
УДК 621.81

Модифицирование материалов для подшипников скольжения

Зелинский В.В., Сучилин Д.Н.

В статье приведены результаты исследования возможностей повышения триботехнических свойств материалов для подшипников скольжения на основе использования нового комбинированного технологического приема – пластического деформирования поверхностного слоя с последующей его приработкой по определенной технологии. Сущность модифицирования состоит в управляемом создании положительного градиента напряжений текучести по глубине, предварительно упрочненного поверхностного слоя, на основе использования явлений возврата, достигаемых приработкой. Приведены условия проведения экспериментов на образцах двух подшипниковых сплавов, применяемых в современных поршневых двигателях. Представлена подробная оценка полученных результатов – по несущей способности модифицированной поверхности, длительности приработки, износным характеристикам и температурным условиям, сопровождающим процесс приработки. Отмечена принципиальная возможность существенного повышения служебных свойств исследуемой группы материалов на основе применения представленного способа модифицирования.

Ключевые слова: модифицирование, приработка, износ, трение, несущая способность, нагрузка.

Modification of the materials for plain bearings

Zelinskiy V.V., Suchilin D.N.

The results of investigating the possibilities of improving tribological properties of materials for bearings using a new combination of technological methods - plastic deformation of the surface layer and its subsequent break-in on a specific technology. The essence of the modification is to manage the creation of a positive stress gradient strength in depth, pre-hardened surface layer, using phenomena return, achieved earnings. There are conditions of the experiments on samples of two bearing alloys used in modern piston engines. Provides detailed evaluation of the results - in the carrying capacity of the modified surface, the length of the running, characteristics wear and temperature conditions coupled with the running process. Emphasizing the possibility of a significant increase in service properties of the study group on the basis of materials submitted by the method of inoculation.

Keywords: modification, running-in, bedding, wear, friction, load capacity, load.

Введение

Подшипники скольжения являются объектом внимания в машиностроении в связи с их массовым применением в основных узлах трения поршневых машин – компрессоров различного назначения, транспортных двигателей внутреннего сгорания (ДВС), силовых и энергетических установок и др. Эксплуатация машин в настоящее время ставит задачу повышения служебных свойств подшипников скольжения. В соответствии с современными представлениями в трибологии эти свойства объединяются понятием – совместимость трибосистем, рассматриваемая как их способность обеспечивать оптимальное состоя-

ние в заданном диапазоне условий работы по выбранным критериям [1,2].

Для тепловозных ДВС во ВНИИЖТ достаточно длительное время проводится совершенствование трибосистем с антифрикционными сплавами по показателям совместимости. При этом особое внимание уделяется материаловедческому аспекту (подбору структурного состава сплавов с использованием различных металлов, применению специальных покрытий, в том числе полимерных) и технологическим методам (нанесению регулярного микрорельефа поверхности, использованию особых режимов термообработки и др.).

Целью работы является исследование принципиальных возможностей повышения совместимости трибосистем на основе деформационно-прирабочного модифицирования поверхностного слоя подшипниковых материалов.

Сущность модифицирования

Из ранее проведенных экспериментальных исследований и опыта эксплуатации различных трибосистем известно, что высокие показатели совместимости достигаются:

- 1) нанесением на поверхность трения покрытий из мягких металлов или полимеров;
- 2) при образовании тонких пленок мягкой составляющей антифрикционных сплавов, выполняющих роль твердого смазочного материала;
- 3) в результате эффекта избирательного переноса;
- 4) в результате размягчения отдельных участков трибоповерхностей из-за нагрева в условиях повышенного трения.

Во всех перечисленных случаях оптимизация трения происходит благодаря особенностям пластического течения в пределах весьма малых толщин трибослоя и основывается на реализации правила положительного градиента сопротивлений сдвигу по глубине слоя [2,3].

При локальном пластическом течении в тонком слое сопротивление сдвигу оценивают максимальным значением напряжения сдвига [4], которое в соответствии с условием пластичности Треска (привлеченном как более простое) представляется выражением

$$\tau_{\max} = \frac{\beta \sigma_s}{2}, \quad (1)$$

где σ_s – истинный предел текучести материала слоя, $\beta = 1 \dots 1,15$ – коэффициент уточнения условия для разных схем деформированного состояния. Выражение (1) показывает, что для обеспечения совместимости трибосистем важен положительный градиент именно напряжений текучести в поверхностном слое.

Структура большинства сплавов для подшипников скольжения является бинарной и представляет собой металлическую матричную основу с равномерно расположенными в ней включениями из другого металла. Сплавы могут иметь структуру «твердой основы с мягкими включениями» и «мягкой основы с твердыми включениями».

В соответствии с [5] в исходном (отожженном) состоянии в поверхностном слое матрицы сплава без мягкого покрытия кристаллическое строение металла находится в термодинамически устойчивом состоянии, не способствующем смещению атомов, образованию и движению дислокаций как источникам пластической деформации и градиента напряжений. При трении развитие несовершенств строения нейтрализуется нагревом. Поэтому для создания положительного градиента напряжений сдвига в поверхностном слое, даже при наличии мягкой составляющей, условия могут быть недостаточными.

В этом случае оказывается выгодным предварительно созданное термодинамически неустойчивое состояние кристаллического строения поверхностного слоя (из-за образования вакансий, дислокаций и т. д.) посредством его пластического деформирования внешним воздействием.

При нагреве трением до сравнительно низких температур в тонком наружном слое наклепанного металла, в соответствии с законами термодинамики, протекают процессы возврата (отдыха, полигонизации и первичной рекристаллизации), обуславливающие возвращение механических свойств к уровню свойств металла до деформации. При этом температурный порог рекристаллизации тем ниже, чем выше степень наклепа [5]. Возникающий градиент температур и разная степень деформации по глубине создают положительный градиент механических свойств, в том числе, предела текучести. О прохождении данных процессов в подшипниковых

сплавах, выявленных экспериментально, отмечено в работе [6].

Таким образом, применительно к подшипниковым сплавам и исходя из общей сущности перечисленных трибологических и термодинамических процессов, принципиальной основой модифицирования является деформационно-прирабочное создание положительного градиента сопротивлений сдвигу в трибослое. Процесс модифицирования состоит из двух этапов: первый этап – упрочнение поверхностным пластическим деформированием (ППД) рабочего слоя основы подшипникового сплава на определенную глубину, второй этап – разупрочнение более тонкого наружного слоя основы сплава за счет явлений возврата, достигаемых приработкой.

Экспериментальные исследования

Экспериментальное исследование проводилось на образцах антифрикционных материалов – баббита Б83 и алюминиево-оловянного сплава АО20-1, которые применяются в поршневых компрессорах высокой мощности и в тепловозных дизелях различных серий. Причем широкое применение сплава АО20-1 сдерживается в связи с недостаточными нагрузочной способностью и усталостной прочностью антифрикционного слоя в биметаллических (сталеалюминиевых) подшипниках скольжения.

Первый этап модифицирования (ППД) трибоповерхности образца антифрикционного материала осуществлялся путем накатывания роликом по определенной технологии с использованием специального нагрузочно-деформирующего устройства. Накатывание роликом позволяет использовать широкий спектр технологий, различающихся по геометрическим параметрам ролика и нагрузочно-скоростным режимам деформирования. В данной работе использовались подходы и принципы лабораторного моделирования,

предусматривающего установление принципиальных, общих результатов и закономерностей.

В устройстве накатной ролик установлен на подшипник качения в опоре, жестко соединенной с динамометрической пружиной, посредством которой ролик прижимается к образцу с заданной нагрузкой. С помощью специальной державки динамометрическая пружина закреплена в шпинделе вертикально-фрезерного станка. Уровень нагрузки, задаваемый перемещением шпинделя, контролируется по величине деформации пружины индикатором часового типа. В состав устройства входит дополнительный индикатор для контроля начала пластического деформирования и глубины внедрения накатного ролика в процессе накатывания.

Опытные значения нагрузок для ППД назначались из условия отсутствия разрушения материала в поверхностном слое на основе предварительного теоретического анализа всего спектра возможных напряженно-деформированных состояний [7].

Второй этап модифицирования, состоящий в разупрочнении тонкого слоя основы подшипникового материала, обусловлен природой явлений возврата, происходящих от нагрева при трении. Температура начала возврата обычно ниже 0,2 от температуры плавления материала. Такая температура в тонком поверхностном слое основы сплава достижима при приработке с достаточной скоростью скольжения и относительно высоким контактным давлением от внешней нагрузки. Поэтому метод приработки, примененный на втором этапе модифицирования, предусматривал постепенное ступенчатое повышение внешней нагрузки до предельного уровня.

Приработка образцов по схеме трения «ролик-плоскость» при смазывании дизельным маслом М14В осуществлялась на лабораторном триботехническом комплексе, состоящем из модернизированной машины тре-

ния и контрольно-измерительной аппаратуры. В процессе приработки непрерывно измерялись и регистрировались с помощью самописцев момент трения и температура трения. Это создавало возможность по результатам второго этапа оценить эффективность всего процесса модифицирования.

Методика проведения второго этапа имела две особенности. Во-первых, с целью исключения возможного влияния графика нагружения на естественное протекание приработочных процессов, приросты нагрузки назначались постоянными и достаточно малыми. Во-вторых, на каждой ступени нагрузки приработка осуществлялось до полной стабилизации контролируемых параметров в течение отрезков времени, длительность которых определялась исключительно природой взаимодействия поверхностей. Выполнение заданного алгоритма опытов в дальнейшей обработке результатов подтвердилось «наложением» зависимостей температуры от нагрузки друг на друга для всех испытаний, что также указывает на полную сопоставимость опытов по тепловым и, в значительной степени, по энергетическим условиям.

Последовательное ступенчатое нагружение осуществлялось до наступления заедания. Достигнутая величина давления принималась за максимальную несущую способность исследуемой трибосистемы.

Результаты исследований Оценка несущей способности и длительности приработки.

При анализе результатов испытаний считалось, что текущая и максимальная несущие способности трибосистемы определяются текущим q и максимальным q_{max} значениями контактных давлений, воспринимаемых исследуемым сплавом.

Анализ изменения контактного давления q при увеличении внешней нагрузки (рис. 1) и во времени (рис. 2) показывает, что прове-

дение модифицирования повышает несущую способность обоих сплавов во всем диапазоне нагрузок. Эффект модифицирования выразился в приросте несущей способности до 25% для баббита Б83 и почти до 50% - для сплава АО20-1. При этом текущие уровни давлений $q = q_0$ для модифицированных образцов, равные максимальным q_{max} для соответствующих базовых образцов, достигаются при существенно меньших внешних нагрузках (рис. 1) и за более короткий период времени (рис. 2). Данное обстоятельство свидетельствует о снижении площади контакта, формируемой приработочными эффектами (изнашиванием и деформированием) для восприятия одинаковых нагрузок. И это снижение, эквивалентное снижению износа, обусловлено как упрочнением поверхностного слоя основы сплава (за счет проведения ППД), так и установлением благоприятной эпюры механических свойств в трибослое (за счет приработочных эффектов возврата). Важно отметить, что благодаря модифицированию период приработки образцов до достижения давления q_0 (равного q_{max} для базовых образцов) для сплава АО20-1 сократился в 2 раза, а для баббита Б83 – почти в 4 раза (рис. 2). Данный эффект, кроме положительного влияния градиента сдвигового сопротивления, также может быть обусловлен текстурованием тонкого слоя основы сплавов и образованием вторичных структур.

Оценка износных характеристик.

Проведенные испытания позволили выявить влияние модифицирования исследуемых сплавов и на закономерности изнашивания. Для сплава АО20-1 зависимости линейного износа от контактного давления (рис. 3а) и от времени (рис. 4), а также зависимость текущей скорости изнашивания от контактного давления (рис. 5) показали значительно различающиеся скорости нарастания износа для модифицированных и базовых образцов, а также более низкую текущую скорость изна-

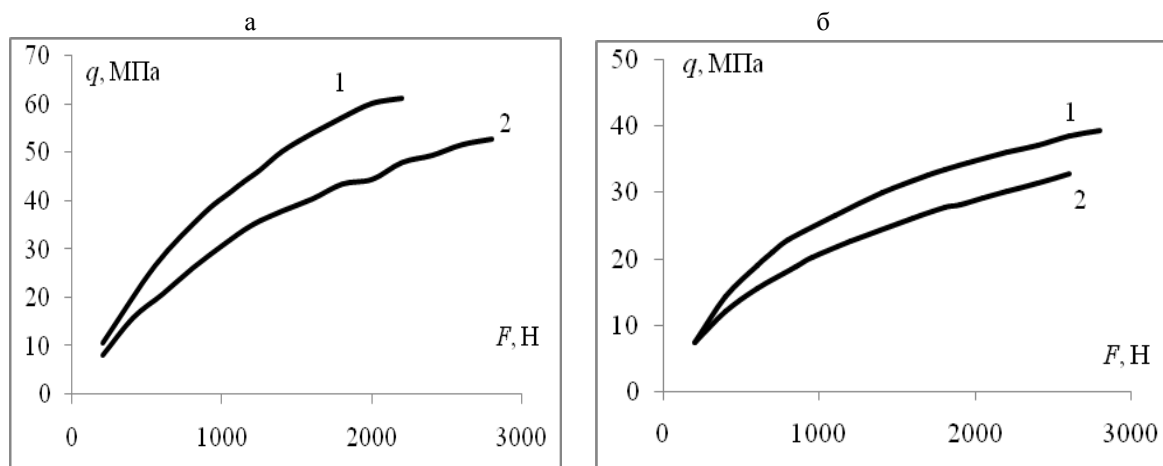


Рис. 1. Изменение контактного давления q от нагрузки F : а - АО20-1, б – сплав Б83 (1 - модифицированный образец, 2 – базовый образец).

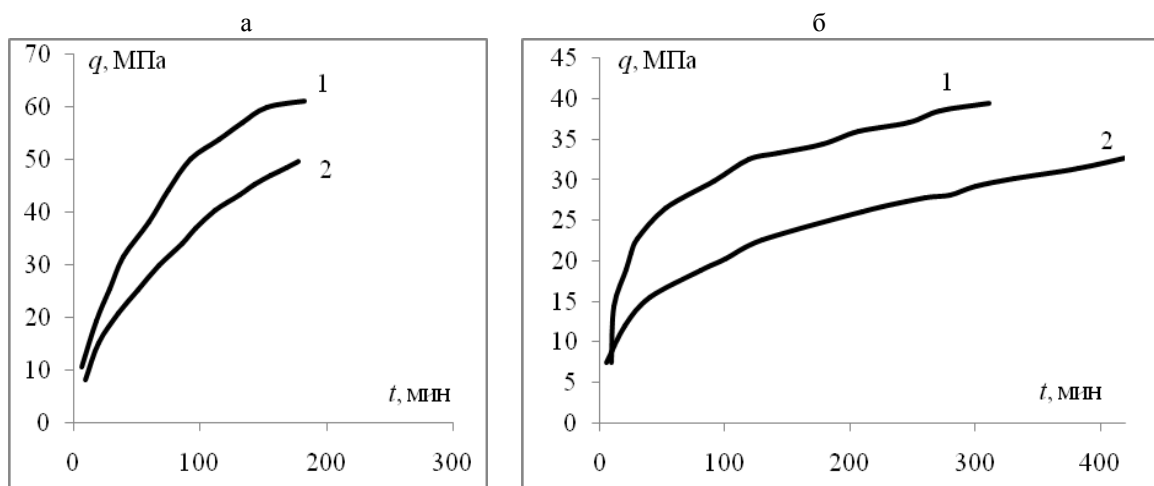


Рис. 2. Изменение контактного давления q от времени t : а – сплав АО20-1, б – сплав Б83 (1 - модифицированный образец, 2 - базовый образец).

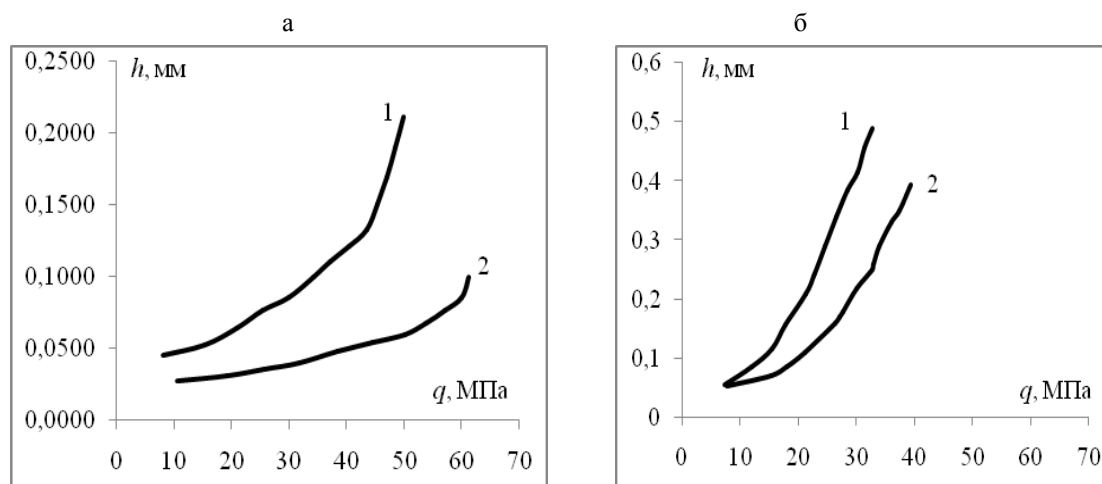


Рис. 3. Изменение линейного износа h от контактного давления q : а – сплав АО20-1, б – сплав Б83 (1 – базовый образец, 2 - модифицированный образец).

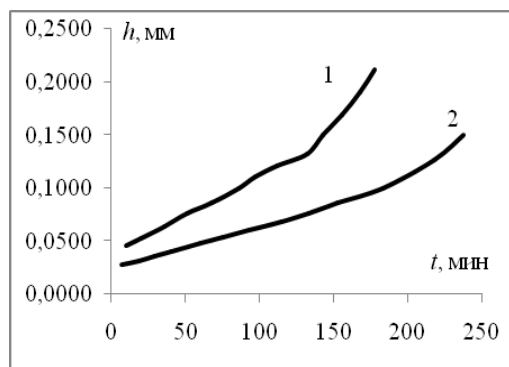


Рис. 4. Изменение линейного износа h от времени t для сплава АО20-1: 1 – базовый образец, 2 – модифицированный образец.

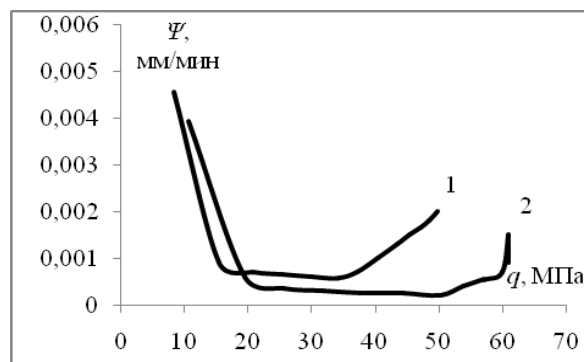


Рис. 5. Изменение текущей скорости изнашивания Ψ от контактного давления q для сплава АО20-1: 1 – базовый образец, 2 – модифицированный образец.

шивания в почти в 2 раза увеличенном диапазоне давлений для модифицированного образца. При достижении давления q_0 износ модифицированных образцов сплавов АО20-1 и Б83 оказался существенно ниже, чем износ базовых образцов: для АО20-1 – в 3,8 раза (рис. 3а) и для Б83 – в 2,2 раза (рис. 3б). Такой эффект в изнашивании, по-видимому, обусловлен не только повышением несущей способности, увеличившейся для обоих сплавов в меньшей степени.

Возможно двухэтапное модифицирование вызвало текстурирование микроструктуры материалов основы сплавов в пределах трибослоя и образование вторичных структур, что дополнительно инициировало снижение износа.

Характерной особенностью в процессе трения образца Б83 о ролик являлось образование углублений в виде царапин на всей поверхности стального ролика. При испытании модифицированных образцов образование царапин практически прекратилось с одновременным уменьшением момента трения.

Оценка температурных условий.

При трении в общей сумме энергий процессов различной природы значительную долю (до 90%) составляет энергия, связанная с теплообразованием. Остальная энергия расходуется на механические процессы (упругую и пластическую деформацию материала по-

верхностных слоев, изнашивание, дробление и перемещение структурных составляющих кристаллических решеток и др.).

В условиях установившегося трения распределение различных видов энергий между трущимися телами, смазочной и окружающей средами можно считать стационарным. Поэтому при постоянных температурах подаваемого масла и окружающей среды прямым показателем теплового содержания общей энергии является температура трущегося контакта.

Результаты испытаний показали, что для всех базовых и модифицированных образцов обеспечилось полное воспроизведение температурных условий. Зависимости температуры от нагрузки оказались в узком интервале значений от 0° до 3° . Это указывает на то, что установленные различия в результатах испытаний базовых и модифицированных образцов по несущей способности и износным характеристикам, вызваны исключительно процессами модифицирования на первом и втором этапах.

Обобщение результатов

В целом по результатам испытаний баббита Б83 и алюминиево-оловянного сплава АО20-1 можно сделать вывод о том, что модифицирование поверхности накатыванием по определенной технологии с последующей

приработкой по одному из вариантов позволяет создать достаточный градиент сдвиговых сопротивлений по глубине поверхностного слоя и за счет этого повысить ряд служебных свойств трибоматериалов. На наличии именно такой, непрерывно воссоздающейся динамической эпюры сопротивлений сдвигу может быть достигнуто обеспечение совместимости трущихся поверхностей в процессе нормальной эксплуатации до определенного уровня износа. При этом наряду с самоорганизующимся благоприятным напряженно-деформированным состоянием поверхностного слоя могут проявиться процессы его текстурирования и образования вторичных структур в его составе. Важно отметить, что повышенная прочность глубинных слоев основы сплавов способствует повышению усталостной прочности всего грузонесущего слоя.

Литература

1. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / *А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун* и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
 2. *Буше Н.А., Копытко В.В.* Совместимость трущихся поверхностей. – М.: Наука, 1981. – 127 с.
 3. *Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.* Основы расчетов на трение и износ. – М: «Машиностроение», 1977. – 526 с.
 4. *Джонсон У., Меллор П.Б.* Теория пластичности для инженеров. Пер. с англ. / Пер. А.Г. Овчинников. – М.: Машиностроение, 1979. – 567 с.
 5. *Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П.* Материаловедение: Учебник для машиностроитель-
- ных вузов - 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение. 1980. – 493 с.
6. *Зелинский В.В.* Механика фрикционного контакта в пластической области деформаций // *Современные проблемы науки и образования*, 2012, № 6; URL: <http://www/science-education.ru>.
 7. *Зелинский В.В.* Пластическое равновесие поверхностного слоя при трении. // *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*, 2012, № 4. – С. 46-49.

References

1. Friction, wear and lubrication (Tribology and Tribotechnics) / *A.V. Chichinadze, E.M. Berliner, E.D. Brown*. Ed. A.V. Chichinadze. – Moscow: Mashinostroenie, 2003. – 576 p.
2. *Bushe N.A., Kopytko V.V.* Compatibility of the rubbing surfaces. – Moscow: Nauka, 1981. – 127 p.
3. *Kragelskiy I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S.* Fundamentals of calculations on friction and wear. – Moscow: Mashinostroenie, 1977. – 526 p.
4. *Johnson W., Mellor P.B.* The theory of plasticity for engineers. – Moscow: Mashinostroenie, 1979. – 567 p.
5. *Lahtin Y.M., Leontiev V.P.* Materials Science: The textbook for engineering schools. 2nd ed. rev. and add. – Moscow: Mashinostroenie, 1980. – 493 p.
6. *Zelinskiy V.V.* Mechanics of friction of the contact in the area of plastic deformation // *Modern Problems of Science and Education*, 2012, № 6, URL: <http://www/science-education.ru>.
7. *Zelinskiy V.V.* Plastic equilibrium of the surface layer of the friction // *Engineering industry and life safety*, 2012, № 4. – P. 46-49.

Статья поступила в редакцию 17 апреля 2013 г.

Зелинский Виктор Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Муромского института (филиала) федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых». E-mail: selvik46@yandex.ru

Сучилин Дмитрий Николаевич – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Муромского института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых». E-mail: suchilind@mail.ru

Zelinskiy Viktor Vasiljevich – Ph.D., Murom Institute of Vladimir State University. E-mail: selvik46@yandex.ru

Suchilin Dmitriy Nikolaevich – Graduate student, Murom Institute of Vladimir State University. E-mail: suchilind@mail.ru