

DOI.org/10.5281/zenodo.2578696

УДК 621.436

Л.Б. Леонтьев, Н.П. Шапкин, В.Н. Макаров, А.Г. Токликишвили,
В.П. Болотова

ЛЕОНТЬЕВ ЛЕВ БОРИСОВИЧ – д.т.н., профессор, e-mail: leontyev.l.b@yandex.ru
МАКАРОВ ВАСИЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ – аспирант, e-mail: makarov_vasily@mail.ru
ТОКЛИКИШВИЛИ АНТОНИНА ГРИГОРЬЕВНА – к.т.н., доцент,
e-mail: Toklikishviligg@mail.ru

Кафедра сварочного производства Инженерной школы
ШАПКИН НИКОЛАЙ ПАВЛОВИЧ – д.х.н., профессор, кафедра неорганической
и элементоорганической химии Школы естественных наук, e-mail: npshapkin@gmail.com
Дальневосточный федеральный университет

Суханова ул., 8, Владивосток, 690091

БОЛОТОВА ВАЛЕНТИНА ПАВЛОВНА – доцент кафедры начертательной геометрии
и графики, e-mail: bolotova@msun.ru

Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
Верхнепортовая ул., 50а, Владивосток, 600003

Влияние тонкопленочных износостойких металлокерамических покрытий на шейках коленчатых валов на эксплуатационные характеристики подшипников скольжения судовых дизелей

Аннотация: На морских судах установлены среднеоборотные дизели (СОД) в качестве главных и вспомогательных двигателей, имеющих коленчатые валы с твердостью шеек от 164 до 694 HV и укомплектованные различными типами вкладышей подшипников. Основными причинами отказов коленчатых валов являются износ и задир шеек. Задир шеек и расплавление антифрикционного слоя вкладышей часто приводят к деформации коленчатых валов, реже – к их поломке.

Износостойкость трущихся поверхностей деталей трибоузлов является основным фактором, определяющим срок службы и эксплуатационные издержки, а также необходимость ремонта. Решение проблемы повышения износостойкости и, соответственно, долговечности связано с применением различных методов упрочнения поверхностей трения и трибоактивных присадок в смазку.

В настоящее время большая группа триботехнических материалов применяется для упрочнения поверхностей трения путем модифицирования и формирования на сопряженных поверхностях металлокерамического слоя благодаря энергии, образующейся в процессе трения, который по многим критериям превосходит износостойкие покрытия, полученные при применении традиционных технологических методов упрочнения. Однако часто отсутствуют рекомендации по эффективному использованию конкретного препарата для такого ответственного трибоузла, как подшипники коленчатого вала СОД. Поэтому в судовой практике почти не применяются трибопрепараты для повышения долговечности и эффективности технической эксплуатации подшипников коленчатых валов СОД.

В статье приведены триботехнические характеристики подшипников скольжения с металлокерамическим покрытием шеек вала на основе вермикулита и дана оценка эффективности его применения для обработки коленчатых валов судовых дизелей при различной твердости шеек валов.

Ключевые слова: долговечность, подшипник, коленчатый вал, вкладыш, дизель, триботехнический материал, покрытие, твердость, износостойкость.

Введение

Надежность судовых дизелей в значительной степени зависит от надежности подшипников коленчатого вала. Использование тяжелых сортов топлива вызывает увеличение скорости изнашивания поверхностей трения трибоузла [5].

Износы поверхностей трения трибоузла «шейка коленчатого вала–вкладыш подшипника» оказывают решающее влияние на его долговечность, работоспособность и возникновение аварийных ситуаций на двигателе [4].

На морских судах установлены среднеоборотные дизели (СОД) в качестве главных и вспомогательных двигателей, имеющих коленчатые валы с твердостью шеек в интервале от 164 HV (164 HB) до 694 HV (58 HRC) и укомплектованные различными типами вкладышей подшипников. Большинство коленчатых валов СОД изготавливают из сталей 45, 40X и др., причем более 80% коленчатых валов имеют твердость шеек не более 240 HB.

Основными причинами отказов коленчатых валов являются износ и задир шеек. Задир шеек и расплавление антифрикционного слоя вкладышей часто приводят к деформации коленчатых валов, реже — к их поломке. Риски и царапины на шейках коленчатых валов повышают параметры шероховатости и увеличивают скорость изнашивания антифрикционного слоя вкладышей в моменты пуска и остановки двигателя. Основной причиной образования рисок и царапин на шейках валов с любой твердостью являются механические примеси в смазке, которые содержат следующие элементы: алюминий, хром, кремний и другие, карбиды и оксиды, величины твердости которых больше величин твердости закаленной стали [2, 4].

Следует отметить, что повышение износа одной из поверхностей трения трибосопряжения, как правило, приводит к возрастанию скорости изнашивания другой, поэтому следует решать проблему повышения долговечности не одной детали, а узла в целом.

Износостойкость трущихся поверхностей деталей трибоузлов является основным фактором, определяющим срок службы и эксплуатационные издержки, а также необходимость ремонта. Решение проблемы повышения износостойкости и, соответственно, долговечности связано с применением различных методов упрочнения поверхностей трения и трибоактивных присадок в смазку. В настоящее время большая группа триботехнических материалов применяется для упрочнения поверхностей трения путем модифицирования и формирования на сопряженных поверхностях металлокерамического слоя благодаря энергии, образующейся в процессе трения, причем этот слой по многим критериям превосходит износостойкие покрытия, полученные при применении традиционных технологических методов упрочнения. При этом потери энергии на преодоление трения могут существенно снизиться, а износостойкость сопряженных деталей повыситься в 2–4 раза. Эксплуатационные свойства упрочнённой поверхности существенно отличаются от свойств исходной поверхности (до модифицирования) [1, 3, 6–9, 11]:

- как правило, большие величины твердости и усилия задира;
- меньшие параметры шероховатости;
- меньший коэффициент трения.

Формирование износостойких тонкопленочных покрытий осуществляется путем трибомодификации поверхностей трения как в процессе штатной эксплуатации двигателей [1, 3, 6–9, 11], так и при ремонте коленчатых валов [6], поэтому технологические затраты минимальные.

В настоящее время на рынке имеется множество серийных трибопрепаратов (около 200 наименований), причем значительная часть из них изготавливается на основе серпентинита [1], триботехнические свойства которого существенно зависят от месторождения и содержания различных примесей в его составе, поэтому технологически сложно получить материал с требуемыми химическим составом, структурой и, соответственно, свойствами. В последнее время исследуется перспектива применения в качестве триботехнических материалов модифицированного вермикулита, композитов и композиций на его основе [6], так как вермикулит весьма распространен в природе, широко применяется в различных отраслях и имеет более низкую стоимость по сравнению с другими слоистыми силикатами. Однако часто отсутствуют рекомендации по эффективному использованию конкретного препарата для такого ответственного трибоузла, как подшипники коленчатого вала СОД. Поэтому в судовой практике почти не применяются трибопрепараты для повышения долговечности и эффективности технической эксплуатации подшипников коленчатых валов СОД.

Цель работы — определение триботехнических характеристик подшипников скольжения с металлокерамическим покрытием шеек вала на основе вермикулита и оценка эффективности его применения для обработки коленчатых валов судовых дизелей при различной твердости шеек валов.

Материалы и методы исследований

Для нашего исследования эксплуатационных свойств тонкопленочных износостойких покрытий, формируемых на поверхностях трения стали путем трибомеханической модификации, был взят препарат «Трибоникс», разработанный нами на основе модифицированного соляной кислотой наноструктурированного вермикулита.

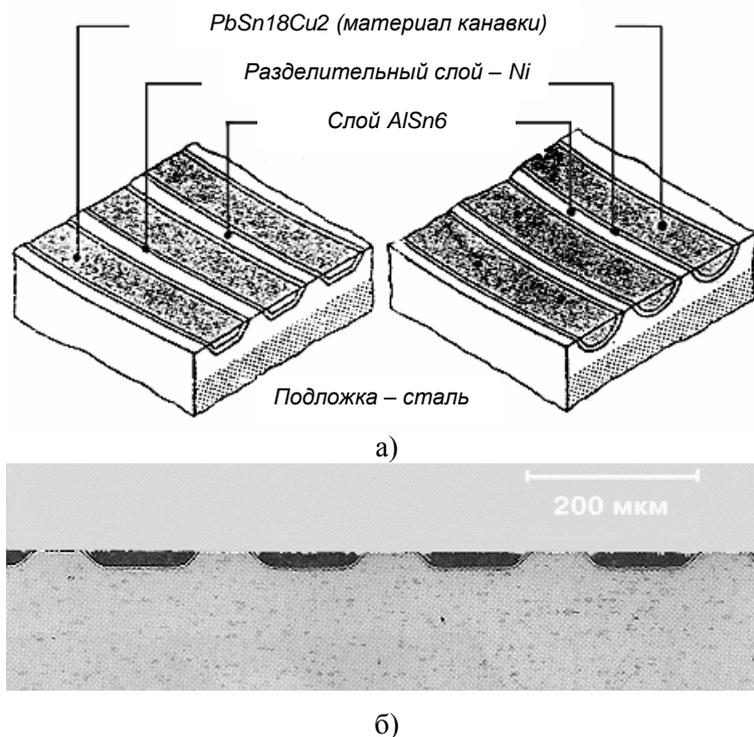
Для получения модифицирующего состава препарат вводят в масло марки М-14-Д₂(цл 30) из расчета 350–400 г на литр и затем подвергают обработке в гидродинамическом кавитационном диспергаторе с частотой около 200 Гц примерно 30 минут.

СОД, работающие на тяжелых сортах топлива, укомплектованы преимущественно современными канавчатыми трехслойными стале-алюминиево-PbSnCu вкладышами (Rillennlager; коды вкладышей 24, 26, 33), реже – вкладышами с напыленным антифрикционным слоем из сплава АО20 (Miba 34, 36, 37) [5].

Ввиду высокой износостойкости канавчатых вкладышей в условиях трения при граничной смазке основные исследования пары трения «вал+покрытие–вкладыш подшипника» выполняли с элементами вкладышей Miba 33. Отличительная особенность этих вкладышей Miba 24, 26 и 33 – наличие регулярного микрорельефа в виде винтовой канавки глубиной 16–40 мкм и шагом около 0,15 мм на всей поверхности трения (рис. 1), что в сочетании с правильно выбранной комбинацией материалов обеспечивает им высокую усталостную прочность и способность выдерживать высокие удельные нагрузки [5]. Участки меньшей ширины (слой AlSnб на рис. 1) воспринимают нагрузку, а участки большей ширины поглощают абразивные частицы. Глубина канавок с учетом приработочного слоя в зависимости от типа вкладыша находится в пределах 16–40 мкм и обеспечивает требуемую усталостную прочность антифрикционного слоя. Площадь, занятая мягким антифрикционным материалом, составляет 67–80% от общей площади поверхности трения вкладыша.

Формирование покрытия выполняли за две технологические операции.

Первая операция. Модифицирование поверхностей трения осуществляли фрикционным методом в течение 3 минут. Модифицирующий состав, состоящий из модифицирующего материала и масла, наносится на упрочняемую поверхность. В процессе упрочнения данная смесь подается в зону трения каждые 15–20 с капельным методом. Содержание триботехнического состава в смазке составляло 40% по массе. Режим нагружения и время приведены в табл. 1.



**Рис. 1. Конструкция вкладыша *Rillenlager*:
а – строение вкладыша; б – профиль поперечного сечения вкладыша.**

Вторая операция. Формирование износостойкого металлокерамического покрытия (смазка подается в зону трения без модификатора). Время выполнения данной технологической операции составляло 1 час (табл. 1).

Нагрузку при трибоиспытаниях изменяли в соответствии с режимами, приведенными в табл. 1. Время трибоиспытаний составляло 3 часа.

Таблица 1

Режимы формирования покрытия и триботехнических испытаний

Нагрузка, Н	40	100	200	400
Время нанесения покрытия, мин	–	1	1	1
Время формирования покрытия, мин	–	5	10	45
Время трибоиспытаний, мин	30	30	60	60

Температуру в зоне фрикционного контакта определяли с помощью инфракрасного пирометра Optris Mimisight (Германия) с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$ в диапазоне от 0 до 420°C .

Анализ профиля поверхности и оценку ее параметров в России выполняют, преимущественно осуществляя двухмерные измерения. Однако геометрические свойства поверхности деталей как после механической обработки, так и в процессе трения анизотропны [10, 12]. Кроме того, поскольку топология поверхности трехмерна, любая двухмерная оценка дает неполное ее описание, поэтому в последнее время в инженерной практике для оценки эксплуатационных свойств деталей машин все шире используется трехмерный анализ шероховатости поверхности. Трехмерное профилометрирование позволяет: более точно оценить реальные характеристики поверхности – однозначно дифференцировать впадины, образованные единичными лунками или бороздками (в двухмерных измерениях их идентифицировать не удастся); определить значения экстремальных характеристик шероховатости, поскольку при традиционном способе их измерения профиль проходит по склонам вершин и впадин, а не пересекается с ними, что искажает опорную кривую поверхности; повысить информа-

тивность результатов в связи с увеличением определяемых независимых параметров; визуализировать поверхность при помощи компьютера, т.е. детально представить ее топографию; получить ряд новых параметров, таких как материальный объем или площадь контакта [10, 12].

Параметры шероховатости и топографию образцов после шлифования и триботехнических испытаний определяли с помощью измерительного прибора Contour GT-I 3D Optical Microscope фирмы Bruker в соответствии со стандартом ISO 25178. Оптический профилометр позволяет измерять параметры широкого диапазона видов поверхностей деталей с высоким разрешением в диапазоне от долей нанометров до ≈ 10 мм. Для анализа были выбраны следующие высотные параметры:

1) 2D-параметры:

– Ra – арифметическое среднее абсолютных значений ординат в пределах базовой длины;

– Rz – сумма наибольшей высоты пика профиля Rp и наибольшей глубины впадины профиля Rv в пределах базовой длины;

2) 3D-параметры:

– Ra – арифметическое среднее абсолютного значения ординаты на поверхности ограниченного масштаба;

– Rz – сумма наибольшей высоты пика профиля Rp и наибольшей глубины впадины профиля Rv на поверхности ограниченного масштаба;

– Rpm – средняя высота вершин на поверхности ограниченного масштаба;

– Rvm – средняя глубина впадин на поверхности ограниченного масштаба.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Для определения влияния твердости стали на триботехнические характеристики пары трения «сталь–покрытие–вкладыш» и оценки эффективности модифицирования стали триботехническими материалами нами проведены сравнительные триботехнические испытания. Образцы были изготовлены из стали 45 различной твердости: 162 HV, 435 HV и 610 HV и стали 40X твердостью 230 HV. В качестве неподвижного образца использовалась колодка, изготовленная из вкладышей подшипников СОД Miba № 33. Для анализа влияния твердости стали, модифицированной препаратом «Трибоникс», на триботехнические характеристики сопряжения «вал – вкладыш подшипника», были определены следующие параметры:

– средняя скорость изнашивания вала и антифрикционного слоя вкладыша подшипника в период приработки трибосопряжения с модифицированной и немодифицированной сталью;

– скорости изнашивания деталей трибосопряжения при нагрузках 200 и 400 Н с модифицированной и немодифицированной сталью;

– коэффициенты трения и температуры в зоне трения трибосопряжения при нагрузках 200 и 400 Н с модифицированной и немодифицированной сталью.

Установлено (рис. 2), что в процессе приработки пары трения при граничной смазке (время приработки 1 час) скорость изнашивания стали и вкладыша подшипника существенно зависит от твердости стали для пары трения с немодифицированной сталью, причем износостойкость стали зависит от ее твердости в большей степени, чем антифрикционного слоя вкладыша подшипника. Модифицирование стали и формирование металлокерамической пленки (МКП) позволяет снизить скорость изнашивания вала примерно в 3 раза и уменьшить зависимость скорости изнашивания сопряженных поверхностей пары трения от исходной твердости стали. Коэффициент трения в процессе приработки сопряжения практически не зависит от исходной твердости и находится в пределах 0,043–0,144. Наличие на поверхности стали МКП приводит к снижению коэффициента трения примерно в 2 раза и уменьшению колебания его величины.

Температура в зоне трения в процессе приработки сопряжения не зависит от исходной твердости и наличия на поверхности стали МКП и находится в пределах 23–29 °С.

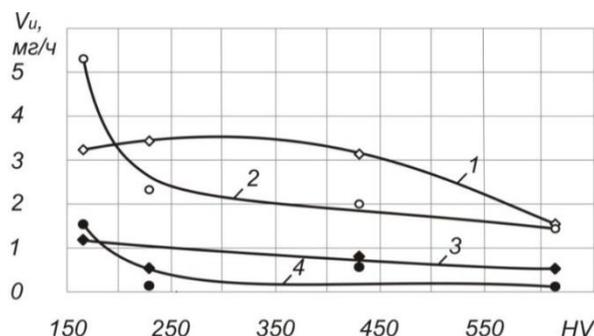


Рис. 2. Зависимости скоростей изнашивания деталей трибосопряжения вал–вкладыш Miba № 33 в процессе приработки от исходной твердости стали при граничной смазке: 1 – вкладыша в паре трения с немодифицированной сталью; 2 – немодифицированной стали; 3 – вкладыша в паре трения с модифицированной сталью; 4 – модифицированной стали.

Влияние исходной твердости стали на ее износостойкость в условиях трения при граничной смазке весьма существенно, особенно при величине твердости менее 220 HV (рис. 3, а). С увеличением твердости износостойкость стали возрастает. Модифицирование стали позволяет снизить скорость изнашивания стали и уменьшить влияние ее исходной твердости на износостойкость.

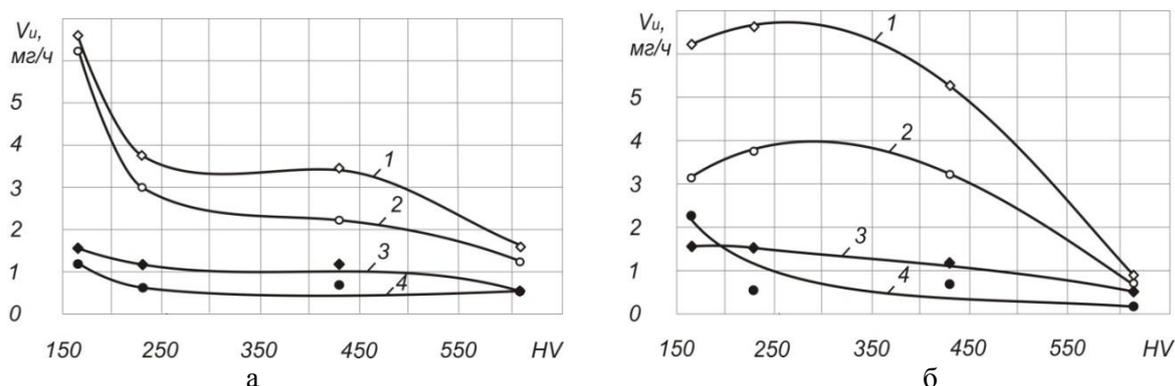


Рис. 3. Зависимости скоростей изнашивания деталей трибосопряжения вал–вкладыш Miba № 33 в процессе триботехнических испытаний от исходной твердости стали при граничной смазке: а – вала; б – вкладыша подшипника;

1 – немодифицированная сталь, нагрузка 400 Н; 2 – немодифицированная сталь, нагрузка 200 Н; 3 – модифицированная сталь, нагрузка 400 Н; 4 – модифицированная сталь, нагрузка 200 Н

Влияние исходной твердости стали на износостойкость вкладыша подшипника проявляется только при величине ее твердости свыше 435 HV. Модифицирование стали позволяет снизить скорость изнашивания вкладыша подшипника и уменьшить влияние исходной твердости стали на его износостойкость (рис. 3, а).

Коэффициент трения при граничной смазке в сопряжении «вал–вкладыш Miba № 33» плавно снижается по мере увеличения твердости стали (рис. 4, а). Модифицирование стали позволяет снизить коэффициент трения более чем в 2 раза, уменьшить влияние исходной твердости стали и разброс величины коэффициента трения.

Температура в зоне трения в процессе приработки сопряжения триботехнических испытаний зависит: наиболее существенно – от величины нагрузки и незначительно – от исходной твердости. Наличие на поверхности стали МКП позволяет в 1,5 раза уменьшить величину температуры при максимальной нагрузке на пару трения, снизить зависимость температуры как от величины нагрузки на пару трения, так и от исходной твердости стали.

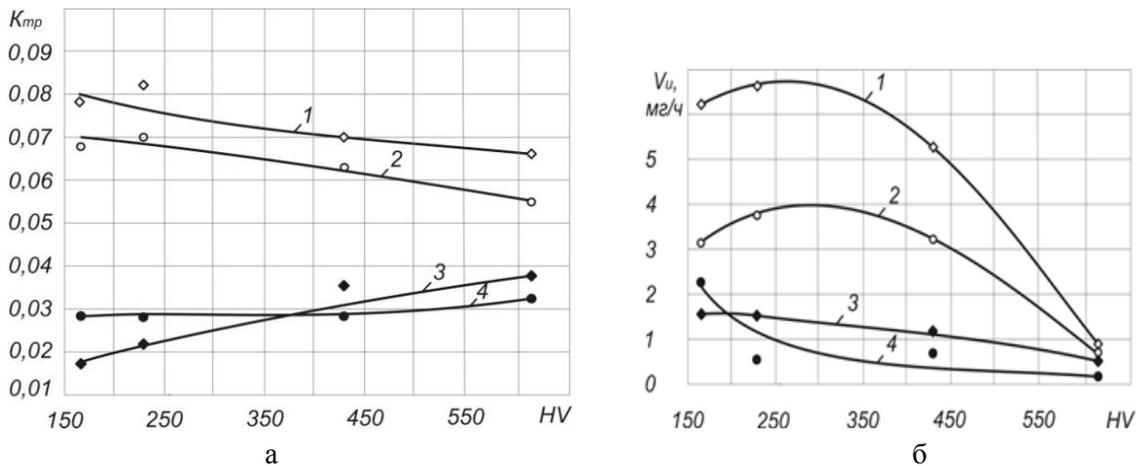


Рис. 4. Зависимости коэффициента трения (а) и температуры в зоне трения трибосопряжения (б) вал–вкладыш Miba № 33 от исходной твердости стали при граничной смазке: 1 – немодифицированная сталь, нагрузка 400 Н; 2 – немодифицированная сталь, нагрузка 200 Н; 3 – модифицированная сталь, нагрузка 400 Н; 4 – модифицированная сталь, нагрузка 200 Н.

Анализ влияния исходной твердости стали на триботехнические характеристики пар трения «вал–вкладыш подшипника» и «сталь–покрытие–вкладыш» в условиях трения при граничной смазке позволил установить:

1) в процессе приработки пары трения скорость изнашивания вала с МКП примерно в 3 раза меньше по сравнению с исходной парой, а коэффициент трения уменьшается примерно в 2 раза, также уменьшаются колебания его величины;

2) после приработки:

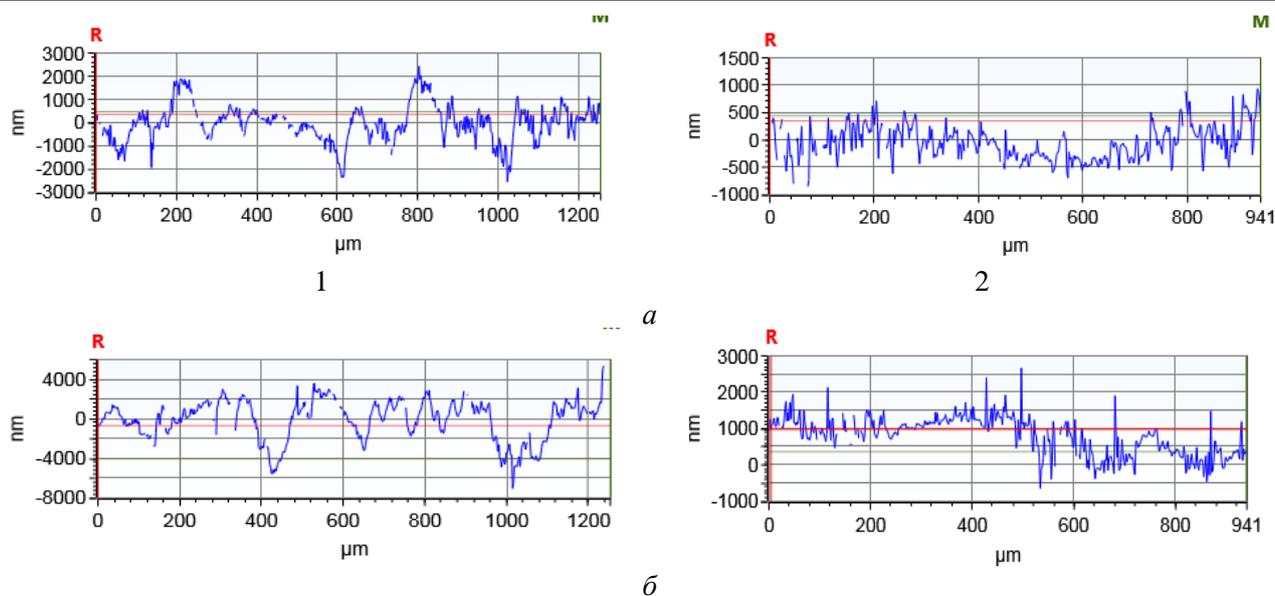
- с увеличением исходной твердости стали (особенно в диапазоне величин твердости 160–220 HV) износостойкость стали существенно возрастает;

- модифицирование стали и формирование на поверхности стали МКП позволяет снизить скорость изнашивания стали и уменьшить влияние ее исходной твердости на износостойкость;

- коэффициент трения в процессе триботехнических испытаний плавно снижается по мере увеличения исходной твердости стали. Модифицирование стали позволяет снизить коэффициент трения более чем в 2 раза, а также уменьшить влияние исходной твердости стали и разброс величины коэффициента трения и, соответственно, снизить вероятность схватывания и задира;

- наличие на поверхности стали МКП позволяет в 1,5 раза уменьшить величину температуры при максимальной нагрузке на пару трения, снизить зависимость температуры как от величины нагрузки на пару трения, так и от исходной твердости стали.

Для определения влияния явлений, происходящих в процессе триботехнических испытаний, на параметры шероховатости и структуру поверхностей трения были проведены сравнительные исследования стали после шлифования, а также триботехнических испытаний неупрочненных и модифицированных образцов. Для этого исследовали параметры шероховатости и профилограммы микронеровностей образцов. Установлено (рис. 5, табл. 2), что у всех образцов после шлифования и триботехнических испытаний наблюдалась значительная анизотропия геометрических характеристик по направлениям. Минимальные параметры шероховатости Ra и Rz характерны для образцов после шлифования. Сравнение величин параметра Rz в двухмерных и трехмерных измерениях для большинства образцов (табл. 2) показало, что в $3D$ они значительно (более чем в 2 раза) больше вследствие определения высотных параметров всех точек поверхности ограниченного масштаба, а не отдельных профилей этой же поверхности, поэтому целесообразно проводить анализ на основании величин $3D$ -параметров.



**Рис. 5. Профилограммы микронеровностей поверхностей стали 40Х (206 НВ):
 после шлифования (а); после трибоиспытаний (б);
 1 – перпендикулярно направлению вращения образца,
 2 – по направлению вращения образца.**

Следует отметить, что параметры шероховатости после 3 часов триботехнических испытаний неупрочненных образцов возрастают примерно в 2 раза по сравнению с исходными. В условиях трения при граничной смазке происходит образование большого количества острых пиков на поверхности стали и возрастание глубины впадин (рис. 5, б и рис. 6, б) вследствие образования царапин на поверхности трения абразивными частицами, находящимися в смазке, которые при контактировании сопряженных поверхностей приводят к повышенному их изнашиванию.

Таблица 2

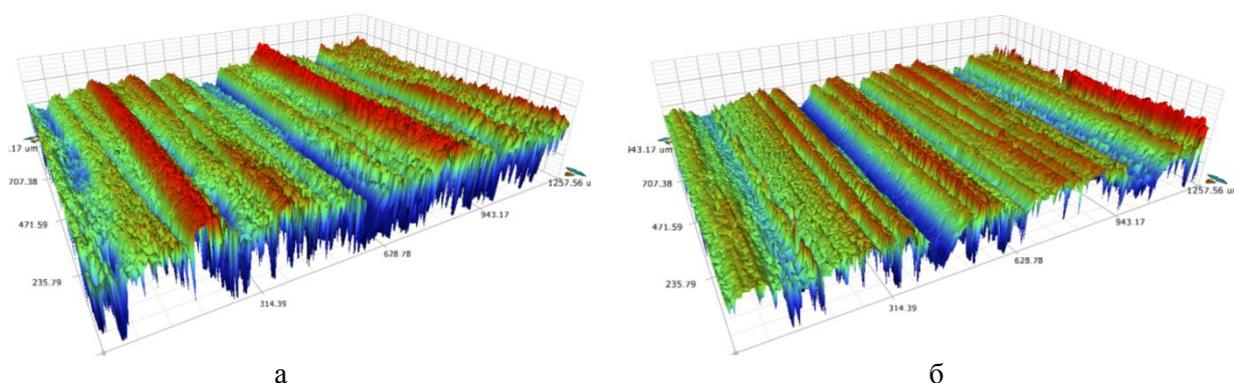
Параметры шероховатости образцов сталей 45 и 40Х различной твердости до и после триботехнических испытаний

Марка и твердость стали	Параметры шероховатости, мкм					
	2D-параметры*		3D-параметры			
	<i>Ra</i>	<i>Rz</i>	<i>Ra</i>	<i>Rz</i>	<i>Rpm</i>	<i>Rvm</i>
Сталь после шлифования						
40Х (206 НВ)	0,31 / 0,28	2,89 / 1,67	0,67	8,31	3,46	-4,85
Немодифицированная сталь после триботехнических испытаний в течение 3 часов						
Сталь 45 (162 НВ)	0,63 / 0,55	8,88 / 3,24	1,66	19,66	10,60	-9,06
Сталь 45 (460 НВ)	0,44 / 0,30	8,99 / 22,74	0,74	25,22	3,31	-21,91
Сталь 40Х (206 НВ)	1,14 / 0,67	8,30 / 4,79	5,49	32,04	10,80	-21,23
Сталь 40Х (206 НВ)	1,75 / 0,40	21,84 / 5,71	4,18	56,84	23,95	-31,39
Сталь 40Х (206 НВ), модифицированная препаратом «Трибоникс»						
После триботехнических испытаний в течение 1 ч (приработка)	0,34 / 0,16	2,68 / 1,36	0,46	7,64	4,18	-3,46
После триботехнических испытаний в течение 3 ч	0,37 / 0,29	3,97 / 2,42	1,08	10,71	3,79	-6,92

* В числителе приведена величина параметра перпендикулярно направлению вращения образца при механической обработке, трибомодифицировании или трибоиспытаниях, в знаменателе – по направлению вращения образца.

Минимальные величины высотных 3D-параметров наблюдаются после модифицирования образца вследствие смятия вершин и заполнения впадин триботехническим материалом. После 3 часов трибоиспытаний величины всех высотных параметров шероховатости неупрочненных образцов в 1,5–2,0 раза превышают аналогичные параметры упрочненных образцов.

После триботехнических испытаний модифицированных образцов в течение 1 часа параметры шероховатости Ra и Rz в направлении, перпендикулярном направлению вращения образца, возрастают (табл. 2, рис. 7, а): Ra – в 1,6 раза, Rz – в 2,3 раза по сравнению с параметрами, полученными в результате формирования покрытия, а в направлении вращения они практически не изменяются. Высотные 3D-параметры (Rz и Rpm) существенно уменьшаются (табл. 2, рис. 8, а) вследствие разрушения кристаллитов на поверхности трения, однако при этом возрастает параметр Rvm из-за наличия абразива в зоне трения, образовавшегося при разрушении кристаллитов силикатов, которые имеют высокую твердость и царапают поверхность покрытия.



а б
Рис. 6. Топография поверхности стали 40X (206 HB):
а – после шлифования; б – после трибоиспытаний.

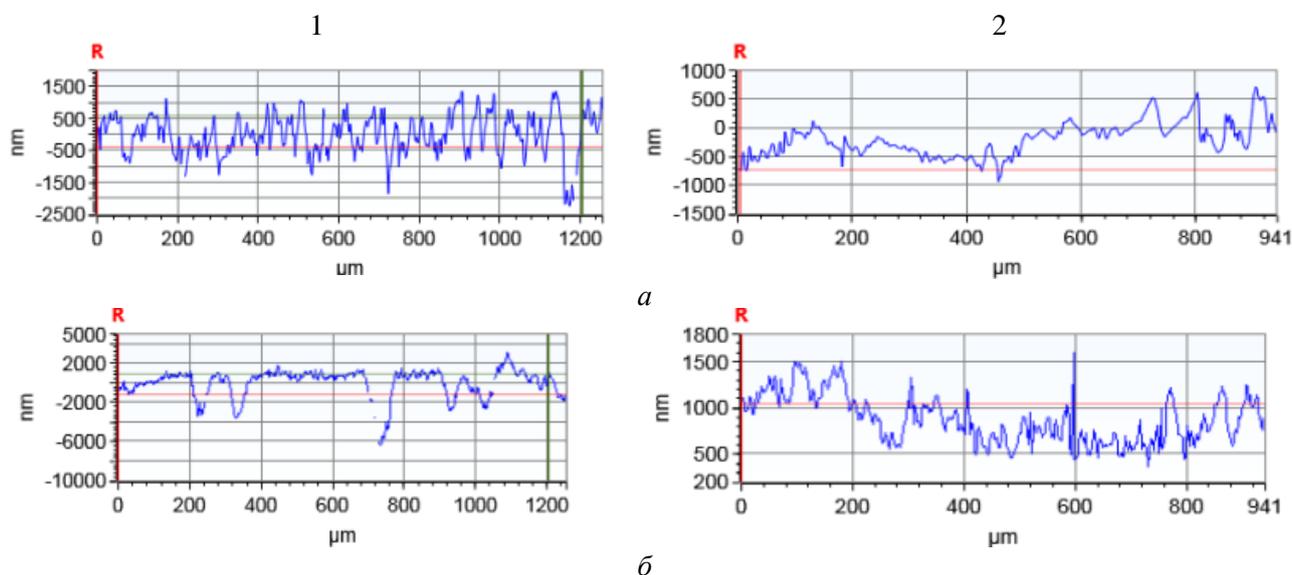


Рис. 7. Профилограммы микронеровностей поверхностей стали 40X (206 HB)

после модифицирования составом «Трибоникс»:

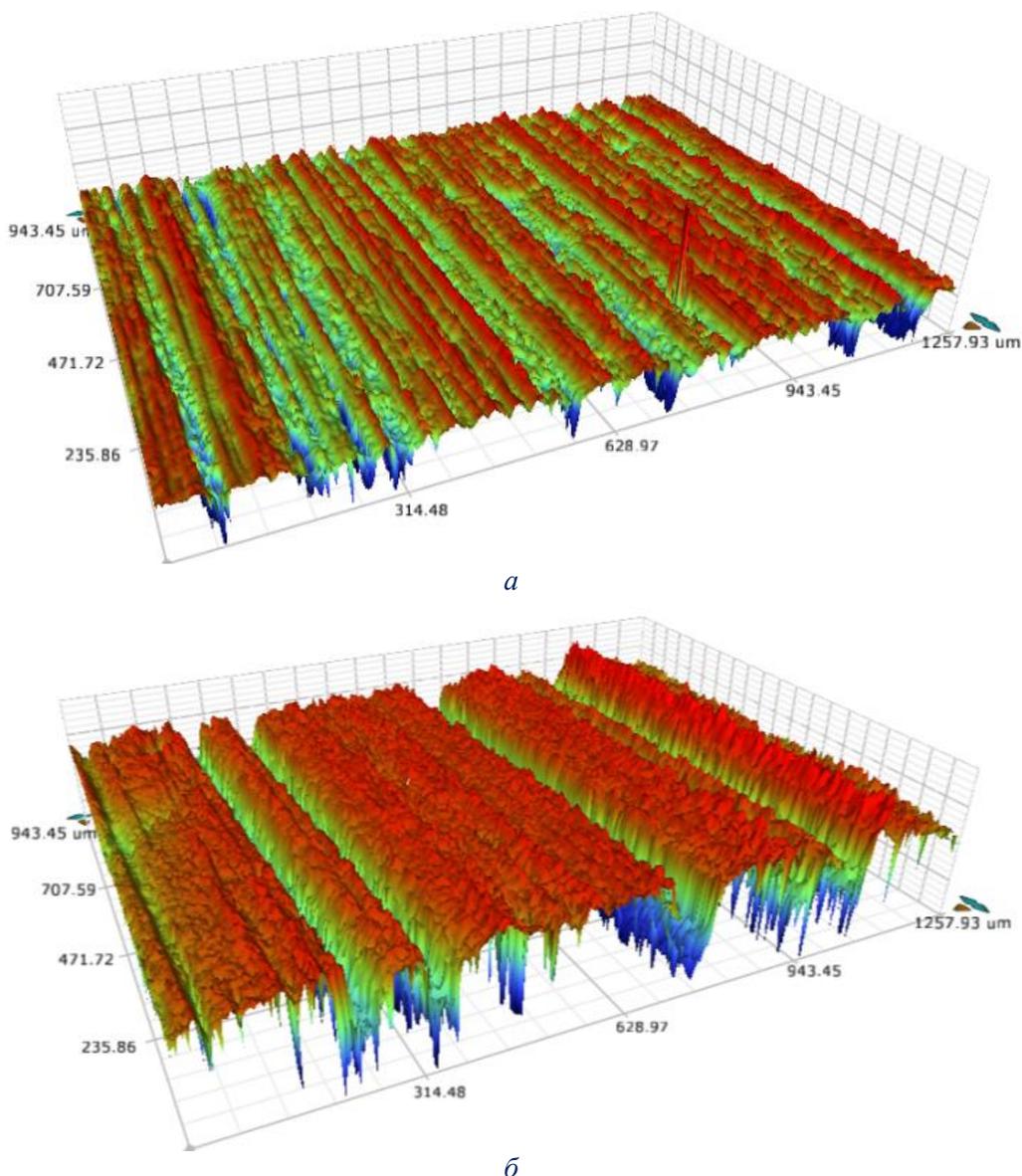
а – после приработки (триботехнические испытания в течение 1 ч);

б – после триботехнических испытаний в течение 3 ч;

1 – перпендикулярно направлению вращения образца, 2 – по направлению вращения образца.

После триботехнических испытаний модифицированных образцов в течение 3 ч параметры шероховатости Ra и Rz и высотный 3D-параметр Rz увеличиваются незначительно (табл. 2), исключение составляют высотные 3D-параметры: Rpm , который несколько

уменьшается вследствие дальнейшего износа в первую очередь пиков на поверхности трения, и параметр R_{vm} , который резко увеличивается из-за образования большого количества глубоких царапин на поверхности (рис. 8, б).



**Рис. 8. Топография поверхности упрочненной стали 40X (206 HV):
а – после приработки (триботехнических испытаний в течение 1 часа);
б – после триботехнических испытаний в течение 3 часов.**

Сравнение параметров шероховатости неупрочненных образцов после триботехнических испытаний в течение 3 часов показало, что их величины превышают аналогичные модифицированных образцов в среднем в 2 раза.

Заключение

Проведенные комплексные исследования по влиянию исходной твердости шеек коленчатого вала в условиях трения при граничной смазке и формирования металлокерамической пленки на поверхностях трения позволили установить:

– с увеличением твердости износостойкость стали возрастает, следует отметить, что существенное возрастание скорости ее изнашивания происходит при величине твердости менее 220 HV;

- исходная твердость стали оказывает существенное влияние на износостойкость вкладыша подшипника только при величине ее твердости свыше 435 HV;
- модифицирование стали препаратом «Трибоникс» позволяет снизить скорости изнашивания вала при любой твердости шеек и вкладыша подшипника, уменьшить величину коэффициента трения, а также влияние исходной твердости стали на износостойкость трибосопряжения;
- в результате образования металлокерамического покрытия на шейках коленчатых валов формируются оптимальные параметры шероховатости и структуры поверхности, которые обеспечивают уменьшение удельного давления на сопряженные поверхности и вероятность схватывания и задира в течение длительного времени трения при граничной смазке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дунаев А.В., Ладиков В.В., Пустовой И.Ф., Голубев И.Г. Эффективность применения минеральных модификаторов при техническом сервисе в АПК. М.: Росинформагротех, 2014. 164 с.
2. Кича Г.П., Перминов Б.Н., Надежкин А.В. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях. Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2011. 372 с.
3. Колокатов А.М. Ремонтно-восстановительные составы для повышения ресурса машин. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. 215 с.
4. Леонтьев Л.Б., Надежкин А.В., Макаров В.Н., Токликишвили А.Г. Анализ функционирования трибосистемы шейка коленчатого вала–вкладыш подшипника–смазка судовых среднеоборотных дизелей // Двигателестроение. 2013. № 2(252). С. 41–47.
5. Леонтьев Л.Б., Юзов А.Д. Подшипники коленчатых валов судовых дизелей. Владивосток: ДВГМА, 2000. 173 с.
6. Леонтьев Л.Б., Шапкин Н.П., Леонтьев А.Л., Макаров В.Н. Триботехнические свойства тонкопленочных покрытий, полученных трибомодификацией шеек коленчатых валов судовых дизелей // Трение и износ. 2016. Т. 37, № 6. С. 685–692.
7. Ломухин В.Б., Токарев А.О., Сургин В.В., Лаптева И.В. Использование модификатора моторного масла на основе серпентина и мягких металлов в судовых энергетических установках // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 3. С. 136–139.
8. Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н. Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин. СПб.: Академия транспорта РФ, 2006. 608 с.
9. Погодаев Л.И., Петров В.М., Шабанов А.Ю. Некоторые результаты исследования влияния смазочных композиций с добавками геомодификаторов трения на работоспособность трибосопряжений в лабораторных и натурных условиях // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2005. № 3. С. 27–41.
10. Порошин В.В. Основы комплексного контроля топографии поверхности деталей: монография. М.: Машиностроение-1, 2007. 196 с.
11. Усачев В.В., Погодаев Л.И., Телух Д.М., Кузьмин В.Н. Введение в проблему использования природных слоистых геомодификаторов в трибосопряжениях // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. № 1. С. 36–42.
12. Филимонова Е.А., Юльметова О.С., Третьяков С.Д. Оценка шероховатости поверхности с использованием трехмерных топографий // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 8. С. 56–60.

THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE

DOI.org/10.5281/zenodo.2578696

Leontev L., Shapkin N., Makarov V., Toklikishvili A., Bolotova V.

LEV LEONTEV, Doctor of Engineering Science, Professor, e-mail: leontyev.l.b@yandex.ru

VASILY MAKAROV, Postgraduate, e-mail: makarov_vasily@mail.ru

ANTONINA TOKLIKISHVILI, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: Toklikishviligg@mail.ru

Department of Welding, School of Engineering

NIKOLAY SHAPKIN, Doctor of Chemical Science, Professor, Department of Inorganic and Organoelemental Chemistry, School of Natural Sciences, e-mail: npshapkin@gmail.com
Far Eastern Federal University

8 Sukhanova St., Vladivostok, 690091, Russia

VALENTINA BOLOTOVA, Associate Professor, Department of Descriptive Geometry and Graphics, e-mail: bolotova@msun.ru

Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy

50-a Verkhneportovaya St., Vladivostok, 600003, Russia

Influence of thin-film wear-resistant cermet coatings of crankshaft journals on the performance characteristics of marine diesel engine friction-type bearings

Abstract: Medium-speed diesel engines installed on marine vessels serve as main and auxiliary engines having crankshaft necks with hardness ranging from 164 to 694 HV (58 HRC) and different types of bearing liners. The main reasons for the failures of crankshafts are wear and scuffing of the necks. Scuffing of the necks and melting of bearing antifriction layer often lead to deformation of crankshafts, and occasionally to their breakdown. Wear resistance of friction surfaces of the tribo-component parts is the main factor determining the service life and operating costs, as well as the need for repair. The solution to the problem of increasing wear resistance and, correspondingly, durability is associated with the application of various methods of hardening friction surfaces and tribo-active additives to lubrication. Currently, a large group of tribotechnical materials is used to harden friction surfaces by modifying and forming a cermet layer on the mating surfaces due to the energy generated in the process of friction, which by many criteria exceeds the wear-resistant coatings obtained when applying traditional technological methods of hardening. However, there are often no recommendations on the effective use of a particular preparation for such an important tribo-component as the crankshaft bearings of the medium-speed diesel engine. Therefore, in shipboard practice, tribo-preparations are rarely used to increase the life time and operating efficiency of the crankshaft bearings of medium-speed diesel.

The article presents the tribotechnical characteristics of friction-type bearings with a vermiculite-based cermet coating of shaft necks, and an assessment of the effectiveness of its use for treating crankshafts of ship diesel engines with different hardness of shaft necks.

Keywords: longevity, bearing, crankshaft, liner, diesel, tribotechnical material, coating, hardness, wear resistance.

REFERENCES

1. Dunaev A.V., Ladikov V.V., Pustovoi I.F., Golubev I.G. The efficiency of the use of mineral modifiers in the technical service in the agro-industrial complex. M., Rosinformagrotekh, 2014, 164 p.
2. Kicha G.P., Perminov B.N., Nadezhkin A.V. Resource-saving oil use in marine diesel engines. Vladivostok, Mor. State. Univ., 2011, 372 p.

3. Kolokatov A.M. Repair and recovery compositions for increasing the life of machines. M., Publishing House RGAU-MAKSA, 2016, 215 p.
4. Leontev L.B., Nadezhkin A.V., Makarov V.N., Toklikishvili A.G. Tribosystem analysis of *neck crank shaft-bearing-lubrication* of marine medium speed diesel engines. Engine engineering, 2013;2:41–47.
5. Leontiev L.B., Yuzov A.D. Bearings of crankshafts of marine diesel engines. Vladivostok, FECMA, 2000, 173 p.
6. Leontiev L.B., Shapkin N.P., Leontiev A.L., Makarov V.N. Tribotechnical properties of thin-film coatings obtained by tribome-modifying the necks of crankshafts of marine diesel engines. Friction and wear. 2016(37);6:685–692.
7. Lomuhin V.B., Tokarev A.O., Surgin V.V., Lapteva I.V. Use of the modifier of engine oil on the basis of serpentine and soft metals in ship power installations. Scientific problems of transport of Siberia and the Far East. 2014;3:136–139.
8. Pogodaev L.I., Kuzmin V.N. Structural-energy models of reliability of materials and machine parts. St. Petersburg. Academy of Transport of the Russian Federation, 2006, 608 p.
9. Pogodaev L.I., Petrov V.M., Shabanov A.Yu. Some results of the study of the effect of lubricating compositions with additives of friction geomodifiers on the efficiency of tribocouples in laboratory and field conditions. Problems of machine building and machine reliability. 2005;3:27–41.
10. Poroshin V.V. Fundamentals of complex control of the surface topography of parts. Monograph. M., Mashinostroenie-1, 2007. 196 p.
11. Usachev V.V., Pogodaev L.I., Telukh D.M., Kuzmin V.N. Introduction to the problem of the use of natural layered geomodifiers in triboconjugations. Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms. 2010;1:36–42.
12. Filimonova E.A., Yulmetova O.S., Tretyakov S.D. An estimate of the surface roughness using three-dimensional topographies. Izv. Universities. Instrument Making. 2014(57);8:56–60.