

УДК 62-233.21/.22

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ МАТЕРИАЛА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

М. В. АНИКЕЕВА, В. В. КУЗНЕЦОВА

*Учреждение образования «Белорусский государственный
университет транспорта», г. Гомель*

Ключевые слова: подшипник скольжения, внутренние кольца, стали, температура, коэффициент трения, топография поверхности

Введение

Долговечность машин и механизмов зависит от интенсивности изнашивания отдельных деталей. Одним из элементов, снижающих срок службы, является подшипник скольжения. Отказы подшипниковых узлов ведут к простоям техники, потерям производительности и увеличению себестоимости продукции.

Анализ литературы по проблеме увеличения ресурса работы подшипников скольжения, снижению себестоимости ремонта и расходов, связанных с техническим обслуживанием [1]–[4], позволяет заключить, что в дальнейшем необходимо совершенствовать конструкции, материалы и виды их обработки, применяемые в процессе производства.

Целью работы является выбор материала и его метода термической обработки, проведение серии триботехнических испытаний для установления возможности замены Стали 45, используемой для изготовления внутренних колец ПСС ТПД (рис. 1) [2], на другие марки сталей, повышающих работоспособность узла трения.

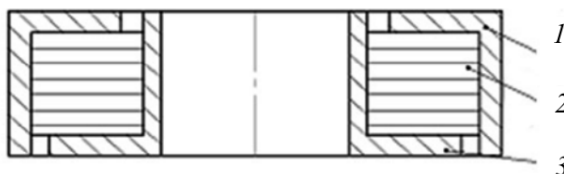


Рис. 1. Подшипник скольжения самосмазывающийся:

1 – наружное стальное кольцо; 2 – запрессованная втулка торцово-прессового деформирования древесной карточки; 3 – внутреннее стальное кольцо

Основная часть

Так как разработанные ПСС ТПД способны работать на самосмазке в абразивно-агрессивных и влажных средах, то к выбору материала для внутренних колец подшипников необходимо предъявлять соответствующие требования. Материал внутреннего кольца должен обладать высокой твердостью, износостойкостью, контактной выносливостью, прочностью, определяющими способность детали противостоять статическим и динамическим нагрузкам.

Сталь 45, используемая для изготовления подшипников скольжения самосмазывающихся с втулкой торцово-прессового деформирования, относится к среднеуглеродистым качественным конструкционным сталям. Химический состав Стали 45 по ГОСТ 1050–95 приведен в табл. 1.

Таблица 1

**Химический состав стали, используемой для изготовления
внутренних колец ПСС ТПД, и ее заменители, %**

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

Режимы термической обработки (ТО) применительно к стали следующие: оптимальная температура закалки 820–840 °С, среда закалки – масло. После ТО сталь приобретает высокую твердость до 50–59 HRC. Для придания необходимой вязкости и снятия внутренних напряжений сталь после закалки рекомендуется подвергать отпуску на сорбит ($\sigma_{\text{в}} = 600$ МПа). Сталь 45 является дешевой. Однако она имеет следующие недостатки: склонна к образованию закалочных трещин при закалке в воду, подвержена коррозии. Из стали 45 изготавливают не только внутренние кольца для ПСС ТПД, но и такие детали, используемые в машиностроении, как вал-шестерни, коленчатые и распределительные валы, шестерни, шпиндели, бандажи, цилиндры, кулачки, для которых важными критериями является максимальная надежность и износостойкость.

Исходя из условий эксплуатации подшипников скольжения самосмазывающихся с втулкой торцово-прессового деформирования, в качестве материала для изготовления их внутренних колец были выбраны конструкционные стали 45X, 18ХГТ, применяемые при производстве ответственных деталей в машиностроении.

Сталь 45X принадлежит к группе среднеуглеродистых легированных конструкционных сталей высокой прочности. Химический состав в соответствии с ГОСТ 4543–95 указан в табл. 1. Сталь 45X отличается от Стали 45 процентным содержанием хрома (у Стали 45X больше в 3–4 раза). Присадка хрома значительно увеличивает предел прочности стали $\sigma_{\text{в}} = 1030$ МПа. Режимы ТО: оптимальная температура закалки 820–840 °С, среда закалки – масло. После ТО сталь приобретает высокую твердость до 54–60 HRC. Основными недостатками Стали 45X являются склонность к отпускной хрупкости (охлаждение после отпуска рекомендуется производить в масле) и низкая стойкость к коррозии. Данная сталь широко применяется в машиностроении, так как обладает небольшой стоимостью, высокой износостойкостью и способна работать при высоких напряжениях. Из нее изготавливаются валы, шестерни, шатуны, оси, всасывающие клапаны, втулки и другие детали, эксплуатируемые в различных механизмах и машинах.

Сталь 18ХГТ – легированная конструкционная сталь, химический состав которой приведен в табл. 1. Данная марка стали по химическому составу отличается от Стали 45 и Стали 45X: процентным содержанием углерода (в 2 раза меньше у Стали 18ХГТ); большим значением марганца (на 0,3 %), который при одновременном введении в сталь с хромом повышает ее прокаливаемость (глубину проникновения закаленной зоны) и прочностные свойства; наличием титана, способствующим измельчению зерна и уменьшению чувствительности стали к перегреву. После холодной штамповки и токарно-доделочной обработки поверхностный слой заготовок подвергается цементации на глубину 0,6–0,8 мм, а затем закалке и отпуску.

В соответствии с ГОСТ 4543–71 установлены рекомендуемые режимы ТО: температура цементации – 920–950 °С, среда цементации – воздух; температура закалки – 820–860 °С, среда закалки – масло; температура отпуска – 200 °С, среда отпуска – воздух. После ТО сталь имеет достаточно прочную вязкую сердцевину 24–30 HRC, износоустойчивую поверхность 56–62 HRC, а предел прочности составляет $\sigma_b = 980$ МПа. К числу недостатков Стали 18ХГТ следует отнести небольшую прокаливаемость (около 25 мм при закалке в воде и 12 мм при закалке в масле) и низкую коррозионную стойкость. Материал 18ХГТ служит для изготовления ответственных деталей, работающих при больших давлениях, скоростях и ударных нагрузках: пальцы, шкворни, втулки, шестерни, червячные валы, кулачковые муфты и т. д. [5], [6].

Предлагаемые материалы Сталь 45Х и Сталь 18ХГТ благодаря высоким показателям по физико-механическим свойствам могут стать заменителями широкоприменяемой Стали 45 для изготовления внутренних колец ПСС ТПД.

Объекты и методы исследований

Объекты испытаний представляли собой ролики из Стали 45Х, Стали 18ХГТ и вкладыши из модифицированной древесины торцово-прессового деформирования.

Ролики из конструкционной легированной Стали 45Х обрабатывались объемной закалкой в камерной печи SECO/WARWICK при температуре нагрева $T_n = 840$ °С с охлаждением в масле и последующим низким отпуском при температуре нагрева $T_n = 200$ °С в течение двух часов.

Цементация образцов из Стали 18ХГТ проводилась при температуре нагрева $T_n = 940$ °С и времени выдержки 7 часов, закалка – при температуре нагрева $T_n = 840$ °С, низкий отпуск – при температуре нагрева $T_n = 200$ °С в течение двух часов в агрегате SECO/WARWICK.

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

Определение твердости стальных образцов производилось на твердомере ТК-2М методом Роквелла.

Триботехнические эксперименты проводились на машине трения 2070 СМТ-1 с использованием схемы «вал – частичный вкладыш» (рис. 2) [1], [7], при различных скоростях скольжения $v = 0,25; 0,5; 0,75; 1$ м/с и давлениях $p = 2, 4, 6, 8$ МПа. Контртелом служили упрочненные ролики из Стали 45Х и Стали 18ХГТ с наружным диаметром 40 мм и внутренним 16 мм. Частичный вкладыш ТПД, пропитанный смазкой модифицированной высокомолекулярной присадкой, имел форму сегмента толщиной 10 мм, длиной дуги 20 мм и площадью поверхности контакта 200 мм². Коэффициент трения определялся по показаниям измерений момента трения и фиксировался при помощи электронного самописца КСП-4. Контроль температуры фрикционного разогрева осуществляли хромель копелевой термопарой на расстоянии 1 мм от поверхности трения.

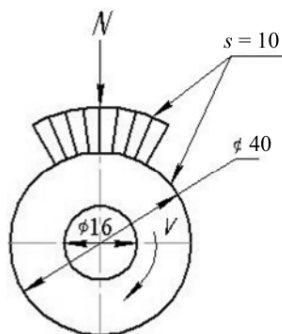


Рис. 2. Схема испытаний «вал – частичный вкладыш»

До и после триботехнических испытаний производилось исследование структурных изменений поверхностей трения роликов из Стали 45Х, Стали 18ХГТ на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LSH.

Результаты испытаний и их обсуждение

Величина твердости внутренних колец после термической обработки Стали 45, Стали 45Х, Стали 18ХГТ составила 52–58 HRC. Высокие значения твердости свидетельствуют о том, что поверхность внутренних колец ПСС ТПД будет износостойкой.

Установлено, что температура фрикционного разогрева незначительно изменяется от продолжительности испытаний. В области малых давлений и скоростей скольжения ($p = 2$ МПа, $v = 0,25$ м/с) температура в зоне контакта при граничном трении пары «ролик – частичный вкладыш» после 20–120 мин испытаний для роликов из Стали 45 составила $T = 32\text{--}39$ °С, Стали 45Х – $T = 29\text{--}36$ °С, Стали 18ХГТ – $27\text{--}35$ °С. При повышении скорости скольжения до $v = 1$ м/с, неизменном давлении $p = 2$ МПа, продолжительности исследований $t = 20\text{--}120$ мин температура в зоне трения для испытуемых объектов из Стали 45 достигла $T = 54\text{--}72$ °С, Стали 45Х – $T = 51\text{--}68$ °С, из Стали 18ХГТ – $48\text{--}58$ °С (рис. 3, а–в). С увеличением давления до $p = 8$ МПа, постоянной скорости скольжения $v = 0,25$ м/с, времени экспериментов – 20–120 мин температура фрикционного разогрева пар трения составила: «внутреннее кольцо из Стали 45 – ПСС» $T = 58\text{--}68$ °С; «внутреннее кольцо из Стали 45Х – ПСС» – $T = 56\text{--}66$ °С, «внутреннее кольцо из 18ХГТ – ПСС» – $48\text{--}53$ °С (рис. 3, к–м).

Таким образом, при увеличении скорости скольжения с $v = 0,25$ до 1 м/с и постоянном давлении $p = 2$ МПа после 20 мин работы температура в зоне контакта «ролик из Стали 45 – частичный вкладыш» изменилась на 22 °С, после 60 мин – на 31 °С, после 120 мин – на 33 °С, при трении пары «ролик из Стали 45Х – частичный вкладыш» изменилась на 22 °С, после 60 мин – на 30 °С, после 120 мин – на 32 °С и при трении «ролик из Стали 18ХГТ – частичный вкладыш» после 20 мин – на 21 °С, после 60 мин – на 22 °С, после 120 мин – на 23 °С (рис. 3, а–в).

При высоком давлении $p = 8$ МПа и скорости скольжения $v = 0,75$ м/с через 40 мин испытаний в зонах трения «внутреннее кольцо из Стали 45 – ПСС» и «внутреннее кольцо из Стали 45Х – ПСС» произошло повышение температуры до $T = 152$ °С. Такая же температура была зафиксирована при давлении $p = 8$ МПа, скорости скольжения $v = 1$ м/с после 20 мин испытаний для пары трения «внутреннее кольцо из Стали 18ХГТ – ПСС» (рис. 3, к–м).

Выявлено, что с увеличением режимов нагружения (p , v) температура в течение 40–60 мин испытаний повышается. За счет роста температуры смазочный материал выделяется из микрополостей модифицированной самосмазывающейся древесины в

зону контакта, образуя граничный смазочный слой, обуславливающий постоянную температуру фрикционного разогрева.

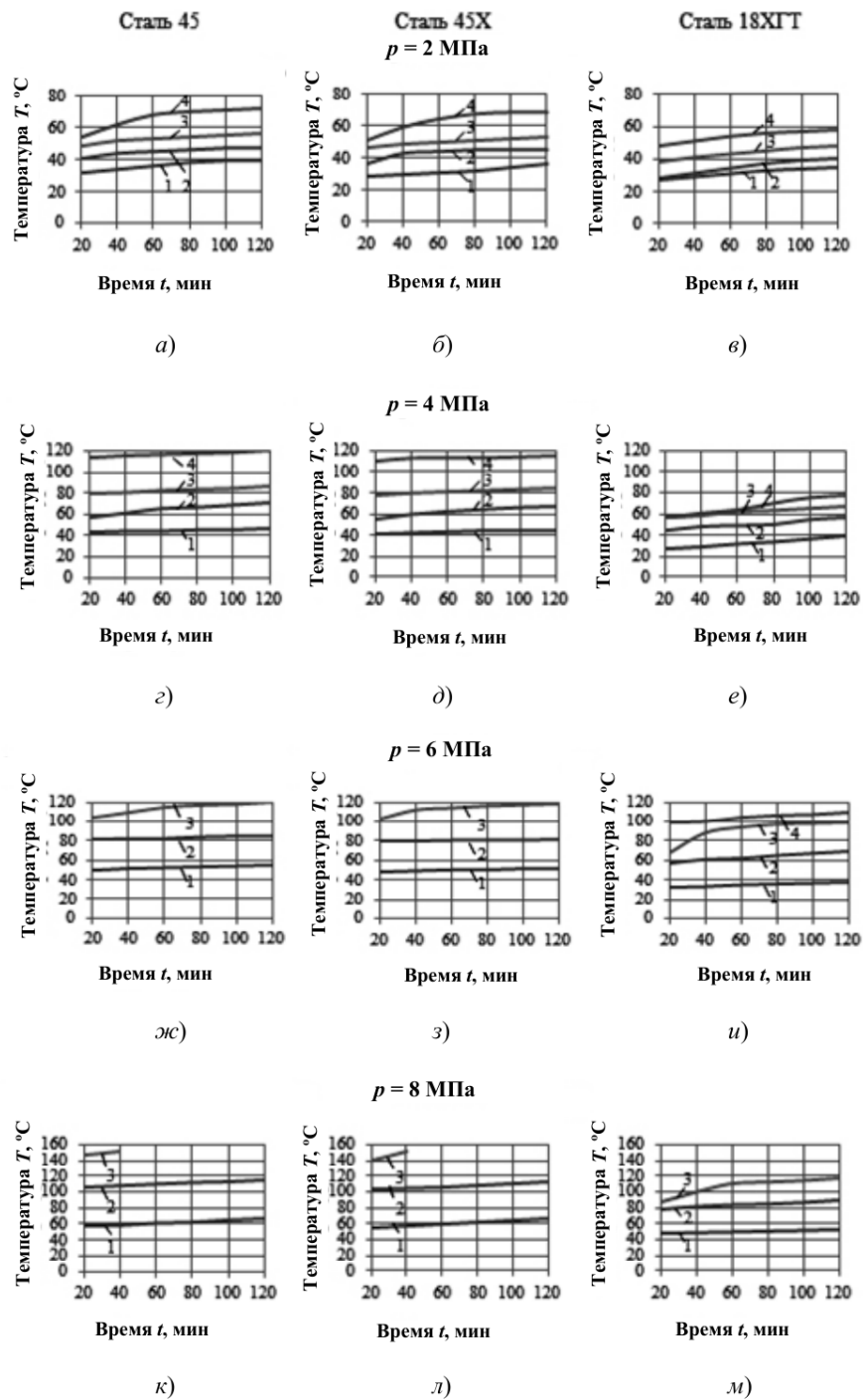


Рис. 3. Зависимость температуры фрикционного разогрева от продолжительности испытаний при различных нагрузках и скоростях скольжения для Сталь 45Х и Сталь 18ХГТ: 1 – $v = 0,25$ м/с; 2 – $v = 0,5$ м/с; 3 – $v = 0,75$ м/с; 4 – $v = 1$ м/с: а, г, ж, к – Сталь 45; б, д, з, л – Сталь 45Х; в, е, и, м – Сталь 18ХГТ

Результаты испытаний показали, что температура в зоне контакта ПСС с втулкой из Стали 18ХГТ имеет меньшие значения по сравнению с втулками из Стали 45 и Стали 45Х. Такая разница, возможно, обусловлена химическим составом и видом химико-термической обработки Стали 18ХГТ, которые повышают ее твердость.

Величина коэффициента трения пары «ролик из Стали 45 – частичный вкладыш» при малой скорости скольжения $v = 0,25$ м/с, давлении $p = 2$ МПа составляет $f = 0,22$ и снижается до $f = 0,12$ с увеличением давления $p = 8$ МПа. В пределах скоростей скольжения $v = 0,25–0,5$ м/с и давлении $p = 8$ МПа с роликами из материала Сталь 45 коэффициент трения $f = 0,12–0,16$ (рис. 4, а, з).

С внутренними кольцами из Стали 45Х при малой скорости скольжения $v = 0,25$ м/с и давлении $p = 2$ МПа коэффициент трения равен $f = 0,21$ и снижается до $f = 0,115$ с увеличением давления $p = 8$ МПа. В пределах скоростей скольжения $v = 0,25–0,5$ м/с и давлении $p = 8$ МПа с роликами из материала Сталь 45Х коэффициент трения $f = 0,115–0,146$ (рис. 4, б, д).

Значение коэффициента трения пары «ролик из Стали 18ХГТ – частичный вкладыш» при скорости скольжения $v = 0,25$ м/с и повышении давления от 2 до 8 МПа варьируется от 0,18 до 0,095. При скоростях скольжения $v = 0,25–0,75$ м/с и давлении $p = 8$ МПа коэффициент пары трения составляет $f = 0,095$ до 0,13 (рис. 4, в, е).

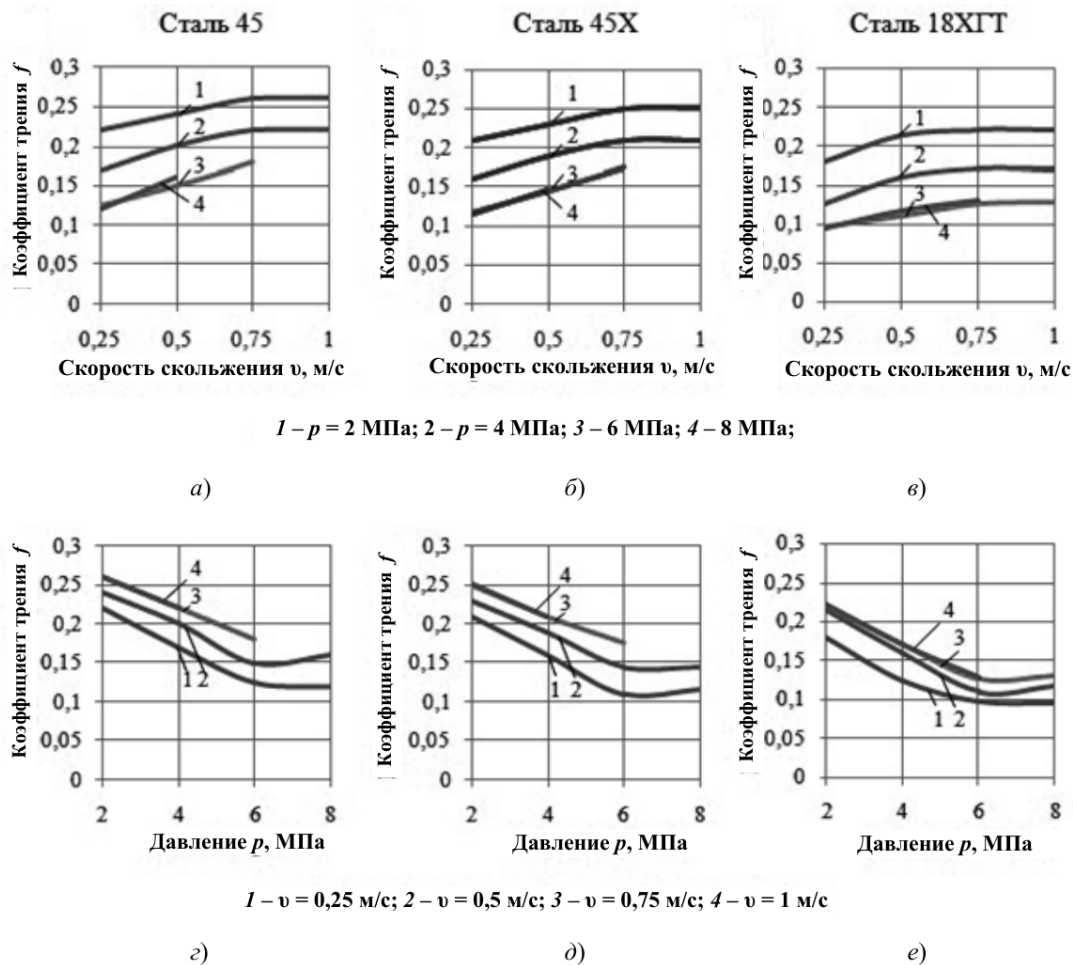


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения и давления для различных сталей: а, з – Сталь 45; б, д – Сталь 45Х; в, е – Сталь 18ХГТ

С увеличением скорости скольжения коэффициент трения с внутренними кольцами из Стали 45, Стали 45Х и Стали 18ХГТ возрастает незначительно, а затем стабилизируется. В то же время при повышении давления p коэффициент трения снижается. Это, возможно, связано с увеличением температуры фрикционного разогрева и интенсификацией выделения смазочного материала из капиллярно-пористой системы древесины.

Проведенные эксперименты показали, что значения коэффициента трения ПСС с внутренними кольцами из Стали 45 варьируются от 0,12 до 0,26, с внутренними кольцами из Стали 45Х – от 0,115 до 0,25, а с внутренними кольцами из Стали 18ХГТ варьируются от 0,095 до 0,22. Возможно, такая разница обусловлена наибольшим содержанием марганца и наличием титана у Стали 18ХГТ, которые повышают предел прочности, твердость, а следовательно, износостойкость, уменьшая коэффициент трения.

С целью проверки точности полученных данных и их последующего анализа количество экспериментов составило $n = 7$, а их повтор производился 3 раза. На основании результатов исследований выполнен статистический анализ данных. Предположение о виде регрессионной зависимости коэффициента трения от скорости скольжения и коэффициента трения от давления подтверждено пакетом STATGRAPHICS Plus 5.0. Полученное уравнение имело вид $y = 0,22757 + 0,0307462 \cdot \log(x)$. Средняя абсолютная ошибка составила 0,0057. Для характеристики качества описания зависимости между двумя случайными величинами произвольным уравнением регрессии использовался коэффициент детерминации, который составил $R^2 = 87\%$. Для проверки значимости оценки коэффициента детерминации применялась статистика, имеющая F -распределение Фишера с ν_1, ν_2 степенями свободы. Значение статистики F , вычисленное по формуле, сравнивалось с критическим значением F_{α, ν_1, ν_2} . Поскольку расчетное значение статистики Фишера оказалось больше критического ($F = 33,46 > 6,608 = F_{0,05;1;5}$), то вычисленный коэффициент детерминации значительно отличается от нуля, и можно утверждать, что между исследуемыми величинами существует зависимость предложенного вида, а полученное уравнение регрессии может использоваться в дальнейших исследованиях.

При изучении топографии поверхностей роликов из Стали 45Х, Стали 18ХГТ были выявлены следующие изменения. До испытаний на поверхности ролика обнаружены отпечатки от режущего инструмента после механической обработки. По окончании триботехнических исследований следы от обработки стальных роликов чуть заметны, а остальная его часть покрыта высокомолекулярными присадками. Их наличие объясняется переносом из композиционного природного материала вследствие повышения температуры в зоне контакта пары трения «ролик – частичный вкладыш» [1]. Таким образом, на поверхности трения происходит сглаживание микровыступов и одновременное формирование граничного слоя смазки (рис. 5).

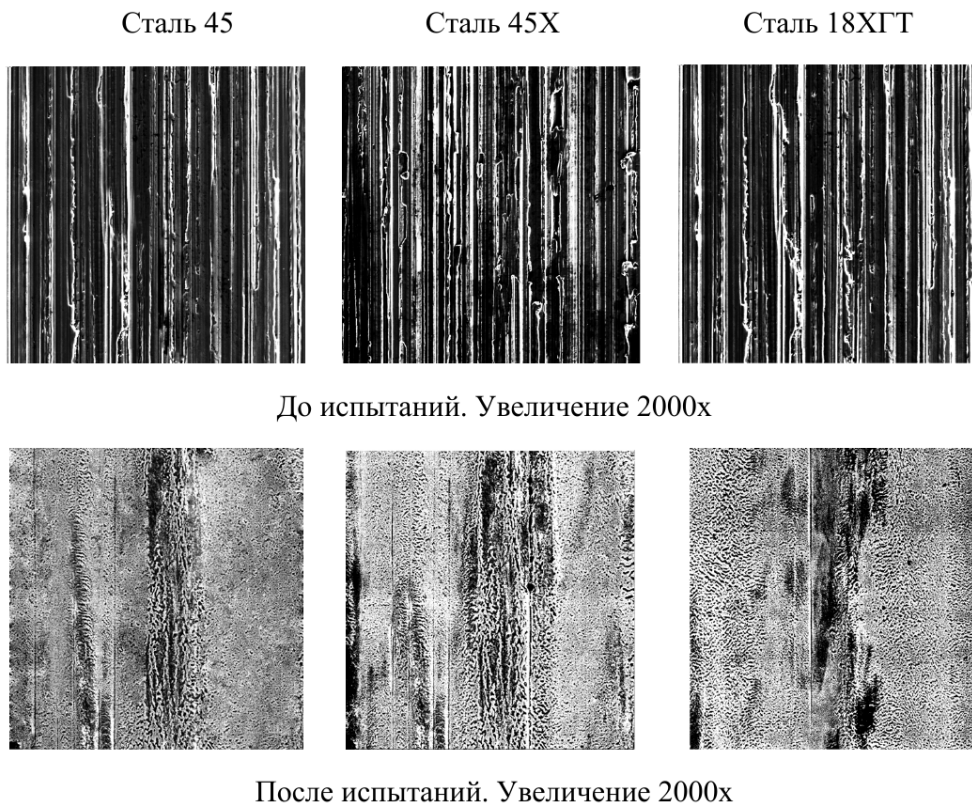


Рис. 5. Топография поверхностей образцов из различных марок сталей

Заключение

Результаты сравнительных испытаний подшипников скольжения самосмазывающихся при $v = 0,25\text{--}0,75$ м/с, $p = 2\text{--}8$ МПа с роликами из Стали 45Х и Стали 18ХГТ позволили установить, что температура в зоне контакта пары трения возрастает с увеличением нагрузки и скорости скольжения, однако с роликами из Стали 18ХГТ температура меньше и составляет $T = 27\text{--}120$ °С, чем с роликами из Стали 45 ($T = 32\text{--}152$ °С), Стали 45Х ($T = 29\text{--}152$ °С). Наименьшие значения температуры фрикционного разогрева для внутренних колец из Стали 18ХГТ, возможно, получились из-за химического состава и вида химико-термической обработки.

При увеличении скорости скольжения коэффициент трения растёт, а с повышением нагрузки снижается. Такие зависимости наблюдаются с внутренними кольцами из Стали 45, Стали 45Х и Стали 18ХГТ, а коэффициент трения находится в пределах $f = 0,12$ до $0,28$, $f = 0,115\text{--}0,25$ и $f = 0,095\text{--}0,22$ соответственно. Небольшие показатели коэффициента трения с внутренними кольцами из Стали 18ХГТ по сравнению с внутренними кольцами из Стали 45, Стали 45Х обусловлены твердостью ее поверхности и износостойкостью материала, которая получается при введении титана.

На основании полученных данных проведена статистическая обработка результатов при помощи пакета STATGRAPHICS Plus 5.0. При проведении регрессионного анализа зависимости коэффициента трения от скорости скольжения и коэффициента трения от давления установлено, что между исследуемыми величинами существует логарифмическая зависимость.

Изучение топографии наружной поверхности колец до и после триботехнических испытаний показало наличие следов механической обработки перед проведени-

ем испытаний и слоя, состоящего из высокомолекулярной присадки на поверхности стальных образцов после триботехнических экспериментов.

Итак, внутренние кольца из Стали 18ХГТ подшипников скольжения самосмазывающихся обладают наилучшими характеристиками по сравнению с внутренними кольцами из Стали 45 и Стали 45Х [2] благодаря содержанию легирующих элементов, повышающих физико-механические и триботехнические свойства сталей. Подшипники скольжения с втулкой торцово-прессового деформирования природного композиционного материала работоспособны при p_v до 2,5–3,5 МПа.

Литература

1. Врублевская, В. И. Износостойкие самосмазывающиеся антифрикционные материалы и узлы трения из них / В. И. Врублевская, А. Б. Невзорова, В. Б. Врублевский. – Гомель : БелГУТ, 2000. – 324 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 // Автомобил. промыш-сть. – 1997. – № 10. – С. 27–28.
4. Врублевская, В. И. Триботехнические характеристики пары трения модифицированная прессованная древесина – металл при работе в абразивной среде / В. И. Врублевская, А. Б. Невзорова, В. В. Макеев // Трение и износ. – 2007. – № 2. – С. 206–210.
5. Гуляев, А. П. Материаловедение / А. П. Гуляев. – М. : Металлургия, 1986. – 544 с.
6. Шишков, М. М. Марочник сталей и сплавов : справочник / М. М. Шишков. – Изд. 3-е, доп. – Донецк : Юго-Восток, 2002. – 456 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.
8. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – Минск : Высш. шк., 1998. – 479 с.
9. Шевченко, Д. Н. Теория вероятностей и математическая статистика / Д. Н. Шевченко. – Гомель : БелГУТ, 2006. – 318 с.
10. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.

Получено 20.10.2016

