

РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

Д-р техн. наук В.Н. Остапчук

РОЗРОБКА СПОСОБІВ ВІДНОВЛЕННЯ ЗНОШЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Д-р техн. наук В.М. Остапчук

DEVELOPMENT WAY TO RESTORE THE WORN SURFACE PARTS OF TRANSPORT

Doct. of techn. sciences V.N. Ostapchuk

На основе анализа требований и условий эксплуатации установлен характер износа прецизионных пар трения. Разработаны способы их восстановления на примере плунжерных пар топливных насосов.

Разработаны принципы формирования многокомпонентных покрытий для восстановления прецизионных пар трения средств транспорта.

Они учитывают взаимосвязь между технологическими параметрами процессов трения, их структурой, механическими и эксплуатационными свойствами.

Ключевые слова: плунжерные пары, многокомпонентное покрытие, износостойкость, антифрикционные свойства.

На основі аналізу вимог і умов експлуатації встановлені характер зносу прецизійних пар тертя. Розроблені способи їх відновлення на прикладі плунжерних пар паливних насосів.

Розроблені принципи формування багатокомпонентних покриттів для відновлення прецизійних пар тертя засобів транспорту. Вони враховують взаємозв'язок між технологічними параметрами процесів тертя, їх структурою, механічними та експлуатаційними властивостями.

Ключові слова: плунжерні пари, багатокомпонентне покриття, зносостійкість, антифрикційні властивості.

Based on the analysis of the requirements and conditions character of precision pairs friction wear were established. On the example of the fuel pumps plunger assemblies the methods of their restore were developed. Principles of multichannel-component coatings formation for restoration precision friction pairs of transport means were designed.

Keywords: plunger assemblies, multi-component coating, wear resistance, anti-friction properties.

Постановка проблемы. В настоящее время в народном хозяйстве приходится 20-30% всего объема работ на восстановление изношенных поверхностей деталей средств транспорта, 60-80 % которых выполняется на предприятиях транспорта (железнодорожных, автомобильных, морских, авиационных).

Надежность средств транспорта является одним из основных показателей, который изменяется в процессе их эксплуатации.

Анализ надежности средств транспорта позволяет выявить именно наименее надежные элементы для их дальнейшего конструктивно-технологического усовершенствования.

Согласно проведенному анализу элементов средств транспорта установлено, что наибольшее количество отказов приходится на двигатели, у которых чаще всего отказывает система питания прецизионных деталей.

Износ и ухудшение технического состояния плунжерной пары в процессе эксплуатации приводит к нарушению нормальной работы двигателя, снижению его мощности, увеличению удельного расхода топлива, образованию нагара на поршнях и деталях распылителей форсунок, возрастанию износа кривошипно-шатунного механизма [1].

Плунжерные пары имеют в своем сопряжении малый зазор (0,6...2 мкм), что обуславливает их высокую чувствительность к загрязнению топлива твердыми частицами, которые вызывают интенсивное изнашивание деталей плунжерной пары и быстрый выход из строя [2].

Для успешного решения вопроса восстановления и повышения ресурса деталей плунжерной пары необходимо изучить условия работы, механизм и характер их изнашивания в процессе эксплуатации, а также существующие способы их восстановления и упрочнения.

Анализ последних исследований и публикаций. Существующие в настоящее время способы восстановления и упрочне-

ния плунжерных пар являются высокотемпературными и длительными по времени.

Их использование в условиях ремонтных предприятий требует применения сложного и дорогостоящего оборудования.

Опубликовано значительное количество работ, в которых рассматриваются вопросы повышения износостойкости деталей плунжерных пар [2-4].

Цель. Цель работы состоит в повышении износостойкости плунжерных пар путем разработки многокомпонентных покрытий.

Результаты исследований. С целью уменьшения интенсивности изнашивания плунжерные пары изготавливают из высокоуглеродистых легированных и конструкционных сталей и подвергают термообработке.

Плунжерные пары изготавливают из таких сталей, как 30ХГСА, ШХ15, 38Х2МЮА и др. [3].

Химический состав и физико-механические свойства некоторых сталей, применяемых для изготовления плунжерных пар, представлены в табл. 1 и 2 [4].

Применение данных сталей для производства плунжерных пар обеспечивает их высокую твердость, износостойкость, коррозионную стойкость, хорошую обрабатываемость, сохранение стабильности размеров и геометрической формы, способность работать в условиях повышенных давлений и температур.

Таблица 1

Химический состав сталей, применяемых для изготовления плунжерных пар, %

Химический состав	Марка стали		
	30ХГСА	ШХ15	38Х2МЮА
C	0,32-0,39	0,95 -1,05	0,35 -0,42
Si	0,90-1,20	0,17-0,37	0,20-0,45
Mn	0,80-1,10	0,20-0,40	0,30-0,60
Ni	-	Не более 0,30	-
S	Не более 0,03	Не более 0,02	Не более 0,02
P	Не более 0,02	Не более 0,03	Не более 0,02
Cu	Не более 0,20	Не более 0,25	Не более 0,30
Mo	-	-	Не более 0,20
Al	-	-	0,7-1,10
Cr	0,8-1,1	1,30-1,65	1,35-1,65

Физико-механические свойства сталей, применяемых для изготовления плунжерных пар

Физико-механические свойства	Марка стали		
	30ХГСА	ШХ15	38Х2МЮА
σ_{-1} , МПа	1080	590-730	825
δ , %	10	20	16,5
ρ , г/м ³	7673	7812	7710
KCU	490	440	1600

В связи со специфическими условиями работы плунжерных пар предъявляют повышенные требования к стабильности размеров, высокой термо- и износостойкости рабочих поверхностей, прочности и допустимым термическим и монтажным деформациям их деталей. Выполнение этих требований достигают с помощью различных видов термической обработки (азотирование, цианирование, цементация, закалка отпуск, нормализация и др.) [5]. Надежность в работе топливной аппаратуры зависит также и от точности изготовления деталей плунжерной пары, и от качественной их сборки. Несмотря на небольшие зазоры в плунжерных парах, плунжер должен свободно перемещаться во втулке, поэтому к геометрической форме плунжерных пар и чистоте сопрягаемых поверхностей предъявляются высокие требования. Твердость цилиндрических поверхностей плунжерных пар должна быть не ниже HRC 58, шероховатость поверхности плунжера и втулки плунжера $R_a < 0,04$ мкм, допустимое отклонение от цилиндрической формы – не более 0,001 мм, некруглость – не более 0,0005 мм, конусность – не более 0,0006 мм на длине 20 мм рабочей поверхности плунжера. Из вышеизложенного следует, что к материалу для изготовления плунжерных пар, к его термообработке, к точности геометрических параметров трущихся поверхностей деталей плунжерной пары, а также к качественной их сборке предъявляются очень высокие требования. Все это необходимо учитывать при

разработке технологического процесса восстановления и упрочнения деталей плунжерных пар, принимая во внимание величину и характер их изнашивания в процессе эксплуатации. Плунжерные пары работают в сложных условиях. При этом имеют место высокие давления и скорость рабочей среды, которая содержит твердые абразивные частицы различных размеров. Износ деталей плунжерных пар происходит из-за минеральных частиц, входящих в состав загрязнений и микротвердость таких абразивных частиц довольно высока, а микротвердость рабочих поверхностей деталей плунжерных пар составляет 9000... 10500 МПа, отсюда становится очевидной причина абразивного износа деталей плунжерных пар. Наличие абразивных частиц в топливе, соотношение их размеров с зазорами в плунжерных парах и высокая скорость движения топлива относительно поверхностей деталей определяют их гидроабразивный износ и абразивное истирание вследствие зацемячивания частиц в зазоре. Гидроабразивный износ представляет собой процесс совместного действия абразивных частиц и жидкости, несущей эти частицы. Износ происходит в результате срезания микростружек поверхности, выбивания отдельных ее частиц, вымывания микроскопических объемов, внедрения жидкости, находящейся под высоким давлением, в дефектные очаги, сопровождающегося раскливающим действием [6]. В большинстве работ [7-10] указывается на то, что абразивное истирание поверхностей

вследствие защемления частиц в зазоре происходит в том случае, когда размер абразивных частиц несколько больше зазора между сопрягаемыми поверхностями. Частицы заклиниваются в зазоре, внедряются в одну из поверхностей и действуют подобно резцу. На поверхности появляются крупные риски, направленные параллельно движению плунжера.

Некоторые авторы [11] указывают на то, что соизмеримые с зазором частицы своими острыми кромками также наносят микроцарапины на поверхности или деформируют поверхностный слой при перекачивании, а частицы меньше радиального зазора в основном проявляют свое действие при гидроабразивном изнашивании. Весьма важно отметить, что износ защемляемыми в зазоре частицами может иметь место в любой зоне сопряженных поверхностей плунжерных пар, а гидроабразивному износу могут подвергаться только те участки поверхностей, которые соприкасаются с движущимся топливом. Анализ условий работы плунжерных пар [3, 5] показывает, что движение топлива относительно поверхностей деталей происходит при просачивании его через зазоры и перетекании в окна гильзы в моменты начала и конца подачи. При перетекании топливо омывает кромки окон гильзы и плунжера и примыкающие к ним участки поверхностей. Просачивание топлива в моменты нагнетания также происходит в основном в зонах, непосредственно примыкающих к указанным кромкам в районах открытия и закрытия окон. В этих местах создаются наиболее короткие пути перетекания топлива из полости высокого давления в полость низкого давления.

Поскольку нагнетание топлива совершается на части хода плунжера, составляющего обычно 1,5...5 мм (активный ход плунжера), то и гидроабразивному износу, обусловленному просачиванием топлива, могут

подвергаться только небольшие участки поверхностей плунжера и гильзы, соизмеримые с активным ходом плунжера по длине и примыкающие к кромкам.

Отличительной особенностью износа деталей плунжерных пар является концентрация его на отдельных участках поверхностей. У гильзы участки износа сконцентрированы выше впускного и с нижней стороны от перепускного окон. У плунжера местные износы располагаются в зонах поверхности, совмещаемых при работе с указанными участками износа гильзы, то есть на участке, примыкающем к впускному окну, и у отсечной кромки в той ее части, где происходит открытие перепускного окна при отсечке подачи. Расположение участков местных износов на поверхностях плунжера и гильзы совпадает с зонами наиболее интенсивного просачивания топлива через зазоры при нагнетании и перетекании его в окна в начальный и конечный моменты нагнетания. Этот факт указывает на связь износа плунжерных пар с перетеканием топлива.

Величины местных износов у плунжера и гильзы неодинаковы, максимальному износу подвергается участок поверхности плунжера, примыкающий к впускному окну гильзы. Глубина местной впадины у предельно изношенного плунжера в непосредственной близости от кромки верхнего торца достигает 30...35 мкм, а на расстоянии 1 мм от кромки – 20...25 мкм.

Ширина изношенного участка достигает 7,5 мм по дуге окружности плунжера. По длине плунжера износ распространяется на 9...10 мм от кромки верхнего торца. В меньшей степени изнашивается втулка в зоне впускного окна. Непосредственно у кромки окна глубина впадины не превышает 20 мкм, а на расстоянии 1 мм кверху от нее – 10...15 мкм.

По мере приближения к кромке окна глубина впадины постепенно

увеличивается, а ее ширина по дуге окружности гильзы уменьшается [9].

Примечательной особенностью местных износов является то, что впадины имеют увеличивающуюся глубину по направлению к кромкам плунжера и гильзы. Это выравнивает сечение образующихся в результате износа каналов, по которым топливо перетекает из надплунжерного пространства в полость пониженного давления.

Такая особенность износа свидетельствует о гидро-абразивном характере процесса изнашивания. Таким образом, можно предположить, что процесс изнашивания плунжерных пар протекает следующим образом.

В момент подачи топлива через впускное окно гильзы (рис. 1, а) абразивные частицы, содержащиеся в топливе, изнашивают кромки впускного окна гильзы и кромку плунжера напротив впускного окна гильзы. В начальный момент нагнетания (рис. 1, б) и при отсечке подачи (рис. 1, в) движущиеся вместе с топливом твердые абразивные частицы наносят микроцарапины на кромках окон гильзы (на участках перекрытия окон) и плунжера и на непосредственно примыкающих к ним участках поверхностей.

При отсечке подачи (рис. 1, г) имеет место завихрение выходящей с большой скоростью в перепускное окно струи топлива.

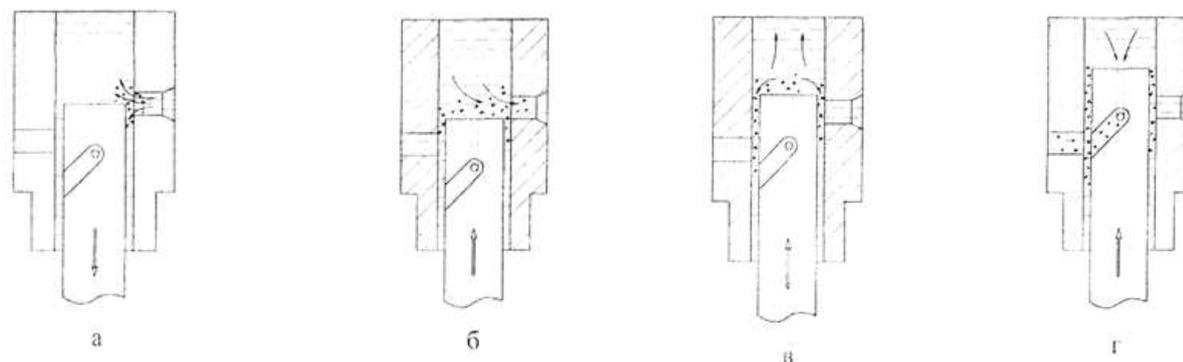


Рис. 1. Механизм изнашивания плунжерных пар:
а – момент подачи топлива; б – начальный момент нагнетания;
в – момент нагнетания топлива; г – момент отсечки подачи

В результате завихрения отдельные струи топлива с содержащимися в нем абразивными частицами ударяются о поверхность плунжера, расположенную выше отсечной кромки. Вследствие многочисленных ударов абразивными частицами на указанной поверхности плунжера образуются многочисленные микроскопические вмятины. Движущееся топливо размывает дефектные очаги (царапины и каверны). В процессе нагнетания, при перекрытых окнах гильзы (см. рис. 1, в), вместе с топливом, просачивающимся по кратчайшим путям в

окна гильзы, в зазор между плунжером и гильзой заносятся абразивные частицы. Мелкие и соизмеримые с зазором абразивные частицы протаскиваются между поверхностями плунжера и втулки движущимся топливом и за счет этого движения наносят царапины на поверхностях как плунжера, так и втулки плунжера. Крупные частицы, попадая в зазор между плунжером и втулкой, защемляются и изнашивают сопряженные поверхности. Занесенные топливом и защемленные в зазоре частицы изнашивают поверхности деталей плунжерных пар и

после отсечки подачи. Таким образом, изнашивание плунжерных пар является гидроабразивным по своему характеру и сопровождается защемлением абразивных частиц. Износ производят движущееся топливо и все содержащиеся в нем частицы, что приводит к появлению на рабочих поверхностях плунжерной пары глубоких борозд (рис. 2).

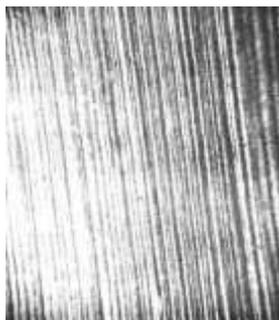


Рис. 2. Внешний вид поверхности изношенного плунжера (x80)

Такой механизм изнашивания плунжерных пар объясняет все рассмотренные выше особенности их износа. Расположение местных износов совпадает с зонами просачивания топлива через зазоры и перетекания его в окна. Направление бороздок указывает на то, что вблизи кромок ведущим является гидроабразивный износ, так как оно совпадает не с направлением движения плунжера, а с линиями движения топлива. Изменение направления бороздок связано с тем, что износ в этих зонах является следствием защемления частиц в зазоре. Так как участок поверхности плунжера, примыкающий к верхней торцевой кромке, перемещается в момент нагнетания из зоны действия гидроабразивного износа в зону износа только защемленными частицами, то бороздки здесь имеют направление, совпадающее с направлением его движения. Механизм изнашивания деталей плунжерных пар объясняет большой износ плунжера на участке, примыкающем к впускному окну гильзы, по сравнению с

соответствующим местным износом гильзы, а также меньший износ поверхностей у отсечной кромки плунжера и перепускного окна гильзы. У гильзы изношенная поверхность имеет отрицательный угол откоса к направлению движения потока топлива, что снижает изнашивающее воздействие на нее гидроабразивной струи. Поверхность плунжера, наоборот, обращена под некоторым углом навстречу потоку топлива. Тем самым она постоянно испытывает направленное воздействие струи. Кроме того, у поверхности плунжера оказывается более высокая скорость потока топлива вследствие слияния ее со скоростью его собственного движения. Защемленные частицы, вероятно, чаще всего шаржируются поверхностью втулки ввиду ее неподвижного положения. Это также приводит к большему износу плунжера. Кроме абразивных частиц в дизельном топливе присутствует вода, которая способствует образованию слабых и сильных электролитов водорастворимых кислот, являющихся наиболее активными реагентами электрохимической коррозии [11]. Вода и растворенные в ней вещества вызывают сильную коррозию деталей системы питания и приводят к дополнительному засорению топлива продуктами коррозии, отложению их на стенках топливных баков, топливопроводов, попаданию в зазоры прецизионных деталей. Описанные характер и механизм изнашивания позволяют сделать вывод о том, что износ деталей носит сложный гидроабразивный характер. В среднем плунжер изнашивается в 1,5-2 раза больше, чем втулка, и величина его износа не превышает 40 мкм. Поэтому для повышения долговечности плунжерных пар при их восстановлении необходимо на поверхности плунжера создать слой, толщина которого учитывает максимальную величину износа плунжера и припуски на механическую обработку, имеющий достаточную микротвердость (в

сравнении с микротвердостью основных абразивов микротвердость поверхности плунжера должна превышать 13000 МПа) и высокую коррозионную стойкость. В настоящее время существует целый ряд способов восстановления и упрочнения плунжерных пар топливных насосов [3,5, 10]. Восстановление плунжерных пар в настоящее время производится следующими методами: перекомплектовки; изготовления ремонтной детали; пластического деформирования втулки плунжера; химического никелирования; повторного азотирования; диффузионного хромирования плунжера; борирования втулки и плунжера; сульфоборирования; хромирования плунжера. Проведенный анализ показал, что существующие способы восстановления и упрочнения изношенных деталей плунжерной пары имеют много недостатков, вследствие чего требуется разработать способ более технологичный, относительно несложный, малотрудоемкий, а также проходящий при низких температурах с целью избежания нарушения термообработки и появления коробления деталей. Наиболее перспективным для восстановления плунжерных пар может быть формирование на рабочей поверхности многокомпонентного покрытия, обладающего заданной твердостью и антифрикционными свойствами. Основной подход к формированию покрытий, содержащих в своем составе соединение MoS_2 , состоит в отказе от плазмохимического синтеза и введении в плазмообразующую среду молекул данного вещества в связанном состоянии. Наиболее целесообразно использование покрытий из MoS_2 в качестве антифрикционного слоя двухслойных покрытий. При этом блокируется влияние материала подложки на элементный состав пленки, предотвращается охрупчивание ее включениями железа и делает покрытие более универсальным к материалам деталей. Исследование на трение и

изнашивание показывает, что антифрикционные свойства деталей пары трения резко возрастают при нанесении тонкопленочных покрытий (1-2 мкм) из меди, содержащей значительные примеси дисульфида молибдена. Пленки из этого материала мало чувствительны к материалу контртела пары трения. Такие характеристики, как величина износа и коэффициент трения, остаются примерно постоянными для большинства материалов железоуглеродистой группы, что снижает жесткие ограничения при выборе материалов сопряженной поверхности. Усредненные значения результатов испытаний на изнашивание показывают, что износ покрытий, содержащих дисульфид молибдена, выше, чем у других покрытий и контрольных образцов (табл. 3). Особенно велика потеря массы покрытия в начальный период приработки. Коэффициент трения покрытий, содержащих MoS_2 , достаточно низок и незначительно изменяется при увеличении давления на контакте трения (табл. 4). Низкое значение коэффициента трения взаимодействующей пары сохраняется длительное время и после истирания антифрикционного покрытия, что обусловлено не только ионной имплантацией MoS_2 в приповерхностную область детали, но и насыщением поверхности молекулами этого соединения в процессе эксплуатации пары трения. Применение покрытий, содержащих сульфид молибдена, в 2-3 раза сокращает время стабилизации моментов трения и значительно повышает предельную нагрузку схватывания. Триботехнические свойства покрытий малочувствительны к материалам основы и остаются практически неизменными при нанесении на пленки из TiN . Следует отметить, что покрытия, содержащие MoS_2 , значительно снижают энергонапряженность контакта трения (табл. 5). Так, максимальная объемная температура масла при испытании образцов с покрытием на 30-

Рухомий склад залізниць

40 % ниже, чем у контрольных образцов, а при увеличении нагрузки это различие не поддается объективной оценке, так как на контрольных образцах происходит возгорание масла. Очевидно, что снижению энергонапряженности контакта трения способствует медная основа пленки покрытия из MoS₂, обладающая высокой теплопроводностью. Учитывая возвратно-вращательный характер взаимного скольжения деталей средств транспорта и большие нагрузки на контакте, одним из определяющих требований, предъявляемых

к покрытиям, является нагрузка задиорообразования. У вакуум-плазменных покрытий с высоким содержанием MoS₂ (как двухслойных, так и однослойных) эта величина достигает 20 МПа, что значительно выше, чем у других покрытий триботехнического плана. Таким образом, лабораторные испытания двухслойных покрытий TiN→(Cu+ MoS₂) показывают, что их физико-механические и триботехнические параметры полностью соответствуют условиям эксплуатации деталей средств транспорта.

Таблица 3

Результаты на износ покрытий TiN→(Cu+ MoS₂) в ступенчатом режиме (τ=2 ч)

Пара трения	Давление, МПа		
	6	8	14
Исходный материал	0,0003/0,0001	0,0007/0,0004	-
С покрытием	0,0014/0,0007	0,0010/0,0006	0,0001/0,0004

Таблица 4

Коэффициент трения образцов с двухслойным покрытием

Пара трения	Давление, МПа			Давление задиорообразования
	6	8	14	
Исходный материал	0,09	0,10	0,13	14
С покрытием	0,06	0,08	0,09	20

Таблица 5

Максимальная объемная температура масла, °С при испытании образцов с двухслойным покрытием

Пара трения	Давление, МПа		
	6	8	14
Исходный материал	92	110	-
С покрытием	64	72	120

Таким образом, проведенные исследования дают основание утверждать, что вакуум-плазменное нанесение таких покрытий способно увеличить ресурс деталей в несколько раз при одновременном улучшении их эксплуатационных характеристик и упрочнении технологии их производства.

Покрытия на основе меди с высоким содержанием MoS₂ очень чувствительны к режимам осаждения, что позволяет формировать пленки с заданным распределением компонентов по толщине. Наиболее оптимальным представляется осаждение покрытий в азотной среде при высоких стартовых температурах с

последующим подстуживанием деталей. При вакуум-плазменном осаждении покрытий, содержащих MoS_2 , молекулы дисульфида молибдена глубоко диффундируют в приповерхностную область и локализуются в местах с явно выраженной структурно-фазовой неоднородностью. Это должно положительно сказываться на триботехнических свойствах поверхности и при окончании процесса приработки, то есть после изнашивания антифрикционного слоя. В связи с этим целесообразно формирование износостойкого слоя в ступенчатом режиме.

Выводы

1. Проанализированы технические требования, предъявляемые к плунжерным парам, и условия эксплуатации и установлены характер износа прецизионных пар трения и способов восстановления и упрочнения на примере деталей плунжерных пар.

2. Разработаны принципы формирования многокомпонентных покрытий для восстановления деталей средств транспорта, которые учитывают связь между технологическими параметрами процессов нанесения покрытий, структурой, механическими и эксплуатационными свойствам нанесения покрытий.

Список использованных источников

1. Антипов, В.В. Износ прецизионных деталей и нарушение характеристик топливной аппаратуры дизелей [Текст] / В.В. Антипов. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
2. Бахтиаров, Н.И. Производство и эксплуатация прецизионных пар [Текст] / Н.И. Бахтиаров, В.Е. Логинов. – М.: Машиностроение, 1979. – 203 с.
3. Бахтиаров, Н.И. Технология обработки прецизионных пар [Текст] / Н.И. Бахтиаров, В.Е. Логинов. – М.: Машгиз, 1963. – 287 с.
4. Лебедев, Б.И. Материалы и термическая обработка прецизионных деталей дизельной топливной аппаратуры [Текст] / Б.И. Лебедев // Тр. ЦНИТА. – М., 1989. – Вып. 9. – С. 48-51.
5. Евсиков, А.В. Технология производства и ремонта топливной аппаратуры дизелей [Текст] / А.В. Евсиков, В.Я. Попов. – М.: Машгиз, 1958. – 307 с.
6. Икрамов, У.А. Расчет абразивного износа сопряжения плунжер-втулка топливоподающей аппаратуры дизелей [Текст] / У.А. Икрамов, М.И. Ташкулатов, К.Х. Махкамов [Текст] // Проблемы трения и изнашивания. – 1980. – Вып. 17. – С. 75-78.
7. Зубчетов, Н.П. Исследование насосов распределительного типа [Текст] / Н.П. Зубчетов // Тр. НАТИ. – М., 1960. – С. 23-28.
8. Гуревич, Д.Ф. К теории износа плунжерных пар [Текст] / Д.Ф. Гуревич // Автомобильная промышленность. – 1958. – Вып. 10. – С. 26-28.
9. Износ плунжерных пар насосов [Текст] / Б.И. Костецкий [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1973. – Вып. 12. – С. 33-36.
10. Кривенко, П.М. Техническое обслуживание дизельной топливной аппаратуры [Текст] / П.М. Кривенко, И.М. Федосов. – М.: Сельхозиздат, 1962. – 374 с.
11. Хрущов, М.М. Абразивное изнашивание [Текст] / М.М. Хрущов, М.А. Бабичев. – М.: Наука, 1970. – 252 с.

Остапчук Віктор Миколайович, доктор техн. наук, професор кафедри матеріалів та технологій виготовлення виробів транспортного призначення Української державної академії залізничного транспорту.
Тел.: (057) 7301049. E-mail: fedcirina@yandex.ru.

Viktor Ostapchuk, doct. of techn. sciences, professor of materials and manufacturing techniques for transport purposes Ukrainian State Academy of Railway Transport. Tel.: (057) 7301049. E-mail: fedcirina@yandex.ru.
