

Как видно из представленного графика, наибольшее приращение выработки приходится на малые значения скорости ветрового потока. Объясняется это тем, что при малых скоростях ветра для способа с фиксированным значением скорости вращения вторичных ветротурбин в диаграмме выработки электроэнергии наблюдается некоторое снижение по отношению к оптимальному отбору мощности [3]. Этот режим ВЭУ с АДМ в работе [5] определяется как квази-автооптимизационный. В то же время алгоритм моментного управления реализует действительно автооптимизационный режим [5].

Заключение. Проведенный в работе анализ эффективности применения моментного управления ВЭУ с АДМ показал увеличение выработки электроэнергии по сравнению с используемым в настоящее время способом управления при фиксированной скорости вращения вторичных ветротурбин. С уменьшением средней скорости ветрового потока приращение выработки увеличивается. Однако нужно отметить, что при малых скоростях ветрового потока снижается выработка электроэнергии, что уменьшает прирост в абсолютном выражении. Тем не менее, результаты подтвердили эффективность предложенного алгоритма моментного управления ВЭУ.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Голубенко, Н. С. Тенденции развития ветроэнергетики и безмультипликаторные ветровые установки / Н. С. Голубенко, С. И. Довгалюк, А. М. Фельдман, В. А. Цыганов // Нетрадиционная энергетика XXI века: материалы IV Международной конференции. – Крым, Гурзуф. – 2003. – С. 68–74.
2. Голубенко, Н. С. Аэродинамические способности безмультипликаторной турбогенераторной схемы ветроэнергетической установки большой мощности / Н. С. Голубенко // Нетрадиционная

- энергетика XXI века: матер. 4-й Междунар. конф. – Гурзуф. – 2003. – С. 123–132.
3. Голубенко, Н. С. Моделирование электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультипликатором в режиме стабилизации скорости ветровых турбин / Н. С. Голубенко, П. Д. Андриенко, И. Ю. Немудрый, Д. Г. Алексеевский // Эл. техника и эл. энергетика. – 2011. – № 1. – С. 70–73.
 4. Миргород, В. Ф. Управление ветроэнергетической установкой большой мощности по запасам аэродинамической устойчивости // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 3. – С. 67–70.
 5. Алексеевский, Д. Г. Объяснение эффекта автооптимизации электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием // Технічні науки та технології. Науковий журнал. – Серія: Технічні науки. – Чернівці: ЧДТУ, 2015. – № 1 (1). – С. 170–176.
 6. Алексієвський, Д. Г. Моментне управління ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням // Вісник КНУТД. – Серія: Технічні науки. – К.: КНУТД, 2015. – № 5 (90). – С. 32–36.
 7. Алексеевский, Д. Г. Визуальное моделирование многоканальных ветроэлектрогенерирующих систем / Д. Г. Алексеевский // Вісник національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2017. – № 27(1249). – С. 332–336.
 8. Алексеевский, Д. Г. Визуальная модель трехфазного мостового выпрямителя / Д. Г. Алексеевский, А. Г. Алексеев, К. О. Турышев, О. О. Панкова // Вісник національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2017. – № 27(1249). – С. 309–312.
- Твайдел, Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайдел, А. Уэйр, пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.

Материал поступил в редакцию 20.11.2018

ALEKSEEVSKIY D. G., PROKOPENIA O. N., PANKOVA O. O., MANAEV K. V. Analysis of the efficiency of control algorithms wind power plant with an aerodynamic multiplication

Comparative analysis of utilization efficiency of two control algorithms for a wind power system with aerodynamic multiplication was presented in the article. These are algorithm with fixed rotation speed of secondary wind turbines with the ability to control installation angle of the primary wind turbine, and the torque control algorithm with a variable rotation speed of secondary wind turbines. Dependence of capacity electricity ratio between the two control algorithms to the average speed of the wind flow was presented in the article too.

УДК 621.793

ГазбанЗадек Э., Соколов И. О., Ванюк Э. А.

АНТИФРИКЦИОННОЕ ПОКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ СПЛАВА БАББИТА И МЕДНОГО КОМПОЗИТА

Введение: в настоящее время многие детали или их отдельные элементы, работающие в условиях трения, изготавливаются из антифрикционных материалов на основе меди, в частности из баббитов. Традиционные способы получения заготовок таких деталей – литье. Однако этот метод имеет ряд недостатков, таких как пористость, раковины, трещины, низкое качество поверхностей и др., а специальные методы литья экономически целесообразны для ограниченной номенклатуры деталей [4, 6, 8].

Одним из перспективных способов создания деталей с высокими триботехническими характеристиками является напыление на их поверхности антифрикционных материалов таких, как баббиты. При этом основа детали может быть изготовлена из относительно дешевых материалов (углеродистая конструкционная сталь, чугуны и т. д.). Кроме того, технология газотермического напыления антифрикционных материалов позволит производить восстановление изношенных поверхностей деталей с целью их повторного использования [4, 6].

Однако создание такой технологии требует решения ряда науч-

ных и практических задач. На сегодняшний день практически отсутствуют порошковые материалы на основе баббитов для создания газотермических покрытий и, соответственно, не создано реальных технологий формирования таких покрытий. Среди большого количества износостойких материалов наиболее широко применяются покрытия из самофлюсующихся порошков на основе никеля и кобальта, которые обладают относительно невысокой температурой плавления, высокой износостойкостью, твердостью, хорошей адгезией со сталями. Однако эти материалы являются дорогостоящими, а также для улучшения эксплуатационных свойств покрытий из самофлюсующихся сплавов необходимо их последующее оплавление, что не приемлемо для многих деталей, так как возникающие остаточные напряжения могут привести к образованию и (или) увеличению усталостных трещин. Поэтому при повышении эксплуатационной надежности деталей оборудования актуальной задачей является разработка материалов и определение технологических параметров их газотермического напыления без последующей термообработки,

ГазбанЗадек Э., ИЧПУП «БелПекаПэйт».

Беларусь, г. Молодечно, ул. Великий Гостинец, 143Б.

Соколов Игорь Олегович, к. т. н., ученый секретарь филиала БНТУ "Научно-исследовательский политехнический институт" (НИПИ).

Ванюк Э. А., магистрант Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

обеспечивающих требуемые эксплуатационные свойства поверхностного слоя детали и прочность сцепления покрытий с основой, превышающую удельные нагрузки [1–8].

Материалы. Требования к покрытиям, наносимым на быстроизнашивающиеся детали машин и механизмов современной техники, определяются условиями их работы. Основными факторами износа являются: трение, воздействие абразива, наличие химически агрессивных сред, вызывающих коррозию. Интегральным показателем, определяющим качество покрытия, наносимого по вновь разрабатываемой технологии, является относительная износостойкость, сравниваемая с износостойкостью детали, упрочненной по базовой технологии. Износостойкость подразумевает не только минимальную интенсивность изменения линейных размеров или уменьшения массы детали, но и отсутствие схватывания и задиоров в процессе работы. Она зависит от условий работы детали, химических и физико-механических свойств покрытия, характера смазки, свойств сопряженной детали и т. п. Износостойкость покрытия определяется твердостью, как матрицы, так и включений. При работе в условиях трения скольжения оптимальным является сочетание относительно мягкой металлической матрицы, как правило, на основе Ni или Fe и твердых включений, таких как карбиды, нитриды или бориды, которые кроме высокой твердости обладают стойкостью против схватывания и достаточной коррозионной стойкостью [1–8].

Твердость и микротвердость покрытий весьма сильно влияют на эксплуатационные характеристики покрытий. Более твердые покрытия, как правило, являются более износостойкими. Кроме того, высокая микротвердость всех компонентов покрытия необходима при работе в условиях высоких контактных нагрузок, при которых может произойти продавливание покрытия в случае низкой его твердости.

Одной из наиболее существенных характеристик износостойких защитных покрытий, определяющей область их практического применения, является прочность сцепления покрытия с поверхностью основы. При предварительном нанесении подслоя из экзотермически термореагирующих никелево-алюминиевых порошков данный параметр может достигать 55 МПа и более.

При напылении покрытия в нем могут возникнуть остаточные напряжения растяжения или сжатия, величина которых может достигать 200–300 МПа, т. е. значительно превосходить прочность сцепления покрытия с основой. Опасным является наличие растягивающих напряжений, тогда как сжимающие, наоборот, положительно влияют на эксплуатационные свойства деталей. Наличие растягивающих напряжений нежелательно из-за возможности трещинообразования или отслоения покрытий при эксплуатации. Появление остаточных напряжений вызывается различием коэффициентов линейного расширения материалов основы и покрытия, а также фазовыми превращениями в процессе остывания покрытий, сопровождающимися изменением параметра кристаллической решетки. Вторым фактором также способствует трещинообразованию. Поэтому стремятся подбирать для покрытий материалы, максимально схожие по свойствам с материалом основы, или наносить на поверхность основы пластичные подслои. Перспективно также введение в материал покрытий пластичных добавок с относительно невысокой температурой плавления, например меди [4, 6, 8].

Существенно влияет на эксплуатационные свойства покрытий их пористость. Она может как положительно, так и отрицательно влиять на работоспособность покрытий. При трении скольжения в условиях ограниченной смазки поры играют роль резервуаров смазочного материала, благодаря чему на поверхности трения постоянно присутствует масляная пленка. Применяемый материал наряду с параметрами технологического процесса нанесения является основным фактором, определяющим физико-механические и эксплуатационные свойства покрытий. Причем если на величины таких параметров как прочность сцепления и пористость влияние обоих данных факторов примерно одинаково, то для обеспечения требуемой твердости покрытий химический состав и морфология выбранного материала имеют первостепенное значение [4, 8].

Задача обеспечения требуемых свойств покрытий определяется решением в комплексе двух ключевых проблем: выбор материала и

формирование его требуемых структуры и свойств за счет подбора технологических параметров. Кроме того, анализ себестоимости нанесения покрытий показывает, что при газотермических технологиях затраты на материал, как правило, являются основной статьей расходов. Наиболее распространенными для нанесения износостойких покрытий являются порошковые материалы на основе никеля, легированные бором, кремнием, углеродом и хромом. Они обладают высокими технологическими свойствами – самофлюсующестью и низкой температурой плавления, а также обеспечивают высокую износ-, коррозионно- и жаростойкость.

Таблица 1 – Предложенные композиции для газотермического напыления

№ композиции	Состав композиции
1	ПТ-НА-01 + ПГ-19М-01 + ПР-Х4Г2Р4С2Ф
2	ПР-НД42СР + ПР-Х4Г2Р4С2Ф + ПТ-НА-01
3	ПТ-ЮНХ16СР3 (1/2) + ПР-Х4Г2Р4С2Ф (1/2)
4	ПР-НД42СР + ПР-Х4Г2Р4С2Ф

Таблица 2 – Химический состав порошков

Марка порошка	Химический состав
ПТ-НА-01	основа Ni; 4,0-5,5% Al
ПР-Х4Г2Р4С2Ф	основа Fe; 3,7% Cr; 2,2% Mn; 3,8% B; 2,5% Si; 0,8% V
ПГ-19М-01	основа Cu; 4% Fe; 8,5-10,5% Al
ПР-НД42СР	основа Ni – Cu; 42,5% Cu; 0,2% C; 0,9% Si; 1% B; до 3% Fe
ПТ-ЮНХ16СР2	основа Ni; 0,7% C; 16% Cr; 3,2% Si; 2,6% B; 1,2% Al

Были проанализированы различные материалы на основе меди. На основе анализа материалов, применяемых для газотермического напыления, предложены композиции для получения износостойких покрытий. Для предварительной оценки уровня свойств покрытий из разработанных композиций были проведены экспресс-испытания на износостойкость.

Для обоснования выбора составов композиций проводились экспресс-испытания на износостойкость (рисунок 1), а также визуальный контроль полученных покрытий на отсутствие их отслоения от основы. Из графика видно, что наибольшей износостойкостью обладают покрытия, полученные из композиций № 1 и 4, кроме того, на некоторых образцах наблюдалось отслоение покрытий, напыленных из композиции № 3, что не гарантирует работоспособность детали с таким покрытием.

U, ч/мкм

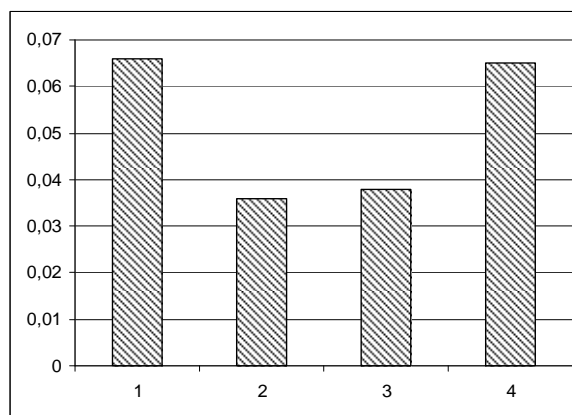


Рисунок 1 – Диаграмма износостойкости

Для выявления степени влияния компонентов композиции на прочность сцепления покрытия с основой и его износостойкость проводилось планирование эксперимента. При обработке результатов планирования эксперимента и получения зависимости функции отклика от входящих факторов применялась стандартная программа – Statistica 6.0.

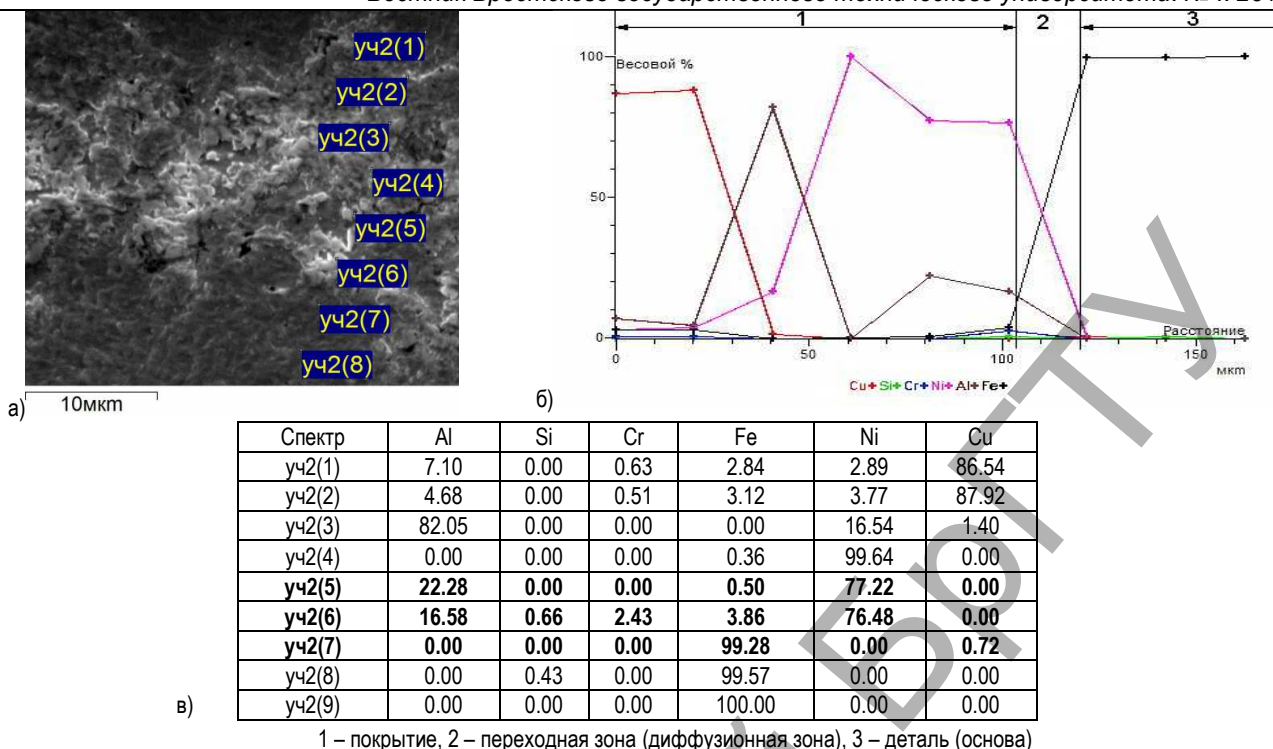
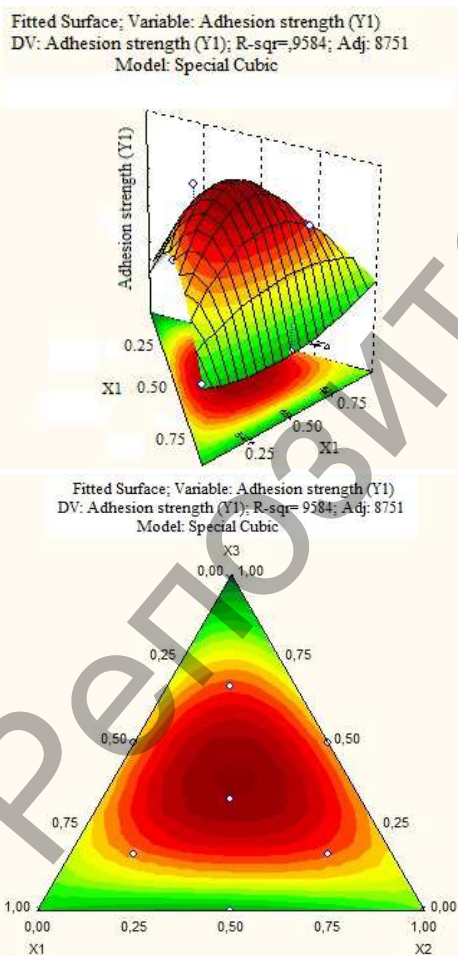


Рисунок 3 – Микроструктура покрытий (а) из композиции № 1. Распределение легирующих элементов (б, в)



а) – поверхность отклика в объеме; б) – поверхность отклика на плоскости

Рисунок 2 – График зависимости износостойкости покрытий от состава композиции № 1

Микроструктура композиционных покрытий. Протекание химического взаимодействия и образование диффузионной зоны между покрытием и основой подтвердил проведенный количественный анализ. Результаты МРСА представлены на рисунке 3. Из графика распределения химических элементов (рисунок 3б) видно, что никель диффундирует в основу (сиреневая линия), железо в покрытие (черная линия).

Микротвердость композиционных покрытий. Исследование микротвердости показало, что отдельные фазы газотермических композиционных покрытий достигают значений 10805 МПа и 10025 МПа, при этом средняя микротвердость этих покрытий составляет 7584 МПа и 7513 МПа. Меньшее значение микротвердости композиции № 2 обусловлено большим содержанием меди.

В состав покрытий входят компоненты на основе меди (ПГ–19М–01, композиция № 2), меди и никеля (ПР–НД42СР, композиция № 1), а также на основе железа, легированного хромом, ванадием, бором, кремнием (ПР–Х4Г2Р4С2Ф), поэтому полученные покрытия имеют пластичную основу (медь–никель–железо) и твердые включения в виде частиц карбидов и боридов. Это объясняет разброс микротвердости по толщине покрытия (5660–10327 МПа – композиция №1 и 6720–10025 МПа – композиция № 2). Такая структура является оптимальной с точки зрения износостойкости и приближается к структуре типа Шарпи: включения твердых компонентов, распределенных в более мягкой матрице. Высокие значения микротвердости вблизи основы, а также исследование структуры покрытий и их элементного состава позволяют сделать вывод о возникновении химического взаимодействия компонентов напыляемого материала и основы с образованием переходной зоны, что обуславливает достижение высокой прочности сцепления покрытия с основой.

Износостойкость. Для оценки уровня эксплуатационных характеристик покрытий были проведены их испытания на износостойкость. Исследование изнашивания композиционных материалов проводили в диапазоне скоростей скольжения $V = 0,5–3,5$ м/с и давлении $P = 10–40$ МПа. Сравнение величин износа показывает, что процесс изнашивания подобных покрытий включает в себя усталостное изнашивание более мягкой структурной составляющей – медной матрицы, обнажение более твердых составляющих – карбидных и боридных фаз и их последующее выкрашивание. Полученные структуры покрытий обладают пониженной склонностью к схватыванию в

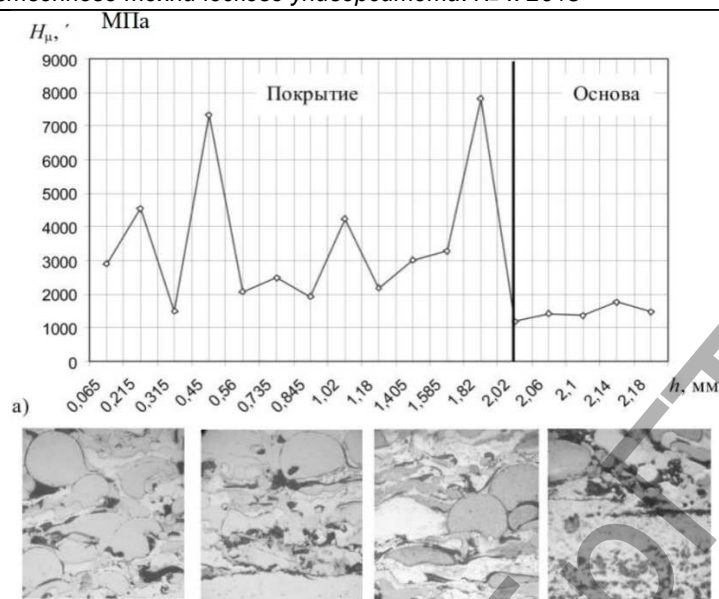


Рисунок 4 – Микротвердость покрытий из композиции № 1

процессе трения. Как следует из представленных зависимостей скорость изнашивания композиционных покрытий с увеличением относительной скорости скольжения и удельной нагрузки плавно увеличивается. Плавное увеличение износа упрочненных поверхностей свидетельствует об отсутствии схватывания. Аналогичные зависимости износа наблюдаются и с изменением удельной нагрузки. Меньшей стойкостью против износа обладает композиция № 2, содержащая больше меди, т. к. увеличение данного компонента уменьшает количество твердых включений в пластичной матрице, что снижает сопротивление износу. Коэффициент трения для всех испытуемых композиций плавно увеличивается с ростом относительной скорости скольжения и удельной нагрузки. Причем интенсивность увеличения коэффициента трения с повышением нагрузки в месте контакта больше, чем с увеличением относительной скорости скольжения. Это увеличение коэффициента трения сопровождается ростом температуры в зоне трения, что приводит к переходу металла в состояние термической пластичности.

Сопротивляемость покрытия износу зависит от химического состава покрытия, который определяет твердость и теплостойкость, а также свойства образующихся в процессе трения вторичных структур. Структура покрытия состоит из мелкодисперсных боридов и карбидов, равномерно распределенных в насыщенной легированными элементами матрице, что определяет его повышенную твердость и теплостойкость. Заметного различия в поведении композиций в зависимости от химсостава при нанесении не наблюдалось. Все порошки имеют одну основу и грануляцию, что определяет их сходные термодинамические свойства, они обладают одинаковыми достоинствами и недостатками с точки зрения технологии.

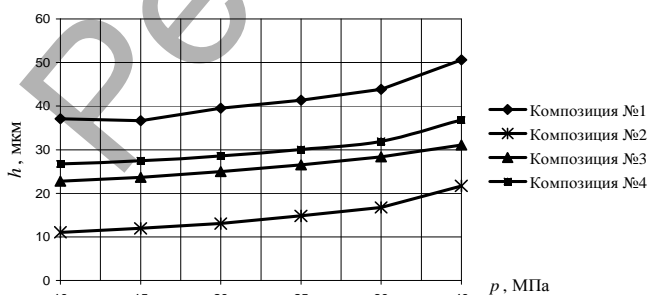


Рисунок 5 – Зависимость износа материалов от удельной нагрузки

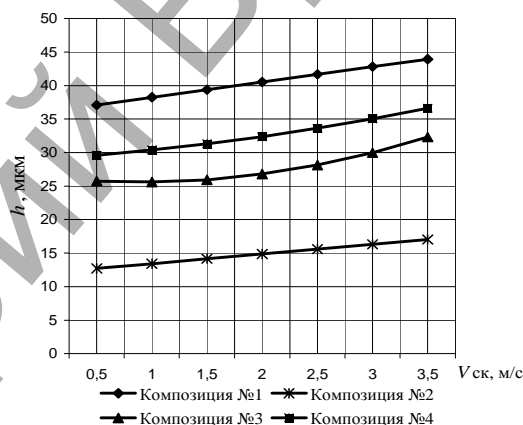


Рисунок 6 – Зависимость износа материалов от скорости скольжения

Остаточные напряжения. Напыление покрытий на основе железа увеличивает напряжения сжатия, возникающие в процессе подготовки поверхности под напыление. Увеличение прогиба образцов составляет 20–50 мкм, что составляет 30–45 % от величины прогиба после шлифования и 3–10 % данной величины после дробеструйной обработки. Рассчитанные по оценочной формуле значения остаточных напряжений составляют после дробеструйной обработки 130–170 МПа, после шлифования – 15–20 МПа. Величины $\sigma_{ост}$ в образцах с напыленными покрытиями при указанных вариантах технологии подготовки поверхности находятся в пределах 160–200 МПа и 22–27 МПа соответственно. Это увеличение остаточных напряжений может быть обусловлено двумя факторами. Первый – различие модулей упругости материалов основы и покрытия. Второй – соотношение коэффициентов линейного расширения материалов покрытия и основы. Согласно исследованиям, наряду с неоднородным тепловым воздействием, различие коэффициентов линейного расширения является наиболее существенным фактором в процессе формирования остаточных напряжений при напылении. Для снижения остаточных напряжений напылялся подслои из терморегулирующего материала (NiAl) и исследовалось влияние толщины напыляемого подслоя на величину остаточных напряжений.

Заключение

1. Установлены зависимости прочности сцепления покрытий с основой и их износостойкости от состава композиций для напыления и результаты экспериментальных исследований, позволили определить оптимальные составы композиций (композиция № 1:

- 30,9% ПТ-НА-01 + 32,7% ПГ-19М-01 + 36,4% ПР-Х4Г2Р4С2Ф; композиция № 2: 18,9% ПР-НД42СР + 41,4% ПР-Х4Г2Р4С2Ф + 39,7% ПТ-НА-01).
2. Покрытия из полученных композиций обладают высокой прочностью сцепления с основой 55–65 МПа и износостойкостью не менее 0,1 ч/мкм.
 3. Экспериментальные исследования параметров плазменного напыления подслоя на прочность сцепления позволили определить область технологических параметров, обеспечивающих прочность сцепления покрытия с основой 65–70 Мпа. Проведенные исследования влияния продолжительности плазменного напыления и его производительности на температуру нагрева основы позволили сделать вывод о том, что с целью предотвращения катастрофического перегрева напыляемой детали и получения качественного покрытия необходимо производить вначале плазменное напыления подслоя на предварительно подогретую до температуры 70–90°C основу, а затем газопламенное напыление основной части ГТП.
 4. Установлено, что покрытия из разработанных композиций обладают высокой износостойкостью в условиях граничного трения во всем диапазоне удельных нагрузок (10–40 МПа) и скоростей скольжения (0,5–3,5 м/с), и которая сопоставима с износостойкостью оплавленного самофлюсующегося сплава ПГ-СР4. Процесс изнашивания протекает плавно во всем диапазоне скоростей скольжения, что свидетельствует об отсутствии схватывания. Коэффициент трения у композиционных покрытий сравнительно низок и в диапазоне относительных скоростей скольжения 0,5–3,5 м/с не превышает 0,12. Высокая износостойкость может быть объяснена композиционным характером структуры разработанных покрытий.

5. Максимальная прочность сцепления покрытий с основой достигается при толщине 15–20 мкм для композиции № 1 и 10–15 мкм для композиции № 2 за счет снижения уровня остаточных напряжений до 3 раз.
6. Результат экспериментальных исследований позволил определить оптимальные параметры (расход МАФ - 1–1,2 м³/ч, расход кислорода - 4,0–4,5 м³/ч, расход воздуха - 0,2 м³/ч), обеспечивающие максимальную прочность сцепления (66,8 МПа).

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Трение, изнашивание и смазка: справочник / Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алипина. – М.: Машиностроение. – Кн. 1. – 1978.
2. Богданович, Л. Н. Трение и износ в машинах: учеб для вузов / Л. Н. Богданович, В. Я. Прушак. – Минск: Высшая школа, 1999.
3. Тушинский, Л. И. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий / Л. И. Тушинский, А. П. Плохов. – Новосибирск: Наука, 1986.
4. Спиридонов, Н. В. Технологические основы формирования поверхностных слоев с повышенными эксплуатационными свойствами: дисс. ... доктора техн. наук: 05.02.08., 05.02.01. – Минск, 1989.
5. Гаркунов, Д. М. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1985.
6. Спиридонов, Н. В. Повышение эксплуатационных характеристик диффузионных боридных слоев лазерной обработкой / Н. В. Спиридонов, О. Г. Девойно // Трение и износ. – 1986. – Т. 7. – № 2.
7. Борисов, Ю. С. Плазменные порошковые покрытия / Ю. С. Борисов, А. Л. Борисова. – Киев: Наукова думка, 1985.
8. Кот, В. А. Газотермические износостойкие и коррозионностойкие покрытия системы металл-стекло и металл-медь / В. А. Кот, Б. Х. Вахабов // Коррозия и защита материалов: тез. докл. науч.-техн. конф. – Могилев, 1988. – Минск: БелНИИТИ, 1988.

Материал поступил в редакцию 20.12.2018

GAZBANZADEKH E., SOKOROV I. O., VANYUK E. A. Antifrictional covering on the basis of alloy of babbitt and the copper composite

Various copper-based materials were analyzed. Based on the analysis of materials used for thermal spraying, compositions for obtaining wear-resistant coatings are proposed. To assess the level of coating properties of the developed compositions were carried out rapid tests for wear resistance and adhesion strength.

УДК 621.7.043

Хвесько Г. М., Вайтехович П. Е., Боровский Д. Н.

МОЩНОСТЬ ПРИВОДА ДИСКОВОЙ ЗАГЛАЖИВАЮЩЕЙ МАШИНЫ С ПЛАНЕТАРНЫМ ПРИВОДОМ

Введение. В производстве железобетонных изделий, в частности стеновых панелей, одной из основных операций является заглаживание поверхностей. Оно проводится после формирования при незатвердевшем бетоне. Для заглаживания используются различные рабочие органы [1], но наиболее эффективным из них является дисковый. Он обладает наибольшей заглаживающей способностью, являющейся показателем эффективности процесса. Под ней подразумевается длина линии, по которой рабочий орган воздействует на каждую элементарную частицу бетонной смеси.

Анализ различных способов привода дискового заглаживающего органа показал, что придание ему планетарного движения приводит к увеличению в 2–3 раза длины указанной выше линии, а соответственно, и заглаживающей способности [2].

Открытым остается вопрос об изменении величины затрат энергии при переходе к планетарному движению. В первых попытках ее определения не удалось рассчитать вклад отдельных составляющих

мощности, проанализировать влияние конструктивных соотношений. Поэтому в данной работе поставлена задача по разработке методики расчета мощности привода дискового заглаживающего органа с планетарным приводом с анализом ее отдельных составляющих.

Методика определения потребляемой мощности привода и ее анализ. Потребляемая мощность исследуемого агрегата расходуется в основном на преодоление сил трения, возникающего при движении диска по незатвердевшей бетонной поверхности. Заглаживающий диск участвует во вращении вокруг собственной оси, в планетарном движении вместе с водилом вокруг центральной оси и в поступательном движении заглаживающей машины относительно поверхности изделия.

В этой связи полная мощность складывается из составляющих каждого из перечисленных движений.

$$N = N_{вр} + N_{пл} + N_{пс}. \quad (1)$$

Хвесько Геннадий Михайлович, к. т. н., доцент кафедры теоретической механики Белорусского государственного технологического университета, e-mail: tm@belstu.by.

Вайтехович Петр Евгеньевич, д. т. н., доцент кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств Белорусского государственного технологического университета, e-mail: vpe51@mail.ru.

Боровский Денис Николаевич, к. т. н., старший преподаватель кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств Белорусского государственного технологического университета, e-mail: dzianis23@rambler.ru.
Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Сверлопа, 13а.