

УДК 669.158.82

Белосточный А.В.<sup>1</sup>, Троцан А.И.<sup>2</sup>, Коротич И.К.<sup>3</sup>

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ  
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЕЖНОСТЬ  
ГАЗОВЫХ БАЛЛОНОВ ИЗ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ**

*Представлены результаты исследований механических свойств и надежности цельнометаллических газовых баллонов из среднеуглеродистой стали после нормализации и прерванного ускоренного охлаждения с температуры нормализационного нагрева. Показано влияние режимов отпуска на напряженное состояние баллонов.*

Снижение металлоемкости и повышение эксплуатационной надежности являются одним из важнейших проблем современного материаловедения сосудов, работающих под давлением.

Из общего числа этих сосудов, значительную часть составляют цельнометаллические баллоны для сжатых газов, изготавливаемые из среднеуглеродистой стали. Принятым режимом термического упрочнения их является нормализация [1].

Статистический анализ свойств баллонов серийного производства, изготовленных ОАО «ММК им. Ильича» из стали марки Д(Дс), показал, что нормализация является недостаточно эффективным видом термической обработки. При практически равном уровне прочностных свойств, определяющих металлоемкость, нормализация повышает значения ударной вязкости по сравнению с горячекатаным состоянием этой стали. Этот вид термической обработки мало влияет на величину критического коэффициента интенсивности напряжения (вязкость разрушения)  $K_{Ic}$ , характеристики, которая вместе с пределом текучести определяет конструкционную прочность изделия [2]. Обеспечивая измельчение действительного зерна, нормализация не повышает дисперсность перлита и практически не позволяет управлять количеством и характером распределения структурно свободного феррита – основных структурных параметров, определяющих уровень вязкости разрушения [2 – 4].

«Классический» способ повышения комплекса механических свойств среднеуглеродистых сталей – закалка с высоким отпуском – для баллонов является неприемлемым. Закалка этих сталей на мартенсит требует больших скоростей охлаждения, которые могут быть достигнуты при применении в качестве охлаждающей среды воды. При этом в баллонах, характеризующихся нетехнологичной, с точки зрения термообработки, формой (тонкая стенка, большая поверхность охлаждения, сферические переходы) возникают значительные напряжения, которые могут привести к образованию микротрещин. По этой причине для сосудов регламентирована [5] скорость охлаждения при закалке  $V_{охл} \leq 0,8 V_v$ , где  $V_v$  – скорость охлаждения в воде.

Эффективным способом повышения уровня механических свойств среднеуглеродистой стали может стать термическое упрочнение путем прерванного ускоренного охлаждения металла с температур нагрева под нормализацию с последующим отпуском или самоотпуском. Использование в качестве охлаждающей среды водовоздушных смесей позволяет регулировать за счет соотношения вода/воздух скорость охлаждения в широких пределах, а окончание охлаждения при высоких температурах обеспечивает относительно низкий уровень напряжений и, таким образом, исключается возможность возникновения микротрещин.

Обеспечивая некоторое измельчение действительного зерна, этот способ за счет различных скоростей охлаждения позволяет управлять дисперсностью перлита. По данным [4] ускоренное охлаждение среднеуглеродистой стали приводит к существенному повышению характеристик механических свойств, а также величины коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Ic}$  и, таким образом, повышает надежность изделий.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния прерванного ускоренного охлаждения на уровень механических свойств и эксплуатационную надежность цельнометаллических газовых баллонов из стали марки Дс (табл. 1).

<sup>1</sup>ОАО "ММК им Ильича", инж.

<sup>2</sup>ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

<sup>3</sup>ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

Таблица 1 – Химический состав стали

Марка стали	Содержание элементов (в % по массе)						
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
Дс	0,47	0,88	0,29	0,023	0,024	0,10	0,04

Баллоны типа 40-150У нагревали в печи до технологически принятой для стали марки Дс температуры 850 °С, а затем ускоренно охлаждали в спреерном устройстве до температуры 600 °С с последующим охлаждением на воздухе. Скорость охлаждения составляла 9 – 10 °С/с. Отпуск баллонов проводился при температуре 560 °С. Время отпуска составляло 2 часа. Часть баллонов подвергалась принятому [1] для сосудов из среднеуглеродистой стали марки Дс режиму термообработки – нормализации с этих же температур аустенитизации. Механические свойства металла определяли на образцах, вырезанных из цилиндрической части сосудов.

Конструктивную прочность и надежность металла баллонов оценивали по следующим показателям [6]:

- по величине ударной вязкости образцов с предварительно нанесенной усталостной трещиной (КСТ, тип 17 по ГОСТ 9454-78) в интервале температур +20 °С – минус 80 °С, характеризующей способность материала сопротивляться развитию разрушения;
- по значению критической температуры хрупкости, определяемой по кривым хладноломкости, построенным для интервала температур +20 – минус 80 °С, при которой КСТ = 19,6 Дж/см<sup>2</sup>;
- по чувствительности стали к концентраторам напряжений при динамическом и статическом нагружении, соответственно КСУ/КСТ и  $\sigma_b^H/\sigma_b$ , где  $\sigma_b^H$  – временное сопротивление образцов с надрезом глубиной 1,0 мм и радиусом 0,25 мм;
- по показателю  $\sigma_b^{H-50}/\sigma_b$ , характеризующего запас прочности стали в условиях одновременного воздействия концентратора напряжений и пониженной температуры.

Ускоренное охлаждение баллонов с температуры нормализационного нагрева до 600 °С приводит к значительному повышению комплекса механических свойств металла по сравнению с нормализованным с этих же температур нагрева состоянием (табл. 2).

Таблица 2 – Механические свойства стали после различных режимов термообработки \*

Вид термического упрочнения	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta_5$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	КСУ <sup>-50</sup> , Дж/см <sup>2</sup>
Нормализация	705	420	20,5	81	64
Уск. охл. до 600 °С +отпуск 560 °С	856	656	18,2	129	104

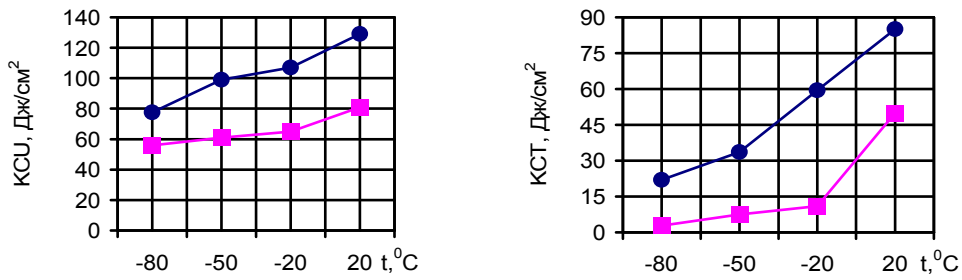
\* - среднее значение 3 измерений.

При значимом повышении прочностных характеристик, достаточно высоком уровне пластичности ускоренное охлаждение обеспечивает существенный рост вязких свойств.

Проведенные исследования показали (рис. 1), что более высокие значения ударной вязкости металла, подвергнутого прерванному ускоренному охлаждению с температуры аустенитизации, наблюдаются в широком интервале температур испытаний, включающем и температурный интервал эксплуатации баллонов (+60 °С – минус 50 °С). Следует отметить, что при всех исследованных температурах испытаний повышение этой характеристики механических свойств связано с ростом ее составляющей – работы развития трещины.

Металлографические исследования показали, что структура металла баллонов после нормализации состояла из феррито-перлитной смеси с размером зерна 8 – 9 балла. Феррит присутствовал в виде сетки по границам зерен.

Структура стали после ускоренного охлаждения имела аналогичный характер. Увеличение скорости охлаждения практически не изменило параметры зеренной структуры. Размер зерна после такой обработки составлял 9 – 8 балл. Ускоренное охлаждение привело к некоторому изменению ферритной составляющей структуры. По сравнению с нормализованным состоянием ферритная сетка по границам была несколько тоньше. Более существенное влияние оказало ускоренное охлаждение на характер перлитной структуры. Дисперсность перлита ускоренно охлажденного металла была выше, он представлял собой сорбитообразный перлит.



- – ускоренное охлаждение до 600 °С, отпуск при 560 °С;
- – нормализация.

Рис. 1 – Температурная зависимость ударной вязкости стали

Ускоренное охлаждение баллонов до 600 °С приводит к существенному повышению показателей надежности по сравнению с нормализованным состоянием (табл. 3).

Величина работы развития трещины при минимальной температуре эксплуатации сосудов –50 °С металла ускоренно охлажденных баллонов существенно превышает значение 19,6 Дж/см<sup>2</sup>, рекомендованное [7] для сосудов из легированных марок сталей, в то время как для нормализованных она находится на весьма низком уровне.

Таблица 3 – Характеристики надежности металла баллонов

Режим упрочнения	KCT, Дж/см <sup>2</sup>	KCT <sup>-50</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	t <sub>кр</sub> , °С	KCU/KCT	σ <sub>в</sub> <sup>H</sup> /σ <sub>в</sub>	σ <sub>в</sub> <sup>H-50</sup> /σ <sub>в</sub>
Нормализация	50	7,5	-10	1,7	1,21	1,32
Уск. охлажд. до 600 °С +отпуск 560 °С	85	33,6	-85	1,51	1,18	1,29

Отношение работы разрушения к работе развития трещины, характеризующее чувствительность стали к концентраторам напряжений при динамическом нагружении, для обоих режимов упрочнения соответствовало принятому [9] критерию надежности для сосудов высокого давления KCU/KCT < 3. При этом значение величины трещиностойкости для ускоренно охлажденных баллонов было несколько выше. Показатели σ<sub>в</sub><sup>H</sup>/σ<sub>в</sub> и σ<sub>в</sub><sup>H-50</sup>/σ<sub>в</sub> превышали единицу, что свидетельствует о малой чувствительности стали после исследованных режимов упрочнения к концентраторам напряжений при статическом нагружении в интервале рабочих температур сосудов [10].

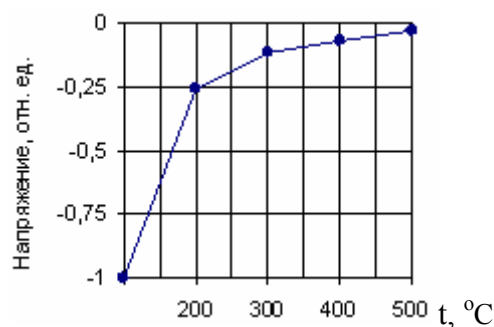


Рис. 2 – Относительное снижение остаточных напряжений в ускоренно охлажденных баллонах при отпуске

Ускоренное охлаждение баллонов приводит к повышению внутренних напряжений в металле. Выполненные по методике разрезания колец [7] качественные исследования напряженного состояния цилиндрической части сосудов показали, что прерванное ускоренное охлаждение их с последующим охлаждением на воздухе приводит к формированию напряжений сжатия, величина которых в несколько раз превышает напряжение металла нормализованных баллонов.

Напряжения сжатия для сосудов, работающих под давлением, стенки которых при рабочих параметрах испытывают растягивающие напряжения, являются благоприятными.

Исследования показали (рис. 2), что отпуск баллонов, подвергнутых прерванному ускоренному охлаждению с последующим охлаждением на воздухе, приводит к значительному снижению их напряженного состояния. При этом величина напряжений, равнозначная напряжениям нормализованных баллонов, достигается уже после часового отпуска ускоренно охлажденных баллонов при температуре 250 °С.

Необходимо отметить, что отпуск нормализованных баллонов приводит не только к количественному, но и к качественному изменению остаточных напряжений цилиндрической

их части. При температуре отпуска 200 °С остаточные напряжения практически полностью снимаются. Более высокие температуры отпуска баллонов приводят к формированию растягивающих остаточных напряжений.

Возможность исключения отпуска после прерванного ускоренного охлаждения баллонов и оценка влияния напряжений на их эксплуатационную надежность может быть установлена по результатам дополнительных исследований.

#### *Выводы*

1. Ускоренное охлаждение цельнометаллических газовых баллонов из среднеуглеродистой стали марки Дс, проводимое с температуры нормализационного нагрева до 600 °С, приводит к значительному повышению уровня их прочностных и вязких свойств по сравнению с состоянием после нормализации.
2. Рост прочностных характеристик ускоренно охлажденного металла обусловлен, в первую очередь, увеличением дисперсности перлита и уменьшением толщины ферритной сетки по границам перлитных зерен. Повышение ударной вязкости связано с ростом работы развития трещин.
3. Эксплуатационная надежность баллонов из углеродистой стали, подвергнутых термическому упрочнению путем прерванного ускоренного охлаждения, по ряду критериев выше, чем нормализованных, и находится на уровне надежности сосудов из легированных сталей, подвергнутых закалке с высоким отпуском (улучшению).
4. Прерванное ускоренное охлаждение баллонов вызывает формирование сжимающих напряжений, благоприятных для сосудов, работающих под давлением. Последующий отпуск баллонов приводит к практически полному снятию остаточных напряжений. Вопрос возможности исключения отпуска требует дополнительных исследований.

#### *Перечень ссылок*

1. ГОСТ 949-73 Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на  $P_p \leq 19,6$  МПа. Технические условия.
2. Структурное состояние колесной стали и уровень характеристик вязкости разрушения в цельнокатаных колесах / И.Г. Узлов, Л.А. Моисеева, А.И. Бабаченко и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1995. – № 5. – С. 79 – 81.
3. *Бабаченко А.И.* Эксплуатационные свойства и структурное состояние стального проката / А.И. Бабаченко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2001. – № 3. – С. 38 – 40.
4. Вязкость разрушения среднеуглеродистой колесной стали в разных структурных состояниях / И.Г. Узлов, Л.А. Моисеева, Н.Г. Мирошниченко и др. // *Сталь*. – 1996. – № 4. – С. 51 – 54.
5. Международный стандарт ISO 9809-1. Газовые баллоны. – Бесшовные стальные газовые баллоны с возможностью повторного наполнения. Ч.1.
6. *Бейлинова Т.А.* Определение оптимального сочетания механических свойств для обеспечения надежности материала баллонов / Т.А. Бейлинова, В.А. Бурнос, Г.Е. Нечай // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1974. – № 9. – С. 71 – 73.
7. К оценке надежности стали 38ХА для баллонов высокого давления / Т.А. Бейлинова, В.М. Янковски, В.А. Бурнос и др. // *Заводская лаборатория*. – 1974. – № 5. – С. 590 – 591.
8. *Лебедев Д.В.* Критерии оценки низкотемпературной конструктивной прочности при одноосном растяжении / Д.В. Лебедев // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1981. – № 6. – С. 17 – 19.
9. *Биргер И.А.* Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.

Рецензент: В.Г. Ефременко  
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 25.02.2008