



УДК 621.74

Поступила 08.12.2014

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ И ШЕСТЕРЕН С УПРОЧНЕНИЕМ УПРАВЛЯЕМОЙ ОБЪЕМНО-ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКОЙ С ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

PROSPECTS OF APPLICATION CARBON STEEL FOR BEARINGS AND GEAR WHEELS WITH OPERATED SURFACE HARDENING FROM INDUCTION HEATING

*П. С. ГУРЧЕНКО, Белорусский национальный технический университет,
А. А. СОЛОНОВИЧ, ОАО «Минский завод шестерен», г. Минск, Беларусь*

*P. GURCHENKO, Belarusian National Technical University, A. SOLONOVICH,
JSC Minsk Plant of Gear Wheels, Minsk, Belarus*

Приведен опыт Минского автомобильного и подшипникового заводов по изготовлению, исследованию и испытанию опытных партий шестерен ведущего моста автомобилей МАЗ и подшипников МЗШ из стали У8А с упрочнением их объемно-поверхностной закалкой с применением индукционного нагрева и управляемого дозированного закалочного охлаждения. Рассмотрен опыт Минского автомобильного завода по внедрению в производство шестерен колесной передачи автомобилей МАЗ из стали 60ПП.

Experience of the Minsk automobile plant and bearing plant in production, research and test of pilot batches of gear wheels of the drive axle of MAZ trucks and MZSh bearings from U8A steel with hardening by their volume and superficial hardening with application of induction heating and the operated surface hardening cooling is given. Experience of the Minsk automobile plant on introduction in manufacturing application of wheel gears of wheel gearing of MAZ trucks from steel 60PP is considered.

Ключевые слова. Подшипники, шестерни, индукционный нагрев, объемно-поверхностная закалка, дифференцированное распределение твердости, сравнительные испытания, снижение стоимости изготовления.

Keywords. Bearings, wheel gears, induction heating, volume and surface hardening, the differentiated distribution of hardness, comparative tests, reduction of cost in production.

В настоящее время в СНГ применяемые для изготовления подшипников стали (ШХ15, ШХ15СГ) являются конструкционными специального назначения [1–5]. Для изготовления крупногабаритных подшипников используют также цементуемые стали 20ХН3А и 20Х2Н4А с упрочнением их методом цементации на глубину 1,8–2,5 мм с последующей закалкой и низким отпускком. На ведущих зарубежных предприятиях-производителях подшипников SKF (Швеция) и Bosh (Германия) подшипники изготавливают из подобных сталей SKF-24, SKF-27 (Швеция) и 100Cr6, 100Cr MnSi6–4 (Германия) близкого химического состава, содержащих от 0,8 до 1,5% углерода, от 0,8 до 1,8% хрома и от 0,21 до 1,2% марганца.

Для подшипников, упрочняемых объемно-поверхностной закалкой с применением индукционного нагрева, рекомендована сталь регламентированной прокаливаемости ШХ4РП (ГОСТ 801-78). Химический состав традиционно используемых для изготовления подшипников сталей в СНГ приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав сталей, используемых в СНГ для изготовления подшипников, %

Марка стали, стандарт	Производитель	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Cu
ШХ15, ГОСТ 801-78	СНГ	1,95–1,05	0,17–0,37	0,20–0,40	1,35–1,65	≤0,30	≤0,027	≤0,020	≤0,25
20Х2Н4А, ГОСТ 4543-71	СНГ	0,15–0,22	0,17–0,37	0,3–0,6	0,25–1,75	3,5–3,75	≤0,025	≤0,020	≤0,30
ШХ4РП, ГОСТ 801-78	СНГ	0,95–1,05	0,15–0,30	0,15–0,30	0,35–0,5	≤0,3	≤0,027	≤0,02	≤0,25

Высокое содержание углерода и хрома в шарикоподшипниковых сталях обуславливает их высокую твердость (60–63 HRC) и прочность после закалки в масло с печного нагрева и стойкость против истирания.

Твердость внутренних слоев деталей подшипников зависит от глубины прокаливаемости стали, которая в свою очередь зависит от содержания хрома, который замедляет превращение аустенита в перлит и, тем самым, увеличивает прокаливаемость стали, поэтому, чем крупнее детали подшипников, тем с большим содержанием хрома (0,4–1,65%) применяется сталь для их изготовления. Кроме того, высокая твердость карбидов хрома повышает износостойкость стали. Хром также увеличивает устойчивость мартенсита против отпуска, уменьшает склонность стали к перегреву и придает ей мелкозернистую структуру. Но при высоком содержании хрома (>1,65%) трудно получить однородную структуру, поэтому содержание хрома в шарикоподшипниковых сталях обычно не превышает 1,65%.

Марганец, как и хром, увеличивает твердость и сопротивляемость стали истиранию. Но одновременно он способствует росту зерна при нагреве, в результате чего при термической обработке с печного нагрева может образовываться крупнозернистая структура перегретой стали. Содержание марганца в стали ШХ15 предусмотрено 0,20–0,40%, а для стали ШХ15СГ – 0,9–1,2%. Для подшипниковых сталей производства Швеции – от 0,3 до 0,8%, Германии – от 0,21 до 1,2%.

Отрицательное влияние на вязкость шарикоподшипниковой стали оказывает кремний. Но марганец и кремний являются раскислителями, и чем выше их содержание, тем полнее раскислена сталь, поэтому присутствие этих элементов в шарикоподшипниковой стали всех марок желательно не более 0,35%Si и 0,4%Mn. Исключение составляют стали для изготовления деталей крупных подшипников типа ШХ15СГ. Повышенное содержание марганца и кремния в этой стали объясняется тем, что эти элементы уменьшают критическую скорость закалки, снижая, тем самым, склонность стали к короблению и трещинообразованию при закалке.

Вредными примесями для шарикоподшипниковой стали являются фосфор, медь и никель. Фосфор увеличивает склонность стали к образованию крупнозернистой структуры при нагреве, повышает хрупкость и уменьшает прочность на изгиб, что в свою очередь увеличивает чувствительность стали к динамическим нагрузкам и склонность изделий к появлению закалочных трещин. В связи с этим содержание фосфора в металле ограничивают (в СНГ не более 0,027%, в Германии не более 0,35%).

Медь, хотя и увеличивает твердость, предел прочности и прокаливаемость стали, является нежелательной примесью, так как с повышением содержания меди при горячей механической обработке увеличивается образование поверхностных трещин и надрывов. Содержание никеля ограничивают в связи с тем, что его присутствие снижает твердость стали.

Сопротивляемость стали выкрашиванию уменьшают примеси таких цветных металлов, как олово, свинец, мышьяк. Отрицательное воздействие на свойства стали оказывают также газы: кислород образует неметаллические включения, водород увеличивает пораженность флокенами, а азот снижает сопротивляемость выкрашиванию.

Влияние серы на свойства шарикоподшипниковой стали не однозначно. Отрицательное влияние сказывается в снижении устойчивости против истирания и усталостном разрушении при выходе на рабочую поверхность сульфидов. Однако образование сульфидной оболочки вокруг сульфидных включений при достаточном содержании серы уменьшает влияние этих включений на концентрацию напряжений и вследствие этого повышает сопротивление усталости. С увеличением отношения концентраций S/O до 3–5 стойкость подшипников возрастает. Этому способствует и улучшение качества поверхности вследствие того, что сера улучшает обрабатываемость стали. Содержание серы в подшипниковых сталях ограничивают значением не более 0,20%.

В подшипниковых сталях, полученных по обычной технологии, содержится около 0,005% O₂, 0,01–0,02% N₂, 0,0001–0,0005% H₂. Кислород находится в виде оксидов и его количество зависит от технологии раскисления. При вакуумировании содержание кислорода уменьшается до 0,002%, а при ВДП – до 0,001%. Водород отрицательно влияет на качество стали ввиду того, что снижение растворимости его при снижении температуры металла вызывает повышенные локальные давления в металле, приводящие к образованию флокенов. При исследовании подшипниковых сталей отечественных и зарубежных фирм было установлено отрицательное влияние повышенных содержаний азота и суммы азота и кислорода на долговечность подшипников.

К подшипниковым сталям предъявляются особые требования по наличию дефектов, неметаллических включений и карбидной неоднородности. Микропористость может приводить к образованию пит-

тинга и снижению долговечности подшипника. Неметаллические включения в подшипниковых сталях являются концентраторами напряжений и могут являться причиной появления микротрещин. В общем случае стараются, чтобы неметаллические включения имели глобулярную форму. Наиболее пагубное воздействие на качество подшипников оказывают включения оксидов и нитридов алюминия. В настоящее время наиболее полно удовлетворяют требованиям по содержанию вредных включений стали, произведенные методами ЭШП и ВДП.

Имеется целый ряд технических условий, содержащих дополнительные требования к качеству полуфабрикатов из подшипниковых марок стали. Требования, предъявляемые к состоянию поверхности прутков, труб, проволоки подшипниковой стали, предусматривают отсутствие грубых дефектов типа нарушения сплошности или ограничивающие допустимость менее опасных дефектов незначительной глубины. На поверхности прутков не допускаются раскоченные и раскатанные загрязнения, пузыри, трещины, корочки, закаты, плены и другие дефекты, возникающие при переделе слитка или промежуточной заготовки.

Несмотря на тщательный контроль на металлургических предприятиях, брак по этим дефектам составляет наибольший процент от общего количества стали, рекламируемой подшипниковыми заводами. Не обнаруженные при контроле в прутках и трубах поверхностные дефекты раскрываются в процессе дальнейшей механической обработки, пластической деформации, термической обработки или в процессе эксплуатации подшипников.

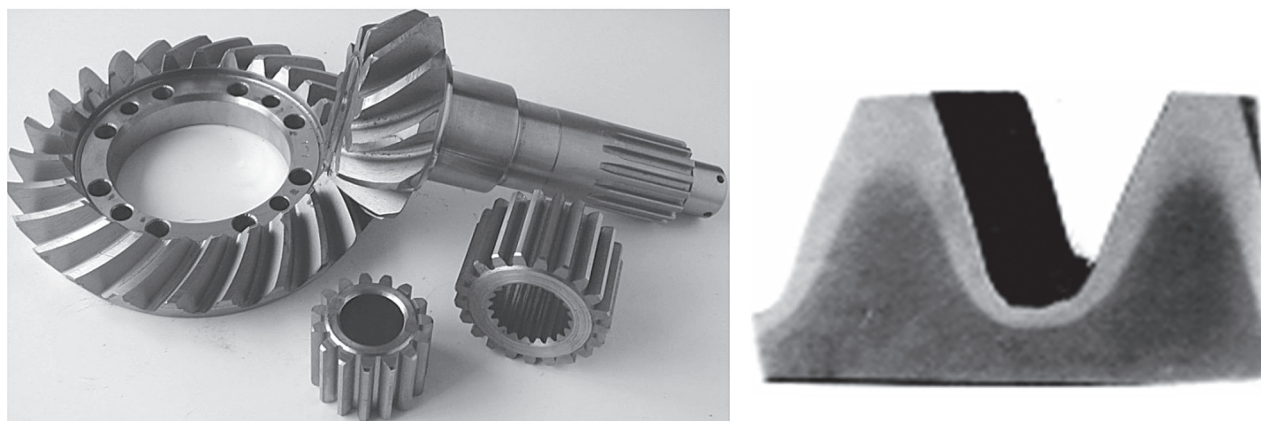
Распространенным дефектом подшипниковых марок стали является карбидная неоднородность в виде карбидной сетки по границам зерен. Исследованиями, выполненными на БМЗ, установлено, что карбидная неоднородность растет с увеличением концентрации углерода и хрома в стали. С увеличением содержания углерода от 0,94 до 1,04% при прочих равных условиях балл карбидной неоднородности увеличивается с 2 до 3, а с увеличением содержания хрома от 1,3 до 1,5% балл карбидной сетки также увеличивается с 2 до 3. Если выполнить экстраполяцию кривых влияния на карбидную неоднородность в сторону уменьшения содержания углерода и хрома, то можно увидеть, что с уменьшением содержания углерода до 0,75–0,85% и хрома до 0,3% карбидная неоднородность исчезнет до нулевого значения.

Исследования, выполненные на ОАО «МАЗ» по изготовлению шестерен автомобилей МАЗ из сталей 60ПП и У8А с упрочнением объемно-поверхностной закалкой [6–8] с применением индукционного нагрева ТВЧ, а также на ОАО «МПЗ» по изготовлению колец подшипников из стали У8А с упрочнением объемно-поверхностной закалкой с применением индукционного нагрева ТВЧ, показали, что регулируемые режимы индукционного нагрева под закалку и жестко дозированное по времени закалочное охлаждение интенсивным водяным душем позволяют получить на закаливаемых изделиях твердость поверхности 63–68 HRC, что обеспечивает высокую контактную прочность и износостойкость. При этом твердость в сердцевине зубьев шестерен на расстоянии 4–7 мм от поверхности составляет 43–48 HRC, благодаря чему резко снижается склонность к хрупкому разрушению.

Изготовление ведущих шестерен и сателлитов колесной передачи автомобилей МАЗ всех модификаций из стали 60ПП с последующим упрочнением объемно-поверхностной закалкой успешно используется на Минском автомобильном заводе с 2005 г. Опробовано изготовление шестерен главной передачи ведущего моста из стали У8А. Шестерни успешно прошли эксплуатационные испытания в условиях песчано-соляного карьера в течение 8 лет при пробеге более 600 тыс. км. Шестерни автомобиля МАЗ, изготовленные из сталей У8А и 60ПП и подвергаемые объемно-поверхностному упрочнению с индукционного нагрева, показаны на рис. 1, а. На рис. 1, б показано расположение зоны закалки в сечении зуба ведомой шестерни главной передачи ведущего моста автомобиля МАЗ 5551 из стали У8У после объемно-поверхностной закалки с индукционного нагрева.

Стеновыми и дорожными испытаниями, выполненными на ОАО «МАЗ», установлено, что шестерни главной и колесной передач ведущего моста автомобилей МАЗ, изготовленные из сталей 60ПП и У8А и упрочненные управляемой объемно-поверхностной закалкой с индукционного нагрева, по своей прочности и износостойкости превосходят аналогичные, изготовленные из стали 20ХН3А и упрочненные цементацией на глубину 1,2–1,5 мм с последующей закалкой и низким отпускком.

При этом стоимость стали для изготовления шестерен снижена в 2,5 раза, а затраты энергоносителей для упрочнения – в 11,5 раз. В сотни раз снижается стоимость применяемых технологических материалов и оборудования для упрочнения. Цикл упрочнения сокращается с 28 ч (ХТО) до 5 мин (ТВЧ).



а

б

Рис. 1. Шестерни главной передачи ведущего моста автомобиля МАЗ-5551 (вверху слева – ведомая, вверху справа – ведущая) и колесной передачи (слева внизу), подвергаемые объемно-поверхностному упрочнению с индукционного нагрева (а), и расположение закаленного слоя в сечении зуба ведомой шестерни главной передачи из стали У8А и после объемно-поверхностной закалки с индукционного нагрева (б)

С 2011 г. на Минском подшипниковом заводе совместно с ОИМ НАН Беларуси, кафедрой «Материаловедение в машиностроении» БНТУ и Минским заводом шестерен выполняются исследовательские и экспериментальные работы по определению возможности и целесообразности изготовления колец подшипников из дешевых углеродистых сталей.

Химический состав сталей, применяемых для изготовления шестерен на ОАО «МАЗ» и колец подшипников на ОАО «МПЗ», приведен в табл. 2.

Таблица 2. Химический состав сталей, применяемых для изготовления шестерен на ОАО «МАЗ» и колец подшипников на ОАО «МПЗ», %

Марка стали, стандарт	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Cu
60ПП, ГОСТ 1050-88	0,57–0,65	0,10–0,30	≤0,20	≤0,15	≤0,15	0,0057	0,0134	≤0,25
80ПП, ГОСТ 1050-88	0,75–0,84	0,10–0,30	≤0,20	≤0,15	≤0,15	0,004	0,011	≤0,25
У8А, ГОСТ 1435-99	0,75–0,84	0,17–0,33	0,17–0,28	≤0,12	≤0,12	≤0,025	≤0,02	0,25

Разработано и отлажены экспериментальное устройство и экспериментальная технология объемно-поверхностной закалки с индукционного нагрева колец подшипников из стали У8А. Изготовлена, упрочнена и исследована опытная партия колец подшипников 53610.01 и 53610.02 в количестве 180 комплектов. С сентября 2013 г. по декабрь 2014 г. на Минском подшипниковом заводе производили стендовые испытания подшипников 53610.01 и 53610.02, кольца которых изготовлены из стали У8А и упрочнены объемно-поверхностной закалкой с индукционного нагрева. Регулируемые режимы закалки позволили обеспечить дифференцированное распределение твердости по поверхности и сечению колец подшипника с достижением твердости 62–68 HRC на дорожках качения и 40–60 HRC в сердцевине сечения. Испытания проводили в отделе главного конструктора Минского подшипникового завода на стенде ВНИПП-543 с одновременной установкой на стенд четырех опытных и серийных подшипников. Результаты испытаний показывают, что после испытаний в течение более 2500 ч при осевой нагрузке 29810 Н и скорости вращения 1720 об/мин подшипники 53610НР находятся в работоспособном состоянии, что более чем в 3 раза превышает расчетный ресурс долговечности для аналогичных испытаний. В настоящее время стендовые испытания подшипников 53610.01 и 53610.02 из стали У8А продолжаются с целью установления истинного ресурса их работы.

На рис. 2 показан общий вид двухрядного роликового подшипника качения Минского подшипникового завода, на рис. 3 – распределение

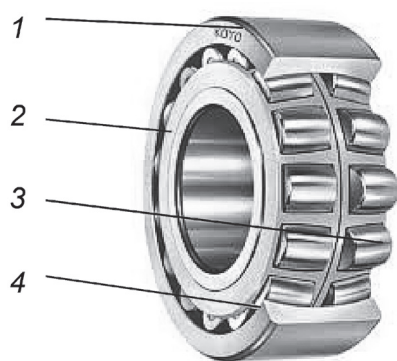


Рис. 2. Внешний вид двухрядного роликового подшипника качения Минского подшипникового завода: 1 – внешнее кольцо; 2 – внутреннее кольцо; 3 – сепаратор; 4 – тела качения

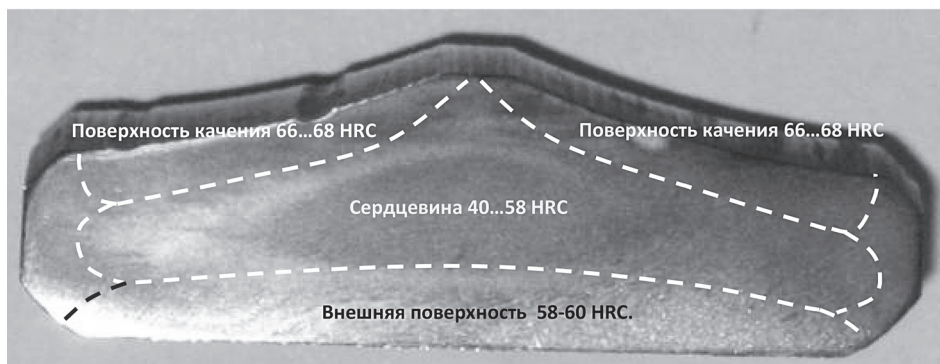


Рис. 3. Сечение внутреннего кольца подшипника с дифференцированным распределением твердости

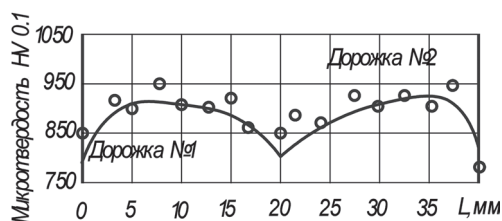


Рис. 4. Распределение микротвердости по ширине контура поверхности качения кольца подшипника из стали У8А после объемно-поверхностной закалки

микротвердости по сечению колец подшипника, достигнутой в результате дифференцированного закалочного охлаждения колец из углеродистой стали У8А, на рис. 4 – дифференцированное распределение твердости по поверхности дорожек качения колец подшипника.

В результате дифференцированного закалочного охлаждения на поверхностях качения наружного и внутреннего колец подшипника сформирована структура мартенсита скрытоигольчатого твердостью 66–68 HRC. Глубина закаленного слоя с такой микроструктурой составила 2,5 мм. По мере удаления от поверхности качения колец к сердцевине твердость плавно уменьшается и в сердцевине составляет 40–58 HRC. На торцах твердость составляет 58–61 HRC. Снижение твердости на этих участках достигнуто меньшей скоростью закалочного охлаждения.

Твердость в центральной части поверхности колец (рис. 3, 4) ниже, чем на дорожках качения, что достигнуто регулированием закалочного охлаждения. Дифференцированное распределение твердости по контуру и сечению колец подшипников обеспечивает высокую износостойкость поверхности дорожек качения и отсутствие хрупкости колец подшипников в условиях динамических нагрузок.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований обеспечено дифференцированное распределение прочности по контуру колец подшипника. Наибольшая прочность и твердость обеспечена на участках беговых дорожек, испытывающих в процессе эксплуатации повышенные циклические контактные нагрузки. На участках, не испытывающих циклических контактных нагрузок, и в сердцевине колец подшипников обеспечена пониженная твердость и высокая вязкость материала.

В рамках исследований по изготовлению опытных партий шестерен и подшипников из углеродистых сталей, выполненных в ОИМ НАН Беларуси, проведена оценка возможности изготовления шестерен и подшипников из высококачественных углеродистых кордовых сталей производства Белорусского металлургического завода. Анализ химического состава, условий выплавки и требований на поставку кордовой стали марок 65К-90К, 65Б-90Б и 80БВ производства БМЗ показывает, что по своему химическому составу, ограничениям на примеси и неметаллические включения кордовые стали не уступают подшипниковым сталям и сталям пониженной прокаливаемости.

Так, заводские технические условия БМЗ на катанку для металлокорда, бортовой проволоки и проволоки для рукавов высокого давления предусматривают жесткие требования к качеству выплавляемой стали:

- Плотность неметаллических включений в катанке для изготовления металлокорда и проволоки для рукавов высокого давления из стали марок 65К, 70К и 75К должна быть не более 1000 вкл/см² (средняя) при максимальном значении на образце 1200 вкл/см².
- Содержание Al₂O₃ в неметаллических включениях должно быть не более 50% и размером не более 5 мкм.
- Подусадочная неоднородность (подусадочная ликвация) в катанке не должна превышать 3 балла для стали марок 45, 65К, 70К, 75К, 85К, 90К, 80БВ, 80Б, 85Б, 90Б и 4 балла для стали марок 65Б, 70Б, 70Б1, 75Б.

- В макроструктуре катанки не допускается наличие несплошности, обусловленной присутствием трещин, расслоений, шлаковых включений.

- Максимальная глубина обезуглероженного слоя катанки не должна превышать 0,10 мм, для 70Б1 – не более 0,12 мм. Полное обезуглероживание не допускается.

Таким образом, учитывая высокие требования к качеству изготавливаемого проката, на базе кордовой стали производства БМЗ может быть создана сталь для изготовления шестерен и подшипников, подлежащих упрочнению методом объемно-поверхностной закалки с индукционным нагревом.

При этом по сравнению с подшипниковыми сталями в кордовой стали марки 75К более благоприятное сочетание содержания углерода и хрома, близкое к стали пониженной прокаливаемости 80ПП, способствующее полному отсутствию карбидной неоднородности. Жесткое ограничение на содержание хрома и никеля должно способствовать низкой прокаливаемости кордовой стали. Более высокое содержание марганца по сравнению со сталью 80 ПП должно способствовать получению более высоких значений твердости после закалки. Менее жесткие ограничения на содержание марганца и кремния будут способствовать облегчению выплавки и снижению стоимости стали по сравнению со сталью 80ПП.

Выводы

Дешевые углеродистые стали 60ПП и У8А при регулируемом упрочнении объемно-поверхностной закалкой с применением индукционного нагрева могут успешно заменить более дорогие легированные стали типа 20ХН3А, 20Х2Н4А, ШХ15, ШХ15СГ и обеспечивают снижение стоимости материалов на изготовление в 1,5–2,5 раза и стоимости энергоресурсов при упрочнении – в 10–12 раз по сравнению с химико-термической обработкой при одновременном повышении прочностных характеристик и долговечности изготавливаемых деталей.

В качестве углеродистых сталей для изготовления шестерен и подшипников могут быть рекомендованы кордовые стали производства БМЗ при их упрочнении объемно-поверхностной закалкой с жестко регулируемым режимами нагрева и закалочного охлаждения.

Литература

1. Зубченко А. С. Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко. М.: Металлургия, 2003. 764 с.
2. Новиков И. И. Теория термической обработки: учеб. / И. И. Новиков. М.: Металлургия, 1986. 480 с.
3. ГОСТ 801-78 «Сталь подшипниковая».
4. Гальдштейн М. И. Специальные стали / М. И. Гальдштейн [и др.]. М.: Металлургия, 1985. 408 с.
5. Башнин Ю. А. Технология термической обработки стали / Ю. А. Башнин, Б. К. Ушаков, А. Г. Секей. М.: Металлургия, 1986. 426 с.
6. Гурченко П. С., Толстой А. В., Шипко А. А. Структура и свойства сложнопольных шестерен, упрочненных объемно-поверхностной закалкой // *Материалы, технологии, инструменты*. 2006. Т.11. № 2.
7. Гурченко П. С., Шипко А. А. История и направления развития индукционного нагрева ТВЧ на Минском автомобильном заводе // *Литье и металлургия*. 2013. № 2. С. 91–105.
8. Гордиенко А. И., Гурченко П. С., Михлюк А. И., Вечера И. И. Обработка изделий машиностроения с применением индукционного нагрева. Минск: Беларуская навука, 2009. 287 с.

References

1. Zubchenko A. S. *Marochnik stalej i splavov* [Database of steels and alloys]. Moscow, Metalurgiya. Publ. 2003. 764 p.
2. Novikov I. I. *Teorij termicheskoj obrabotki* [The theory of heat treatment]. Moscow, Metalurgiya Publ., 1986.480 p.
3. GOST 801-78. *Stal podchipnikovaj* [Steel Bearing] State Standard 801–78.
4. Galdstein M. I. *Spezialnue stali* [Special steel] I dr., Moscow, Metalurgiya Publ., 1985, 408 p.
5. B a c h n i n J u. A. i dr. *Technologij termicheskoj obrabotki stali* [Technology heat treatment of steel] Moscow, Metalurgiya Publ., 1986. 426 p.
6. Gurchenko P. S., Tolstoj A. V., Shipko A. A. *Struktura i svojstva slozhnoprofil'nyh shesteren, uprochnennyh ob' emno-poverhnostnoj zakalkoj* [Structure and properties of complex-gears, hardened body-surface hardening]. *Materialy, technologies, instrumenty*. 2006. Vol.11. no.2.
7. Gurchenko P. S., Shipko A. A. *Istorija i napravlenija razvitija indukcionnogo nagreva TVCh na Minskom avtomobil' nom zavode* [History and direction of induction heating HDTV at the Minsk Automobile Plant]. *Lit'e i metallurgiya* [Foundry and metallurgy] 2013, no 2, pp.91–105.
8. Gordienko A. I., Gurchenko P. S., Mihljuk A. I., Vechera I. I. *Obrabotka izdelij mashinostroenija s primenieniem indukcionnogo nagreva* [Processing engineering products using induction heating] Minsk, Belarusian science Publ., 2009. 287 p.

Сведения об авторах

Гурченко Павел Семенович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Материаловедение в машиностроении» БНТУ, г. Минск, ул. Я. Коласа, 12. Моб. тел. (+375 44) 7790071.

Солонович Андрей Александрович, главный металлург Минского завода шестерен, г. Минск, ул. Долгобродская 17. Моб. тел. (+375 44) 7528559.

Information about the authors

Gurchenko Pavel, Doctor of Technical Sciences, Professor of «Materials Science in BNTU Mechanical Engineering». GSM: (+375 44) 7790071.

Solonovich Andrey, the chief metallurgist of the Minsk Plant of Gear Wheels. GSM: (+375 44) 7528559.