

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ В МЕТАЛЛУРГИИ И МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.7

В.М. КОНСТАНТИНОВ, д-р техн. наук (БНТУ),
В.А. КУКАРЕКО, д-р техн. наук (ОИМ НАНБ),
А.В. КОВАЛЬЧУК (БНТУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ РЯДА УЛУЧШАЕМЫХ СТАЛЕЙ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Введение. Повышение прочности сталей, достигаемое при термической обработке, традиционно сопровождается снижением вязкости, что ограничивает применение низколегированных сталей для использования их в условиях климатического холода и экстремальных нагрузок [1–5]. Необходимый комплекс прочностных характеристик сталей для использования их в указанных условиях часто получают за счет микролегирования дорогостоящими добавками, что не всегда является возможным и приемлемым. Поэтому перспективной задачей является определение режимов термической обработки с применением индукционного нагрева низколегированных сталей для использования их в экстремальных условиях [6]. Применение индукционного нагрева при этом может позволить одновременно повысить как прочность, так и вязкость сталей, что в совокупности обеспечит их высокую стойкость в экстремальных условиях и позволит повысить эффективность управления структурно-фазовым состоянием и свойствами сталей [7, 8].

Цель данной работы заключалась в определении режимов термической обработки низколегированных сталей 32Г2А и 35Г2Ф для повышения их работоспособности в условиях экстремальных нагрузок и климатического холода путем снижения порога хладноломкости.

Материалы и методики. Исследовали промышленные стали 32Г2А и 35Г2Ф. Для проведения процессов отжига, отпуска и нормализации использовали шахтную электрическую печь с селитовыми нагревателями. Контроль температуры осуществляли при помо-

щи потенциометра КСП-3П, градуировка ХА. Для повышения чувствительности к изменению температуры термопару помещали в печь без защитного кожуха. Закалку образцов в воде проводили с использованием индукционного нагрева, который осуществляли на установке ТВЧ-100/0,08 (ТУ 16.739.275-81) с мощностью на выходном контуре 100 кВт и частотой преобразователя 8000 Гц. Скорость нагрева и изотермическую выдержку обеспечивали регулированием напряжения на контуре. Контроль температуры осуществляли инфракрасным пирометром модели TI213EL с диапазоном измеряемой температуры от 20 до 1200 °С, при этом погрешность измерения составляла 1 %.

Исследования микроструктуры сталей после термообработки проводили на оптическом микроскопе Neophot-21. Для выявления микроструктуры использовали стандартные металлографические реактивы.

Определение ударной вязкости проводили с использованием маятникового копра модели 2083 КМ-0.4 в соответствии с ГОСТ 10708.

Результаты и их обсуждение. В качестве основных операций термической обработки (ТО) были выбраны нормализация, закалка и отпуск при различных температурах с использованием различных охлаждающих сред. Исследование влияния режимов термообработки на показатели ударной вязкости проводили на образцах из сталей 32Г2А и 35Г2Ф, подвергнутых ТО по восьми различным режимам:

1. Нормализация 880 °С (40 мин).
2. Нормализация 880 °С (40 мин), отпуск 600 °С (60 мин, воздух).
3. Закалка 860 °С (40 мин), отпуск 600 °С (60 мин, воздух).
4. Нормализация 880 °С (40 мин), закалка 860 °С (40 мин, вода), отпуск 600 °С (60 мин).
5. Нормализация 900 °С (60 мин).
6. Нормализация 900 °С (60 мин), отпуск 620 °С (90 мин, вода).
7. Нормализация 900 °С (60 мин), закалка 850 °С (40 мин, вода), отпуск 620 °С (90 мин, вода).
8. Закалка 850 °С (40 мин, вода), отпуск 620 °С (90 мин, вода).

В результате были установлены режимы термообработки (режимы 7, 8), обеспечивающие получение наибольших значений удар-

ной вязкости KCV, работы удара и доли вязкой составляющей в изломе (рисунки 1–3).

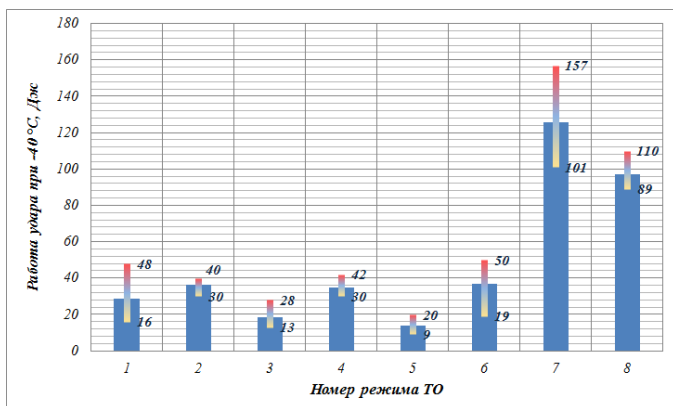


Рисунок 1 – Интервалы изменения ударной вязкости (KCV) образцов стали 32Г2А

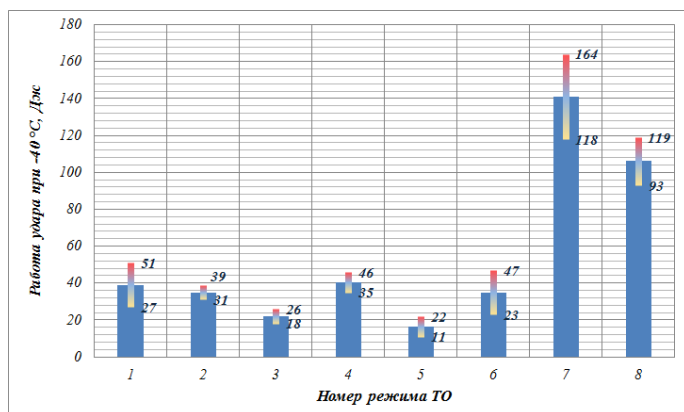


Рисунок 2 – Интервалы изменения ударной вязкости образцов стали 35Г2Ф

Уточнено влияние ряда режимов ТО на предел прочности, ударную вязкость, работу удара и долю вязкой составляющей в изломе, определенные при испытаниях на ударный изгиб (KCV) для сталей 35Г2Ф и 32Г2А. В результате термической обработки получены мелкодисперсные феррито-цементитные структуры и структуры на

основе мартенсита (после закалки) и троостосорбита и сорбита после отпуска.

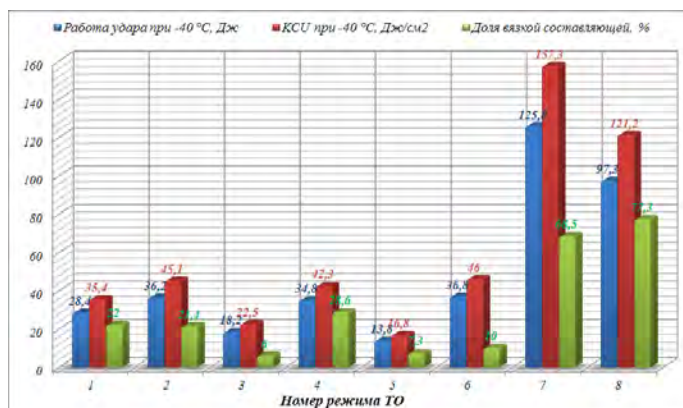


Рисунок 3 – Влияние режима термической обработки на изменение вязкостных свойств стали 32Г2А [1]

Установлено, что нормализация 900 °С с последующей закалкой 850 °С и отпуском 620 °С сталей 35Г2Ф и 32Г2А приводит к существенному повышению их предела прочности, твердости и увеличению доли вязкой составляющей в изломе при испытаниях на ударную вязкость, а также к измельчению микроструктуры в сравнении с результатами закалки и отпуска или нормализации в отдельности (таблица 1).

Таблица 1 – Твердость HRB сталей 32Г2А и 35Г2Ф после термической обработки по различным режимам

№ режима	1	2	3	4	5	6	7	8
Сталь 32Г2А	95,8	93,0	94,0	93,7	95,5	92,0	95,4	95,0
Сталь 35Г2Ф	97,7	93,4	100,4	102,2	95,7	99,9	94,3	93,5

Относительно повышенные значения ударной вязкости образцов стали 35Г2А после обработки по режимам 7 и 8 могут быть связаны с влиянием промежуточной закалки при 850 °С, обеспечивающей эффективную перекристаллизацию зеренной структуры стали 32Г2А и не приводящей к ее укрупнению в процессе длительной

изотермической выдержки в течение 40 мин. Использование более высокой температуры индукционной промежуточной закалки (860 °С) сопровождается существенным снижением значений ударной вязкости сталей 32Г2А и 35Г2Ф из-за укрупнения структуры.

Установленные режимы термообработки могут быть использованы для термической обработки методом объемно-поверхностной закалки, в том числе для колец подшипников, и адаптированы для применения индукционного нагрева. Такая термообработка подразумевает применение индивидуального индуктора для каждого вида и типоразмеров деталей. Равномерный прогрев кольца по сечению при этом должен обеспечиваться за счет правильной формы индуктора и величиной зазора между деталью и поверхностью индуктора. Индуктор должен быть оснащен каналами для циркуляции охлаждающей жидкости. Равномерный нагрев изделий круглой формы обычно достигается при вращении кольца во время подачи напряжения на индуктор, что обусловлено равномерным распределением электромагнитных силовых линий по контуру изделия. Вращение кольца подшипника можно осуществить за счет установки изделия на вращающийся центр под индуктором.

Как известно, при мартенситном превращении (в интервале M_n-M_k) в сталях из-за изменения удельного объема фаз аустенита и мартенсита возникают существенные структурные напряжения [9, 10]. Напряженное состояние может приводить к значительным деформациям детали. В случае сильных отклонений формы изделие может выбраковываться. Уменьшить коробление во время закалки можно, используя специальные штампы, технология применения которых отработана на ОАО «Минский подшипниковый завод» [2].

В работе авторов [1, 2] описана конструкция экспериментального устройства для объемно-поверхностной закалки колец подшипников, которая включает в себя установку ТВЧ с частотой 8 кГц, медный индуктор, специальный штамп для закалки изделия. Закалочное устройство работает по следующему алгоритму: нагрев кольца в индукторе, после достижения заданной температуры изделие перемещается в закалочное устройство. Охладительная камера, куда через систему отверстий попадает вода, герметично закрывается затвором.

Заключение. Исследовано влияние ряда режимов ТО на предел прочности, ударную вязкость, работу удара и долю вязкой состав-

ляющей в изломе, определенные при испытаниях на ударный изгиб (KCV) для сталей 35Г2Ф и 32Г2А. Установлено, что сочетание нормализации 900 °С, последующей закалки 850 °С и отпуска 620 °С для стали 32Г2А приводит к повышению предела прочности, твердости и увеличению доли вязкой составляющей в изломе при испытаниях на ударную вязкость, а также к измельчению микро-структуры в сравнении с результатами закалки при более высокой температуре 860 °С и отпуска или нормализации в отдельности.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке режимов упрочнения сталей для изготовления ответственных деталей, работающих в условиях климатического холода и экстремальных нагрузок.

Литература

1. Исследование возможностей применения упрочняющей термической обработки горячекатаных труб БМЗ с целью достижения требований, предъявляемых ГОСТ 633 для групп прочности К, Е, Л в условиях Севера : отчет о НИР (заключ.) / Белорус. нац. техн. ун-т; рук. темы В.М. Константинов. – Минск, 2013. – 133 с. – № ГР 11014567.

2. Разработка опытно-промышленных технологий и оборудования индукционной термообработки колец подшипников и длинномерных деталей транспортных средств, исследование фазового состава, структуры и свойств среднеуглеродистых сталей : отчет о НИР (заключ.) / Белорус. нац. техн. ун-т; рук. темы П.С. Гурченко. – Минск, 2013. – 188 с. – № ГР 20121128.

3. Identification of the effective grain size responsible for the ductile to brittle transition temperature for steel with an ultrafine grain size ferrite/cementite microstructure with a bimodal ferrite grain size distribution / Ming-Chun Zhao [et al.] // Materials Science and Engineering A, 2011. – V. 528. – No. 12. – P. 421–422.

4. Hwang, B. Low-temperature toughening mechanism in thermo mechanically processed high-strength low-alloy steels / B. Hwang, G.L. Chang, K. Sung-Joon // Metallurgical and Materials Transactions A, 2011. – V. 42. – No. 3. – P. 717–728.

5. Константинов, В.М. Анализ путей повышения хладостойкости ряда углеродистых и низколегированных конструкционных ста-

лей / В.М. Константинов, А.И. Галимский, Б.Б. Хина // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.* – Минск : БНТУ, 2015. – № 36. – С. 177–185.

6. Исследование влияния режимов скоростной термической обработки на структуру и механические свойства трубной стали 32Г2 / А.И. Гордиенко [и др.] // *Литье и металлургия*, 2012. – № 1. – С. 43–47.

7. Андрушкевич, В.В. Энергоэффективные технологии с применением индукционного нагрева в трубной промышленности: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.10 / В.В. Андрушкевич; Электротехнология, СПб, 2016. – 18 с.

8. Константинов, В.М. Структурообразование диффузионного слоя при термоциклическом предварительном и совместном нагреве / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко // *Ползуновский альманах*. – 2012. – № 1. – С. 45-48.

9. Ивашко, В.В. Исследование и разработка технологии термической обработки горячекатаных труб, изготовленных из стали 30ХМА / В.В. Ивашко, С.В. Авдеев. // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сборник научных трудов в 3 кн. Кн. 1. Материаловедение* / С.А. Астапчик [и др.] ; под ред. С.А. Астапчика. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2016. – С. 83–89.

10. Подкустов, В.П. Исследование и разработка технологии производства труб с ускоренным охлаждением в потоке / В.П. Подкустов // *Сталь*. – № 5. – 2001. – С. 41–42.

УДК 669.58

В.М. КОНСТАНТИНОВ, д-р техн. наук,
И.А. БУЛОЙЧИК (БНТУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ ЦИНКОВЫХ ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНОЙ КОРРОЗИИ

В сравнении с непокрытыми сталями скорость коррозии оцинкованных сталей значительно ниже благодаря анодным свойствам цинкового покрытия, а также благодаря образованию защитных