрабатываются нанокompозитные составы, содержащие твердосмазочную и твердые/сверхтвердые фазы [3–5].

* Исследования проводили в рамках реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 гг.