

*УДК 621.7*

**П.С. ГУРЧЕНКО, д-р техн. наук,  
Г.А. ТКАЧЕНКО, канд. техн. наук,  
А.А. СОЛОНОВИЧ (БНТУ)**

**ОПЫТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОГО  
УПРОЧНЕНИЯ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКА  
ИЗ УГЛЕРОДИСТОЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ\***

В рамках научно-исследовательской программы на ОАО «Минский подшипниковый завод» совместно с кафедрой «Материаловедение в машиностроении» Белорусского национального технического университета выполняется комплекс исследований, направленных на снижение себестоимости изготовления и термической обработки колец подшипников без ухудшения эксплуатационных свойств готового изделия.

Действующая технология упрочняющей термической обработки для подшипников качения обладает определенными преимуществами и недостатками.

Наиболее распространенными и применяемыми марками стали являются ШХ15, ШХ15СГ. Конструктивные элементы подшипников из данных марок стали подвергаются неполной закалке и низкому отпуску. Данный материал при правильном режиме термического упрочнения обеспечивает высокий комплекс эксплуатационных свойств готовому изделию (износостойкость, контактная выносливость). Однако формирование свойств достигается благодаря твердой и хрупкой микроструктуре – мартенсит. При достижении высоких динамических нагрузок появляется вероятность разрушения кольца подшипника.

Цементуемые стали марок 15Г или 18ХГТ предназначены для изготовления карданных подшипников. Технология термического упрочнения колец и тел качения является энергоемкой и продолжи-

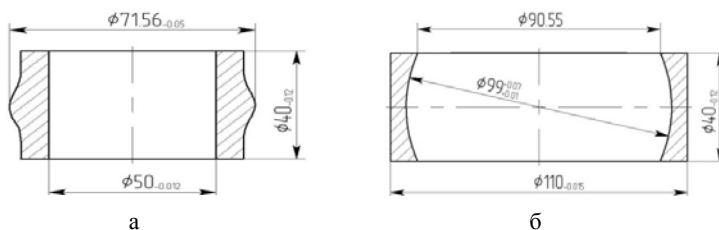
тельной. Цементация длится в течение 200 ч и только после этого проводят закалку и низкий отпуск [1].

Разрабатываемая технология изготовления и термического упрочнения конструктивных элементов подшипника предусматривает устранение перечисленных недостатков применяемых технологий.

Впервые для двухрядных цилиндрических подшипников предложена высокоуглеродистая инструментальная сталь марки У8А. Эта сталь обладает схожими механическими свойствами по сравнению с традиционной подшипниковой сталью марки ШХ15. Твердость и прочность после закалки и отпуска совпадают – 62–65 HRC, прочность – 2200 МПа. Стоимость прутка из У8А в 1,3 раза ниже, чем из стали ШХ15.

Изготовление колец подшипника из углеродистой стали позволило применить термическую обработку, представляющую собой закалку с самоотпуском. Детали, обработанные таким образом, не требуют последующего стационарного низкого отпуска с печным нагревом, продолжительность которого не менее 2–3 ч. Следовательно, исключается одна термическая операция, что снижает себестоимость термообработки.

Минский подшипниковый завод совместно с кафедрой «Материаловедение в машиностроении» в 2011–2012 гг. проводил исследовательские работы по изготовлению и испытанию опытной партии колец подшипников из стали У8А. Экспериментальными образцами служили двухрядные подшипники модели 53610.01 и 53610.02 с наиболее простой формой и сечением (9 мм) (рисунок 1).

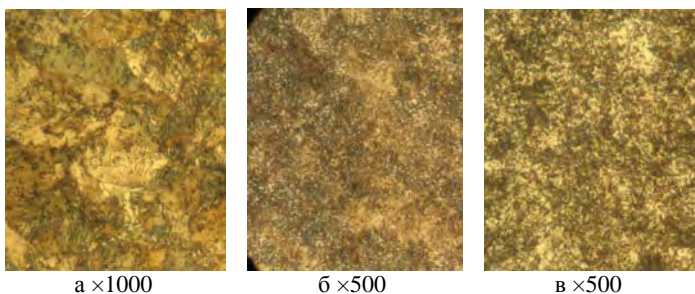


а – внутреннее кольцо; б – внешнее кольцо  
Рисунок 1 – Чертеж колец двухрядного подшипника 53610

Изменения, внесенные в технологический процесс, коснулись полного цикла производства изделия. На начальной стадии изготовления поковок, на автоматизированной кузнечной линии Л-309 был

применен скоростной индукционный нагрев. Это позволило сократить время прогрева поковки до температур 1150–1180 °С (перед обработкой давлением) с 20 до 8 мин на поковку. Использование индукционного нагрева исключило угар металла и образование обезуглероженного слоя в процессе нагрева под ковку.

Часть поковок для предотвращения образования окалины и роста зерна аустенита ускоренно охлаждали водо-воздушной смесью, подаваемой через форсунки, до температур 750–730 °С, а далее на воздухе. По окончании охлаждения микроструктура стали представляла собой пластинчатый перлит 4 баллов (рисунок 2, а). Последующая термическая обработка заключалась в отжиге для получения структуры точечного и мелкозернистого перлита с твердостью НВ 192–230 (рисунок 2, б). Вторая партия поковок послековки подвергалась закалке с температур концаковки 900–850 °С с последующим высоким отпуском (650–670 °С) на сорбитную структуру с твердостью НВ 241–255 (рисунок 2, в).



а  $\times 1000$                       б  $\times 500$                       в  $\times 500$   
а – водо-воздушное охлаждение; б – отжиг на зернистый перлит;  
в – после высокого отпуска

Рисунок 2 – Микроструктуры заготовки кольца подшипника из стали У8А

При последующей механической обработке всех опытных партий колец подшипника 53610.01 и 53610.02, прошедших термическую обработку по указанным режимам, установлено отсутствие проблем по обрабатываемости резанием на всех операциях токарной обработки.

Традиционная технология термической обработки, проводимая послековки, колец подшипника из стали ШХ15 – сфероидизирующий отжиг на мелкозернистый перлит с твердостью НВ 179–207. Продолжительность данной операции составляет не менее 14,5 ч,

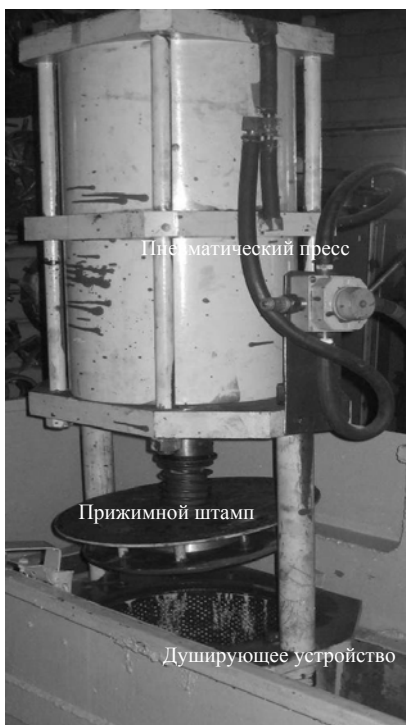
что более чем в 1,5 раза превышает предложенный вариант предварительной термической обработки колец из стали У8А.

Нагрев колец под закалку производили на универсальном закалочном станке от преобразователя частоты ВПЧ 100/8,0 частотой 8 000 Гц и мощностью 100 кВт. В целях обеспечения сквозного равномерного прогрева колец по сечению нагрев проводили при заниженной мощности преобразователя, чтобы температура выровнялась по всему сечению. Электрические параметры индукционного нагрева подбирали таким образом, чтобы время нагрева под закалку до температуры 795–815 °С составляло 0,5–1,5 мин. В процессе индукционного нагрева кольца вращали в индукторе при помощи центра закалочного станка с частотой 1 об/с. Контроль температуры поверхности в процессе индукционного нагрева осуществляли оптическим пирометром «Раутек».

После нагрева до закалочной температуры (800–820 °С) кольца переносили (1–3 с) в специально спроектированное механизированное закалочное устройство (рисунок 3, а). Кольца устанавливались в центрирующую вставку для базирования в прижимном штампе (рисунок 3, б). После опускания штампа охлаждающая жидкость под высоким давлением подавалась на изделие через систему отверстий (душ), обеспечивая равномерное и быстрое охлаждение.

Закалочное охлаждение производили в спрейере с интенсивной подачей воды на внутреннюю и наружную поверхности одновременно в течение 1,5 с. Для обеспечения высокой скорости охлаждения применялся насос производительностью 260 м<sup>3</sup>/ч с рабочим давлением 4 атм.

В целях предотвращения закалочных трещин производили самоотпуск путем неполного охлаждения изделия. Время закалочного охлаждения (1,5±0,1 с) подобрано экспериментально с таким расчетом, чтобы обеспечить в дальнейшем самоотпуск 140–180 °С. При меньшей длительности охлаждения твердость после закалки снижалась на 3–5 и более единиц HRC. При большей длительности закалочного охлаждения (2 с и более) кольца охлаждались до температуры закалочной воды, самоотпуск не происходил, твердость поверхности составляла 66–67 HRC, но при этом на кольцах образовывались закалочные трещины, располагающиеся вдоль, перпендикулярно и под произвольным углом относительно оси [2].



а



б

а – закалочное устройство; б – центрирующая вставка

Рисунок 3 – Закалочное механизированное устройство

В процессе подбора режимов термической обработки было изучено структурообразование, изменение механических свойств инструментальной стали У8А при объемно-поверхностной закалке с индукционным нагревом [3].

На рисунке 4 представлен разрез кольца и указаны зоны 1–7, в которых проводили исследование структур и определение микротвердости. Выбор данных участков обусловлен тем, что в двухрядном роликовом подшипнике рабочая нагрузка в процессе эксплуатации распределяется по поверхности кольца равномерно, а условия охлаждения кольца могут быть не одинаковыми для торцов и сердцевин.

В соответствии с эксплуатационными нагрузками к участкам 1, 4 и 5 особых требований по микроструктуре можно не предъявлять. Наружная поверхность кольца в зонах 1 и 5, а также внутренняя в зоне 4 контактных нагрузок не испытывают.

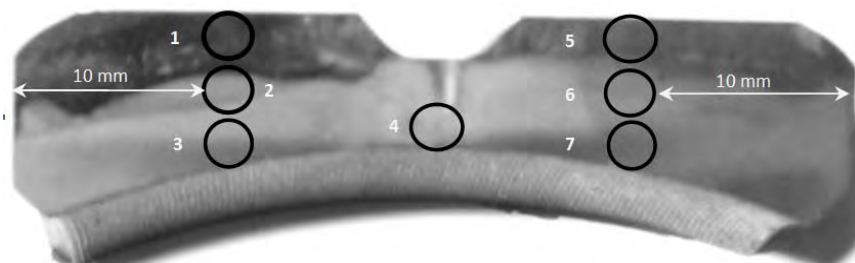


Рисунок 4 – Схема расположения исследуемых участков в сечении наружного кольца подшипника из стали У8А после объемно-поверхностной закалки

Достаточно, чтобы они имели достаточно высокую твердость и прочность, препятствующую механическим деформациям. Наиболее высокие требования по структуре должны быть предъявлены к беговым дорожкам качения роликов на кольцах подшипника.

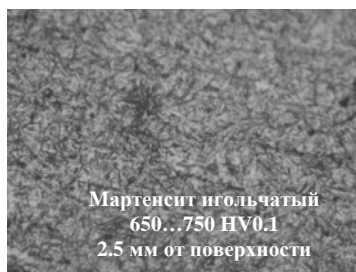
Выбранная схема объемно-поверхностной закалки обеспечивает достижение дифференцированного распределения твердости и структуры по сечению колец подшипников. Микроструктура в различных зонах наружного кольца подшипника после объемно-поверхностной закалки показана на рисунке 5. На наружной поверхности кольца, нагреваемой перед закалкой до более высоких температур, сформирована структура крупноиглочатого мартенсита (рисунок 5, а и б) с твердостью 60–63 HRC. По мере удаления от внешнего диаметра кольца твердость увеличивается за счет уменьшения размера иголок мартенсита и увеличения степени его тетрагональности. Наибольшая твердость – 66–68 HRC – достигнута на поверхности беговой дорожки за счет сформированной структуры скрытоиглочатого мартенсита (рисунок 5, в). Толщина закаленного слоя с такой микроструктурой составила 2,5 мм.

На расстоянии 20 мм от обоих торцов кольца и в центре внутренней сферической поверхности зоны подшипника между беговы-

ми дорожками микроструктура представляет собой смесь троостита закалки и мартенсита скрытоигольчатого (рисунок 5, г). На данном участке 4 твердость составляет 58–60 HRC, что ниже, чем на поверхности беговых дорожек. Это обусловлено большим количеством троостита закалки – более 60 %. Снижение твердости на этом участке может быть объяснено более низкой скоростью закалочного охлаждения.



а



б



в



г

а – мартенсит на поверхности в зонах 1 и 5; б – на расстоянии 2,5 мм от поверхности;  
в – троостит и мартенсит в зоне 4; г – поверхность дорожек качения

Рисунок 5 – Микроструктура наружного кольца подшипника из стали У8А после объемно-поверхностной закалки с индукционного нагрева (×500)

Твердость – характеристика, определяющая не только износостойкость, но и конструкционную прочность элементов подшипника. Поэтому необходимо было установить распределение механических свойств (микротвердость) по сечению колец. Измерения проводили от поверхности беговой дорожки до внешней кромки

кольца, в сечении дорожки 1, проходящей через зоны 1–3 и в сечении дорожки 2, проходящей через зоны 5–7.

На графике распределения твердости (рисунок 6) видно, что различия в механических свойствах дорожек 1 и 2 практически нет. Это свидетельствует об идентичности условий нагрева и закалочного охлаждения для обеих дорожек. Твердость от максимального значения 1050–1100 HV0.1 плавно снижается до 650–700 HV0.1. Снижение твердости по сечению кольца обусловлено уменьшением скорости охлаждения и прокаливаемостью углеродистой стали. Максимальный теплоотвод наблюдается только с поверхности, где скорость охлаждения максимальна (более 650 °C/c). Глубже по сечению скорость закалочного охлаждения снижается (450 °C/c), но остается выше критической скорости закалки. Наивысшая твердость фиксируется в приповерхностном слое беговых дорожек, где сформирована структура мартенсита скрытоигольчатого, что свидетельствует об оптимальной температуре нагрева под закалку и достаточно интенсивном теплоотводе. Минимальная твердость 650–700 HV0.1 на наружной поверхности кольца и структура игольчатого мартенсита указывают на завышенную температуру нагрева под закалку этих участков.

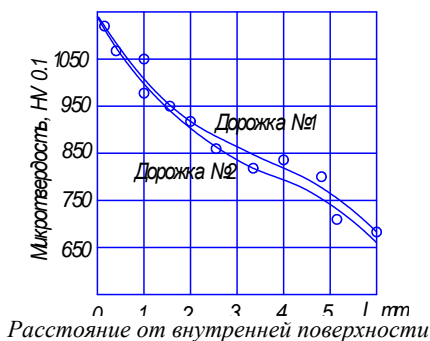


Рисунок 6 – Микротвердость по сечению двух дорожек внешнего кольца подшипника из стали У8А после объемно-поверхностной закалки

Распределение твердости по контуру внутренней поверхности наружного кольца вдоль оси от одного торца к другому определяли



на удалении 1 мм от поверхности по схеме, представленной на рисунке 7.

Полученные результаты (рисунок 8) свидетельствуют о дифференцированном распределении микроструктур и твердости по контуру беговой дорожки внешнего кольца подшипника. Максимальная твердость дорожки соответствует точке контакта роликов с кольцом. Низкая твердость по торцам обусловлена меньшей скоростью охлаждения. Невысокая твердость в центре кольца между беговыми дорожками связана с заниженной температурой нагрева под закалку в этой зоне и неомогенностью по углероду перед закалкой. Этой особенностью и объясняется снижение твердости до 680 HV0.1 в центре.



Рисунок 7 – Схема измерения твердости по контуру внутренней поверхности наружного кольца подшипника из стали У8А после объемно-поверхностной закалки

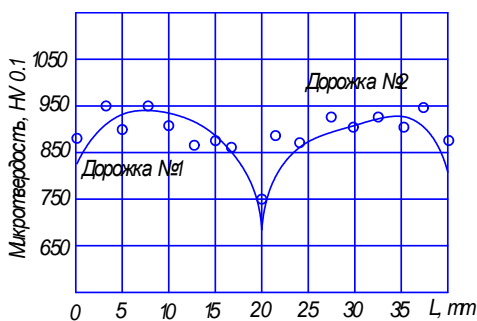


Рисунок 8 – Распределение микротвердости на расстоянии 1 мм от поверхности по контуру внутренней поверхности наружного кольца подшипника из стали У8А после объемно-поверхностной закалки

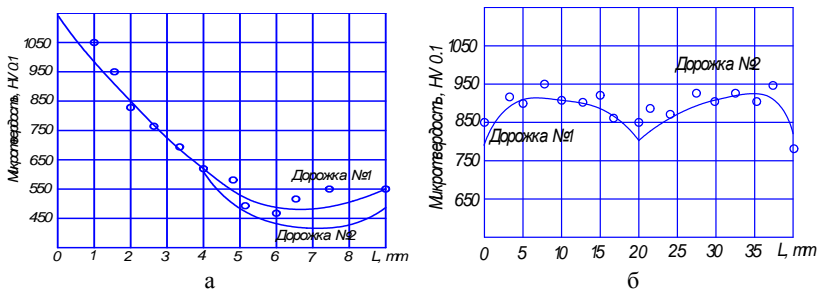
Исследования внутренних колец подшипника проводили по аналогичной методике.

В соответствии с эксплуатационными нагрузками, наивысшим требованиям по микроструктуре кольца должна отвечать поверхность дорожек качения, где предпочтительнее обеспечить структуру скрытоигольчатого мартенсита. Структура троостомартенсита в сердцевине может способствовать снижению вероятности хрупкого разрушения колец, а к внешней кромке, не испытывающей больших циклических контактных нагрузок, особых требований не предъявляется.

Исследованиями установлено, что в результате объемно-поверхностной закалки в сечении внутреннего кольца, изготовленного из стали У8А, сформирована дифференцированная микроструктура. По мере продвижения от наружного диаметра к поверхности беговых дорожек изменяется микроструктура и увеличивается твердость материала. В приповерхностном слое внутренней поверхности кольца сформирована троостосорбитовая структура с твердостью 500 HV0.1. В центре сечения, на глубине 4,5 мм от поверхности, преобладает троостомартенсит скрытоигольчатый с твердостью 63 HRC. На расстоянии 6 мм от наружной поверхности структура представляет собой троостомартенсит с твердостью 820 HV0.1. На беговой дорожке, где температура нагрева под закалку была оптимальной, а скорость закалочного охлаждения максимальной, сформирована структура скрытоигольчатого мартенсита с твердостью 66–68 HRC.

Более мягкие и вязкие структуры в центре кольца подшипника, предполагается, должны препятствовать в процессе эксплуатации хрупким разрушениям. Такого распределения микроструктур удалось достигнуть благодаря специальной конструкции закалочного устройства и низкой прокаливаемости стали.

Измерения твердости по сечению внутреннего кольца выполняли через каждые 0,5 мм от наружной до внутренней поверхности. Плавное и равномерное изменение твердости на обеих дорожках указывает на одинаковое охлаждение в процессе закалки и самоотпуска (рисунок 9, а).



а – твердость по сечению; б – твердость по контуру  
Рисунок 9 – Распределение механических свойств

Распределение твердости по контуру рабочей поверхности внутреннего кольца подшипника определяли по схеме (рисунок 10).



Рисунок 10 – Схема измерения твердости по контуру рабочей поверхности внутреннего кольца подшипника из стали У8А после объемно-поверхностной закалки

Характер дифференцированного распределения твердости по контуру дорожек представляет собой плавные переходы от торцов к сердцевине и снижение в центре кольца (рисунок 9, б). С торцов твердость ниже, что может быть объяснено меньшей интенсивностью закалочного охлаждения торцевой поверхности. На возвышенности внутреннего кольца твердость также падает, что может быть объяснено меньшей интенсивностью закалочного охлаждения при завышенной температуре нагрева под закалку, о чем свидетельствует появление в микроструктуре троостита закалки в сочетании с игольчатым мартенситом.

**Выводы.** Преимущества замены стандартной шарикоподшипниковой стали марки ШХ15 на углеродистую инструментальную У8А следующие: снижение себестоимости изготовления подшипника за счет меньшей стоимости материала, использование объемно-поверхностной закалки с индукционным нагревом, изменение режимовковки.

Применение углеродистой стали и индукционного нагрева позволяет на всех стадиях изготовления и термической обработки заменить печной нагрев в защитной или окислительной атмосфере на нагрев токами высокой частоты. Использование ТВЧ под операцииковки и штамповки исключает угар материала и образование обезуглероженного слоя. Продолжительность прогрева до температуры (1150–1180 °С)ковки сократилась с 20 до 8 мин на заготовку.

Снижение расхода топливно-энергетических ресурсов, времени и трудоемкости при изготовлении деталей машин достигается за счет закалки от температуры окончанияковки и высокого отпуска поковки. Себестоимость продукции снижается не только за счет стоимости стали, но и за счет уменьшения затрат на упрочняющую термообработку.

После объемно-поверхностной закалки с самоотпуском на поверхности колец подшипника сформирована структура скрытоигольчатого мартенсита (твердостью 68 HRC), в сердцевине стали – троостосорбитная структура (твердостью 55–60 HRC). Дифференцированное распределение структур и твердости обеспечивает высокую износостойкость поверхности и исключает продавливание закаленного слоя дорожки качения.

## Литература

1. Башнин, Ю.А. Технология термической обработки стали / Ю.А. Башнин. – М.: Металлургия, 1986. – 424 с.

2. Гуринович, В.А. Регулируемое охлаждение заготовок в процессе горячего формообразования деталей автомобиля / В.А. Гуринович, П.С. Гурченко, А.И. Михлюк. – Автомобильная промышленность. – 2007. – № 4. – С. 27–29.

3. Гурченко, П.С. Применение углеродистой стали У8А и объемно-поверхностной закалки при индукционном нагреве для изготовления колец подшипников / П.С. Гурченко, Г.А. Ткаченко,

УДК 539.12.043

**Ф.Ф. КОМАРОВ**, д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. НАНБ  
(НИИПФП БГУ),  
**В.А. КУКАРЕКО**, д-р техн. наук (ОИМ НАНБ),  
**С.В. КОНСТАНТИНОВ**,  
**В.В. ПИЛЬКО**, канд. физ.-мат. наук (НИИПФП БГУ)

### **ВЛИЯНИЕ АЛЮМИНИЯ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ TiN\***

**Введение.** В настоящее время актуальной задачей является создание наноструктурированных сверхпрочных покрытий. В ряде работ по этой тематике было показано, что наиболее перспективной является модификация известного покрытия TiN путем его наноструктурирования и добавки к нему 3-го компонента, такого как Al, Si, Cr [1, 2]. Однако до сих пор остается невыясненным конкретное влияние добавок 3-го элемента (тип, концентрация, способ осаждения, тип подложки) на трибомеханические свойства покрытия [3, 4]. Целью данной работы является исследование влияния состава распыляемой мишени с добавкой алюминия, режимов осаждения покрытий, типа подложки на эксплуатационные характеристики, такие как твердость и износостойкость, а также влияния режимов нанесения и типа подложки на механизм разрушения покрытий.

**Методы нанесения покрытий и исследования полученных структур.** Исследования проводили на образцах покрытий TiN, TiAlN, нанесенных методом магнетронного распыления на подложки из различных материалов. В качестве подложек использовали цилиндрические заготовки (диаметром 15 мм, толщиной 4 мм), изготовленные из проката стали 12X18H10T, армко-железа и твердого сплава T15K6. Некоторые подложки из армко-железа и стали 12X18H10T были предварительно подвергнуты нитроцементации