



Микосянчик О. А.,
Ляшенко Б. А.,
Агеев М. С.,
Лопата В. Н.

АНАЛИЗ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ КАЧЕНИЯ СО СКОЛЬЖЕНИЕМ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

В работе проведен анализ кинетики изменения физико-механических, противоизносных и антифрикционных свойств покрытия, полученного при напылении на контактные поверхности самофлюсующегося порошка ПГ-АН9. Установлено увеличение продолжительности нормальной работы покрытия с наибольшей толщиной при смазывании контактных поверхностей трансмиссионным маслом в условиях ступенчатого повышения нагрузки. Определены механизмы разупрочнения поверхностных слоев металла, определяющие износостойкость контактных поверхностей.

Ключевые слова: самофлюсующиеся покрытия, износ, антифрикционные свойства, микро-твердость, нестационарное нагружение.

1. Введение

В свете актуальности проблем ресурсо- и энерго-сбережения в промышленности экономически перспективными являются разработки комплекса технологических мероприятий, направленные на восстановление и упрочнение изношенных деталей. В последнее время многие исследователи пытаются получить тонкие поверхности газотермическим напылением покрытий из материалов, обладающих высокой твердостью и износостойкостью [1]. Самофлюсующиеся порошки получили наибольшее распространение в практике восстановительно-упрочняющих технологий. Особое преимущество материалов этого класса состоит в том, что качественное оплавление покрытия происходит без применения дополнительных флюсов или защитных сред. При этом стоимость восстановления обычно не превышает 30–50 % стоимости новых деталей [2].

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Самофлюсующиеся сплавы — это широко распространенные материалы, имеющие целевое триботехническое назначение в технике, направленное на создание износостойких покрытий. Сплавы легированы бором и кремнием, которые образуют легкоплавкие флюсы при взаимодействии материала покрытия с поверхностью напыляемой детали. Необходимым условием достижения требуемой твердости и износостойкости покрытия является наличие в структуре сплава фаз высокой твердости боридов хрома CrB и комплексных карборидов Fe, Ni, Cr [3, 4]. Несмотря на повышенный интерес к таким покрытиям, многие вопросы, связанные с изучением их формирования, влияния структурно-фазовых изменений исходных материалов на

физико-механические свойства покрытий, в том числе и сопротивление усталости системы «покрытие-основа», остаются нерешенными [5]. Проведенные исследования самофлюсующихся сплавов Ni-Cr-B-Si с высоким содержанием Cr и B показали, что для них характерно формирование различных типов микроструктур, зависящих от скоростей охлаждения и температуры [6].

Самофлюсующиеся сплавы на основе никеля, легированные бором и кремнием, отличаются высокими технологическими (низкая температура плавления; оплавление в окислительной или нейтральной атмосфере в плотное, беспористое покрытие; обрабатываемость резанием) и эксплуатационными (износостойкость покрытий в 3...5 раз превышает закаленные инструментальные стали) свойствами [7]. Согласно [8], самофлюсующиеся порошки Ni-Cr-B-Si являются одними из самых широко используемых для наплавки на контактные поверхности в качестве износостойких и коррозионностойких покрытий.

Самофлюсующиеся порошки применяются для упрочнения, защиты и восстановления деталей плунжеров насосов, валов газотурбинных двигателей, транспортных средств (клапаны ДВС, детали сцепки вагонов, валы, крестовины и т. п.), деталей дорожных машин и механизмов и т. д. [1, 9]. Согласно [10], применение самофлюсующегося порошка на никелевой основе позволяет получить сплав с высокой жаропрочностью, теплостойкостью и износостойкостью в парах трения с чугуном в условиях скольжения.

Широкое использование самофлюсующихся покрытий сдерживается в связи с недостатком научно обоснованных рекомендаций по их применению для различных элементов пар трения, работающих не только в условиях скольжения, но и качения, и, особенно, качения с проскальзыванием в смазочной среде. Особую актуальность этот вопрос приобретает в связи с отсутствием каких-либо обоснованных рекомендаций по

применению этих покрытий для деталей пар трения машин и механизмов, работающих преимущественно в нестационарных условиях.

3. Объект, цель и задачи исследования

Объект исследования — пары трения из закаленной стали 45 с модифицированной рабочей поверхностью путем создания покрытия из самофлюсующегося гранулированного порошка ПГ-АН9 методом газопламенного напыления.

Целью исследований являлось определение закономерностей кинетики изменения физико-механических, противозносных и антифрикционных свойств самофлюсующихся покрытий на никелевой основе в среде трансмиссионного масла при качении со скольжением в условиях нестационарного нагружения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- определить продолжительность нормальной работы самофлюсующегося покрытия разной толщины в условиях ступенчатого повышения нагрузки;
- установить взаимосвязь смазочных, антифрикционных, энергетических характеристик триботехнического контакта с износостойкостью самофлюсующегося покрытия.

4. Материалы и методы исследования покрытия самофлюсующегося порошка ПГ-АН9 в среде трансмиссионного масла в условиях качения и качения со скольжением

Исследование триботехнических параметров пар трения проводилось на установке [11] в нестационарных условиях трения в режиме пуск — остановка по циклу: разгон в условиях чистого качения (12,5 с) — работа в условиях 20 % проскальзывания (4 с) — торможение в условиях чистого качения (12,5 с) — остановка (4 с).

Контактная нагрузка по Герцу (σ_{\max}) в процессе испытаний ступенчато увеличивалась и составила: с 1 по 150 цикл — 150 МПа; 151–300 цикл — 200 МПа; 301–650 цикл — 250 МПа. Максимальное количество оборотов составило 1000 и 800 об/мин соответственно для опережающей и отстающей поверхностей. Конечный период работы трибосопряжения определялся при первых признаках схватывания контактных поверхностей.

В качестве смазочного материала использовалось трансмиссионное масло ТС-гип (SAE 140 API GL-5), изготовленное по ТУ 38.1011332-90 на ЗТМ «Ариан» (Украина), которое предназначено для смазывания прямозубых, спирально-конических и червячных передач. Объемная температура масла составляла 100 °С.

В качестве образцов использовались ролики из закаленной стали 45 (HRC 38), на рабочую поверхность которых наносился методом газопламенного напыления самофлюсующийся гранулированный порошок ПГ-АН9 (ПР-НХ8Д6СРП), разработанный Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины по ТУ 374–83 [12]. Гранулометрический состав основной фракции порошка соответствовал размеру частиц 50–125 мкм. Толщина напыляемого слоя за один проход составляет 0,1...0,25 мм. Общая толщина покрытий для

каждой пары исследуемых образцов после шлифования составляет 0,3; 0,7 и 1,2 мм.

5. Результаты исследований смазочных, антифрикционных и противозносных свойств самофлюсующихся покрытий

Предельная работоспособность исследуемого покрытия ПГ-АН9, определяемая при проявлении первых признаков схватывания контактных поверхностей в нестационарных условиях трения, составила 120, 320 и 650 циклов наработки соответственно при толщине напыленного слоя 0,3; 0,7 и 1,2 мм.

Рассмотрим кинетику изменения основных триботехнических показателей контакта. В условиях чистого качения в начальный период разгона длительностью до 2 с для всех исследуемых контактных поверхностей, согласно расчетному критерию λ [13], в контакте преобладает гидродинамический режим смазочного действия. Увеличение контактного давления с 150 до 200 МПа вызывает кратковременное снижение несущей способности смазочного материала для пар трения с толщиной покрытия 0,7 мм. Аналогичные изменения смазочной способности установлены при дальнейшем увеличении σ_{\max} до 250 МПа для покрытия с толщиной напыленного слоя 1,2 мм.

Увеличение проскальзывания в контакте до 20 %, которое обуславливает появление высоких градиентов скорости сдвига в смазочном слое порядка $(0,2–1,5) \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ не влияет на характер смазочного действия для покрытия толщиной 0,3 и 0,7 мм.

Для покрытия толщиной 1,2 мм установлено снижение толщины смазочного слоя на 10 %, однако в контакте доминирует гидродинамический режим смазочного действия. В периоды повышения контактного давления до 200 и 250 МПа кратковременно реализуется смешанный режим смазочного действия (рис. 1).

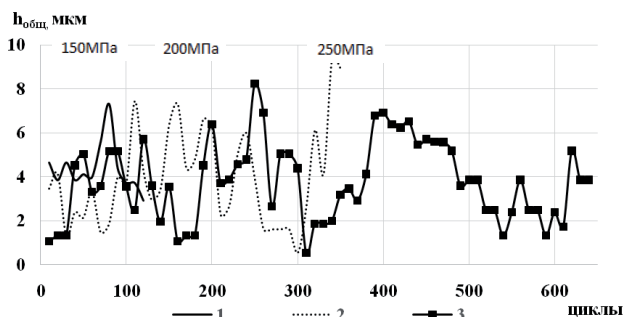


Рис. 1. Кинетика изменения толщины смазочного слоя в условиях качения с проскальзыванием: 1 — покрытие 0,3 мм; 2 — покрытие 0,7 мм; 3 — покрытие 1,2 мм

Согласно методике [14], при определении толщины граничных смазочных слоев установлена высокая адсорбционная активность компонентов смазочного материала — толщина граничных смазочных пленок, образованных на поверхностях с различной толщиной напыленного слоя порошка варьирует от 0,2 до 6 мкм (рис. 2).

Анализ кинетики изменения момента трения в триботехническом контакте позволил установить ряд антифрикционных свойств напыленного слоя. Во-первых, в пусковой период в условиях чистого качения для

Таблица 1

Изменение микротвердости поверхностных слоев (H_{100}) напыленных покрытий при наработке

Толщина покрытия ПГ-АН9, мм	Опережающая поверхность			Отстающая поверхность		
	Исходная H_{100} , МПа	После наработки, H_{100} , МПа	ΔH_{100} , МПа	Исходная H_{100} , МПа	После наработки, H_{100} , МПа	ΔH_{100} , МПа
0,3	2377	2318	-59	2370	2171	-199
0,7	4204	3076	-1128	4200	2600	-1600
1,2	6124	5684	-440	6100	5069	-1031



Рис. 2. Кинетика образования граничных смазочных слоев: 1 — покрытие 0,3 мм; 2 — покрытие 0,7 мм; 3 — покрытие 1,2 мм

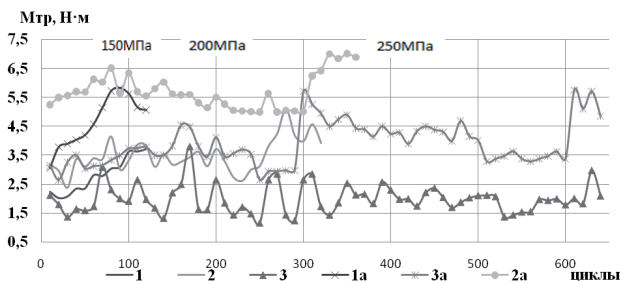


Рис. 3. Изменение момента трения при повышении нагрузки для контактных поверхностей в условиях чистого качения (1, 2, 3) и качения с проскальзыванием (1а, 2а, 3а): 1, 1а — покрытие 0,3 мм; 2, 2а — покрытие 0,7 мм; 3, 3а — покрытие 1,2 мм

При исследовании микротвердости контактных поверхностей установлено, что исходная микротвердость напыленного слоя коррелирует с его толщиной: увеличение толщины покрытия порошка ПГ-АН9 до 0,7 и 1,2 мм приводит к повышению микротвердости поверхностных слоев в 1,77 и 2,58 раз соответственно, по сравнению с покрытием 0,3 мм (табл. 1). Это обусловлено длительностью температурного воздействия при послойном нанесении покрытия с последующим оплавлением напыленных слоев.

Анализ кинетики изменения удельной работы трения ($A_{тр}$) в контакте показал, что наибольшие значения данного параметра характерны для покрытия толщиной 0,3 мм — в условиях чистого качения $A_{тр}$ составляет 50–250 Дж/мм², в условиях качения с проскальзыванием — 3000–10000 Дж/мм² (рис. 4).

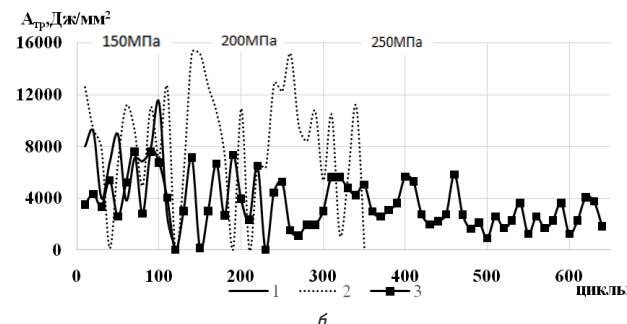
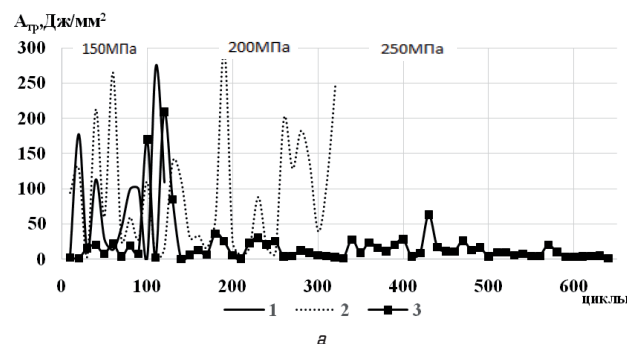


Рис. 4. Изменение удельной работы трения для контактных поверхностей в условиях чистого качения (а) и качения с проскальзыванием (б): 1 — покрытие 0,3 мм; 2 — покрытие 0,7 мм; 3 — покрытие 1,2 мм

Стабилизация энергетического параметра при ступенчатом повышении нагрузки установлена лишь для покрытия с максимальной толщиной напыленного слоя. Приращение удельной работы трения при разгоне контактных поверхностей при пуске в условиях чистого качения составляет от 5 до 200 Дж/мм² в 15 % циклов, а в условиях проскальзывания при σ_{max} 150 и 200 МПа колебания $A_{тр}$ составляют 0–700 Дж/мм², что в 2–3 раза меньше аналогичных значений, установленных при исследовании контактных поверхностей с меньшей толщиной напыленного порошка.

На рис. 5 приведены показатели линейного износа опережающей и отстающей поверхностей исследуемых покрытий.

Установлена четкая корреляционная связь между толщиной покрытия и его износостойкостью. Например, при увеличении толщины напыленного слоя порошка ПГ-АН9 до 0,7 мм в 2,7 раз повышается время работы пар трения до схватывания. При этом износ контактных поверхностей снижается в 4,65 и 1,81 раз соответственно для опережающей и отстающей поверхностей,

по сравнению с аналогичными показателями для покрытия толщиной 0,3 мм.

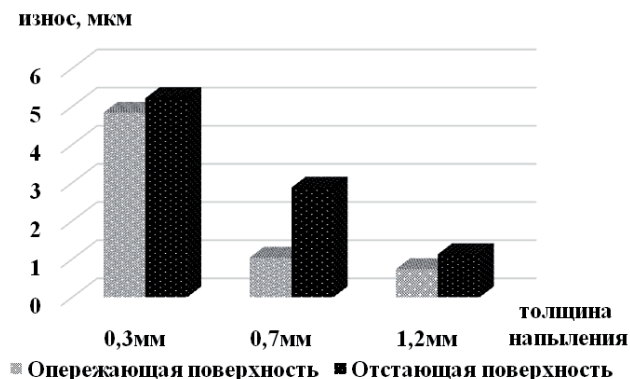


Рис. 5. Линейный износ контактных поверхностей с разной толщиной напыленного слоя

6. Обсуждение результатов исследования триботехнических характеристик самофлюсующихся покрытий

В работе установлена корреляция между длительностью нормальной работы исследуемых элементов трибосопряжения и контактного давления. Для толщины покрытия 0,3 мм установлено минимальное время работы до наступления схватывания контактных поверхностей при минимальной установленной нагрузке ($\sigma_{\max} = 150$ МПа), что соответствует общему пути трения 4320 м. Увеличение толщины напыленного слоя до 1,2 мм повышает продолжительность нормальной работы трибосопряжения в 5,42 раза (23415 м) и характеризуется нормальной работоспособностью при увеличении контактного давления до $\sigma_{\max} = 250$ МПа. Первые признаки схватывания контактных поверхностей включают частичное разрушение граничных смазочных слоев в контакте, вследствие чего стремительно возрастает коэффициент трения.

Решающее влияние на антифрикционные свойства контакта оказывает смазочное действие и, в частности, кинетика формирования граничных смазочных слоев на контактных поверхностях трения. Исследуемое масло ТС-гип изготовлено на основе базовых минеральных фракций (высоковязкого ароматизированного продукта (SAE-50) и дистилатного масла селективной очистки (ISO VG 68)) с добавлением антизадирной и депрессорной присадок. Наличие ароматических углеводородов в базовой основе масла и активной серы ($\geq 1,5$ %) в качестве присадки способствует повышению адсорбционной активности данных компонентов на поверхности металла [15]. При этом следует отметить, что в 20–30 % циклов установлены резкие скачки прироста толщины граничных смазочных слоев, которые в 2,0–2,5 раз превышают аналогичные показатели толщины пленки в других циклах наработки. Авторы статьи предполагают, что это обусловлено пористостью напыленного слоя. Тлеющий электрический разряд в смазочном материале, по которому регистрируется падение напряжения в контакте, учитывает наличие смазочного материала, находящегося в порах напыленного слоя порошка.

Согласно эффекту Ребиндера, адсорбция на металле поверхностно-активных веществ обеспечивает пластифици-

рование его поверхностных слоев [16]. Однако этот эффект с различной интенсивностью проявляется на исследуемых контактных поверхностях с разной толщиной напыленного слоя, что подтверждается кинетикой изменения его микротвердости при наработке. Согласно [17], основная структурная фаза образующихся покрытий — γ -твердый пересыщенный раствор на основе никеля, упрочняющими фазами которого являются бориды и силициды никеля, бориды хрома и никеля, карбиды хрома переменного состава. Однако степень растворения в никеле упрочняющих кластеров прямо пропорциональна длительности и периодичности воздействия температуры оплавления покрытия, что проявляется в снижении его пористости и повышении микротвердости при увеличении толщины покрытия (табл. 1).

В процессе трения установлена общая закономерность для опережающей и отстающей поверхностей — происходит разупрочнение поверхностных слоев металла при наработке, что проявляется в снижении их микротвердости, однако механизмы этого процесса для пар трения с разной толщиной напыленного слоя различны.

Наименьшее снижение микротвердости поверхностных слоев металла установлено для минимальной толщины напыленного слоя — ΔH_{100} составляет 59 и 199 МПа для опережающей и отстающей поверхностей соответственно. Для этих контактных поверхностей установлена наибольшая интенсивность изнашивания, что связано с периодическим удалением верхних деформированных слоев металла в условиях динамического нагружения. При такой интенсивной активации поверхностных напыленных слоев значительно повышается их адсорбционная активность к компонентам смазочного материала. Однако вследствие низкого содержания упрочняющих фаз в γ -твердом пересыщенном растворе на основе никеля, деформационные процессы затрагивают нижележащие слои напыленного металла, обуславливая постоянное их диспергирование и повышенный износ.

Основное влияние на пластифицирование поверхностных слоев металла оказывают сформированные на активированных трением поверхности граничные адсорбционные слои смазочного материала, характеризующиеся эффективными противозносными свойствами.

Для покрытий толщиной 0,7 мм показатели удельной работы трения в контакте аналогичны показателям, установленным для пар трения с меньшей толщиной покрытия. Повышение контактного давления до 200 МПа не влияет на приращение удельной работы трения в условиях чистого качения, а в условиях качения с проскальзыванием в 5 % циклов удельная работа трения повышается до 14000 Дж/мм² (рис. 4). Однако повышение нагрузки не приводит к интенсификации износа, поскольку на 80 % площади контакта сформированы граничные пленки, характеризующиеся прочными хемосорбционными связями с металлической поверхностью и высокими антифрикционными свойствами (стабилизация коэффициента трения до 0,033 при σ_{\max} 200 и 250 МПа). С повышением σ_{\max} до 250 МПа возрастает пластическая составляющая деформации и доминирует механизм диспергирования нижележащих слоев металла, поскольку установившаяся микротвердость поверхностных слоев металла при наработке лишь на 10–20 % выше, по сравнению с аналогичным параметром при минимальной толщине напыления.

Процессы структурной приспособляемости и смазочного действия наиболее эффективно протекают на поверхностях с максимальной толщиной напыленного слоя. Благодаря повышению в 2,58 раз исходной микротвердости поверхностных слоев напыление толщиной 1,2 мм характеризуется высокой стойкостью к деформациям. Это подтверждается минимальным приращением удельной работы трения при разгоне контактных поверхностей при пуске в условиях как чистого качения, так и качения со скольжением. Следует отметить, что при 250 МПа происходит стабилизация параметра удельной работы трения. Например, в условиях качения с проскальзыванием значения этого параметра находятся, в среднем, в пределах 1500–2500 Дж/мм² (рис. 4). Низкая активационная способность напыленного слоя при 150 МПа увеличивает период формирования прочных граничных пленок смазочного материала на контактных поверхностях — в 20 % циклов происходит срыв смазочного слоя на стоянке (рис. 3). Однако при последующей наработке элементов трибосоприжения в условиях повышения σ_{\max} до 250 МПа сформированные граничные слои характеризуются высокими антифрикционными и противоизносными свойствами. Износ опережающей и отстающей поверхностей снижается в 6,54 и 4,62 раза соответственно, по сравнению с аналогичными параметрами для напыленного слоя толщиной 0,3 мм (рис. 5). Также следует отметить меньшую степень пластифицирования поверхностных слоев покрытия при формировании на них граничных смазочных слоев — разупрочнение опережающей поверхности снижается в 2,56 раз, а отстающей в 1,55 раз, по сравнению с влиянием граничных слоев смазки на напыленный слой толщиной 0,7 мм. Авторы статьи предполагают, что это связано с равномерностью растворения в никеле упрочняющих фаз при оплавлении покрытия, что значительно повышает его износостойкость.

Представленные результаты исследований основаны на развитии перспективного направления касательно организации восстановления изношенных деталей машин. В литературных источниках имеются результаты исследований, показывающие повышения удельной мощности авиационных зубчатых передач путем нанесения покрытий [18]. Появление новых технологий для наплавки, термомеханической и химической обработок, покрытия и снижения шероховатости контактирующих поверхностей позволяет находить различные варианты их сочетания как при ремонте, так и при проектировании новых зубчатых передач для повышения их долговечности в условиях эксплуатации.

7. Выводы

1. Увеличение толщины напыленного покрытия самофлюсующегося порошка ПГ-АН9 с 0,3 до 1,2 мм повышает продолжительность нормальной работы трибосоприжения, которая устанавливается до периода проявления первых признаков схватывания контактных поверхностей, в 5,42 раза в условиях динамического нагружения.

2. Установлена высокая смазывающая способность трансмиссионного масла ТС-гип — независимо от нагрузки, в контакте преимущественно реализуется гидродинамический режим смазочного действия. При увеличении контактного давления с 150 до 250 МПа

и при переходе от чистого качения к качению с проскальзыванием происходит кратковременное снижение несущей способности масляного слоя для пар трения с толщиной покрытия 0,7 и 1,2 мм, что проявляется в реализации смешанного режима смазочного действия.

3. Наилучшими антифрикционными свойствами характеризуется самофлюсующееся покрытие толщиной 1,2 мм, для которого момент трения в контакте в 1,5–2 раза ниже аналогичных показателей, установленных для поверхностей с меньшей толщиной покрытия.

4. Наивысшая износостойкость покрытия толщиной 1,2 мм обеспечивается за счет повышения в 2,58 раз исходной микротвердости поверхностных напыленных слоев; снижения в 2–3 раза приращения удельной работы трения как в условиях чистого качения, так и в условиях качения с проскальзыванием; уменьшения степени пластифицирования поверхностных слоев покрытия при формировании на них граничных смазочных слоев, что проявляется в меньшем разупрочнении опережающей и отстающей поверхностей.

Литература

1. Дружинин, Л. К. Получение покрытий высокотемпературным распылением [Текст]: сб. статей / под ред. Л. К. Дружинина, В. В. Кудинова. — М.: Атомиздат, 1973. — 312 с.
2. Проников, А. С. Надежность и долговечность машин и оборудования (опыт и теоретические исследования) [Текст] / А. С. Проников. — М.: Издательство стандартов, 1972. — 314 с.
3. Hemmati, I. Effects of the Alloy Composition on Phase Constitution and Properties of Laser Deposited Ni-Cr-B-Si Coatings [Text] / I. Hemmati, V. Ocelik, J. T. M. De Hosson // Physics Procedia. — 2013. — Vol. 41. — P. 302–311. doi:10.1016/j.phpro.2013.03.082
4. Витязь, П. А. Теория и практика нанесения защитных покрытий [Текст] / П. А. Витязь, В. С. Ивашко, А. Ф. Ильющенко и др. — Мн.: Беларуская навука, 1998. — 583 с.
5. Гадалов, В. Н. Электроискровая обработка инструментальных сталей порошковыми самофлюсующимися сплавами типа ПГ-СР [Текст]: сб. материалов VII междунауч. конф., 25–26 мая 2004 г. / В. Н. Гадалов, Е. В. Павлов, И. В. Павлов и др. // Медико-экологические информационные технологии — 2004. — Курск: КГТУ, 2004. — С. 202–206.
6. Hemmati, I. Evolution of microstructure and properties in laser cladding of a Ni-Cr-B-Si hardfacing alloy [Text] / I. Hemmati, V. Ocelik, J. T. M. De Hosson // Surface Effects and Contact Mechanics X. — 2011. — Vol. 71. — P. 287–296. doi:10.2495/secm110251
7. Пантелеенко, Ф. И. Восстановление деталей машин [Текст]: справочник / Ф. И. Пантелеенко, В. П. Лялякин, В. П. Иванов, В. М. Константинов; под ред. В. П. Иванова. — М.: Машиностроение, 2003. — 672 с.
8. Das, C. R. Characterisation of nickel based hardfacing deposits on austenitic stainless steel [Text] / C. R. Das, S. K. Albert, A. K. Bhaduri, C. Sudha, A. L. E. Terrance // Surface Engineering. — 2005. — Vol. 21, № 4. — P. 290–296. doi:10.1179/174329405x40867
9. Шаблій, О. Дослідження мікроструктури і властивостей наплавленого металу, отриманого при індукційному нагріванні [Текст] / О. Шаблій, Ч. Пулька // Вісник Тернопільського національного технічного університету. — 2009. — Т. 14, № 1. — С. 46–55.
10. Гусев, А. В. Ремонт клапана ДВС [Текст] / А. В. Гусев, И. З. Аширов // Вестник Оренбургского государственного университета. — 2006. — № 13. — С. 81.
11. Пристрій для оцінки триботехнічних характеристик трибо елементів [Текст]: Патент України № 88748, МПК G 01 N 3/56 / Мікосянчик О. О. — у 2013 13450, заявл. 19.11.13; опубл. 25.03.14, Бюл. № 6. — 4 с.
12. Харламов, Ю. А. Основы технологии восстановления и упрочнения деталей машин [Текст]: учеб. пос. / Ю. А. Харламов, Н. А. Будагьянц. — Луганск: Восточноукраинский национальный университет им. Владимира Даля, 2003. — 495 с.

13. Мнацаканов, Р. Г. Триботехнические свойства смазочных материалов в нестационарных режимах работы [Текст] / Р. Г. Мнацаканов. — Киев: КМУГА, 1997. — 109 с.
14. Мнацаканов, Р. Г. Влияние неустановившихся режимов работы на смазочное действие масел и смазок в условиях качения со скольжением [Текст]: дисс. ... к. т. н.: 05.02.04 / Р. Г. Мнацаканов. — Киев: КИИГА, 1986. — 156 с.
15. Кламман, Д. К. Смазки и родственные продукты [Текст]: пер. с англ. / Д. К. Кламман. — М.: Химия, 1988. — 488 с.
16. Ребиндер, П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды [Текст] / П. А. Ребиндер. — М.: Наука, 1979. — 384 с.
17. Официальный сайт ОАО «Полема» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: \www/URL: http://www.polema.net
18. Dimofte, F. Tests of bearings and gears with PVD coatings for aerospace transmissions; results and problems [Text] / F. Dimofte, T. L. Krantz; ed. by K.-D. Bouzakis // Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN), 1–3 October 2008. — Chalkidiki, Greece: EEDM and PCSM, 2008. — P. 33–44.

АНАЛІЗ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОФЛЮСУЮЧИХ ПОКРИТТІВ В УМОВАХ КОЧЕННЯ З КОВЗАННЯМ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

У роботі проведено аналіз кінетики зміни фізико-механічних, протизношувальних і антифрикційних властивостей покриття, отриманого при напиленні на контактні поверхні самофлюсуючого порошку ПГ-АН9. Встановлено збільшення тривалості нормальної роботи покриття з найбільшою товщиною при змащуванні контактних поверхонь трансмісійною оливою в умовах ступеневого підвищення навантаження. Визначено механізми розміцнення поверхневих шарів металу, що визначають зносостійкість контактних поверхонь.

Ключові слова: самофлюсуючі покриття, знос, антифрикційні властивості, мікротвердість, нестационарне навантаження.

Микосянчик Оксана Александровна, кандидат технических наук, доцент, кафедра безопасности жизнедеятельности,

Национальный авиационный университет, Киев, Украина, e-mail: oksana.mikos@bk.ru.

Ляшенко Борис Артемович, доктор технических наук, профессор, заведующий отдела упрочнения поверхности элементов конструкций, Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко, Киев, Украина.

Агеев Максим Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра эксплуатации судовых энергетических установок и общепромышленной подготовки, Херсонская государственная морская академия, Украина.

Лопата Виталий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра инженерии поверхности, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Микосянчик Оксана Александровна, кандидат технических наук, доцент, кафедра безпеки життєдіяльності, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Ляшенко Борис Артемович, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу зміцнення поверхні елементів конструкцій, Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка, Київ, Україна.

Агеев Максим Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра експлуатації судових енергетичних установок та загальної інженерної підготовки, Херсонська державна морська академія, Україна.

Лопата Виталий Миколайович, кандидат технических наук, доцент, кафедра инженерии поверхности, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Mikosyanchuk Oksana, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: oksana.mikos@bk.ru.

Lyashenko Boris, G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength, Kyiv, Ukraine.

Ageev Maxim, Kherson State Maritime Academy, Ukraine.

Lopata Vitaly, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine

УДК 621.6

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.66948

Иванов В. Б.

АНАЛИЗ ПРЕИМУЩЕСТВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

В статье рассмотрены преимущества использования электроприводных газоперекачивающих агрегатов при транспортировке природного газа на основе анализа эксплуатационных, экологических и экономических факторов. Выполнено сравнение частотно-регулируемых, гидродинамических и механотронных электроприводных агрегатов с турбоприводными. Показаны условия эффективного использования различных видов приводов.

Ключевые слова: газовая турбина, электродвигатель, компрессор, регулируемый привод, эксплуатационные, экологические, экономические факторы.

1. Введение

Расширение сферы использования электроприводных центробежных компрессоров стало заметной тенденцией как в технологиях переработки нефти и газа, так и процессах транспортировки и хранения газа. В США, Европе, на Ближнем Востоке и Юго-Восточной Азии увеличивается доля нагнетателей, использу-

ющих электропривод. Даже в обеспеченной дешевым собственным газом России на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ «Кстово», «Кириши») и компрессорных станциях (КС 22 «Чебоксарская») за последние годы были реализованы проекты по замене газовых турбин на электродвигатели в качестве приводов центробежных компрессоров. Распространению данной тенденции способствовал целый ряд факторов, а именно: