



## МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СВАРНЫХ БАЛЛОНОВ

Л. М. ЛОБАНОВ, В. А. НЕХОТЯЩИЙ, М. Д. РАБКИНА

*Приведены результаты систематических исследований коэрцитивной силы  $H_c$  и текстуры металла при изготовлении баллонов из высокопрочной стали 30ХГСА. Показано, что для оперативного подбора режимов сварки и термообработки ответственных сварных конструкций целесообразно, наряду с применением традиционных физико-механических методов, на протяжении всей технологической цепочки получения готового изделия применение неразрушающих методов контроля, в том числе основанных на магнитных свойствах стали.*

*The paper presents the results of systematic studies of coercive force  $H_c$  and metal texture in manufacture of cylinders from 30KhGSA high-strength steel. It is shown that for a fast selection of welding and heat treatment modes for critical welded structures it is rational, in addition to application of the traditional physico-mechanical methods, to apply the non-destructive control methods, including those based on the magnetic properties of steel, during the entire technological sequence of manufacturing the finished product.*

Промышленный выпуск облегченных сварных баллонов высокого давления из высокопрочных среднелегированных сталей обеспечивается современными технологиями [1, 2]. Однако при производстве небольших партий штампованных тонкостенных конструкций, где их применение экономически нецелесообразно, возникают условия, требующие, во избежание трещинообразования, специальных технологических приемов.

Целью работы является совершенствование процесса изготовления баллонов, предназначенных для хранения энергоносителей при давлении 15 МПа, с использованием метода магнитного контроля.

Исходным материалом служили термообработанные листы толщиной 2,5 мм из стали 30ХГСА следующего химического состава, мас. %: 0,31 С; 0,97 Mn; 1,07 Si; 0,01 S; 0,017 P; 0,08 Ni; 0,1 Cu; 0,99 Cr; 0,02 V; 0,03 Mo; 0,005 Ti. Механические характеристики гарантировались сертификатом качества (табл. 1), несмотря на то, что эта сталь склонна к образованию холодных трещин [3]. При этом достаточно высокие значения пластичности металла в состоянии поставки должны были обеспечить приемлемую обрабатываемость листов в процессе изготовления баллонов.

Металлографическим анализом основного металла установлено, что его структура представляет собой ферритно-бейнитную смесь со следами полосчатости в приповерхностных сечениях, характерной особенностью которых являются обезуглероженные зоны, чему, по всей вероятности,

способствует повышенное содержание кремния (> 1 %). Микротвердость в этих зонах в 1,7 раза ниже по сравнению с микротвердостью срединных сечений. Местами обезуглероживание распространяется на глубину до 200 мкм (рис. 1). Поскольку в этих зонах были обнаружены микрорасслоения, представляло интерес определить кристаллографическую ориентацию в листе, так как характер текстуры металла обуславливает возможность развития в нем подобных дефектов [4, 5].

Результаты исследования текстуры листа методом построения обратных полюсных фигур показали, что в исходном состоянии в металле сформировалась типичная текстура прокатки, характерная для металлов и сплавов с ОЦК-решеткой, которая описывается как  $\{001\}\langle 110\rangle$  (основная компонента) и  $\{112\}\langle 110\rangle + \{111\}\langle 110\rangle$  (дополнительные компоненты) (рис. 2, табл. 2). Это означает, что параллельно плоскости прокатки располагаются кристаллографические плоскости семейства  $\{001\}$ ,  $\{112\}$  и  $\{111\}$  с направлениями  $\langle 110\rangle$ , лежащими в этих плоскостях и параллельными направлению прокатки. Интенсивность описанной текстуры увеличивается при приближении к середине толщины листа (рис. 2, б). Так,

Таблица 1. Механические свойства стали 30ХГСА

Документ	Состояние материала	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %
30ХГСА ГОСТ 4543	Закалка плюс отпуск	883...1226	687	10
30ХГСА ГОСТ 11268	Высокий отпуск	490...740	—	20
Сертификат 41260	» »	620	—	21
Протокол контрольных испытаний в ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ	Высокий отпуск	595	390	28

В работе принимали участие: канд. техн. наук А. Н. Тимошенко, инж. Т. Г. Соломийчук, инж. Р. И. Дмитриенко (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины), д-р физ.-мат. наук В. В. Усов, канд. техн. наук Н. М. Шкатуляк (ЮГПУ им. К. Д. Ушинского).

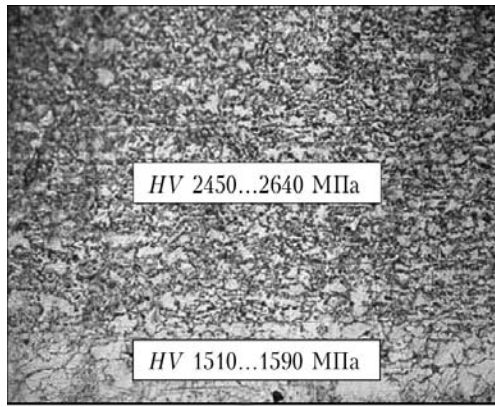


Рис. 1. Микроструктура основного металла с обезуглероженным слоем у поверхности,  $\times 200$

плотность плоскостей скола  $\{001\}$  на поверхности листа составляет 1,21; плоскостей сдвига  $\{112\}$  — 1,15 и  $\{111\}$  — 1,12. В срединных слоях соответственно 1,94; 1,7 и 2,58; в то же время при нагреве листов в ферритной области текстура сначала «обостряется» (при температурах  $\approx 240...270$  °С), а затем с увеличением температуры приблизительно до 325 °С существенно уменьшается (табл. 2).

Таким образом, результаты исследования химического состава и микроструктуры основного металла позволяют предположить, что, с одной стороны, величина углеродного эквивалента  $C_{\text{экв[МИС]}} = 0,69$ , а с другой — наличие обезуглероженных слоев и микрорасслоения могут существенно влиять на зарождение и развитие трещин в процессе формообразования баллона и последующего получения сварного соединения. Кроме того, одной из основных причин, способствующих расслоению листов как в состоянии поставки, так и в процессе обработки давлением при изготовлении баллонов и при их дальнейшей эксплуатации, является кристаллографическая текстура

Таблица 2. Изменение полюсной плотности  $P_{hkl}$  в зависимости от температуры нагрева

Плоскости, $\{hkl\}$	Исходное состояние	После нагрева, °С		
		240	270	325
$\{001\}$	1,21	1,31	1,07	0,98
$\{112\}$	1,15	1,16	1,15	1,18
$\{111\}$	1,12	1,08	0,93	1,02
$\{013\}$	1,01	1,26	1,28	1,25
$\{011\}$	0,99	0,76	0,7	0,82
$\{123\}$	0,90	0,78	0,86	0,82

Таблица 3. Влияние термической обработки на коэрцитивную силу, А/см

Контролируемый участок	Состояние элементов баллона		Состояние готового изделия	
	после сварки	после отпуска 680 °С, 45 мин, охлаждение воздухом	после закалки 880 °С, 30 мин, охлаждение водой	после отпуска 570 °С, 30 мин, охлаждение водой
Основной металл	9,5...10,5	7,5...8,5	26...30	10,5...11,5
Сварное соединение	13,5...15,5	6,5...10,0	28...30	9,5...10,0

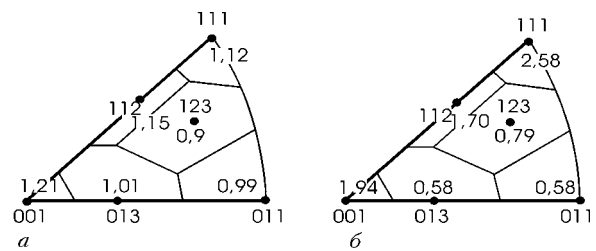


Рис. 2. Распределение полюсной плотности, нанесенное на стандартный кристаллографический треугольник: а — с поверхности листа; б — на середине толщины

основного металла. Ослабление острой текстуры, как правило, снижает склонность листа к расслоению [5, 6].

Основным типом сварных соединений баллонов были приняты стыковые швы (без разделки кромок), полученные аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом по слою активирующего флюса за два прохода с полным проплавлением при поддуве аргоном обратной стороны шва.

Металлографическим анализом сварных соединений установлено, что в состоянии после сварки металл шва и околошовная зона имеют преимущественно бейнитную структуру (рис. 3, а) с микротвердостью  $HV 2970...2870$  МПа. Интересно отметить, что обезуглероженный слой в околошовной зоне наблюдается в состоянии после сварки, а в сварном шве — после закалки с отпуском. Также, как и в случае основного металла, характерным признаком этого слоя является не только визуальное отличие (рис. 3, б, в), но и пониженные значения микротвердости ( $HV 1760$  МПа). При этом соотношение значений твердости основной массы металла и обезуглероженного слоя остается на уровне 1,7 раза, изменяется только их абсолютная величина. Так, после охлаждения в воду с температуры 880 °С металл шва приобретает типичную структуру закалки (рис. 3, в) с микротвердостью  $HV 3570...3830$  МПа. Обезуглероженный слой со структурой зернистого феррита (рис. 3, г) имеет микротвердость  $HV 2210...2280$  МПа.

Предварительные эксперименты, включающие формообразование обечайки, с последующим выполнением продольных швов, показали, что в сварном соединении имеют место холодные трещины. Кроме того, в околошовной зоне из-за обезуглероживания приповерхностных слоев развиваются расслоения, наследующие расслоения основного металла.

С целью предупреждения указанных дефектов на протяжении всей технологической цепочки от обработки металла давлением до сварки и последующего испытания готового изделия структурное состояние основного металла и сварных соединений контролировали с помощью магнитометрического метода, в основу которого положено измерение коэрцитивной силы  $H_c$  [7–9]. Значения  $H_c = 9,5...10,5$  А/см, которым соответствовала высокая пластичность основного металла в состоянии поставки были взяты за ориентир, на уровне которых должен был находиться металл после деформации и сварки. Как показали измерения, в сварных соединениях обечаек баллонов были зафиксированы значения  $H_c$  на уровне 13,5...15,5 А/см (табл. 3), что свидетельствует об их склонности к трещинообразованию. Для подбора оптимальных режимов сварки и термической обработки был опробован ряд технологических мероприятий. Прежде всего, в соответствии с данными химического состава согласно методике, предложенной в работе [10], была выполнена оценка значений  $A_{C1}$  и  $A_{C3}$  (755,2 и 865 °С соответственно). Эти данные хорошо согласуются с результатами определения критических температур методом дилатометрического анализа ( $A_{C1} = 755...770$  °С и  $A_{C3} = 840...855$  °С).

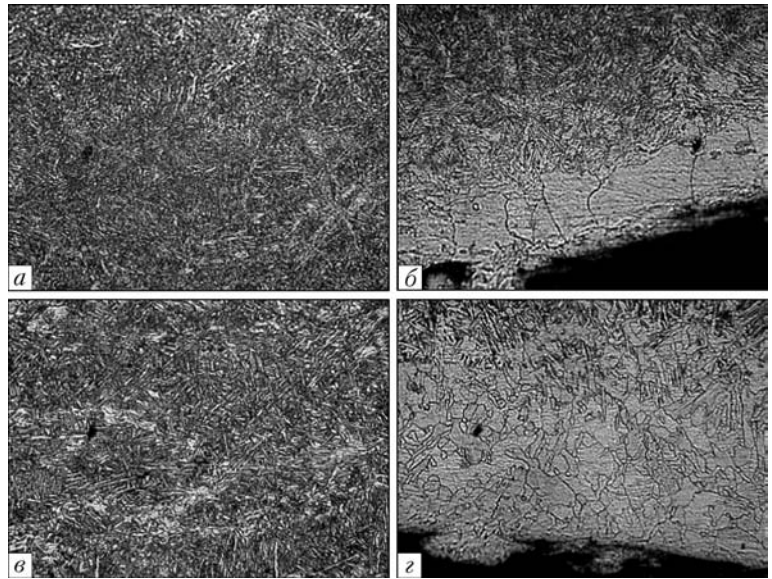


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 500$ ) сварного соединения в состоянии после сварки (а, б) и после последующей термообработки (в, г); а, в — центр шва; г — обезуглерожженный слой в шве; б — металле ЗТВ

С учетом установленного межкритического температурного интервала дальнейшее варьирование режимами термической обработки показало, что наиболее благоприятное влияние на структуру сварного соединения оказывает высокий отпуск. Так, отпуском при 680 °С, который следовал за сваркой каждой обечайки, значения  $H_c$  были понижены до уровня 6,5...10 А/см в сварном шве и до 7,5...8,5 А/см в основном металле. Кроме снятия остаточных напряжений, высокая температура отпуска, как известно, оказывает также влияние на текстурную перегруппировку в прокатанном металле.

Термообработкой, состоящей из закалки и отпуска, были достигнуты значения коэрцитивной силы основного металла и сварного соединения, при которых обеспечиваются требуемые прочностные характеристики сварного баллона (табл. 3). В соответствии с уточненными режимами термообработки были обработаны все баллоны партии. При этом однородность структуры металла цилиндрической стенки, оцениваемая разбросом значений  $H_c$ , не пре-

вышала 1 А/см, что вполне отвечает установленным закономерностям.

Последующие технологические испытания на сплющивание колец, вырезанных из пробных обечайек, а также 100 %-й магнитопорошковый контроль, не обнаружили каких-либо трещин ни в шве, ни в околошовной зоне.

Предусмотренное технологией упрочнение баллона для достижения запаса прочности на уровне 2,6 было осуществлено на опытных образцах. На испытание образцы поступали со следующими значениями коэрцитивной силы  $H_c$ : основного металла — 11...12 и сварного соединения — 10,5...11,5 А/см. Согласно данным, полученным при испытании однократной нагрузкой, образцы разрушились без осколков (рис. 4, б) в диапазоне давлений 39...40 МПа; соответственно запас прочности баллонов 2,6...2,66; максимальные относительные деформации, измеренные после разрушения баллонов, составили 2,2...2,3 %. При этом коэрцитивная сила основного металла, измеренная после разрушения, увеличилась до порогового значения  $H_c = 18...19$  А/см, соответствующего состоянию предразрушения стали 30ХГСА.

Таким образом, результаты выполненной работы показали, что с помощью измерения коэрцитивной силы металла на протяжении всей технологической цепочки получения готового изделия могут быть получены сварные баллоны из ферромагнитных



Рис. 4. Общий вид баллона: а — до испытания; б — после испытания



сталей с необходимыми прочностными характеристиками.

1. Патон Б. Е., Савицкий М. М., Кузьменко Г. В. Перспективы применения высокопрочных среднелегированных сталей в сварных баллонах высокого давления для автотранспорта // Автомат. сварка. — 1994. — № 3. — С. 4–9.
2. Фазовые и структурные превращения при сварке и дуговой обработке соединений стали 30ХГСА / В. М. Кулик, В. Г. Васильев, Г. М. Григоренко и др. // Там же. — 2007. — № 9. — С. 10–15.
3. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 247 с.
4. Гиренко В. С., Рабкина М. Д. О слоисто-вязком и слоисто-хрупком разрушениях в сварных соединениях конструкционных сталей // Сварные конструкции: Тр. междунар. конф. — Киев, 1990. — С. 160–162.
5. Влияние кристаллографической текстуры на склонность к слоистому разрушению низколегированных малоуглеродистых сталей / В. В. Усов, Н. М. Шкатуляк, В. С.

- Гиренко и др. // Изв. АН СССР. Металлы. — 1990. — № 1. — С. 120–125.
6. Лякишев Н. П., Эгиз И. В., Шамрай В. Ф. Текстура и кристаллографические особенности разрушения материала труб из стали Х70 // Металлы. — 2000. — № 2. — С. 68–72.
  7. Долинский В. М., Стогний В. Н., Новик В. Г. Анализ разрушений и возможности контроля состояния металла кислородных баллонов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 4. — С. 33–36.
  8. Лобанов Л. М., Бондаренко А. Ю., Бондаренко Ю. К. Оценка сварных соединений конструкций магнитным (коэрциметрическим) методом для прогнозирования индивидуального остаточного ресурса // Там же. — С. 3–8.
  9. Безлюдько Г. Я. Практика оценки состояния сварных швов по изменением магнитной характеристики — коэрцитивной силы металла // Там же. — С. 20–22.
  10. Касаткин О. Г., Винокур Б. Б., Пилушенко В. Л. Расчетные модели для определения критических точек стали // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1984. — № 1. — С. 20.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,  
Киев

Поступила в редакцию  
19.01.2009

## НОВАЯ КНИГА

### **В. А. Троицкий. Визуальный и измерительный контроль деталей машин, металлоконструкций, сварных соединений: Учебн. пособие. — Киев, Феникс, 2009. — 276 с.**

Вышла из печати книга Троицкого В. А. «Визуальный и измерительный контроль деталей машин, металлоконструкций, сварных соединений».

В книге изложены требования к порядку проведения работ по визуальному и измерительному контролю, включая требования к подготовке и аттестации персонала, средствам контроля, организации работ, документированию результатов при изготовлении, монтаже, ремонте и эксплуатации металлических конструкций, трубопроводов, энергетических объектов и др. сооружений.

Визуальный и измерительный контроль основных материалов и комплектующих проводится в качестве входного при их поступлении на предприятие с целью подтверждения соответствия требованиям нормативной документации, а также при подготовке заготовок перед началом технологических операций, например, перед сборкой соединения под сварку или перед гибкой, формовкой и т. п. и обязательно предшествует радиационным, магнитным, ультразвуковым методам поиска внутренних дефектов.

Приводятся описание разнообразных приборов, методики выполнения работ, правила приемки изделий.

Рассмотрены основополагающие международные стандарты (EN 473, ISO 9712) по подготовке персонала, которые были использованы наряду с материалами фундаментальных работ на эту тему и многолетний опыт специалистов ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины по контролю качества сварных соединений.

Настоящее пособие будет полезно дефектоскопистам, выполняющим визуально-измерительный контроль, а также абитуриентам, готовящимся получить право на проведение этого вида НК.



**По вопросам приобретения книга обращаться по адресу:  
03680, г. Киев-150, ул. Боженко, отд. № 4. Тел.: 287-26-66, факс: 289-21-66**