

УДК 621.785.68

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОДО-ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОДШИПНИКОВЫХ КОЛЕЦ

Ярошенко Ю.Г.¹, д.т.н., профессор-консультант кафедры теплофизики
и информатики в металлургии (yury-y@planet-a.ru)

Липунов Ю.И.², к.т.н., директор Центра новых систем охлаждения
и технологий термоупрочнения металлов (vniimt@yandex.ru)

Смаханов А.Б.¹, магистрант кафедры теплофизики и информатики
в металлургии (47alisher@gmail.com)

Столярова М.В.², к.т.н., научный сотрудник Центра новых систем охлаждения
и технологий термоупрочнения металлов (vniimt@yandex.ru)

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 28)

² ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» («ВНИИМТ»)
(620137, Россия, Екатеринбург, ул. Студенческая, 16)

Аннотация. В статье представлены результаты математического моделирования и экспериментальных исследований, выполненных в ходе разработки технологии дифференцированного водо-воздушного охлаждения подшипниковых колец из стали ШХ15 производства ЗАО «Вологодский подшипниковый завод». Наложение рассчитанных по разработанной в ОАО «ВНИИМТ» математической модели кривых изменения температуры по сечению подшипника на термокинетическую диаграмму распада переохлажденного аустенита показало, что в широком диапазоне режимов дифференцированного водо-воздушного охлаждения достигается требуемая микроструктура термообработанного металла. Экспериментальные исследования термоупрочнения подшипниковых колец водо-воздушными струями проведены на специально смонтированном опытно-промышленном устройстве с системой охлаждения, оснащенной смесителями и коллекторами с плоско-факельными форсунками оригинальной конструкции, которые обеспечивают устойчивость факела и равномерность распыла водо-воздушной смеси в широком диапазоне изменения расхода и давления воды и воздуха. Проведенное на различных режимах охлаждения термическое упрочнение колец с последующим определением механических свойств и структурных характеристик стали подтвердило, что технология водо-воздушного охлаждения позволяет достичь требуемых структурных и механических характеристик подшипниковых колец и является конкурентоспособной экологически чистой альтернативой технологии объемной закалки в масляном баке.

Ключевые слова: термическая обработка, закалка, подшипниковая сталь, водо-воздушное охлаждение, форсунка, математическое моделирование, твердость, микроструктура.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-423-430

В настоящее время в машиностроительной промышленности основную часть изделий термически упрочняют погружением в закалочный бак. В зависимости от марки стали, конфигурации и размеров изделия в качестве закалочной среды используют воду, масло, соляные, щелочные или полимерные растворы [1 – 7]. При такой закалке не всегда достигается требуемый для конкретного изделия уровень механических свойств из-за невозможности управлять скоростью его охлаждения. Закалка изделий в масляном баке имеет и ряд неустраняемых недостатков, в частности: недостаточная интенсивность охлаждения изделий в интервале структурных превращений, высокая пожароопасность, загрязнение окружающей среды вредными выбросами, высокая стоимость технологии и т.д.

В России и за рубежом проводятся исследования по замене технологии закалки в масляном баке на альтернативные варианты с использованием технологии тер-

мической обработки металла как водяными струями, так и водо-воздушной смесью [8 – 13].

В ОАО «ВНИИМТ» разработаны несколько вариантов систем охлаждения, в которых охлаждение изделий при закалке осуществляется водо-воздушной смесью ВВС, (туманом). Такая охлаждающая среда формируется в генераторах ВВС и через коллекторы с форсунками подается на охлаждаемое изделие. При использовании ВВС скорость охлаждения изделия зависит от многих параметров (в частности, от давления воды и воздуха, содержания воды в смеси [14, 15]), что позволяет управлять интенсивностью охлаждения изделий в широких пределах. Конструктивные и режимные параметры разработанных систем водо-воздушного охлаждения при достаточно простой системе управления позволяют изменять до 5 – 6 раз интенсивность охлаждения в течение одного цикла закалки. Такие системы способны обеспечить охлаждение изделий по режиму,

не только близкому к закалке в масле, но и осуществить более мягкое охлаждение изделий, а также реализовать различные варианты дифференцированного охлаждения, устанавливая требуемую интенсивность охлаждения в процессе термической обработки за счет изменения параметров ВВС [16, 17]. При дифференцированном охлаждении обеспечивается высокая интенсивность охлаждения в начальной стадии в интервале температур структурного превращения, что позволяет получать необходимую структуру изделия и более высокий уровень механических свойств, чем при закалке в водяном баке. При снижении температуры до определенного значения осуществляется переход к мягкому охлаждению в интервале мартенситного превращения, как в масле, если необходимо, и ниже, что позволяет минимизировать термические напряжения и устранить вероятность трещинообразования.

Типовые режимы термической обработки изделий из сталей типа ШХ при их закалке погружением в масле и воде представлены в табл. 1. При закалке таких изделий с начальной температурой 830 °С в масле и отпуске при 160 °С в течение 2 ч их микроструктура представляла собой мелкоигольчатый мартенсит и равномерно распределенные избыточные карбиды [18].

В ОАО «ВНИИМТ» были проведены исследования по термическому упрочнению водо-воздушной смесью подшипниковых колец производства ЗАО «Вологодский подшипниковый завод», изготовленных из стали ШХ15. В соответствии с требованиями прочность металла после термической обработки должна быть 62 – 66 НРС, а микроструктура должна состоять из скрыто- и мелкокристаллического мартенсита и мелких равномерно распределенных карбидов.

Математическая модель, разработанная во ВНИИМТ для расчета температурного поля в изделиях сложной формы при различных граничных условиях теплообмена на поверхности изделия, позволила осуществить расчетное моделирование режимов закалки подшипниковых колец в масляном баке и водо-воздушной смесью.

Математическая модель отражает все особенности физико-химических процессов, сопровождающих термическое упрочнение подшипниковых колец. Модель включает дифференциальное уравнение теплопроводности для двумерной задачи, начальное условие (при-

нято, что начальная температура изделия постоянна) и граничные условия.

При задании граничных условий для расчета процесса охлаждения в масляном баке использованы зависимости коэффициента конвективной теплоотдачи от температуры поверхности образца, приведенные в работах [16, 19, 20]. При водо-воздушном охлаждении интенсивность охлаждения в первую очередь зависит от соотношения воды и воздуха в ВВС и количества смеси, подаваемой на единицу площади охлаждаемой поверхности (плотности орошения). Для инженерных расчетов при задании граничных условий для спрейерного охлаждения применяются зависимости снимаемого с поверхности удельного теплового потока от плотности орошения и температуры поверхности [13].

Граничные условия для водо-воздушного охлаждения (в устройстве охлаждения) следующие:

$$\begin{cases} \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \begin{cases} q \text{ при } t_{\text{пов}} \geq 100 \text{ }^\circ\text{C}; \\ \alpha(t_{\text{пов}} - t_{\text{окр.ср}}) \text{ при } t_{\text{пов}} < 100 \text{ }^\circ\text{C}, \end{cases} \\ \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} = \begin{cases} q \text{ при } t_{\text{пов}} \geq 100 \text{ }^\circ\text{C}; \\ \alpha(t_{\text{пов}} - t_{\text{окр.ср}}) \text{ при } t_{\text{пов}} < 100 \text{ }^\circ\text{C}, \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

где $t_{\text{пов}}$ и $t_{\text{окр.ср}}$ – температура поверхности кольца и окружающей среды соответственно; $\alpha(t)$ – коэффициент конвективной теплоотдачи, зависящий от температуры поверхности кольца; $\lambda(t)$ – удельная теплопроводность металла; x, y – координаты в поперечном сечении кольца; q – удельный тепловой поток, отводимый от поверхности кольца.

Граничные условия для охлаждения на воздухе при транспортировке образца после нагрева в печи до устройства охлаждения и пребывания его на воздухе после выхода из устройства охлаждения, когда идет процесс выравнивания температуры по сечению образца, запишутся в виде

$$\begin{cases} \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha(t_{\text{пов}} - t_{\text{окр.ср}}) + \varepsilon_{\text{м}} C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр.ср}}}{100} \right)^4 \right] \\ \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha(t_{\text{пов}} - t_{\text{окр.ср}}) + \varepsilon_{\text{м}} C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр.ср}}}{100} \right)^4 \right] \end{cases}, \quad (2)$$

Т а б л и ц а 1

Типовые режимы термической обработки сталей типа ШХ

Table 1. Typical heat treatment modes for bearing steels

Сталь	Температура, °С, при				
	отжиге	нормализации	закалке в масле	закалке в воде	отпуске
ШХ6, ШХ9	780 – 790	870 – 890	800 – 835	780 – 815	150 – 150
ШХ15	790 – 810	900 – 920	815 – 850	785 – 830	150 – 160
ШХ15СГ	790 – 800	890 – 910	810 – 835	–	–

где ϵ_m – степень черноты поверхности металла; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Предварительную оценку возможной структуры по сечению колец после термической обработки в различных средах можно получить наложением расчетных кривых охлаждения на термокинетические диаграммы превращения переохлажденного аустенита. Следует отметить, что температурно-временные интервалы превращений аустенита на диаграммах различных авторов существенно различаются. Поэтому оценка вероятности получения той или иной структуры носит качественный характер.

При моделировании закалки водо-воздушной смесью анализировали динамику температурных полей при различных схемах охлаждения. При дифференцированном охлаждении моделировали режимы закалки с различной интенсивностью охлаждения: такой же, как в баке с водой, и с более высокой в интервале температур от начала охлаждения до температуры начала мартенситного превращения, равной приблизительно 250 °С, и в последующем – мягкого охлаждения в интервале мартенситного превращения. Такая технология закалки обеспечивает требуемую мартенситную структуру на максимально возможную глубину слоя и минимизирует напряжения при мартенситном превращении.

На рис. 1 приведены расчетные значения температуры колец с толщиной стенки 20 мм при закалке в масляном баке с температурой масла 120 °С и при дифференцированном охлаждении ВВС. Кривые изменения температуры поверхности и середины образца наложены на термокинетическую диаграмму, на которой выделены области превращений в стали, отмеченные следующими обозначениями: А – аустенит, М – мартенсит, Б – бейнит, Ф – феррит, П – перлит, К – карбид, AC_1 – область формирования аустенита при нагревании, M_n – линия начала мартенситного превращения аустенита. При закалке в масле для колец такого размера в срединных слоях возможно появление нежелательных структур (типа бейнита), тогда как при водо-воздушном охлаждении после закалки структура по сечению таких колец будет мартенситная, а уровень термических напряжений не превысит значений, которые формируются при закалке в масле.

Для исследования процессов охлаждения нагретых изделий по различным технологиям термического упрочнения (охлаждение погружением в бак, струйное водяное, водо-воздушное, воздушное) в экспериментальном цехе ОАО «ВНИИМТ» смонтирована полупромышленная установка, схема которой представлена на рис. 2. В состав ее входят нагревательная печь, рама с рольгангом для транспортировки образца, размещенное на раме охлаждающее устройство и вспомогательное оборудование, бак для воды, шкаф управления и щит контрольно-измерительной аппаратуры. Кольца помещали на сетчатый поддон, нагревали в печи и

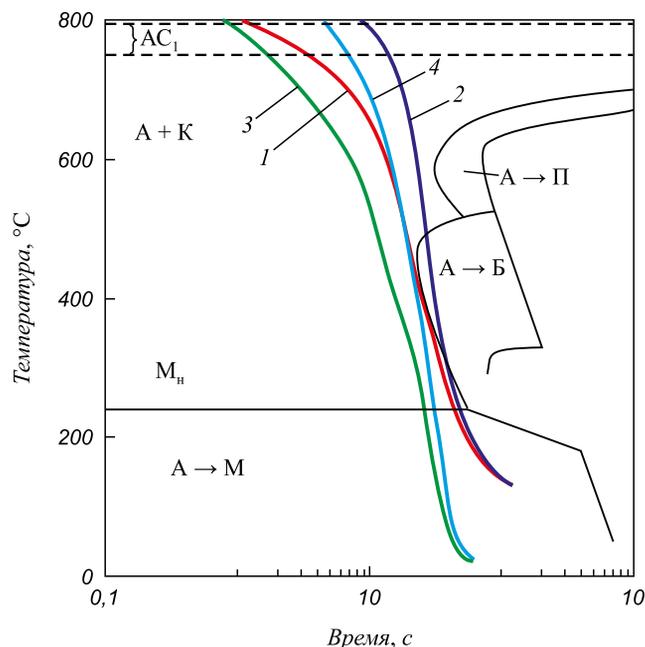


Рис. 1. Расчетное значение температуры подшипникового кольца с толщиной стенки 20 мм при его охлаждении в масле с температурой 120 °С и при дифференцированном водо-воздушном охлаждении:

1 и 2 – поверхность и середина кольца при охлаждении в масле; 3 и 4 – поверхность и середина кольца при дифференцированном водо-воздушном охлаждении

Fig. 1. The calculated temperature value of bearing ring with wall thickness of 20 mm when it is cooled in oil with temperature of 120 °С and at a differential water-air cooling:

1 and 2 – the surface and the middle of the ring at cooling in oil; 3 and 4 – the surface and the middle of the ring at a differential water-air cooling

охлаждали снизу и сверху плоскими водо-воздушными потоками при реверсивном перемещении поддона в зоне охлаждения. Контроль температуры в печи осуществляли по показаниям пирометров, а температуру поверхности колец измеряли приваренными на поверхность колец термопарами ТХА. Частоту записи показаний термопар при охлаждении колец установили в 0,1 секунды.

Для производства ВВС использовали оригинальной конструкции смеситель, подачу смеси на образцы осуществляли через систему коллекторов с плоско-факельными форсунками.

Водо-воздушная смесь относится к типу газожидкостных дисперсных сред. Степень распыления дисперсной фазы (воды), определяется размером ее капель. Степень дисперсности ВВС оценивали при помощи визуального и тактильного наблюдений, для этого при проведении испытаний вели видео-фото съемку. Характеристика дисперсности ВВС в зависимости от параметров воды и воздуха приведена в табл. 2.

Характеристики факелов и их геометрические размеры стабильны в широком диапазоне изменения параметров воды и воздуха, таких как давление, расход, соотношение в смеси содержания воды и воздуха.

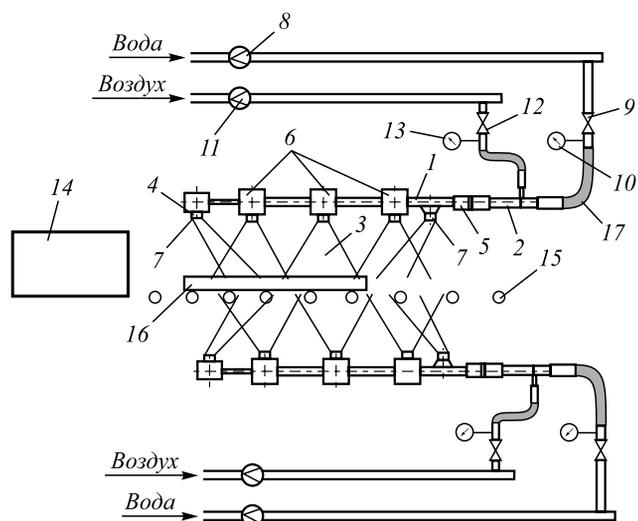


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 – корпус коллектора; 2 – смеситель воды и воздуха; 3 – водо-воздушный факел; 4 – форсунка; 5 – соединитель для изменения длины и/или вставки диффузора разных диаметров; 6 – форсунки с центральной выдачей; 7 – форсунки с боковой выдачей; 8 – расходомер для воды; 9 – вентиль для воды; 10 – манометр для воды; 11 – диафрагма для воздуха; 12 – вентиль для воздуха; 13 – манометр для воздуха; 14 – печь для нагрева колец; 15 – рольганг; 16 – сетчатый поддон с кольцами; 17 – гибкие подводы

Fig. 2. Scheme of experimental unit:

1 – collector case; 2 – water and air mixer; 3 – water-air torch; 4 – nozzle; 5 – connector for length and/or insertion of the diffuser of different diameter; 6 – nozzles with the central supply; 7 – nozzles with lateral supply; 8 – flowmeter for water; 9 – valve for water; 10 – manometer for water; 11 – diaphragm for air; 12 – valve for air; 13 – manometer for air; 14 – furnace for rings heating; 15 – roller bed; 16 – mesh pallet with rings; 17 – flexible feeds

При проведении экспериментальных исследований термической обработки подшипниковых колец параметры ВВС варьировали в широких пределах: расход

воды изменялся от 0,75 до 3,0 м³/ч, расход воздуха – от 26 до 197 м³/ч, отношение расхода воздуха к расходу воды – от 17,4 до 167.

Термическую обработку колец проводили, как по технологии закалки, при которой образец нагревался до температуры, выше температуры образования аустенита, и охлаждался со скоростью, выше критической до среднemasсовой температуры ниже 100 °С. Кроме того, термическую обработку колец проводили технологии прерванного охлаждения с самоотпуском: образец охлаждался до среднemasсовой температуры выше 100 °С, и при охлаждении на воздухе за счет тепла внутренних слоев происходит разогрев и самоотпуск поверхностных слоев образца. В табл. 3 приведены режимы термической обработки колец по технологии закалки и закалки с самоотпуском.

По экспериментальным данным, полученным при режимах прерванного охлаждения колец, рассчитан средний удельный тепловой поток, снимаемый с поверхности колец в процессе их охлаждения. Значения среднего удельного теплового потока для параметров водо-воздушной смеси, при которых проводились исследования, лежат в пределах от 0,22 до 1,2 МВт/м², что позволяет реализовать широкий диапазон режимов охлаждения как сравнимых с охлаждением в масляном и водяном баках, так и дифференцированных во времени.

Анализ механических свойств и оценка микроструктуры металла проведены для двух экспериментальных образцов подшипниковых колец, термически обработанных по технологии закалки таким образом, чтобы скорость охлаждения ВВС была близка к скорости охлаждения в масле. Образцы вырезаны из подшипникового кольца наружным диаметром 72 мм и толщиной стенки 6,1 мм. Режим охлаждения следующий: расход воды 2,9 м³/ч, расход воздуха 121 м³/ч. На рис. 3 приве-

Таблица 2

Результаты определения степени распыления дисперсной фазы и характеристики дисперсности водо-воздушной смеси

Table 2. The results of determining the degree of dispersion of the dispersed phase and the dispersion characteristics of water-air mixture

Номер опыта	Расход воды, м ³ /ч	Расход воздуха, м ³ /ч	Соотношение расходов воздуха и воды, доли	Характеристика распыления
1	1,20	85	70	Отдельные струи воды в факеле не наблюдаются. Начало полного распыления воды
2	1,19	96	80	Наблюдаются крупные капли воды
3	1,20 – 1,21	109 – 121	90 – 100	Состояние плотного водяного тумана, визуальнo капли воды не наблюдаются
5	0,91 – 1,02	120 – 126	123 – 131	Состояние полупрозрачного водяного тумана, визуальнo капли воды не наблюдаются, тактильнo в смеси ощущаются капли воды
7	0,75 – 0,85	129 – 137	161 – 172	Состояние прозрачного водяного тумана, капли воды не определяются ни визуальнo, ни тактильнo

Т а б л и ц а 3

Экспериментальные режимы охлаждения

Table 3. Experimental cooling modes

Температура нагрева в печи, °С	Выдержка в печи, мин	Время охлаждения, с	Среднемассовая температура окончания охлаждения, °С
Технология закалки			
820 – 860	15 – 20	15 – 20	≤ 100
Технология закалки с самоотпуском			
820 – 860	15 – 20	1,4 – 7,0	250 – 600

дены показания термопар, приваренных к поверхности образцов (кривые 2 и 3), и расчетное значение температуры поверхности кольца таких же размеров при его охлаждении в масляном баке с температурой масла 40 °С (кривая 1).

Механические свойства и описание микроструктуры металла образцов подшипниковых колец в исходном состоянии, термоупрочненных в масляном баке и термически обработанных по технологии закалки в устройстве водо-воздушного охлаждения приведены в табл. 4.

На рис. 4 представлены микроструктуры образцов металла, полученные при 500 и 1000-кратных увеличениях. В исходном состоянии микроструктура образца при увеличении в 500 раз представлена на рис. 4, а зернистым перлитом, а на рис. 4, б после закалки в масляном баке при увеличении в 1000 раз – мелкоигльчатый мартенсит и карбидами, что соответствует требованиям. На рис. 4, в, г отражены при увеличении в 1000 раз микроструктуры образцов № 3 и № 4. Эти образцы были обработаны по технологии закалки в устройстве водо-воздушного охлаждения. Динамика их охлаждения отражена на рис. 3: линия 2 для образца № 3 и линия 3 для образца № 4. Микроструктура металла этих экспериментальных образцов состоит из мелкоигльчатого мартенсита и карбидов. Из сравнения микроструктур (рис. 4) и механических свойств (табл. 4) образцов, подвергнутых термической обработке в мас-

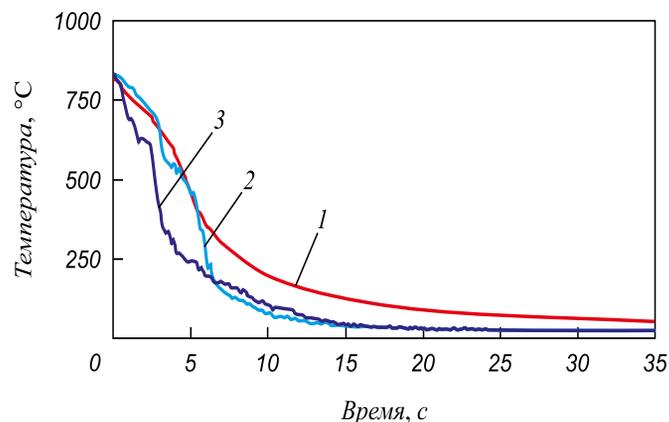


Рис. 3. Температура поверхности подшипникового кольца при охлаждении в масляном баке и устройстве водо-воздушного охлаждения:

1 – расчетное значение температуры поверхности кольца при охлаждении в масляном баке с температурой масла 40 °С; 2 и 3 – показания термопар образцов колец № 3 и № 4 при водо-воздушном охлаждении

Fig. 3. Calculated value of the ring surface temperature of at its cooling in oil tank and in unit of water-air cooling:

1 – calculated value of the surface temperature of the ring at cooling in the oil tank with an oil temperature of 40 °С; 2 and 3 – registration of the thermocouple of samples of the rings no. 3 and no. 4 at water-air cooling

ляном баке (образец 2) и в установке водо-воздушного охлаждения (образцы 3 и 4), следует отметить идентичность этих показателей.

Таким образом, и микроструктура, и твердость металла образцов подшипниковых колец, термоупрочненных в устройстве водо-воздушного охлаждения, соответствуют предъявляемым к термоупрочненной подшипниковой стали требованиям.

Выводы. Изучено температурное состояние подшипниковых колец из стали ШХ15 при их термической обработке в масляном баке и водо-воздушными струями, для чего были использованы:

– математическая модель, разработанная в ОАО «ВНИИМТ», которая способна учесть все особенности тепловых процессов и физико-химических явлений при термическом упрочнении подшипниковых колец;

Т а б л и ц а 4

Механические свойства и микроструктура металла образцов подшипниковых колец

Table 4. Mechanical properties and microstructure of metal of bearing rings samples

Образец	Режим термообработки	HRC	Микроструктура металла
1	Исходное состояние	31 – 32	Зернистый перлит 4 балла, шкала № 8 ГОСТ 801-78
2	Закалка в масляном баке	63 ÷ 65	Мелкоигльчатый мартенсит (5 баллов, шкала №3 ГОСТ8233-56) и карбиды
3, 4	Закалка в устройстве водо-воздушного охлаждения	63 – 65	Мелкоигльчатый мартенсит (5 баллов, шкала №3 ГОСТ8233-56) и карбиды

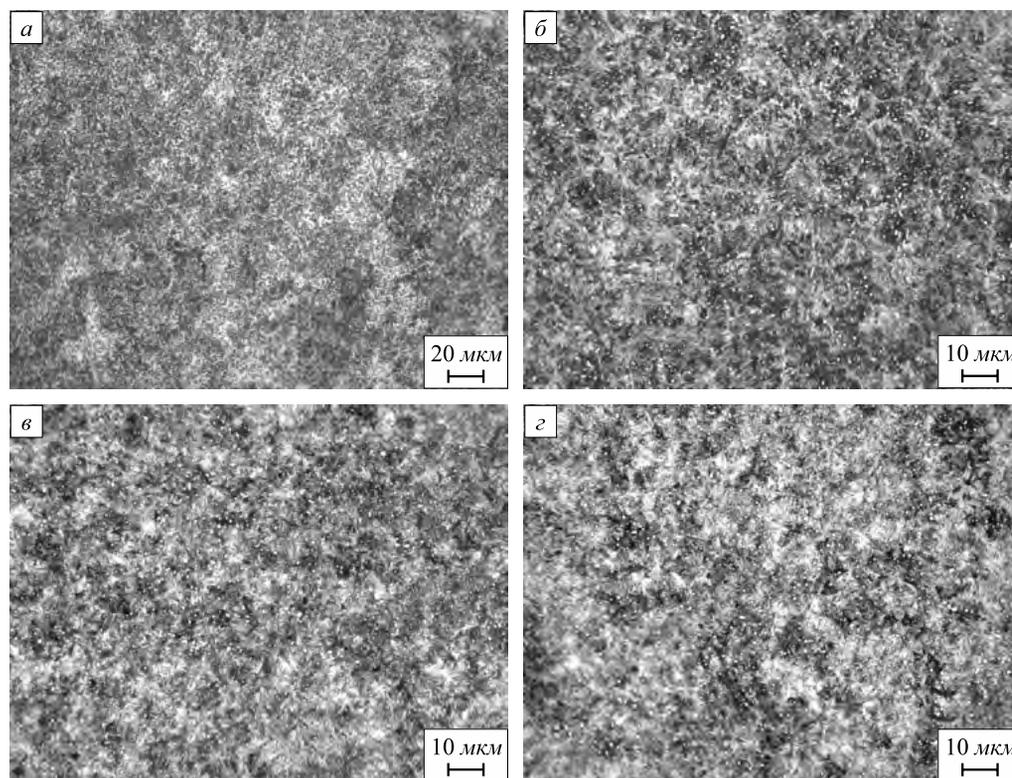


Рис. 4. Микроструктура металла экспериментальных образцов:
а – исходное состояние; *б* – после объемной закалки в масляном баке; *в* и *г* – после водовоздушной закалки

Fig. 4. Microstructure of metal of the samples:
a – initial condition; *б* – after volume quenching in an oil tank; *в* and *г* – after water-air quenching

– экспериментальная установка, созданная в ОАО «ВНИИМТ», на которой была реализована технология водо-воздушного охлаждения подшипниковых колец и установлены параметры водо-воздушной смеси, способные обеспечить требуемые показатели механических свойств и структуру колец из подшипниковой стали.

Технология водо-воздушного охлаждения позволяет устанавливать требуемую интенсивность охлаждения в процессе термической обработки за счет изменения параметров водо-воздушной смеси и тем самым обеспечивать термическую обработку подшипниковых колец с улучшенными технико-экономическими и экологическими показателями в сравнении с технологией закалки подобных изделий в масляном баке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Люты В. Закалочные среды. Справочник / Под ред. С.Б. Масленкова; / Пер. с польск. – Челябинск: Металлургия, 1990. – 192 с.
2. Heat treatment problems solved by new quenching medium // Metallwork Praduc. 1967. Vol. 3. No. 4. P. 65, 66.
3. Lasday Stanley B. Metal quenching with oils and syntezetie media // Industrial Heating. 1976. Vol. 43. No. 10. P. 8 – 13, 16.
4. Suttie N.R. The use of polymer quenchants for aluminium alloy heat treatment // Heat Treatment Metals. 1979. Vol. 6. No. 1. P. 19 – 21.
5. AQUATENSID /AQUACOOOL/ /http://www.petrofer.com/images/petrofer/ dokumente/produkte/en/PET_1_QUECHANTS_EN.pdf

6. Aqua-Quench/ <https://www.houghtonintl.com/en-gb/find-your-products?search=&application=All&industry=All>
7. http://www.spray.de/spray_nozzles/spray_nozzles_overview.aspx
8. Желудкевич М.С. Теплотехнологические основы управляемого водовоздушного охлаждения при закалке изделий из железоуглеродистых сплавов: Автореф. дис. д.т.н.: – Минск, 2001. – 34 с.
9. Машеков С.А., Абсадыков Б.Н., Алимкулов М.М. Физическое моделирование при исследовании влияния режимов прокатки и охлаждения водо-воздушной смесью на качество рельсов // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. С. 2.
10. Глазков Л.А., Желудкевич М.С., Желянин Т.Л., Табулин А.А., Ресурсосберегающий технологический процесс термической обработки крупногабаритных штампов // Вестник БНТУ. 2009. № 2. С. 31 – 34.
11. Golovko A.N., Rodman D., Nürnberger F. etc. Investigation of the Water-Air Cooling Process of the ThickWalled Extruded Profile Made of Alloy En Aw-6060 on the Output Table // Metallurgical and Mining Industry. 2012. Vol. 4. No. 2. P. 66 – 74.
12. Yaroshenko Y.G., Startseva M.V., Lipunov Y.I. etc. Developing a Modern Thermal Strengthening Technique for Regulated Fishplate Cooling // WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2014. Vol. 190. No. 1. P. 491 – 499.
13. Липунов Ю.И., Эйсмонт К.Ю., Старцева М.В. Внедрение современного энерго- и ресурсосберегающего оборудования и экологически чистой технологии термоупрочнения в производстве рельсовых накладок // Бюллетень «Черная металлургия». 2013. № 12. С. 61 – 64.
14. Будрин Д.В., Кондратов В.М. Водовоздушное охлаждение при закалке // Металловедение и термическая обработка металлов. 1965. № 6. С. 22 – 25.

15. Systems for accelerated cooling of plates. Bernhard Ludwig, MDS Mannesmann Demag Sack GmbH, Düsseldorf // *Metallurgical Plate and Technology*. 1988. No. 4. P.10 – 17.
16. Lipunov Y.I., Zaynullin L.A., Startseva M.V. Development of high-efficiency technologies and devices of controlled cooling for thermohardening of metal // *Advanced metals, ceramics and composites: proceedings of the XI China-Russia Symposium on Advanced Material & Technologies*, ed. Hailing Tu, Solntsev K., Ring Zhou. Part I / China, Kunming, Yunnan Publishing Group Corporation, Yunnan Science & Technology Press, 2013. P. 295 – 298.
17. Мандзяк И.И., Перерва В.Я., Шевченко Г.Л. Исследование водо-воздушного охлаждения при термической обработке металла. – В кн.: Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: Материалы Международной науч.-тех. конф. студ., аспирантов, ученых. – Челябинск: изд. ЮУрГУ, 2013. Т. 1. № 1. С. 206 – 209.
18. Наседкина Я.И., Караваева М.В., Кайбышев О.А. Влияние комбинированной термомеханической обработки на структуру и механические свойства высокоуглеродистой подшипниковой стали // *Вестник УГАТУ. Машиностроение*. 2012. Т. 16. № 5 (50). С. 145 – 148
19. Эйсмонт Ю.Г. Исследование закалочных сред, альтернативных закалочным маслам // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2000. № 11. С. 32 – 36.
20. Петраш Л.В. Закалочные среды. – М.:МАШГИЗ. 1959. – 111 с.

Поступила 28 июня 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. Vol. 61. No. 6, pp. 423–430.

APPLICATION OF WATER-AIR COOLING TECHNOLOGIES FOR HEAT TREATMENT OF BEARING RINGS

*Yu.G. Yaroshenko¹, Yu.I. Lipunov², A.B. Smakhanov¹,
M.V. Stolyarova²*

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

² OJSC “Scientific Research Institute of Metallurgical Heat Engineering” (“VNIIMT”) Ekaterinburg, Russia

Abstract. The paper presents the results of mathematical modeling and experimental researches executed during the development of the technology of differential water-air cooling of bearing rings made of 52100 (EN1.3505) steel produced by JSC “Vologda Bearing Plant”. Overlapping the mathematical model of temperature variation curves across the bearing cross-section on the thermokinetic diagram of the decomposition of supercooled austenite calculated according to the mathematical model developed by JSC VNIIMT has shown that a required microstructure of the heat-treated metal is achieved in a wide range of differentiated water-air cooling modes. Experimental studies of heat-strengthening of bearing rings by water-air jets were carried out on a specially assembled experimental industrial device with a cooling system equipped with mixers and collectors with flat-jet nozzles of the original design that ensure the stability of the torch and the uniformity of spraying the water-air mixture over a wide range of flow rates and water and air pressure. The thermal hardening of the rings carried out at various cooling regimes, followed by the determination of the mechanical properties and structural characteristics of the steel, has confirmed that the water-air cooling technology achieves the required structural and mechanical characteristics of the bearing rings and is a competitive, environmentally friendly alternative to the technology of volume quenching in oil tank.

Keywords: heat treatment, quenching, bearing steel, water-air cooling, nozzle, mathematical modeling, hardness, microscopic structure.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-423-430

REFERENCES

1. Luty W. *Chtodziwa hartownicze*. Warszawa, 1986. (Russ.ed.: Luty W. *Zakalochnye sredy: Sprav. izd.* Trans. from Polish. Chelyabinsk: Metallurgiya, 1990, 192 p.) (In Pol.).
2. Heat treatment problems solved by new quenching medium. *Metallwork Praduc*. 1967, vol. 3, no. 4, pp. 65–66.
3. Lasday Stanley B. Metal quenching with oils and syntezet media. *Industrial Heating*. 1976, vol. 43, no. 10, pp. 8–13, 16.
4. Suttie N.R. The use of polymer quenchants for aluminium alloy heat treatment. *Heat Treatment Metals*. 1979, vol. 6, no. 1, pp. 19–21.
5. *AQUATENSIS /AQUACOOOL*. Available at: http://www.petrofer.com/images/petrofer/dokumente/produkte/en/PET_1_QUENCHANTS_EN.pdf
6. *Aqua-Quench*. Available at: <https://www.houghtonintl.com/en-gb/find-your-products?search=&application=All&industry=All>
7. *Spraying Systems Co.* Available at: http://www.spray.de/spray_nozzles/spray_nozzles_overview.aspx
8. Zheludkevich M.S. *Teplotekhnologicheskie osnovy upravlyаемого vodovozdushnogo okhlazhdeniya pri zakalke izdelii iz zhelezouglerodistykh splavov: avtoref. diss...dokt. tekhn. nauk* [Heat engineering basics of controlled water-air cooling during quenching of products of iron-carbon alloys: Extended Abstract of Dr. Sci. Diss.]. Minsk: 2001, 34 p. (In Russ.).
9. Mashekov S.A., Absadykov B.N., Alimkulov M.M. Physical modeling in the study of the effect of modes of rolling and water-air mixture cooling on the rails quality. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015, no. 2, p. 2. (In Russ.).
10. Glazkov L.A., Zheludkevich M.S., Zelenin T.L., Tabolin A.A. Resource-saving technological process of heat treatment of large dies. *Vestnik BNTU*. 2009, no. 2, pp. 31–34.
11. Golovko A.N., Rodman F., Njurnberger F. Investigation of the water-air cooling process of the thick walled extruded profile made of alloy En Aw-6060 on the output table. *Metallurgical and Mining Industry*. 2012, vol. 4, no. 2, pp. 66–74.
12. Yaroshenko Y.G., Startseva M.V., Lipunov Y.I., Eismont K.Y., Nekrasova E.V. Developing modern thermal strengthening technique for regulated fishplate cooling. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2014, vol. 190, no. 1, pp. 491–499.
13. Lipunov Yu.I., Eismont K.Yu., Startseva M.V., Yaroshenko Yu.G., Nekrasova E.V. Introduction of modern energy-saving equipment and environmentally pure strengthening technology into the production of rail pads. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta “Chermetinformatsiya”*. 2013, no. 12, pp. 61–64. (In Russ.).
14. Budrin D.V., Kondratov V.M. Quenching in air-water mixtures. *Metallurgy and Heat Treatment*. 1965, vol. 7, no. 6, pp. 367–370.
15. Systems for accelerated cooling of plates. Bernhard Ludwig, MDS Mannesmann Demag Sack GmbH, Düsseldorf. *Metallurgical Plate and Technology*. 1988, no. 4, pp. 10–17.
16. Lipunov Yu.I., Zaynullin L.A., Startseva M.V. Development of high-efficiency technologies and devices of controlled cooling for thermohardening of metal. *Proceedings of the XI China-Russia Symposium on Advanced Material & Technologies*, Hailing Tu, Solntsev K., Ring Zhou eds. Part I. China, Kunming, Yunnan Publishing Group Corporation, Yunnan Science & Technology Press, 2013, pp. 295–298.
17. Mandzyak I.I., Pererva V.Ya., Shevchenko G.L. Investigation of water-air cooling at heat treatment of metal. In: *Energo- i resur-*

sosberezhenie v teploenergeticheskoi i sozial'noi sfere. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii stud., aspir., uchenykh. 2013. Chelyabinsk [Energy and resource saving in heat power and the social sphere. Proc. of Int. Sci.-Tech. Conf. of Students, Postgraduates and Scientists 2013. Chelyabinsk]. Chelyabinsk: SUSU, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 206–209. (In Russ.).

18. Nasedkina Ya.I., Karavaeva M.V., Kaibyshev O.A. Effect of combined thermomechanical treatment on the structure and mechanical properties of high carbon bearing steel. *Vestnik UGATU. Mashinostroenie*. 2012, vol. 16, no. 5 (50), pp. 145–148. (In Russ.).
19. Eismondt K.Yu. Study of the quenching medium, alternative to the quenching oils. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2000, no. 11, pp. 32–36. (In Russ.).
20. Petrash L.V. *Zakalochnye sredy* [Quenching medium]. Moscow: Mashgiz, 1959, 111 p. (In Russ.).

Information about the authors:

Yu.G. Yaroshenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor-Consultant of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (yury-y@planet-a.ru)

Yu.I. Lipunov, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Center of Modern Cooling Systems and Thermohardening Metals Technologies (vniimt@yandex.ru)

A.B. Smakhanov, MA Student of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (47alisher@gmail.com)

M.V. Stolyarova, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Center of Modern cooling Systems and Thermohardening Metals Technologies (vniimt@yandex.ru)

Received June 28, 2017
