

УДК 62.233.21/. 22

В. И. ВРУБЛЕВСКАЯ¹, М. В. АНИКЕЕВА¹, П. С. ДРОБЫШЕВСКИЙ²¹Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь²ОАО «Гомсельмаш», Гомель, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

Рассматриваются подшипники скольжения самосмазывающиеся на основе природного композита, взаимозаменяемые с подшипниками качения. Приведены результаты физико-механических и триботехнических испытаний подшипников с внутренними кольцами из сталей 45Х, 18ХГТ в сравнении с аналогичными кольцами из стали 45. Выявлено, что лучшими свойствами обладает конструкционная низкоуглеродистая легированная сталь 18ХГТ, упрочненная химико-термической обработкой (цементацией).

Ключевые слова: подшипники скольжения, свойства материала внутренних колец, триботехнические испытания, износостойкость.

Введение. В рыночных условиях проблема повышения качества и эффективности техники особо актуальна. Создание долговечных, высокопроизводительных, экономичных машин и механизмов невозможно без повышения износостойкости узлов трения с подшипниками качения и подшипниками скольжения. Основным недостатком подшипника качения является недолговечность при работе в абразивно-агрессивных средах. Поэтому повышение срока службы узлов трения, работающих в таких условиях, представляет актуальную задачу.

В БелГУТе разработаны подшипники скольжения самосмазывающиеся торцово-прессового деформирования карточек из древесины (ПСС ТПД). Вкладыш 2 запрессовывается в наружное кольцо 1. Внутреннее кольцо 3 изготавливается из стали 45 (рисунок 1) [1, 2].

На износ подшипников скольжения из полимерных материалов и прессованной древесины (природного композита) существенное влияние оказывает материал контртела. Например, если принять относительный износ образцов из фторопласта в паре с углеродистой сталью за 1, то в паре с чугуном относительный износ достигает 2, в паре с нержавеющей сталью – 3, хромовым покрытием – 20, алюминиевым сплавом – 50.

ПСС ТПД взаимозаменяемы с подшипниками качения, кольца и тела качения которых изготавливают из высокоуглеродистых легированных малопластичных сталей марок ШХ15, ШХ15СГ, ШХ20СГ и др. Однако послед-

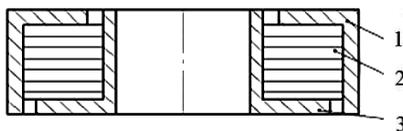


Рисунок 1 – Подшипник скольжения самосмазывающийся:

1 – наружное стальное кольцо; 2 – запрессованная втулка торцово-прессового деформирования древесной карточки;

3 – внутреннее стальное кольцо

ние обладают серьезным недостатком: точная объемная штамповка выполненных из нее колец подшипников невозможна, поэтому заготовки колец приходится получать поштучно – либо горячей штамповкой, либо (чаще) прямым вытачиванием из труб, при котором до 50 % металла превращается в стружку. Естественно, себестоимость подшипника и его цена растут, а конкурентоспособность снижается.

Выход из создавшегося положения подсказали теоретические исследования. Они показали, что низкоуглеродистые стали хорошо и точно штампуются без подогрева, их можно подвергать химико-термическому упрочнению и за счет этого значительно повышать качество рабочих поверхностей колец подшипников, а следовательно, их надежность в эксплуатации.

Выводы теоретиков применили такие известные фирмы, как Тимкин (США), Койо (Япония), одна из подшипниковых фирм Южной Кореи, а также ряд отечественных подшипниковых заводов (для крупногабаритных подшипников), и на практике доказали успешность изготовления колец подшипников качества из низкоуглеродистых сталей 20X, 20XНМ, 18ХГТ, 15Г, 12ХНЗА и др. [3]. Стендовые испытания, выполненные в научно-исследовательском институте подшипниковой промышленности в 1996–1997 гг. показали, что цементация рабочих поверхностей значительно повышает их качество, а ресурс работы увеличивает в 1,5–2 раза [4].

С подшипниками скольжения из прессованной древесины во всех исследованиях применялась только сталь 45. Другие стали не исследовались.

Основная цель данной работы заключается в выборе сталей для внутренних колец с высокими физико-механическими и триботехническими свойствами и методов их упрочнения, проведении микроструктурных, механических, триботехнических исследований для обоснования возможности их использования при производстве ПСС ТПД.

Объекты и методы исследований. Объекты сравнительных испытаний представляли собой вкладыши из модифицированной древесины торцово-прессового деформирования, пропитанной смазочным материалом, работающие в контакте с внутренними кольцами, изготовленные из сталей 45, 45X, 18ХГТ, химический состав которых приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав сталей 45X, 18ХГТ в сравнении со сталью 45, % [5, 6]

Марка стали	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Fe	Ti
45	0,4–0,5	0,17–0,37	0,5–0,8	≤0,3	≤0,045	≤0,04	≤0,25	0,25	~97	
45X	0,4–0,5	0,17–0,37	0,5–0,8	≤0,3	≤0,035	≤0,035	0,8–1,1	≤0,3	~97	
18ХГТ	0,17–0,23	0,17–0,37	0,8–1,1	≤0,3	≤0,035	≤0,035	1–1,3	≤0,3	~96	0,03–0,09

Для повышения твердости испытуемых образцов применялись различные методы упрочнения. Партия роликов из конструкционной стали 45 обрабатывались объемной закалкой при температуре нагрева $T_n = 840$ °С с охлаждением в масле и последующим низким отпускком при температуре нагрева

$T_n = 200$ °С в течение $t = 2$ ч. Металлические образцы из стали 45Х обрабатывались объемной закалкой при температуре нагрева $T_n = 840$ °С с охлаждением в масле и последующим низким отпуском при температуре нагрева $T_n = 200$ °С в течение $t = 2$ ч. Цементация образцов из стали 18ХГТ проводилась при температуре нагрева $T_n = 940$ °С и времени выдержки $t = 7$ ч, закалка при температуре нагрева $T_n = 840$ °С, низкий отпуск при температуре нагрева $T_n = 200$ °С в течение $t = 2$ ч. Термическая обработка всех названных роликов производилась в камерных печах SECO/WARWICK.

Пропитка вкладышей торцово-прессового деформирования подшипников скольжения минеральным маслом МС-20, загущенным высокомолекулярной присадкой, осуществлялась на экспериментальной установке для высокотемпературной пропитки.

Измерение твердости роликов на поверхности и в сердцевине производилось на твердомере Struers Duramin 500 по шкале Роквелла в соответствии с ГОСТ 9012–59 (рисунок 2). Принцип действия прибора основан на вдавлении алмазного конуса с углом при вершине $120 \pm 30'$. Под действием предварительной нагрузки $P = 10$ Н осуществлялся прокол поверхностных слоев, а затем добавлялась основная нагрузка $P = 150$ Н.

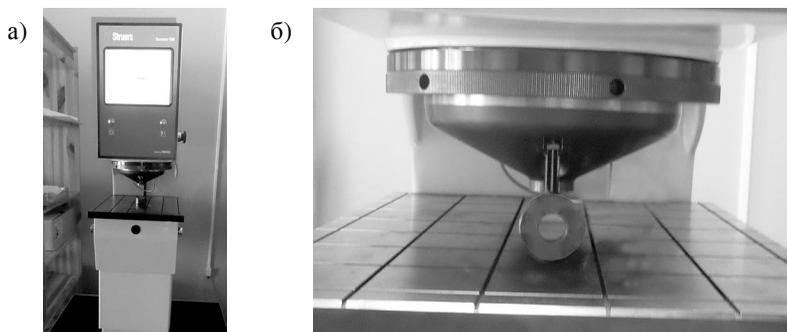


Рисунок 2 – Общий вид твердомера Struers Duramin 500 (а) и испытание ролика (б)

Определение шероховатости поверхности металлических образцов производилось на контактном высокочувствительном профилографе-профилометре модели 252. Работа устройства построена на ощупывании исследуемой поверхности алмазной иглой с радиусом кривизны при вершине 10 мкм и преобразовании с помощью дифференциального индуктивного преобразователя ее механических колебаний в пропорциональные изменения электрического напряжения. Полученные данные обрабатывались при помощи программного обеспечения Profilograph1.0 на персональном компьютере, подключенном к прибору [7].

Микрофотографии и трехмерные модели поверхности ролика и вкладыша из модифицированной прессованной древесины получены с помощью лазерного сканирующего микроскопа Olympus LEXT ols 3000 (рисунок 3).

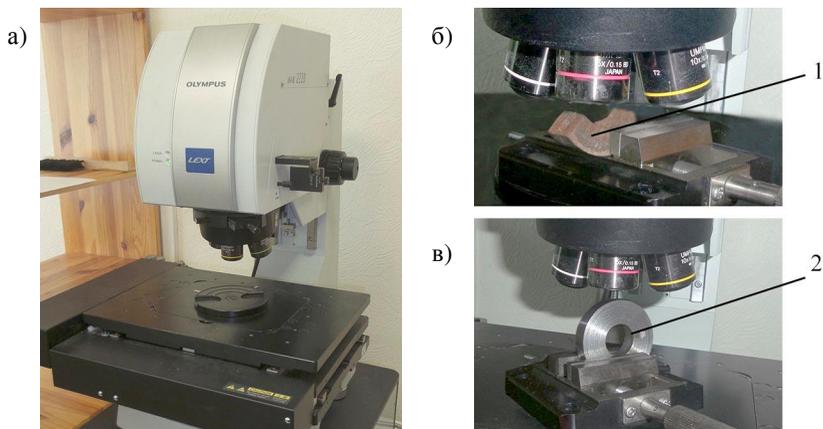


Рисунок 3 – Общий вид лазерного сканирующего микроскопа Olympus LEXT 3000 (а) и испытание вкладыша (б), ролика (в)

Данные передавались на подключенный к микроскопу компьютер. Действие прибора основано на физических процессах взаимодействия поверхности твердого образца с сфокусированным пучком электронов. Передвижение луча осуществляется в одном направлении параллельно оси вращения ролика и оси вкладыша. Изображение наружной поверхности ролика и внутренней вкладыша оцифровывается посредством аналого-цифрового преобразователя и передается на компьютер.

Испытания пары трения «ролик – вкладыш» на износ производилось на машине трения 2070 СМТ-1 (рисунок 4) при давлениях $p = 2 \dots 10$ МПа и скоростях скольжения $v = 0,25; 0,5$ м/с. При работе машины проходило истирание образцов, прижатых друг к другу силой F . Вкладыш располагал в шаровой опоре, что позволяло ему и ролику самоустанавливаться при работе узла. Контакт в процессе трения происходил по линии.

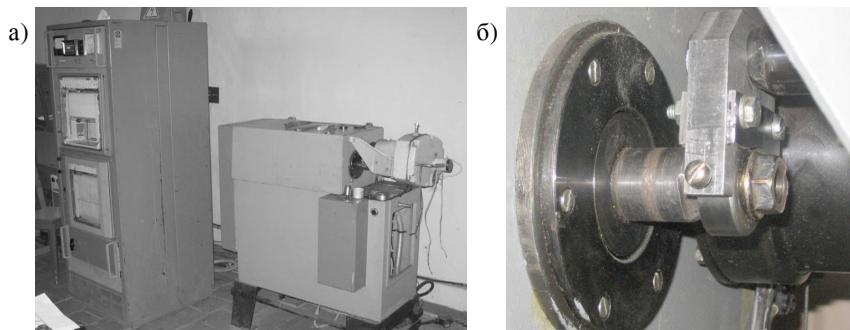


Рисунок 4 – Общий вид машины трения 2070 СМТ-1 (а) и узел трения (б)

Результаты исследований и их обсуждение. Методом Роквелла определены значения твердости на поверхности и в сердцевине роликов. Результаты испытаний представлены на рисунке 5.

Установлено, что твердость поверхности стали 45 после объемной закалки и низкого отпуска составила 52 HRCэ, а твердость сердцевины – 49 HRCэ. Сталь 45X после объемной закалки и низкого отпуска приобрела поверхностную твердость – 53 HRCэ и твердость сердцевины – 50 HRCэ. Однако, сочетание материала 18ХГТ и метода химико-термической обработки позволило достигнуть высокой твердости на поверхности (57 HRCэ) и низкой в сердцевине (28 HRC), что повысило физико-механические и триботехнические характеристики.

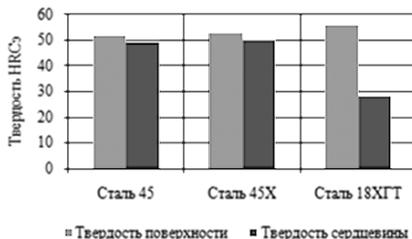


Рисунок 5 – Твердость стальных роликов на поверхности и в сердцевине

На микрофотографиях поверхностей всех роликов до испытаний видны следы обработки от режущего инструмента (рисунок 6, а), а после испытаний на них просматривается наличие смазочного материала (рисунок 6, б).

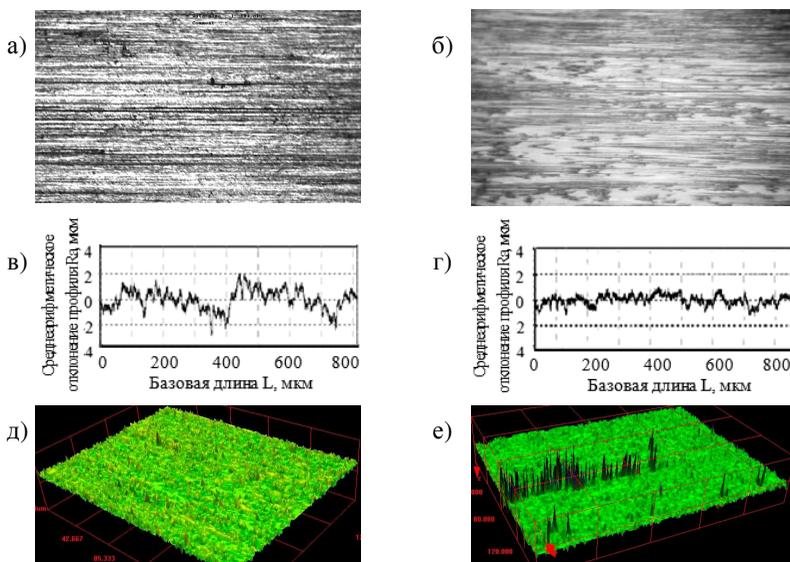


Рисунок 6 – Микрофотографии поверхности ролика до (а) и после (б) испытаний.

Профилотграммы поверхности трения до (в) и после (г) экспериментов.

3D-модель поверхности трения ролика до (д) и после (е) испытаний

С помощью программного обеспечения Profilograph1.0 вычислены параметры шероховатости поверхностей роликов до испытаний ($R_a = 0,64$ мкм,

$Rq = 0,79$ мкм, $L = 800$ мкм) и после экспериментов ($Ra = 0,36$ мкм, $Rq = 0,45$ мкм, $L = 800$ мкм). Измерениями профилограмм поверхности трения металлических роликов, работающих в контакте с вкладышами, пропитанными авиационным маслом МС-20, загущенными высокомолекулярной присадкой, установлено, что в процессе работы происходит сглаживание микронеровностей и после приработки чистота поверхностей роликов повышается (рисунок 6, в, з). На трехмерной модели ролика до испытаний исследуемая зона не имеет существенных неровностей (рисунок 6, д), а после экспериментов в некоторой области обнаружено наличие пиков, что свидетельствует о переносе смазочного материала в зону трения (рисунок 6, е).

На микрофотографиях, профилограммах, 3D-моделях вкладышей из модифицированной прессованной древесины (МПД), работающих с роликами из различных сталей заметно сглаживание неровностей внутренней поверхности вкладыша (рисунок 7, а, б), снижение ее параметров шероховатости по измерениям профилографа-профилометра (с $Ra = 3,9$ мкм, $Rq = 4,95$ мкм, $L = 800$ мкм до $Ra = 2,69$ мкм, $Rq = 3,37$ мкм, $L = 800$ мкм) (рисунок 7 в, з) и соответственно уменьшение количества пиков, просматриваемых на 3D-модели (рисунок 7 д, е).

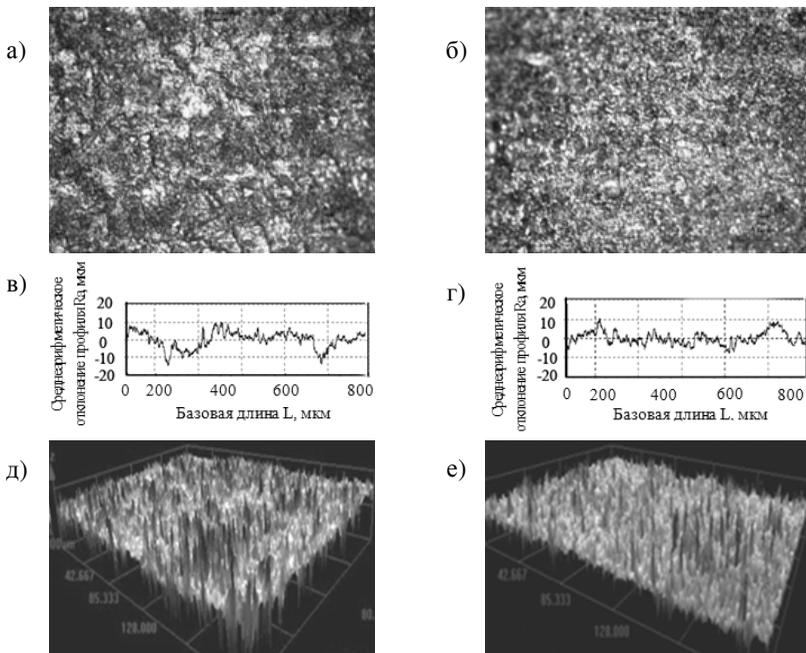


Рисунок 7 – Микрофотографии внутренней поверхности вкладыша до (а) и после (б) экспериментов. Профилограммы поверхности трения до (в) и после (г) испытаний. 3D-модель поверхности трения вкладыша до (д) и после (е) исследований

При скорости скольжения $v = 0,25$ м/с выбранные пары трения способны выдерживать давления $p = 1...10$ МПа. Массовый износ вкладыша из МПД, контактируемого с роликом из Стали 45 составил $\Delta m = 0,02...0,08$ г, из Стали 45X – $\Delta m = 0,017...0,071$ г, из Стали 18ХГТ – $\Delta m = 0,012...0,062$ г (рисунок 8, а). Однако с увеличением скорости скольжения до $v = 0,5$ м/с снижается нагрузочная способность ($p = 1...7$ МПа) пар трения «ролик из Стали 45 – частичный вкладыш», «ролик из Стали 45X – частичный вкладыш». Таким образом, массовый износ вкладыша, работающего с образцом из Стали 45 – $\Delta m = 0,022...0,08$ г, с роликом из Стали 45X – $\Delta m = 0,0185...0,062$ г. Пара трения «ролик из Стали 18ХГТ – частичный вкладыш» способна эксплуатироваться при скорости скольжения $v = 0,5$ м/с, давлении $p = 1...8$ МПа с массовым износом вкладыша из МПД – $\Delta m = 0,0145...0,0663$ г (рисунок 8, б).

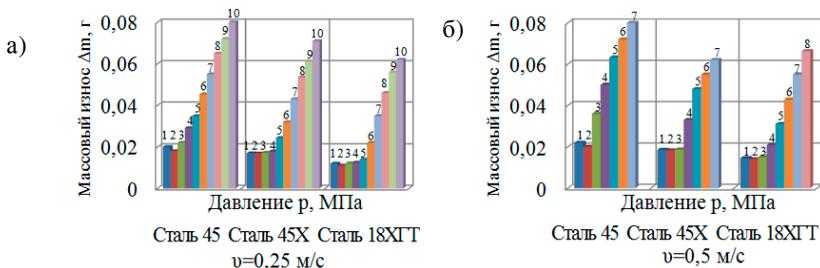


Рисунок 8 – Массовый износ вкладышей, работающих с контртелом из различных марок сталей твердостью 52–57 HRC при скоростях скольжения $v = 0,25$ м/с (а) и $v = 0,5$ м/с (б)

Результаты испытаний показали, что массовый износ вкладыша при контакте с образцом из Стали 18ХГТ имеет меньшие значения по сравнению с роликами из Стали 45, Стали 45X. Такая разница, возможно обусловлена химическим составом и видом химико-термической обработки, которые повышают твердость Стали 18ХГТ и снижают массовый износ частичного вкладыша.

Построены графики зависимостей линейной интенсивности изнашивания вкладышей, эксплуатируемых с роликами из различных сталей, от давления и скорости скольжения. Установлено, что линейная интенсивность изнашивания вкладышей, работающих с роликами возрастает с увеличением режимов нагружения. Линейная интенсивность изнашивания вкладышей, контактирующих со Сталью 45 – $I_h = 2,47 \cdot 10^{-8}...9,87 \cdot 10^{-8}$, со Сталью 45X – $I_h = 2,1 \cdot 10^{-8}...8,76 \cdot 10^{-8}$, со Сталью 18ХГТ – $I_h = 1,48 \cdot 10^{-8}...7,65 \cdot 10^{-8}$ ($p = 1...10$ МПа, $v = 0,25$ м/с) (рисунок 9, а).

При скорости скольжения $v = 0,5$ м/с вкладыши, работающие со Сталью 45, Сталью 45X выдерживают давления от 1 до 7 МПа, а их линейная интенсивность изнашивания составляет $I_h = 2,72 \cdot 10^{-8}...9,87 \cdot 10^{-8}$ и $I_h = 2,28 \cdot 10^{-8}...7,65 \cdot 10^{-8}$ соответственно. Вкладыши из МПД, эксплуатируемые с роликами из Стали 18ХГТ способны работать со скоростью скольжения $v = 0,5$ м/с, давлении

$p = 1...8$ МПа. Линейная интенсивность изнашивания таких вкладышей – $I_h = 1,78 \cdot 10^{-8} ... 8,19 \cdot 10^{-8}$ (рисунок 9, б).

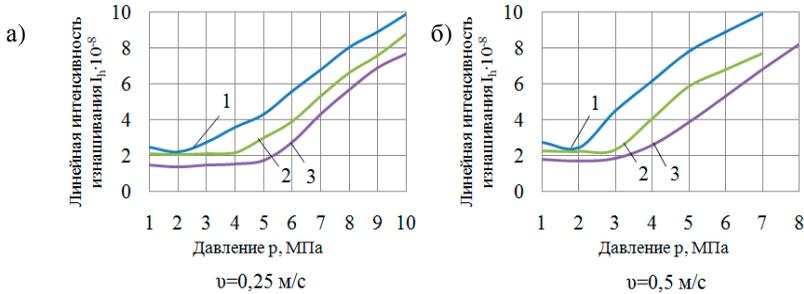


Рисунок 9 – Линейная интенсивность изнашивания вкладышей, контактирующих с роликами из Стали 45 (1), Стали 45X (2), Стали 18ХГТ (3) при скоростях скольжения $v = 0,25$ м/с (а) и $v = 0,5$ м/с (б)

При определении износостойкости вкладышей выявлено, что при скорости скольжения $v = 0,25$ м/с и давлении $p = 1...10$ МПа они имеют следующие значения: со Сталью 45 – $\varepsilon = 0,4...0,101$, со Сталью 45X – $0,476...0,114$, со сталью 18ХГТ – $0,675...0,1307$ (рисунок 10, а). Износостойкость вкладышей, эксплуатируемых с образцами из Стали 45 и Стали 45X для режимов $v = 0,5$ м/с, $p = 1...7$ МПа составляет $\varepsilon = 0,367...0,101$ и $\varepsilon = 0,13...0,438$ соответственно. Износостойкость вкладышей, работающих с роликами из Стали 18ХГТ – $\varepsilon = 0,122...0,56$ (рисунок 10, б).

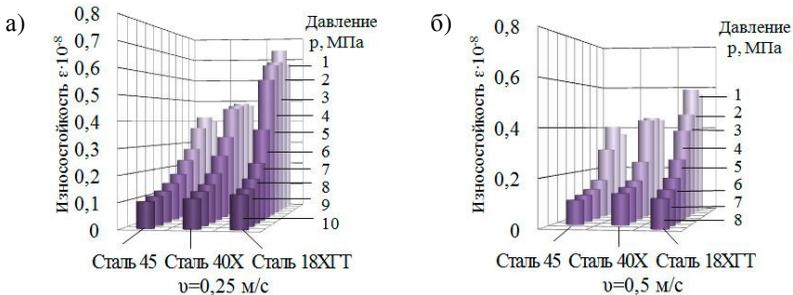


Рисунок 10 – Износостойкость вкладышей, работающих с контртелом из Стали 45 (1), Стали 45X (2), Стали 18ХГТ (3) при скоростях скольжения $v = 0,25$ м/с (а) и $v = 0,5$ м/с (б)

На основании полученных данных следует отметить, что существует разница в значениях линейной интенсивности изнашивания, износостойкости вкладышей, работающих с образцами из различных марок сталей. Наилучшие показатели работоспособности выявлены у пары трения «ролик из стали 18ХГТ – вкладыш ТПД». Возможно, сказывается наибольшее содержание таких легирующих элементов, как марганец и титан, повышающих твердость

Стали 18ХГТ, и обуславливающих износостойкость и уменьшение интенсивности изнашивания вкладыша.

Заключение. В результате экспериментов установлено, что при использовании материала 18ХГТ и метода химико-термической обработки удается получить высокую твердость на поверхности, низкую в сердцевине детали, что ведет к повышению физико-механических и триботехнических характеристик стали. Массовый износ и линейная интенсивность изнашивания вкладышей, работающих с роликами из Стали 18ХГТ, меньше в 1,4 раза, а из Стали 45Х – в 1,2 раза по сравнению с роликами из Стали 45. Таким образом, пара трения «ролик из Стали 18ХГТ – частичный вкладыш» способна выдерживать большие нагрузки и имеет лучшие показатели, характеризующие износ. Поэтому для изготовления внутренних колец подшипников скольжения ПСС ТПД можно рекомендовать к использованию Сталь 18ХГТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Врублевский, В. Б.** Исследование процесса торцово-прессового деформирования древесины и создание высокопроизводительного оборудования для изготовления из нее подшипников скольжения : автореф. дис.... канд. техн. наук. – Минск, 2002. – 20 с.

2 Подшипники скольжения самосмазывающиеся на основе модифицированной древесины: теория, технология, практика / А. Б. Невзорова [и др.] ; под общ. ред. А. Б. Невзоровой. – Гомель : БелГУТ, 2011. – 254 с.

3 **Дзанашвили, Г. Ф.** Российские подшипники. Новые технологии и материалы / Г. Ф. Дзанашвили, О. В. Савченко, Н. М. Австрийский // Автомобильная промышленность. – 1997. – № 10. – С. 27–28.

4 **Гурченко, П. С.** Перспективы применения углеродистых сталей для подшипников и шестерен с упрочнением управляемой объемно-поверхностной закалкой с индукционного нагрева / П. С. Гурченко, А. А. Солонович // Литье и металлургия. – 2015. – № 1(78). – С. 91–97.

5 Материаловедение : учеб. пособие / И. М. Жарский [и др.]. – Минск : Выш. шк., 2015. – 557 с.

6 **Гуляев, А. П.** Материаловедение / А. П. Гуляев. – М. : Металлургия, 1986. – 544 с.

7 **Богданович, П. Н.** Трение, смазка и износ в машинах / П. Н. Богданович, В. Я. Прушак, С. П. Богданович. – Минск : Тэхналогія, 2011. – 527 с.

V. I. VRUBLEVSKAYA, M. V. ANIKEEVA, P. S. DROBYSHEVSKY
Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus.
Open Joint-Stock Company «Gomselmash», Gomel, Belarus.

RESEARCH OF STEEL PROPERTIES FOR THE PLAIN BEARING INNER RINGS PRODUCTION

There are considered the self-lubricating on the basis of natural composite, interchangeable with rolling bearings plain bearings. The results of physical-mechanical and tribotechnical tests of bearings with inner rings made of 45H and 18HGT steel in comparison with the inner rings made of steel 45 are presented. It was revealed that the steel 18HGT after chemical-thermal processing (cementation) has the best properties.

Получено 28.09.2017