

## ВИДЫ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТАЛЛОВ И СПОСОБЫ ИХ НАНЕСЕНИЯ

В.А. Наумов

С.Н. Шарапов

Л.И. Бессуднов

Bessudnovli@inbox.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

**Аннотация**

*Рассмотрены технология и способы нанесения покрытий на металлические детали, отмечены износостойкость, коррозионная стойкость и недостатки. Особое внимание уделено технологическому покрытию Molykote Metalform на основе синтетического воска*

**Ключевые слова**

Поступила в редакцию 30.11.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

**Введение.** Основными причинами (более 70 %) выхода из строя деталей машин и металлоконструкций являются процессы изнашивания и коррозии. Ежегодные потери металла от трения и износа составляют до 4–5 % валового национального дохода. Именно поэтому большое внимание уделяется увеличению срока службы и восстановлению рабочих поверхностей различных деталей и механизмов. В ряде случаев для увеличения срока службы стальных деталей является целесообразным применение различных способов нанесения защитных и упрочняющих покрытий на их рабочие поверхности [1, 2].

До недавнего времени основным направлением по борьбе с износом в машиностроении было повышение твердости трущихся поверхностей детали и избирательный перенос. Под избирательным переносом (ИП) понимают комплекс физико-химических явлений на контакте поверхностей при трении, который позволяет преодолеть ограниченность ресурса трущихся сочленений машин и снизить потери на трение. ИП — это особый вид трения, который обусловлен самопроизвольным образованием в зоне контакта неокисляющейся тонкой металлической пленки с низким сопротивлением сдвигу и неспособной наклепываться. На пленке образуется, в свою очередь, полимерная пленка, которая создает дополнительный антифрикционный слой. ИП, его системы снижения износа и трения, разработанные А.А. Поляковым, не вытекают из ранее имевшихся представлений о трении и изнашивании. Теперь для защиты металлических заготовок и деталей от окисления, обезуглероживания, газонасыщения, выгорания легирующих элементов используют технологические покрытия. Также их применяют в качестве высокотемпературной смазки при ковке, штамповке, прокатке, прессовке, термической обработке различных сталей, титановых, тугоплавких, жаропрочных и др. Рассмотрим их подробнее.

Антифрикционные покрытия (АФП) — смазочные материалы, подобные краскам, но содержащие вместо красящего пигмента высокодисперсные частицы твердых смазочных веществ, равномерно распределенные в смеси связующих элементов и растворителей. Механизм действия антифрикционных покрытий состоит в следующем. После полимеризации связующие элементы вместе с сухими смазками заполняют впадины микронеровностей поверхности и увеличивают ее опорную площадь [1, 2].

Применение технологических покрытий позволяет значительно улучшить технико-экономические показатели металлообрабатывающих производств, например, сократить потери металла, снизить трудоемкость операций обработки, сократить цикл производства изделий. Индивидуальная защита деталей покрытиями позволяет не только исключить окисление поверхности и выгорание легирующих элементов, но и использовать данный способ защиты без каких-либо дополнительных капитальных затрат на обычном термическом оборудовании [3–5]. Покрытия обеспечивают получение однородной микроструктуры в поверхностном слое деталей и заготовок, гарантируют получение высоких антикоррозионных и механических свойств. При применении технологических покрытий снижается трудоемкость термообработки деталей и последующей очистки их поверхности, сокращается продолжительность производственного цикла, расход специально подготовленного песка для пескоструйной очистки, повышается качество поверхности и надежность деталей, исключаются потери нержавеющей стали на угар. Особое значение технологические покрытия приобретают в целях снижения адгезии между поверхностью заготовки и инструментом и уменьшения толщины деформируемого слоя при обработке металлов давлением.

В процессе трения часть смазочных частиц переносятся на сопряженную поверхность. При этом они ориентируются параллельно направлению движения, образуя гладкую и скользкую защитную антифрикционную пленку на обеих поверхностях. Чтобы обеспечить хорошую защиту, покрытие должно быть сплошным, иметь хорошую адгезию с основным металлом (сцепление), быть непроницаемым для агрессивной среды, равномерно распределяться по поверхности, обладать высокой износостойкостью, жаростойкостью и в отдельных случаях твердостью.

Во всем мире широкую известность получили высококачественные антифрикционные покрытия Molykote от компании Dow Corning. Они изготавливаются на основе дисульфида молибдена, графита, политетрафторэтилена, а также композиций различных твердых веществ, содержание которых в зависимости от вида покрытия может достигать 70 %. Сухие смазки в составе покрытий обеспечивают необходимый комплекс свойств.

Связующие вещества определяют его защитные свойства, химическую стойкость и тип отверждения. В линейке смазочных материалов Molykote имеются АФП, полимеризующиеся как при комнатной температуре, так и в результате нагрева. В зависимости от обрабатываемой основы, типа полимеризации, требуемого комплекса эксплуатационных характеристик применяют различные

способы подготовки поверхности и нанесения АФП Molykote [1, 2]. Существует несколько этапов технологического процесса нанесения покрытий. Рассмотрим эти этапы подробнее.

**Подготовка поверхности.** Подготовка к нанесению АФП начинается с обезжиривания. Даже если ранее производилось предварительное удаление коррозии кислотой, последующее обезжиривание способствует более равномерному и прочному нанесению покрытия. Традиционно для обезжиривания деталей в щелочных растворах рекомендуют полуавтоматические моечно-сушильные установки, в которых можно промывать детали после механической обработки в количестве до 80 кг/ч. Для операций химического и электрохимического обезжиривания применяют стальные сварные ванны, оборудованные подогревом в виде парового змеевика. Ванны для травления в кислотах изготавливают из кислотостойких материалов (керамики, винипласта, полипропилена и др.) или из стали, но с кислотостойкой футеровкой (винипласт, хлорвиниловый пластикат, резина).

При нанесении покрытий Molykote данная технологическая операция может производиться органическими нежирными растворителями, например, нефрасом, растворителями Molykote 7415 или Molykote L13 вручную, а также с помощью ультразвуковых очистителей. После обезжиривания детали высушивают на воздухе. Трогать обработанные поверхности руками нельзя. Из соображений экологичности и безопасности персонала, предпочтительно использовать органические растворители с низким содержанием ароматических соединений. Имеющиеся на обрабатываемой поверхности окислы удаляют химическими или механическими методами [1, 2].

В качестве механического метода для деталей из стали, титана, алюминия, меди, магния и их сплавов рекомендовано проводить пескоструйную обработку окисью алюминия или литой сталью (размер зерна около 55 мкм). Этот вид предварительной обработки поверхности необходим также для хромированных и никелированных деталей. Помимо удаления коррозии, пескоструйная обработка повышает шероховатость поверхности (Ra от 0,5 до 1,0 мкм) и обеспечивает лучшую адгезию АФП. По окончании работ необходимо удалить прилипшие частицы песка сухим сжатым воздухом, не содержащим масла. Во избежание риска появления коррозии на обработанные таким образом поверхности в кратчайшие сроки необходимо нанести АФП. Следует учитывать, что при пескоструйной обработке деталей происходит изменение их линейных размеров до 1,3 мкм. Также применяют шлифовально-полировальные операции для сглаживания поверхности и удаления царапин, рисок и подобных дефектов, обычно используют двусторонние полировальные станки. Для обработки поверхности деталей абразивными материалами применяют гидроабразивные установки различных типов, в которых пульпа из воды с абразивом подается под давлением 390–490 кПа. Более эффективным средством абразивной обработки является так называемое вибрационное галтование. Для виброабразивной обработки мелких деталей используют установки подводного полирования и сухой глян-

повки в барабанах. Установка состоит из ванны с мыльным раствором и двух барабанов с двумя или тремя отсеками в каждом. Нижний барабан, имеющий перфорированные грани, вращается в мыльной воде, верхний барабан герметичен. Подъем и опускание барабанов осуществляются с помощью ручной лебедки. После пескоструйной обработки возможно нанесение АФП, однако для более продолжительной службы покрытия рекомендуется фосфатирование детали. Для обработки деталей из меди и медных сплавов вместо пескоструйной обработки может применяться травление смесью двух или более кислот (серной, фосфорной, азотной, хромовой, соляной). Травление коррозионностойкой стали производят специальными растворами щавелевой кислоты. Растворы следует подбирать таким образом, чтобы можно было удалить продукты коррозии, при этом воздействие на основной металл должно быть незначительным. Время погружения, концентрация раствора варьируются в зависимости от сплава и состояния поверхности. После травления необходимо тщательно промыть детали для удаления остатков кислоты.

Алюминий и его сплавы обрабатывают методом электролитического оксидирования. Алюминиевые сплавы с содержанием меди 0,5 % и более, а также сплавы с общим содержанием легирующих добавок свыше 7,5 % обрабатывают раствором серной кислоты. После обработки детали необходимо промыть в воде, затем закрепить поверхностную пленку путем погружения в 5%-ый раствор дихромата натрия или калия, прополоскать и высушить. Сушку производят при температуре не выше 102 °С. Все другие алюминиевые сплавы и алюминий могут обрабатываться в растворе хромовой кислоты.

Фосфатирование применяют для железа и стали, но не для коррозионностойкой стали, оцинкованного чугуна и деталей с кадмиевым и гальваническим покрытием. Обработка фосфатом марганца увеличивает несущую способность и смазывающие свойства покрытия. Обработка фосфатом цинка улучшает его коррозионную стойкость. Фосфат железа улучшает адгезию с АФП.

Для фосфатирования используют только такие растворы, которые создают слои мелких кристаллов. Большинство частиц, осаждаемых на поверхности, должно иметь размеры в диапазоне от 3 до 8 мкм. После обработки фосфатный слой должен иметь ровную, однородную структуру и цвет от серого до черного. Пятна фосфатирующего раствора и следы коррозии на поверхности деталей не допустимы. Во избежание образования коррозии под действием влаги, содержащейся в воздухе, АФП необходимо наносить в кратчайшие сроки после фосфатирования.

**Нанесение разных видов покрытий. Цинкование** — наиболее распространенный метод защиты металла от коррозии, заключается в нанесении цинка или его сплава на поверхность изделия из металла. В силу высокой технологичности и экономической выгоды цинкование занимает одно из лидирующих мест среди операций антикоррозионной обработки деталей из железа и его сплавов. В зависимости от необходимой степени защиты металлической поверхности толщина покрытия составляет от 10 до 200 мкм. Наиболее часто этот метод защиты используют при обработке стальных листов, проволоки и ленты, крепежных деталей, трубопроводов и корпусов приборов.

Нанесение хрома или его сплава на металлическое изделие применяют, чтобы повысить износостойкость, жаростойкость, механические и электромагнитные свойства, сопротивление к коррозии. Широкое распространение получила электролитическая и диффузионная технология обработки металлов с использованием хрома.

Нанесение на поверхность металлических изделий никелевого покрытия применяют для защиты от коррозии изделий из стали и сплавов на основе меди, цинка и алюминия, реже — изделий из магния, титана, вольфрама, молибдена и сплавов на их основе. Толщина покрытия составляет 1–50 мкм [3–5].

**Алюминирование, алитирование** — это процесс насыщения поверхностного слоя атомами алюминия деталей, изготовленных из стали, никелевых сплавов и чугуна. Поверхность обрабатываемого металла приобретает коррозионную стойкость, жаропрочность и привлекательный внешний вид. Наиболее распространенным является применение горячего алюминирования. Детали погружают в ванну с расплавом алюминия и кремния. Толщина покрытия может составлять 20–200 мкм [6, 7].

**Гальванический метод** — нанесение медных покрытий на стальные и цинковые детали или на стальную проволоку, применяют для защиты отдельных участков стальных изделий от цементации (науглероживания), используют как технологический слой при нанесении на поверхность никеля или хрома. Медное покрытие не используют в качестве защитного, поскольку оно не обладает достаточной стойкостью к коррозии. Оловянирование — антикоррозионная защита изделий, в том числе и тех, что подвержены воздействию органических кислот. Благодаря высокой устойчивости и безвредности такого покрытия оловом, его активно используют для получения тары и прочих аксессуаров для пищевой промышленности. Кроме того, технология антикоррозионной обработки с использованием олова получила широкое применение в приборостроении и изготовлении электронных узлов самого различного назначения, данный металл используют в качестве покрытия припаиваемых деталей. Кадмий используют как антикоррозионное покрытие изделий, эксплуатация которых проходит в морской воде и условиях воздействия соли и влаги. Такое применение обусловлено большой химической устойчивостью данного элемента. Кадмий имеет высокую пластичность, что обуславливает его применение в качестве антикоррозионного покрытия деталей с резьбовыми элементами, прецизионных и предназначенных к пайке поверхностей. При этом кадмиевому покрытию не страшны изгиб, вытяжка или развальцовка, а пайка должна проходить с использованием оловянно-свинцовых припоев. Помимо защитных покрытий из металла, в различных областях промышленности применяют неметаллические покрытия (лакокрасочные, полимерные, покрытия резинами, смазками, силикатными эмалями, пастами) для изоляции металлических изделий, защиты от воздействия влаги, придания более эстетического вида изделию [8, 9].

Лакокрасочные защитные покрытия применяют широко. В состав покрытия входят пленкообразующие вещества, наполнители, пигменты, пластификаторы,

растворители, катализаторы. Такое покрытие не только хорошо защищает изделие в различных атмосферах, но и придает ему приятный внешний вид. Кроме того, изменяя состав смеси, получают покрытия со специфическими свойствами (токопроводящие, светящиеся, декоративные, с повышенной прочностью, жаростойкие, кислотостойкие и т. п.). Лакокрасочные защитные покрытия, в свою очередь, подразделяют на лаки, краски, эмали, грунтовки, олифы и шпаклевки.

**Покрытие полимерами** — тонкослойное покрытие тонкостенных изделий путем нанесения порошкообразных полимерных композиций на поверхность детали или формы. Позволяет получить антикоррозионное и декоративное покрытие, которое увеличивает диэлектрические и теплоизоляционные качества/свойства материала, повышает сопротивляемость прохождению звука. Защитное покрытие резинами (гуммирование) осуществляют с помощью резины и эбонита для защиты от воздействия внешней среды различных емкостей, трубопроводов, цистерн, химических аппаратов, резервуаров для перевозки и хранения химических веществ. Защитное покрытие может быть сформировано из мягкой (при воздействии на эксплуатируемое изделие ударных, растягивающих, колебательных и других видов нагрузок) или твердой резины (работают при постоянной температуре, не подвергаются нагрузкам). Мягкость резины регулируют с помощью добавок серы (мягкая — содержит от 2 до 4 % серы, а твердая — от 30 до 50 %). Наносят резину на предварительно очищенную и обезжиренную поверхность, сначала обрабатывая ее резиновым клеем, потом валиком выдавливая скопившийся воздух. Заключительным этапом в гуммировании является вулканизация. Резиновые защитные покрытия являются хорошими диэлектриками, обладают высокой стойкостью по многим кислотам и щелочам. Разрушающее действие на резиновые покрытия оказывают лишь сильные окислители. Резиновые покрытия, как и все полимерные материалы, со временем стареют [10].

Защитные покрытия на основе паст и смазок используют при длительном хранении и перевозке металлоизделий. Пасту или смазку наносят на защищаемую поверхность распылением, кистью или специальным тампоном. После высыхания образуется пленка, которая защищает изделие от воздействия влаги, пыли, газообразных веществ. Смазки изготовляют на основе минеральных масел (вазелинового, машинного) с примесью воскообразных веществ (воска, парафина, мыла). Защитные покрытия из паст и смазок очень эффективны. Главным недостатком этих покрытий считают неустойчивость образовавшейся пленки к внешним воздействиям.

Защитные покрытия силикатными эмалями применяют для изделий, работающих при высоких температурах, давлениях, в агрессивных химически активных средах. Формирование эмалевого защитного покрытия возможно сухим (нанесение порошка) или мокрым (нанесение пасты) способами. Процесс нанесения эмали проводят в несколько этапов. Сначала непосредственно на изделие наносят порошкообразную грунтовую эмаль, которая улучшает адгезию, а также уменьшает термические и механические напряжения. Затем проводят спекание при температуре 880–920 °С. Далее покрывают слоем покровной эмали и спека-

ют при температуре 840–860 °С. Основным недостатком эмаливого защитного покрытия является низкая прочность при воздействии ударных нагрузок, т.е. растрескивание, скалывание [11, 12].

**Газопламенное и плазменное напыление.** Наиболее качественные покрытия получают при первоначальном напылении подслоя термореагирующим порошком толщиной 0,05–0,15 мм, а затем основного слоя износостойким порошковым сплавом толщиной 2 мм. Подслой и основной слой наносят при одних и тех же режимах напыления: давление кислорода 0,35–0,45 МПа; давление ацетилена 0,03–0,05 МПа; расход кислорода 960–1100 л/ч; расход ацетилена 900–1000 л/ч; расстояние от среза сопла мундштука до наплавляемой поверхности 160–200 мм; продольная подача 3–5 мм/об; расход порошка 2,5–3 кг/ч.

Мощность пламени выбирают в зависимости от размеров детали. При напылении применяют восстановительное (нормальное) или науглероживающее (с небольшим избытком ацетилена) пламя. Перед началом напыления деталь подогревают до температуры 50–100 °С. В процессе напыления необходимо следить, чтобы поверхность напыляемой детали не нагревалась выше 250 °С. Температуру можно контролировать с помощью термочувствительных карандашей. Недостатком данного способа считают необходимость предварительного нагрева покрываемой поверхности минимум до 135 °С (в ряде случаев до 200 °С), низкие пределы прочности и модуль упругости при сжатии, а также недостаточная адгезия к стали и низкая деформационная теплостойкость.

АФП наносят путем распыления, погружения, с помощью щетки, валиков или трафаретной печати. Покрытия Molykote наносят путем распыления с использованием сжатого воздуха или электростатического процесса в специальных камерах или в помещениях с хорошей вентиляцией. Небольшие участки целесообразно окрашивать с помощью аэрографа с круговым сечением факела и диаметром сопла 0,8 мм при давлении от 2 до 5 бар. Расстояние между поверхностью и аэрографом должно быть таким, чтобы попадая на поверхность состав не высыхал и не образовывал брызг или капель. Толщина защитной пленки покрытия регулируется количеством наносимых слоев. Каждый последующий слой можно наносить лишь после полного высыхания предыдущего. Интервал перед нанесением каждого последующего слоя не должен превышать времени, указанного в технической документации АФП [1, 2].

При распылении нужно использовать сжатый сухой воздух, не содержащий масла. Для равномерного нанесения покрытия в процессе длительной работы или после перерывов покрытие необходимо периодически перемешивать. До полного высыхания покрытия с обработанными деталями следует обращаться с большой осторожностью. Если позволяют форма, размер и количество деталей, а также при наличии необходимого оборудования, для нанесения АФП Molykote можно использовать способ погружения. Наиболее экономичным для больших партий таких изделий, как винты, гайки и других мелких деталей является погружение с раскручиванием на центрифуге. Погружение с центрифугированием всегда проводится дважды. Необходимая толщина пленки АФП при его заданной вязкости

устанавливается регулированием скорости вращения центрифуги. Крупные болты, втулки, валы, секции, трубы и плоские детали, которые не могут быть покрыты пленкой в центрифуге, обрабатываются в погружной ванне. В таком случае необходимо регулировать скорость погружения детали для предотвращения затягивания в ванну пузырьков воздуха. Скорость извлечения детали также необходимо контролировать, чтобы избежать образования потеков и добиться требуемой толщины пленки. Равномерность распределения содержимого погружной ванны обеспечивается постоянной циркуляцией жидкости, создаваемой насосами и сливными порогами.

Покрытие Molykote можно наносить с помощью щетки, кисти, валиков, а также стандартными машинами для койлкоутинга — окрашивания металлических лент в рулонах. Следует учитывать, что при нанесении АФП щеткой или кистью трудно добиться равномерной толщины пленки. Если покрытие необходимо нанести только на часть детали, то целесообразно применять трафаретную печать. Перед отверждением АФП маскирующие трафареты или защитную пленку удаляют [5].

При необходимости удаления АФП в большинстве случаев используют растворители Molykote L13, Molykote 7415, средства для удаления красок на основе эпоксидных смол или пескоструйную обработку поверхности [1, 2, 5, 10].

**Контроль толщины покрытия.** Толщина пленки оказывает существенное влияние на срок службы, коэффициент трения и антикоррозионные свойства АФП. Она должна превышать размер поверхностных неровностей соприкасающихся поверхностей, т. е. составлять от 5 до 20 мкм. Нанесение покрытия на обе сопряженные поверхности относительно тонким слоем обеспечивает большую несущую способность, чем нанесение более толстого слоя на одну из поверхностей.

Для измерения толщины пленки могут быть использованы следующие методы:

- магнитный (DIN 50 981/ISO 2178) для веществ на основе ферромагнетика;
- вихревых токов (DIN 50 984/ISO 2360) для цветных металлов;
- обратного рассеяния бета-частиц (DIN 50 983/ISO 3543) для пластиков;
- в случае когда другие методы не доступны, микрометр и оптические методы [1, 2, 6].

Задача повышения долговечности узлов трения крайне актуальна в связи с интенсивным развитием науки, техники и технологий. Известно, что во многих странах мира большие коллективы научных сотрудников и инженеров работают над проблемами трения и изнашивания. Однако стремление снизить материалоемкость машин ведет к уменьшению габаритов и удельных массовых характеристик узлов трения, что еще больше усложняет задачу. На основе проведенного исследования рекомендовано использовать покрытие Molykote, как самое простое и наиболее дешевое, особенно для мелкосерийного и единичного производства.



## Литература

1. Горленко А.О., Прудников М.И. Нормализация триботехнических испытаний для создания базы данных по одноступенчатому технологическому обеспечению износостойкости // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008. № 9. С. 7–13.
2. Прудников М.И. Метод триботехнических испытаний цилиндрических поверхностей трения // Вестник БГТУ. 2008. № 2 (18). С. 48–56.
3. Яковлева А.П., Омельченко И.С. Повышение нагрузочной способности стальных деталей методом комбинированной обработки // Авиационная промышленность. 2013. № 2. С. 47–49.
4. Яковлева А.П. Поверхностное упрочнение электромеханической обработкой стальных деталей машин // Авиационная промышленность. 2014. № 1. С. 32–33.
5. Большагин Н.П., Яковлева А.П. Повышение производительности обработки шлифованием // Главный механик. 2014. № 8. С. 34–42.
6. Яковлева А.П. Повышение нагрузочной способности деталей типа тел вращения методом комбинированной обработки // Главный механик. 2015. № 1. С. 46–48
7. Большагин Н.П., Яковлева А.П. Сборка червячной передачи // Авиационная промышленность. 2015. № 2. С. 44–47.
8. Кравченко И.И., Яковлева А.П. Анализ видов разрушений зубчатых колес // Главный механик. 2015. № 5–6. С. 45–50.
9. Яковлева А.П. Обработка зубчатых колес крупного модуля // Главный механик. 2014. № 6. С. 40–42
10. Паршиков О.Н., Яковлева А.П. Обработка стальных деталей электромеханическим методом // Главный механик. 2014. № 7. С. 62–64.
11. Яковлева А.П., Кравченко И.И. Влияние качества поверхности на нагрузочную способность зубчатых колес // Главный механик. 2015. № 10. С. 36–38.
12. Яковлева А.П. Роботы и манипуляторы, пневмомолоты и гидроклины для литейных производств // Главный механик. 2016. № 1. С. 11–16.

**Наумов Валентин Алексеевич** — студент кафедры «Технологии машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Шарапов Сергей Николаевич** — студент кафедры «Технологии машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Бессуднов Леонид Игоревич** — студент кафедры «Технологии машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — А.П. Яковлева, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

## TYPES OF PROTECTIVE COATINGS OF METAL AND METHODS OF THEIR APPLICATION

V.A. Naumov

S.N. Sharapov

L.I. Bessudnov

Bessudnovli@inbox.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

### Abstract

The article deals with the technology and methods for coating metal parts. We specified the advantages and disadvantages of each method and paid particular attention to technological MolykoteMetalform coating based on synthetic wax

### Keywords

Metal, protective coating, wear resistance, corrosion resistance, MolykoteMetalform coating

© Bauman Moscow State Technical University, 2016

### References

- [1] Gorlenko A.O., Prudnikov M.I. Normalization of tribotechnical tests for creation of data base of wear resistance single-stage technological ensuring. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmakh* [Friction&Lubrication in Machines and Mechanisms], 2008, no. 9, pp. 7–13 (in Russ.).
- [2] Prudnikov M.I. Method of tribotechnical tests of cylindrical sliding surfaces. *Vestnik BGTU* [Bulletin of Bryansk State Technical University], 2008, no. 2 (18), pp. 48–56 (in Russ.).
- [3] Yakovleva A.P., Omel'chenko I.S. Enhancement of load-carrying capacity of steel parts by combined processing. *Aviatsionnaya promyshlennost'* [Aviation Industry], 2013, no. 2, pp. 47–49 (in Russ.).
- [4] Yakovleva A.P. Surface hardening by electromechanical processing of steel components of machines. *Aviatsionnaya promyshlennost'* [Aviation Industry], 2014, no. 1, pp. 32–33 (in Russ.).
- [5] Bol'shagin N.P., Yakovleva A.P. Machining efficiency increase by polishing. *Glavnyy mekhanik* [Chief mechanical engineer], 2014, no. 8, pp. 34–42 (in Russ.).
- [6] Yakovleva A.P. Increase of bearing capacity of the parts of solid revolution type by using method of combined treatment. *Glavnyy mekhanik* [Chief mechanical engineer], 2015, no. 1, pp. 46–48 (in Russ.).
- [7] Bol'shagin N.P., Yakovleva A.P. Assembly of a worm gear. *Aviatsionnaya promyshlennost'* [Aviation Industry], 2015, no. 2, pp. 44–47 (in Russ.).
- [8] Kravchenko I.I., Yakovleva A.P. Analysis of gear wheels breakage types. *Glavnyy mekhanik* [Chief mechanical engineer], 2015, no. 5–6, pp. 45–50 (in Russ.).
- [9] Yakovleva A.P. Turning of large module gear wheels. *Glavnyy mekhanik* [Chief mechanical engineer], 2014, no. 6, pp. 40–42 (in Russ.).
- [10] Parshikov O.N., Yakovleva A.P. Electro-mechanic method of steel parts treatment. *Glavnyy mekhanik* [Chief mechanical engineer], 2014, no. 7, pp. 62–64 (in Russ.).
- [11] Yakovleva A.P. Kravchenko I.I. Influence of surface quality onto loading capacity of gear wheels. *Glavnyy mekhanik* [Chief mechanical engineer], 2015, no. 10, pp. 36–38 (in Russ.).
- [12] Yakovleva A.P. Robots and manipulators, pneumatic hammers and hydraulic wedges for the foundries. *Glavnyy mekhanik* [Chief mechanical engineer], 2016, no. 1, pp. 11–16 (in Russ.).

**Naumov V.A.** — student of Department of Mechanical Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Sharapov S.N.** — student of Department of Mechanical Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Bessudnov L.I.** — student of Department of Mechanical Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — A.P. Yakovleva, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor of Mechanical Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.