

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ШТОКОВ СИЛОВЫХ ГИДРОЦИЛИНДРОВ

1. Белорусский национальный технический университет

2. Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

Минск, Беларусь

Описаны результаты исследований процесса восстановления штоков силовых гидроцилиндров гиперзвуковой металлизацией с последующим трибомеханическим модифицированием, на основании которых был разработан и апробирован технологический процесс.

Введение. Тяжелые условия эксплуатации строительных и строительного-дорожных машин (СДМ), а также режимы циклически изменяющейся нагрузки отрицательно сказываются на эффективности их использования по причине снижения долговечности гидропривода. Значительное влияние на его срок службы оказывает техническое состояние одного из дорогостоящих и наиболее интенсивно изнашивающихся элементов, каким является гидроцилиндр. Работая в условиях высокой концентрации пыли, на поверхности штока гидроцилиндра оседают частицы с высокой абразивной способностью. Перемещаясь, шток увлекает их за собой, что приводит к нарушению герметичности манжет, появлению задиров, рисок, тем самым, загрязняя рабочую жидкость гидросистемы и способствуя повышенному изнашиванию сопряженных деталей гидропривода и, как следствие, интенсивной утечки жидкости. Эти факторы являются причиной снижения безопасности, изменения проектной геометрии и усталостной прочности деталей гидроцилиндров, снижения эффективности и долговечность гидроприводов в целом [1].

Так как наружные рабочие поверхности штоков во время эксплуатации находятся в контакте с агрессивной средой, то к ним предъявляются повышенные требования: наружная рабочая поверхность штоков должна быть изготовлена по 8-му и 11-му классам точности и иметь чистоту $Ra = 0,63 - 0,32$ мкм. Кольцевые и продольные риски на поверхности трения не допускаются. Конусообразность, овальность и бочкообразность наружного диаметра по всей длине штока должны быть в пределах половины допуска на этот диаметр. Непрямолинейность оси цилиндра допускается не более 0,4 мм на длине 500 мм. Аналогичные требования предъявляются к гидроцилиндрам и плунжерам.

К штокам кроме основных требований к точности, герметичности, чистоте рабочих поверхностей предъявляются требования по антикоррозийной стойкости, и требования свободного перемещения штока через манжетное уплотнение крышки гидроцилиндра под действием собственного веса при минимальном зазоре между стенками крышки и штока.

Для повышения износостойкости и защиты штоков используют наплавку и последующее хромирование. Однако хромирование имеет ряд недостатков: высокая пористость покрытия, наличие в осаждающемся слое напряжений растяжения, возможность восстанавливать детали с относительно небольшим износом, снижение на 30–40 % усталостной прочности сталей. В ходе эксплуатации это приводит к отслаиванию, шелушению покрытия поверхности, задирам, царапинам, коррозии.

Целью исследований, результаты которых изложены в данной работе, явилось определение рациональных режимов восстановления штоков силовых гидроцилиндров методом гиперзвуковой металлизации с последующим трибомодифицированием. Описано использование технологических приемов и материалов, обеспечивающих комплексное улучшение физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий на поверхности штоков за счет деформационных структурно-фазовых превращений и метастабильных состояний, образующихся в поверхностных слоях в процессе приработки и дальнейшей эксплуатации.

Выбор метода и оборудования для восстановления штоков. Методики исследований. Одним из наиболее экономичных и эффективных способов нанесения высокоплотных металлических покрытий, является гиперзвуковая металлизация (ГМ) (рис. 1) [2]. Формирование покрытий данным способом осуществляется путём распыления материала расплавленных в электрической дуге проволок высокоскоростной струей продуктов сгорания воздушно-пропановой смеси. Главной отличительной особенностью ГМ является наличие малогабаритной высокоэффективной камеры сгорания воздушно-пропановой смеси, сверхзвуковая струя которой имеет на выходе из камеры скорость до 1500 м/с при температуре 1850 °С. Это позволяет частицам расплавленного металла разогнаться в потоке до 500 м/с и формировать покрытие, имеющее плотность и прочность сцепления в 2...3 раза выше, чем при традиционной электродуговой металлизации. Такие особенности процесса ГМ позволяют получать высокоплотные покрытия с пористостью 1...4 % и прочностью сцепления 45...60 МПа [3], что и послужило причиной использования метода ГМ для восстановления штоков.



Рис. 1. Установка гиперзвуковой металлизации в процессе напыления покрытий стальными проволоками

Для нанесения покрытий использовалась установка гиперзвуковой металлизации модели АДМ-10 (таблица 1), напыляемые материалы – проволоки из сталей мартенситного и аустенитного классов диаметром 1,6–2 мм. В качестве горючего газа для формирования распыляющего факела использовался пропан. Для повышения прочности сцепления покрытий с основой наносился промежуточный слой напылением проволоки из сплава Х20Н80. В качестве материала образцов использована низкоуглеродистая сталь Ст3. Перед нанесением покрытий производилась струйно-абразивная обработка с использованием рабочего давления сжатого воздуха 0,5 МПа и при расходе стальной колотой дроби марки ДСК 0,3–2,0 около 1,2 кг/с.

Пористость покрытий оценивалась на металлографических шлифах с помощью программного комплекса обработки и анализа изображений «Autoscan». Для изучения фазового состава использовался дифрактометр ДРОН-3 (монохроматизированное (CoK_α) излучение) Запись дифракционных линий осуществлялась в режиме сканирования. Шаг сканирования – $0,1^\circ$, время набора импульсов в точке 10 сек.

Таблица 1 – Технические характеристики установки АДМ-10

Показатель	Величина
Диаметр применяемой проволоки, мм	1,2–2,0
Скорость подачи проволоки, м/мин	0–6,3
Рабочий ток дуги, А	До 500
Коэффициент использования материала, не менее	0,85
Расход воздуха при 0,6 МПа, м ³ /ч	60
Расход горючего газа (пропан-бутан), кг/мин	0,011

Определение содержания углерода в напыленном покрытии проводилось на экспресс-анализаторе АН-7529М. Расшифровка рентгенограмм осуществлялось при помощи программного обеспечения Crystallographica Search-Match с картотекой PDF-2. Параметр решетки аустенита рассчитывался по дифракционной линии 222. Измерения твердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan 20.

Триботехнические испытания напыленных покрытий проводились на трибометре АТВП. При испытаниях использовалось контртело, изготовленное из закаленной стали У8 (800 HV10).

Основные результаты исследований, положенные в основу разработки технологического процесса. Состав распыляющего пропано-воздушного факела аппарата гиперзвуковой металлизации был выбран следующим: режим 1 – избыток пропана (объемное соотношение воздуха и пропана $\beta = 17–20$); режим 2 – избыток воздуха ($\beta = 26–28$); режим 3 – чистый воздух (схема традиционной электродуговой металлизации).

Поскольку основное количество оксидов образуется в результате контакта расплавленных частиц с воздухом, исследовалось влияние расхода распыляющего воздуха на количество кислорода в покрытиях, полученных традиционной металлизацией (режим 3). Установлено что, содержание кислорода в электрометаллизационных покрытиях составляет 2,6 ... 4,2 % в зависимости от расходов сжатого воздуха, причем максимальная концентрация 4,2 % достигается при расходах около 1,4 ... 1,6 м³/мин (рис. 2). Дальнейшее увеличение расхода распыляющего воздуха не приводит к заметному повышению концентрации кислорода. Наименьшее количество кислорода (1,3–2,3 %) регистрируется в ГМ – покрытиях, напыленных при избыточном количестве пропана в

смеси (режим 1). Увеличение воздуха в горючей смеси до практически предельного значения ($\beta = 28$) повышает содержание кислорода, однако степень окисления покрытий остается ниже, чем при традиционной металлизации.

Исследование плотности и адгезии напыляемых покрытий показало, что пористость резко возрастает, а прочность сцепления снижается при увеличении дистанции напыления свыше 200 мм. Особенно это проявляется при минимально допустимых расходах сжатого воздуха 1–1,5 м³/мин. При увеличении расходов воздуха до максимальных значений, пористость монотонно убывает.

Минимальный расход определяется устойчивостью горения горючей смеси, максимальный – расходом горючего газа (пропана) из баллона. Дальнейшее увеличение расходов обеспечит рост качества покрытия, однако это потребует усложнения технологической схемы процесса для обеспечения необходимого расхода пропана, например, подачи пропана с рампы. В большинстве случаев такое удорожание процесса нецелесообразно.

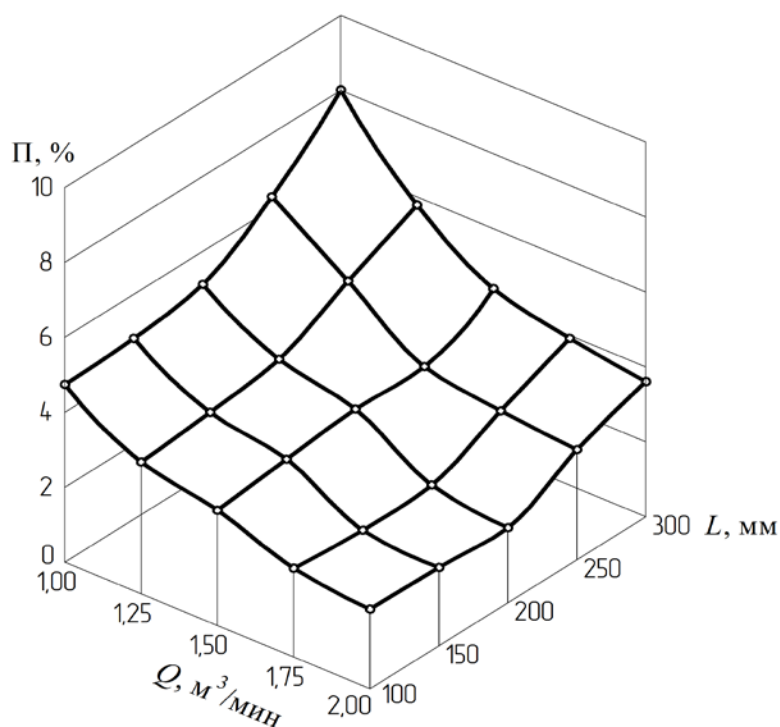


Рис. 2. Зависимость пористости стальных покрытий от расхода воздуха (Q) и дистанции напыления (L)

При увеличении дистанции напыления свыше 200 мм снижаются скорость и тепло-содержание капель. При ударе по этой причине ухудшаются условия растекания жидкого металла капли по поверхности. Это приводит к повышению пористости покрытия. Малые дистанции, $L = 100$ – 150 мм, технологически сложно обеспечивать в углах и на выступах поверхности.

Таким образом, проведенные исследования показали, что наиболее плотные покрытия с допустимым количеством оксидов в процессе гиперзвуковой металлизации сталей образуются при использовании пропано-воздушной смеси с избытком пропана ($\beta = 18$ – 20), расходом воздуха в смеси $Q = 1,75$ – 2 м³/мин., дистанциях напыления $L = 150$ – 170 мм.

В ходе определения рациональных электрических параметров процесса установлено, что величина рабочего тока при напряжении 26...30 В прямо пропорциональна производительности процесса напыления стальных покрытий.

Анализ результатов экспериментов позволил определить следующие рациональные режимы напыления стальных покрытий на детали типа «вал» методом гиперзвуковой металлизации:

– для валов диаметром от 60 до 100 мм и диаметра распыляемых проволок 1,6 мм – напряжение дуги 26 В, ток дуги 350 А, частота вращения детали 65–70 об/мин; для диаметра распыляемых проволок 2 мм – напряжение дуги 30 В, ток дуги 250 А, частота вращения детали 70–75 об/мин;

– для валов диаметром от 100 до 200 мм и диаметра распыляемых проволок 1,6 мм – напряжение дуги 28–30 В, ток дуги 350 А, частота вращения детали 75–90 об/мин; для диаметра распыляемых проволок 2 мм – напряжение дуги 30–32 В, ток дуги 350 А, частота вращения детали 90–110 об/мин;

– для валов диаметром от 200 до 300 мм и диаметра распыляемых проволок 1,6 мм – напряжение дуги 30–32 В, ток дуги 350 А, частота вращения детали 90–110 об/мин; для диаметра распыляемых проволок 2 мм – напряжение дуги 34 В, ток дуги 350 А, частота вращения детали 110–120 об/мин.

На следующем этапе изучались покрытия, полученные одновременным распылением проволок мартенситного и аустенитного классов, необходимость которого обосновывалась следующим. Одним из возможных подходов формирования композиционных газотермических покрытий, отвечающих принципу Шарпи (материал, отвечающий высоким требованиям по износостойкости, должен состоять из сплошной вязкой матрицы, в которой расположены твердые структурные составляющие), может быть одновременное распыление стальных проволок аустенитного и мартенситного классов. При этом частицы аустенитной стали образуют вязкую коррозионно-стойкую матрицу, в которой на стадии приработки узла трения может быть реализован эффект трибомеханического модифицирования с формированием наноразмерной зеренной ячеистой субструктуры [3], а частицы мартенситной стали образуют дисперсные включения с повышенным содержанием остаточного аустенита [4], в котором на начальной стадии эксплуатации будут протекать деформационно активируемые $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения с образованием твердых включений мартенсита деформации.

Для обеспечения достаточно высокого содержания упрочняющей фазы в композиционном покрытии содержание остаточного аустенита в нем должно быть в пределах 45–60 об. %. При его содержании менее 45 об. % количество формирующегося мартенсита деформации и твердость покрытия после приработки будут недостаточными для обеспечения высокой абразивной износостойкости рабочего слоя, а при содержании более 60 об. % после приработки может сформироваться чрезмерно твердое покрытие низкой трещиностойкости, которое будет иметь недостаточную износостойкость в условиях ударных нагрузок. Вязкая и износостойкая матрица композиционного покрытия может быть получена в процессе трибомеханического модифицирования элементов газотермического покрытия, сформированных из напыленных частиц аустенитной стали, с образованием в них наноразмерной субзеренной структуры, в то время как твердые включения образуются в результате $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения в напыленных частицах мартенситной стали в процессе деформационного воздействия при приработке.

Поскольку механические и физические свойства высокохромистых аустенитных сталей определяются количеством аустенита, перешедшего в мартенсит, а также температурой мартенситного превращения (чем ниже, тем лучше), необходимо, чтобы концентрация никеля в высокохромистой стали аустенитного класса, как одного из наиболее активных аустенитообразующих элементов, составляла не менее 10 об. %.

Анализ результатов проведенных экспериментов показал, что для формирования покрытий с количеством остаточного аустенита в пределах 45–60 % необходимо, чтобы в качестве материала одной из проволок использовалась высокохромистая сталь аустенитного класса с содержанием никеля не менее 10 %, в качестве другой проволоки – высокохромистая сталь мартенситного класса с содержанием углерода более 0,4 %, причем ее диаметр должен быть в 1,12–1,20 раза больше диаметра проволоки аустенитного класса.

Известны приемы повышения триботехнических свойств пар трения и увеличения ресурса трибосопряжений путем их приработки в присутствии смазочного материала, содержащего наноразмерные твердые компоненты, в частности наноразмерные алмазы, получившие название трибомеханического модифицирования [3, 5]. Твердые наноразмерные частицы, введенные в состав смазочной среды, оказывают комплексное воздействие на трибосистему, увеличивая ее долговечность. С одной стороны, наночастицы повышают физические и объемно-механические свойства смазочного материала, увеличивают несущую способность смазочного слоя. Во-вторых, твердые наноразмерные частицы способны оказать положительное влияние на поверхность контактирующих тел, изменив их структуру в процессе фрикционного контакта.

Применение смазочных материалов, модифицированных, твердыми наноразмерными добавками, обеспечивает интенсификацию приработочных процессов в трибосопряжениях, расширение диапазона температурно-нагрузочных режимов эксплуатации узлов трения и повышения их ресурса. Эффективность трибомеханического модифицирования в значительной степени определяется структурно-фазовым состоянием поверхностного слоя материалов пары трения, составом приработочной композиции и нагрузочно-скоростными режимами трибоконтактного взаимодействия пары трения.

Целью последующих исследований явился выбор состава смазочного материала для трибомеханической обработки композиционных стальных газотермических покрытий.

Отработка состава приработочной композиции и режимов трибомеханического модифицирования осуществлялась на композиционных стальных покрытиях, полученных распылением следующих пар проволочных материалов (таблица 2).

Таблица 2 – Варианты газотермических покрытий для отработки параметров трибомеханического модифицирования

№ образца	Марки напыляемых стальных проволок		Диаметр проволоки, мм		Соотношение диаметров проволок, $D1/D2$	Содержание остаточного аустенита, об. %
	проволока №1	проволока №2	$D1$	$D2$		
1	40X13	08X18H10T	1,8	1,6	1,12	46
2	45X14H14B2M	12X18H10T	1,8	1,6	1,12	52
3	90X18MФ	12X18H12T	1,8	1,5	1,20	60
4	95X18	12X18H10T	1,8	1,5	1,20	58
5	110X18M	12X25H16T7	1,8	1,5	1,20	60

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента трения от продолжительности приработки (путь трения) для газотермического покрытия состава № 1 (таблица 2) при скорости скольжения $V = 0,25$ м/с и удельных нагрузках $P = 40$ МПа (кривые 1а, 1б, 1в, 1г) и $P = 50$ МПа (кривые 2а, 2б, 2в, 2г) с использованием пластичной смазки Литол-24

(число пенетрации 300), модифицированной алмазно-графитовой шихтой ША-А (ТУ РБ 1000561180.003–2003) (размер частиц в пределах $dч = 10–50$ нм) с различной концентрацией добавки: США-А = 0,20 масс. % (кривые 1а, 2а), США-А = 0,25 масс. % (кривые 1б, 2б), США-А = 0,50 масс. % (кривые 1в, 2в), США-А = 0,60 масс. % (кривые 1г, 2г).

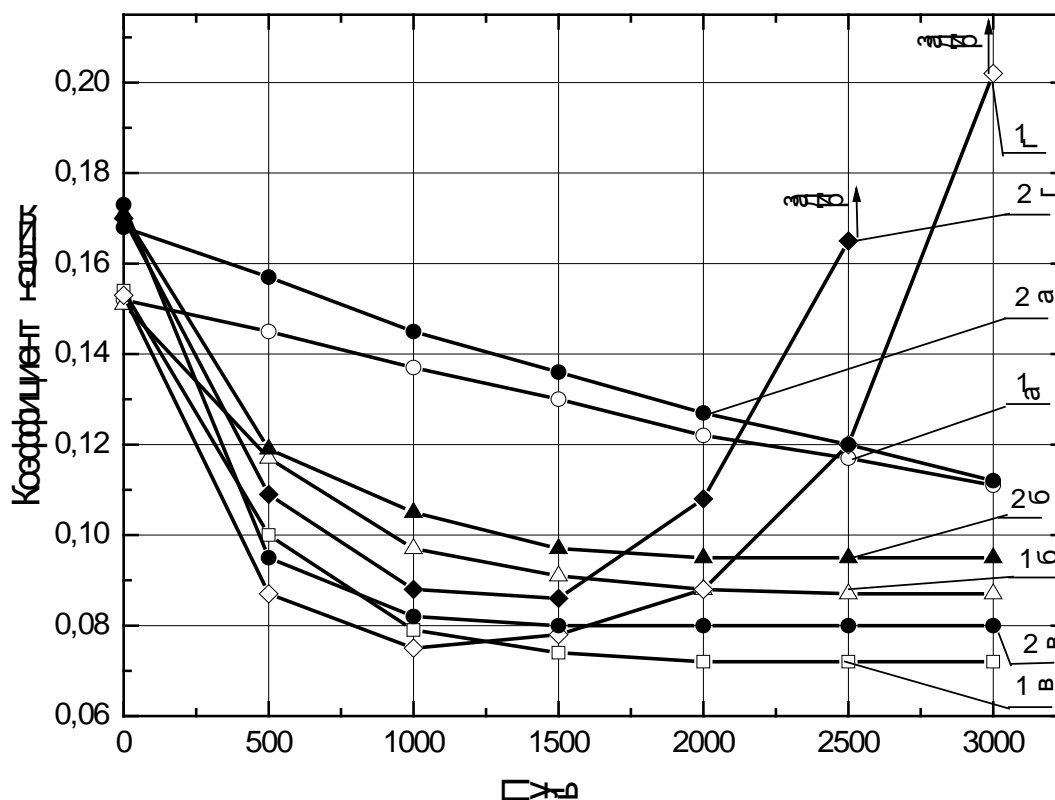


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от продолжительности приработки (путь трения) для газотермического покрытия состава № 1 (таблица 2)

Результаты исследований влияния режимов трибомеханического модифицирования на характер изменения свойств поверхности газотермического покрытия (твердость, коэффициент трения) показал, что наиболее эффективно процесс трибомодифицирования поверхности трения для исследованных газотермических покрытий проявляется в диапазоне удельных нагрузок $p = 40–50$ МПа при скорости скольжения $V_{ск} = 0,20–0,30$ м/с. При этих режимах стабилизация коэффициента трения на уровне $f = 0,07–0,09$ наступает после приработки на пути трения $L = 1580–1860$ м, а твердость поверхностного слоя при этом увеличивается на 50–70 %. При давлениях $p < 40$ МПа стадия приработки протекает на пути трения более $L = 3000$ м, и при этом повышение твердости поверхности составляет не более 12–23 %, а коэффициент трения стабилизируется на уровне $f = 0,10–0,12$. При давлениях $p > 50$ МПа уже на стадии приработки начинают проявляться явления задира, обусловленные выдавливанием смазочного материала из зоны трения.

Технологический процесс и его испытания. Разработанный на основании анализа результатов проведенных исследований технологический процесс восстановления штоков силовых гидроцилиндров монтажного оборудования гиперзвуковой металлизацией с последующим трибомодифицированием рекомендуется применять при ремонте

штоков диаметром 30–120 мм, эксплуатирующихся в гидроцилиндрах с номинальным рабочим давлением от 10 до 25 МПа.

Технологический процесс включает подготовку проволочных материалов для процесса гиперзвуковой металлизации, подготовку восстанавливаемой поверхности штока, нанесение покрытия гиперзвуковой металлизацией, шлифование покрытия, трибомодифицирование. Для восстановления штоков используют одновременное распыливание двух проволок: проволоку из стали 95X18-III $d = 2,0$ мм ТУ 1039-2012 и проволоку из стали 12X18Н10Т $d = 1,8$ мм, ГОСТ 18143-72. Для напыления покрытия устанавливают напряжение металлизации 32...34 В, скорость подачи проволок 3,2 м/мин, дистанцию напыления 170 мм. Устанавливают расход воздуха 1,75 м³/мин (105 м³/ч) при давлении 0,45...0,60 МПа, пропан-бутана – 0,9 м³/час при давлении в 0,45 МПа, производят зажигание смеси в камере сгорания, включают подачу проволоки и наносят покрытие (рисунок 5.13, а). Используемая в камере сгорания металлизатора пропановоздушная смесь подается с избытком пропана ($\beta = 18–20$). Если в качестве горючего газа использовали газ МАФ, то его давление и расход составляет 0,37 МПа и 0,9 м³/ч. Частота вращения восстанавливаемого штока 90 об/мин. Толщина слоя наносимого покрытия зависит от глубины дефектов на восстанавливаемых штоках и составляет $\delta = 1,0...1,8$ мм.

Для шлифования покрытия рекомендуется станок кругло-шлифовальный 3А423 с абразивным кругом ПП960×40×305 25А40СМ15К2.

После обработки шлифованием в номинал, рабочую поверхность смазывают смазкой ИТМОЛ-150Н, модифицированная шихтой ША-А ТУ РБ 1000561180.003–2003. Для нанесения смазки используют кисть-макловицу типа КМА 135 ГОСТ10597–87.

Максимальные триботехнические характеристики восстановленной поверхности обеспечиваются после приработки штока при удельной нагрузке $P = 40–50$ МПа, скорости скольжения $V_{ск} = 0,20–0,30$ м/с и пути трения более 1900 м. Учитывая, что указанный диапазон практически соответствует условиям работы штоков, эффект «самоупрочнения» нанесенных покрытий достигается после первой недели эксплуатации.

Вывод. Испытания показали, что износостойкость восстановленных по разработанной технологии рабочих поверхностях штоков выше, чем у новых штоков в 1,15–1,25 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шестопапов, К.К. Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование / К. К. Шестопапов. – 8-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2014. – 320 с.
2. Белоцерковский, М. А. Особенности и применение гиперзвуковой металлизации / М.А. Белоцерковский // Белорусская инновационная неделя «Состояние и перспективы совместных белорусско-польских исследований в области упрочняющих и биотехнологий»: научно-практический семинар. – 2011. – 16 – 17 ноября. – С. 21–23.
3. Витязь, П. А. Повышение ресурса трибосопряжений активированными методами инженерии поверхности / П. А. Витязь, В. И. Жорник, М. А. Белоцерковский, М. А. Леванцевич. – Минск: Беларус. навука, 2012, – 452 с.
4. Кукареко, В. А. О природе формирования метастабильной аустенитной структуры при газотермическом напылении высокохромистой стали мартенситного класса 95X18 / В. А. Кукареко, А. Н. Григорчик, М.А. Белоцерковский, А. В. Сосновский // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. Т. 13. – № 7 (151). – С. 318–322.
5. Zhornik, V. I. Tribomechanical Modification of Friction Surface by Running-In Lubricants with Nano-Sized Diamonds / V. I. Zhornik, V. A. Kukareko, M. A. Belotserkovsky // Advances in Mechanics Research. Volume 1 / Editors: Jeremy M. Campbell. – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2011. – P. 1–78.

Поступила 18.09.2020