

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЗАКАЛКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КОНСТРУКТИВНОЙ ПРОЧНОСТИ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ

Корниенко О. Ю.¹, Беликов С. В.¹, Сергеева К. И.¹, Аль Катави Али Адван Хаммуд^{1,2}, Ермензина Н. В.¹

¹ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), kc985432@mail.ru

²Diyala University, college of engineering, Diyala, Iraq

В работе исследована возможность применения изотермической закалки для повышения конструктивной прочности толстостенных труб повышенной надежности на основе изучения особенностей изотермического распада переохлажденного аустенита в интервале температур бейнитного превращения. Установлено, что причиной повышения хладостойкости исследованных сталей является наследование исходной морфологии мартенсита ферритом в двухфазной ($\alpha+\gamma$) области и формирование субмелкокристаллической структуры. Определено, что соблюдение условий формирования относительно однородной гетерогенной мартенсито-бейнитной структуры в условиях непрерывного охлаждения позволяет на стали 20Х1МФА получить комплекс свойств, соответствующий группе прочности P110 в соответствии со стандартом API 5CT/ISO 11960.

Ключевые слова: изотермическая закалка, гетерогенные структуры, конструктивная прочность, трубные стали.

ASSESSMENT OF APPLICATION POSSIBILITY OF ISOTHERMAL QUENCHING FOR INCREASING OF CONSTRUCTIVE STRENGTH OF THICK-WALLED INCREASED RELIABILITY PIPES

Kornienko O. Y.¹, Belikov S. V.¹, Sergeeva K. I.¹, Al Katawy A. Adwan^{1,2}, Ermenzina N. V.¹

¹Ural Federal University named after First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia (620002, Ekaterinburg, street Mira, 19), kc985432@mail.ru

²Diyala University, college of engineering, Diyala, Iraq

Possibility of application of isothermal quenching for increasing of constructive strength of thick-walled increased reliability pipes on the basis of studying of isothermal decay features of the overcooled austenite in the bainitic transformation range of temperatures is investigated in our work. It is established that the reason of increase of cold resistance investigated steels is inheritance of initial morphology of martensite by ferrite in two-phase ($\alpha+\gamma$) area and formation of subfine-crystalline structure. It is defined that observance of conditions of formation uniform heterogeneous martensite-bainite structure in the conditions of continuous cooling allows to receive the complex of properties corresponding to group of durability of P110 according to the standard API 5CT/ISO 11960 on steel 20H1MFA.

Key words: isothermal quenching, heterogeneous structure, constructive strength, pipe steels.

Введение

Термическая обработка труб повышенных групп прочности в хладо- и сероводородостойком исполнении осуществляется путем закалки и последующего высокого отпуска. Установлено [1-3, 6], что образование до 50 % нижнего бейнита не ухудшает свойств стали после высокого отпуска, а в некоторых случаях существенно повышает ударную вязкость и хладостойкость. Для исследуемой группы сталей повышение хладостойкости всегда совпадает с улучшением коррозионной стойкости [4, 5], поэтому, найдя путь существенного повышения одного из свойств, мы автоматически повысим и другое. Однако, по нашему мнению, традиционная обработка не полностью раскрывает

потенциал трубных хромомолибденованадиевых сталей с гетерогенными мартенситосодержащими структурами, и представляется необходимым продолжить поиск путей повышения комплекса свойств этого класса сталей методами термической обработки. Наиболее перспективным способом для создания гетерогенных мартенситосодержащих структур, обладающих экстремальной хладостойкостью и ударной вязкостью, представляется прерванная или изотермическая закалка.

Материал и методы исследования

Материалом исследования в данной работе служили стали 20Х1МФА, 25Х2М1ФА, 26Х1МФА, изготовленные по серийной технологии на ОАО «Северский трубный завод»; и сталь 35ХН3МФА, произведенная по серийной технологии на ОАО «Уралмашзавод». Химический состав сталей приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав сталей

Марка стали	Содержание химических элементов, % по массе													
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu	Ni	As	V	Mo	Ca	Al	N ₂
20Х1МФА	0,20	0,58	0,27	0,008	0,003	1,30	0,09	0,10	0,005	0,081	0,41	0,0026	0,026	0,0162
25Х2М1ФА	0,22	0,57	0,24	0,007	0,009	1,75	0,10	0,09	0,006	0,153	0,63	0,0025	0,023	0,0110
26Х1МФА	0,26	0,62	0,25	0,009	0,006	1,60	0,11	0,09	0,005	0,08	0,43	0,0028	0,026	0,0110
35ХН3МФА	0,34	0,34	0,24	0,013	0,010	1,22	0,14	2,88	0,011	0,105	0,33	-	0,003	-

* основа Fe

Термическая обработка сталей 26Х1МФА, 25Х2М1ФА, 35ХН3МФА проводилась в дилатометре. Часть образцов после изотермической выдержки подвергалась отпуску в лабораторных печах типа СНОЛ.

Для изготовления шлифов использовались шлифовальный станок и наждачная бумага различной степени зернистости.

Для определения микроструктуры при больших увеличениях и для микрорентгеноспектрального анализа отшлифованные образцы были исследованы с помощью растровых электронных микроскопов Jeol JSM 6490LV.

Исследование кинетики распада переохлажденного аустенита в изотермических условиях и при непрерывном охлаждении проводилось на дилатометре Linseis L78 R.I.T.A.

Механические испытания на ударный изгиб проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 9454 – 78. Образцы с V – образным надрезом, тип образцов № 11 испытывались на маятниковом копре МК – 30А.

Для определения прочностных и пластических характеристик при испытании на растяжение использовали стандартные цилиндрические пятикратные образцы (тип III) в соответствии с ГОСТ 1497 – 84. Результаты получены с помощью испытательной машины Instron 3382.

Исследования проведены на оборудовании лаборатории «Структурных методов анализа и свойств материалов и наноматериалов» Сетевого центра коллективного пользования уникальным оборудованием УрФУ. Работа проведена в рамках госбюджетной темы № 3.1330.2011 «Управление процессами фазовых и структурных превращений в материалах на основе железа для обеспечения требуемого комплекса свойств».

Результаты исследования и их обсуждение

Для анализа возможности контролируемого выделения бейнита при изотермической закалке проведено подробное изучение кинетики изотермического распада переохлажденного аустенита стали 25X2M1ФА. Показано, что исследованная сталь имеет низкую устойчивость переохлажденного аустенита в интервале температур бейнитного превращения (450...525 °С): наблюдаемый инкубационный период при всех температурах менее 5 секунд, время условно полного превращения 30...75 секунд. Устойчивость несколько увеличивается только после аустенитизации при температуре $t_{\gamma}=1100$ °С (инкубационный период 10 сек, время завершения превращения менее 250 сек), но т.к. в результате такой обработки сильно увеличивается размер аустенитного зерна, его нельзя признать практически значимым. Кроме того, в связи с развитой неоднородностью распределения легирующих элементов исследованная сталь в состоянии, в котором она обычно используется в промышленных условиях, не является перспективной с точки зрения разработки режима изотермической закалки, обеспечивающего наличие в структуре до 50 % равномерно распределенного нижнего бейнита. В то же время наличие неоднородности химического состава делает вполне возможным и без специальной обработки формирование локальных областей шириной около 100 мкм, обладающих оптимальной микроструктурой (~40/60 нижнего бейнита и мартенсита соответственно), окруженных областями бейнита и мартенсита.

В качестве «модельного» материала для изучения возможных причин положительного влияния бейнита на свойства была выбрана сталь 35XНЗМФА, применяемая в энергомашиностроении для изготовления валов роторов. Образцы для исследования отбирались от ковальной заготовки вала. Несмотря на строгое соблюдение на предприятии-изготовителе технологии предварительной термической обработки и горячей пластической деформации исследованная сталь характеризуется существенной локальной химической неоднородностью. Содержание хрома колеблется в пределах 1,2...1,6, никеля 2,6...3,5,

молибдена 0...0,8 % масс. Структурная неоднородность, связанная с ликвацией, имеет не полосчатую, а более сложную «муаровую» морфологию. В процессе изотермической выдержки бейнитное превращение начинается в областях аустенита, обедненных легирующими элементами и имеющих минимальную устойчивость. При достаточно малой общей объемной доле бейнита, распад в этих областях проходит практически на 100 %. По мере увеличения времени изотермической выдержки в процесс превращения вовлекаются все более легированные области аустенита. Приостановка развития превращения за счет резкой закалки приводит к фиксации сложной гетерогенной структуры, состоящей из мартенситных, бейнитных и мартенситно-бейнитных (с разным соотношением) областей. Фрактографический анализ изломов ударных образцов стали 35ХН3МФА совместно с металлографическим анализом позволил установить однозначную связь особенностей макро и микрорельефа поверхности разрушения с микроструктурой образцов в месте разрушения как в свежезакаленном состоянии, так и после высокого отпуска. Наиболее вязко разрушались участки с гетерогенной мартенситно-бейнитной структурой.

Длительный гомогенизационный отжиг стали 26Х1МФА (1000 °С , 24 ч+1100 °С, 24 ч) позволил практически полностью устранить локальную химическую неоднородность. В гомогенизированной стали бейнит в процессе изотермической выдержки равномерно и только при этих условиях по всему объему металла реализовался механизм измельчения мартенситных пакетов за счет фрагментации аустенитных зерен.

Исходя из результатов проведенных экспериментов, можно сформулировать условия применимости способа повышения вязкости разрушения за счет формирования однородной гетерогенной мартенсито-бейнитной структуры в результате изотермической закалки: ликвация легирующих элементов должна быть снижена до уровня, обеспечивающего при выбранной температуре протекание бейнитного превращения в обогащенных и сохранение не превращенного аустенита в обедненных микрообъемах.

Формирование относительно однородной гетерогенной мартенсито-бейнитной структуры в условиях непрерывного охлаждения требует выполнения следующего условия: скорости охлаждения во всех сечениях изделия должны быть выше скорости подавления выделения верхнего бейнита в областях, обедненных легирующими элементами, и ниже верхней критической скорости закалки для областей, обогащенных легирующими элементами.

Если эти условия не могут быть выполнены, тогда необходимо учитывать влияние на энергоемкость и морфологию поверхности разрушения геометрических характеристик гомогенных (мартенситных и бейнитных) и гетерогенных (мартенсито-бейнитных) микрообластей.

Другим важным аспектом при проведении изотермической закалки является учет закономерностей влияния продолжительности выдержки ($t_b=400\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 20\dots5400$ сек) после окончания превращения γ -бейнит на структуру и свойства стали 20Х1МФА (таблица 2). На этом же этапе работ проведено исследование влияния времени изотермической выдержки ($t_b=600\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 20\dots5400$ сек) при температурах повышенной устойчивости переохлажденного аустенита и последующего охлаждения в воде на структуру и свойства стали 20Х1МФА. После всех обработок образцы подвергались низкому отпуску $t_H=150\text{ }^\circ\text{C}$, 90 сек.

Таблица 2. Комплекс механических свойств стали 20Х1МФА после изотермической закалки от температур 400 и 600 $^\circ\text{C}$

400 $^\circ\text{C}$ /600 $^\circ\text{C}$	20 сек	60 сек	180 сек	5400 сек
$\sigma_{0,2}$, МПа	760/840	755/830	790/820	800/820
σ_b , МПа	1105/1120	1100/1170	1080/1155	1110/1140
δ_p , %	9/7	8,5/9	9/9	10,5/8,5
δ , %	28/27	27/27	28/27	30/27
KV, Дж	51/80	52/88	80/85	75/84

Как и ожидалось, выдержка в бейнитном интервале температур (400 $^\circ\text{C}$) не приводит к значительному изменению свойств: $\sigma_{0,2}$ растет на 40 МПа, что можно связать с перераспределением углерода и закреплением дислокаций, образовавшихся при сдвиговом $\gamma \rightarrow \alpha$ превращении. Временное сопротивление практически не изменяется и находится на уровне 1095 ± 15 МПа. Ударная вязкость повышается, что может быть связано со снижением уровня локальных остаточных напряжений. Ускоренное охлаждение после выдержки в интервале повышенной устойчивости закономерно приводит к формированию более прочной структуры, содержащей повышенное количество мартенсита. Однако разница в $\sigma_{0,2}$ 100МПа (после выдержки 20 сек) значительно снижается при увеличении времени выдержки (до 20 МПа после выдержки 5400 сек). Величина σ_b , как и в случае выдержки при низкой температуре, оказалась практически не чувствительной ко времени выдержки и колебалась на уровне 1150 ± 20 МПа. Значительно отличается поведение ударной вязкости – она во всем временном интервале также остается практически неизменной и составляет ~ 85 Дж. Таким образом, в нашем эксперименте наблюдается охрупчивающее действие свежееобразованного бейнита (выдержка до 180 сек). Исчезновение эффекта после изотермической выдержки в течении 180 сек, совпадающее с повышением $\sigma_{0,2}$ на 30-35 МПа, вероятнее всего, связано с процессами перераспределения углерода, протекающими в бейните. Они вызывают

релаксацию напряжений и микроискажений. Кроме того, при изотермической выдержке релаксируют напряжения в аустените вблизи образовавшегося бейнита.

Выводы

Установлено, что в изделиях, изготовленных по существующей технологии из низко и среднелегированных хромомолибденованадиевых и хромоникельмолибденованадиевых сталей, наблюдается локальная неоднородность распределения легирующих элементов, приводящая к формированию в результате изотермической закалки с последующим резким охлаждением сложной гетерогенной структуры, состоящей из мартенситных, бейнитных и мартенситно-бейнитных (с разным соотношением) областей.

Повышение вязкости разрушения за счет измельчения мартенситных пакетов при фрагментации исходных аустенитных зерен бейнитными пакетами реализуется в локальных участках, имеющих гетерогенную структуру с благоприятным сочетанием мартенсита и бейнита, причем за счет постепенного захвата бейнитным превращением все более легированных областей такие участки имеются при любой длительности изотермической выдержки и при любой скорости непрерывного охлаждения формирующей мартенситно-бейнитную структуру.

Сталь 20Х1МФА позволяет получить комплекс свойств, соответствующий группе прочности Р110 в соответствии со стандартом API 5CT/ISO 11960 и М по ГОСТ 632 после изотермической закалки при температуре 400 °С в течение 180...5400 сек (охлаждение после выдержки в воде) или охлаждения в воде после изотермической выдержки при температуре 600 °С в течение 20...5400 сек. В обоих случаях окончательной обработкой являлся низкий отпуск при 150 °С, 1,5 ч.

Список литературы

1. Беликов С. В. Особенности формирования структуры и свойств сталей с гетерогенной бейнито-мартенситной структурой для газо-нефтепроводов / Беликов С. В., Корниенко О. Ю., Ашихмина И. Н., Степанов А. И., Сергеева К. И. // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2010. – № 12 (666). – С. 9–14.
2. Гончар В. Н., Воскобойникова Н. А., Щербакова А. Ф. Влияние промежуточных структур на свойства конструкционной стали // *Известия вузов. Чёрная металлургия.* – 1966. – № 1. – С. 149-153.
3. Насонова О. Ю. Повышение конструктивной прочности Cr-Mo-V сталей методами термической и термомеханической обработок: Диссертация ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2007. – 142 с.

4. Улиг Г. Г., Ревы Р. У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику / Пер. с англ. под ред. А. М. Сухотина. – Л.: Химия, 1989; Пер. изд., США, 1985. – 456 с.
5. Howe A. A. Ultrafine grained steels: industrial prospects // Materials Science and Technology. – 2000. – No. 16. – P. 1264–1266.
6. Tomita Y., Okabayashi K. Mechanical properties of high strength steel of mixed microstructures // Metallurgical Transactions A. – 1985. – No. 16A. – P.73 –82.

Рецензенты:

Потехин Борис Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология металлов», Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург.

Швейкин Владимир Павлович, доктор технических наук, доцент, директор Института дополнительного образования и профессиональной переподготовки, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург.