

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА РУЛОНИРОВАННЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Я.М. Клебанов, А.Г. Бурмистров, Н.Н. Столяров

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассматривается проблема установления диапазонов допустимых конструктивных размеров и свойств материала стенки, технологических параметров и минимальных температур площадки строительства вертикальных цилиндрических резервуаров, полученных методом рулонирования.

Ключевые слова: *резервуары для нефти, рулонирование, сварные узлы, хладостойкость, хрупкая прочность, ползучесть, приспособляемость, малоцикловая усталость, сварные напряжения, пластические деформации.*

Строительство вертикальных цилиндрических резервуаров основано на заводском изготовлении сварных полотнищ, сворачиваемых для транспортирования в многослойные габаритные рулоны. Для этой цели на предприятиях используются установки с двухсторонней стыковой сваркой листов специализированными сварочными автоматами. При монтаже резервуара выполняются только работы по разворачиванию рулона, подгонке и сварке одного вертикального шва. Этот способ строительства резервуаров повысил качество сварных соединений, сократил сроки строительства и их стоимость. Однако систематических испытаний механических свойств, приобретаемых сварными швами листовых конструкций при рулонировании, не проводилось.

Изготовление рулонов сопровождается многократным упругопластическим деформированием. С учетом механической неоднородности сварных соединений получается, что в прилегающей к шву зоне при свертывании и последующем развертывании рулона возникают заметные пластические деформации. Кроме того, технология изготовления цилиндрических резервуаров предопределяет наличие многих дефектов, каждый из которых в условиях низких температур строительства резервуара и дальнейшей эксплуатации может привести к локальной потере герметичности и, возможно, к катастрофическому разрушению. Пластическое деформирование стенки в процессе развертывания рулонов и монтажа резервуаров особенно неблагоприятно сказывается на пластичности и вязкости металла, если происходит после его длительного старения.

В данной работе рассматривается проблема установления диапазонов допустимых конструктивных размеров и свойств материала стенки, технологических параметров рулонирования и минимальных температур площадки строительства вертикальных цилиндрических резервуаров, полученных методом рулонирования. С этой целью был проведен комплекс экспериментальных и теоретических исследований.

Экспериментальные исследования решают две основные задачи.

Яков Мордухович Клебанов (д.т.н., профессор), заведующий кафедрой «Механика».
Анатолий Георгиевич Бурмистров (к.т.н., доцент), доцент кафедры «Механика».
Николай Николаевич Столяров (д.ф.-м.н., профессор), профессор кафедры «Механика».

1. Определение характеристик прочности, упругости, пластичности и ползучести материала сварного соединения на разных этапах процесса получения рулона. Эти характеристики необходимы для компьютерного моделирования механического поведения и оценки прочности изделия при его изготовлении и эксплуатации.

2. Получение экспериментальных данных по ударной прочности сварных соединений в зависимости от конструктивных размеров, технологических параметров рулонирования и температур испытаний. Эти данные предназначены прежде всего для непосредственного обоснования области применения рулонизируемых резервуаров.

Методика экспериментальных исследований. В качестве материала для исследований была выбрана листовая сталь 09Г2С толщиной 14; 16; 18 мм. Химический состав представлен в таблице.

Химический состав партий исследованной стали

№ плавки	Толщина, мм	Содержание основных элементов									
		C, %*100	Si, %*100	Mn, %*100	P, %*100	S, %*100	Cr, %*100	Ni, %*100	Cu, %*100	As, %*1000	N, %*1000
КЛ136272	14	10	55	135	11	6	3	2	5	3	5
ЭЛ28149	16	9	63	44	8	5	7	8	15	8	8
ЭЛ27412	18	9	56	137	9	2	7	11	17	9	8

Сталь плавки ЭЛ28149 несколько отличается по составу заниженным содержанием марганца, которого по ГОСТ 19281-89 должно быть 1,3 – 1,7 %.

Изготовление полотнищ из стальных листов стандартных размеров и рулонирование проводилось по заводской технологии на ОАО «Самарский резервуарный завод». Автоматическая сварка под флюсом выполнялась электродной проволокой марки Св-08ГАС диаметром 4 мм. На рис. 1 показана схема сворачивания полотнища в рулон и процесс изготовления сварного шва по «верхней» технологии. Выпрямление рулона осуществляется для образования второго шва. Вырезка заготовок для образцов проводилась газовой резкой. Затем, чтобы исключить термическое влияние резки, отрезной фрезой из заготовок вырезались полосы шириной 90 мм различной длины в зависимости от требуемого количества образцов.

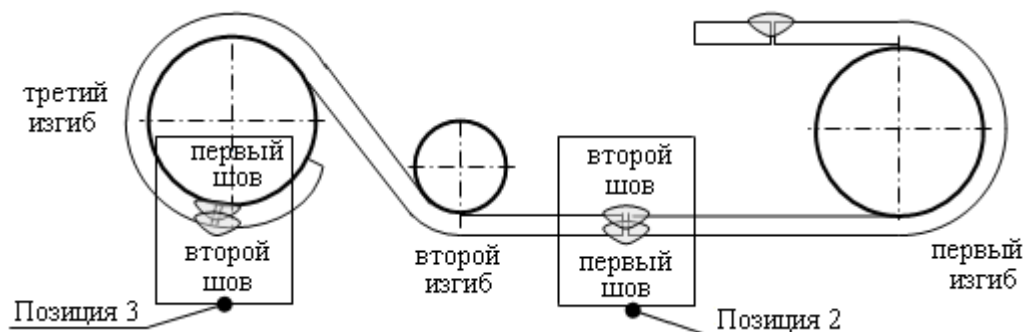


Рис. 1. Сварные соединения листов стали, подвергшиеся рулонированию по «верхней» технологии

Отбор заготовок производился по ГОСТ 7564-73 [1]. Поверхность заготовок выравнивали фрезерованием и доводили толщину до 10 мм. Причем со стороны того сварного шва, где должен быть вырезан образец, выполняли фрезерование на глубину не более 0,5 мм. Затем эта поверхность подвергалась травлению реактивом Гейна, содержащим хлористый аммоний и хлористую медь. В результате травления четко обозначались границы зоны термического влияния с основным металлом и сварным швом.

Заготовки образцов вырезались на следующих позициях:

- позиция 1 – сварное соединение, не подвергнутое рулонированию (не показано);
- позиция 2 – сварное соединение, подвергнутое изгибу и выпрямлению (первый шов);
- позиция 3 – сварное соединение, подвергнутое третьему изгибу (первый шов);
- позиция 4 – сварное соединение, разогнутое в плоскость после рулонирования (не показано).

Для испытаний на статическое растяжение были изготовлены пятикратные образцы диаметром 3 мм по ГОСТ 1497-84 [2], а для испытаний на ударную вязкость – образцы типа 11 с концентратором вида V по ГОСТ 9454-84 [3]. Образцы отбирались из основного металла (ОМ), металла сварного шва (СШ) и зоны термического влияния (ЗТВ). Ось образца на растяжение и надрез образца на ударную вязкость устанавливались вдоль сварного шва посередине или на границе ЗТВ. Анизотропия механических свойств зоны шва не исследовалась в связи с малым размером шва и ЗТВ в поперечном направлении.

Испытания образцов на растяжение проводились на машине Р-5. Устанавливалась шкала нагрузок 0 – 1000 кг с записью диаграммы растяжения в масштабе по деформации 100:1, цена деления шкалы – 2 кг. Испытания на ударный изгиб проведены на маятниковом копре фирмы «Мор и Федергафф» с энергией удара 30 кгм.

Для охлаждения образцов использовался этиловый спирт, охлажденный твердой двуокисью углерода (сухой лед).

Время выдержки образцов при охлаждении составляло от 10 до 15 мин согласно ГОСТ 11150-84 [4] с учетом времени на установку образца. Переохлаждение составляло 5 °С при испытаниях на удар и 10 – 15 °С при испытаниях на растяжение.

Температура охлаждающей жидкости замерялась двумя низкотемпературными термометрами с ценой деления 1 градус. Испытания проводились при температурах: 20 °С (комнатная), 0 °С, -20 °С, -40 °С, -60 °С.

Результаты экспериментальных исследований

Статическое растяжение и стационарная ползучесть. На рис. 2 показана характерная диаграмма деформирования на растяжение образца, вырезанного в зоне термического влияния (ЗТВ) первого сварного шва из листа 16 мм, прошедшего все технологические операции рулонирования и разогнутого в плоскость после рулонирования (позиция 4). Оснастка обеспечивала необходимые условия закрепления образца, т. е. отсутствовало проскальзывание образца в захватах испытательной машины.

Из результатов испытаний на растяжение можно видеть, что на диаграммах появляется широкий «зуб» текучести, превышающий до 7,5 % уровень предела прочности. На диаграммах напряжений образцов, вырезанных в позиции 1, такой «зуб» отсутствует: пластическое деформирование характеризуется тем, что максимальное напряжение на «зубе» меньше, чем предел прочности, который достигается при раз-

витых пластических деформациях, – в нашем случае это 15 % и выше. Когда максимальная величина напряжений на «зубе» оказывается и наибольшим напряжением на всей диаграмме, это свидетельствует о заметном снижении способности материала к упрочнению и даже о его пластическом разупрочнении. Такое снижение свойств, во-первых, имеет место в материале сварного шва в сравнении с основным материалом, во-вторых, появляется при снижении температуры, и в-третьих, особенно выражено после рулонирования и распрямления.

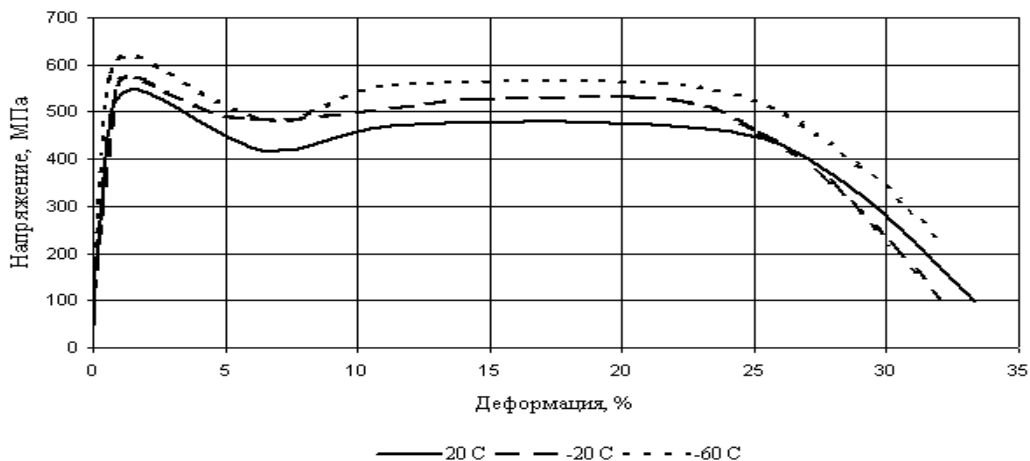


Рис. 2. Усредненные диаграммы деформирования

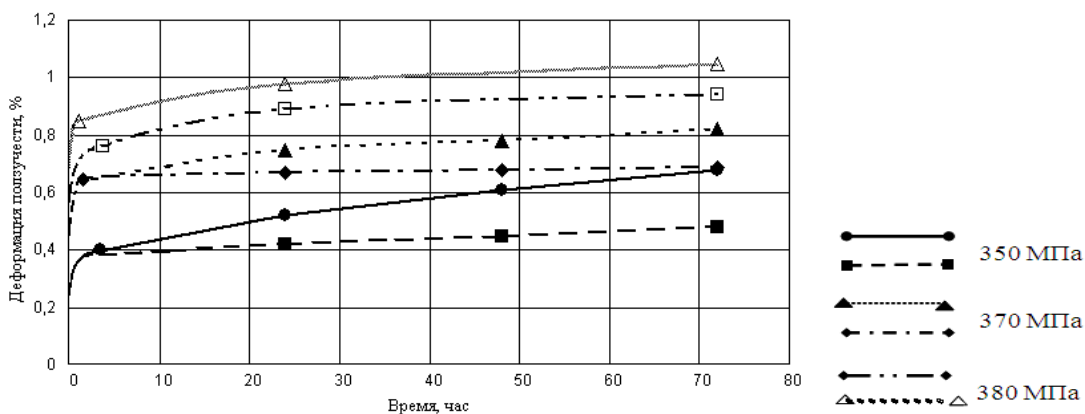


Рис. 3. Стационарные кривые ползучести при температуре 20 °С в течение трех первых суток

Еще одной причиной снижения способности материала к упрочнению и его охрупчивания являются деформации ползучести. При проведении испытаний скорость движения активного захвата разрывной машины составляла 90 мм/мин – наибольшая возможная скорость для машины Р-5. Это связано с тем, что сталь 09Г2С проявляет значительную чувствительность к скорости деформирования. Установлено, что при меньшей скорости деформирования за время нагружения успевает накапливаться неупругая деформация, «зуб» текучести отсутствует. Это связано с ползучестью материала. Она особенно выражена в первые секунды и минуты после приложения на-

грузки. Выбранные относительно высокие скорости нагружения отвечают условиям, при которых охлажденный образец сохраняет требуемую температуру в процессе испытания. Кроме того, высокая скорость нагружения соответствует тому, что разрушение резервуара происходит с очень высокой скоростью.

Экспериментальные кривые стационарной ползучести показаны на рис. 3. Из приведенных диаграмм ползучести следует, что хотя скорость деформаций постепенно уменьшается, их накопление практически не прекращается в течение 32 суток.

Ударная вязкость и оценка хладостойкости рулонизируемой стали. При тех же трех обстоятельствах, что указаны выше, отмечается и заметное снижение ударной вязкости. Усредненные экспериментальные зависимости ударной вязкости от температуры опыта показаны на рис. 4 и 5.

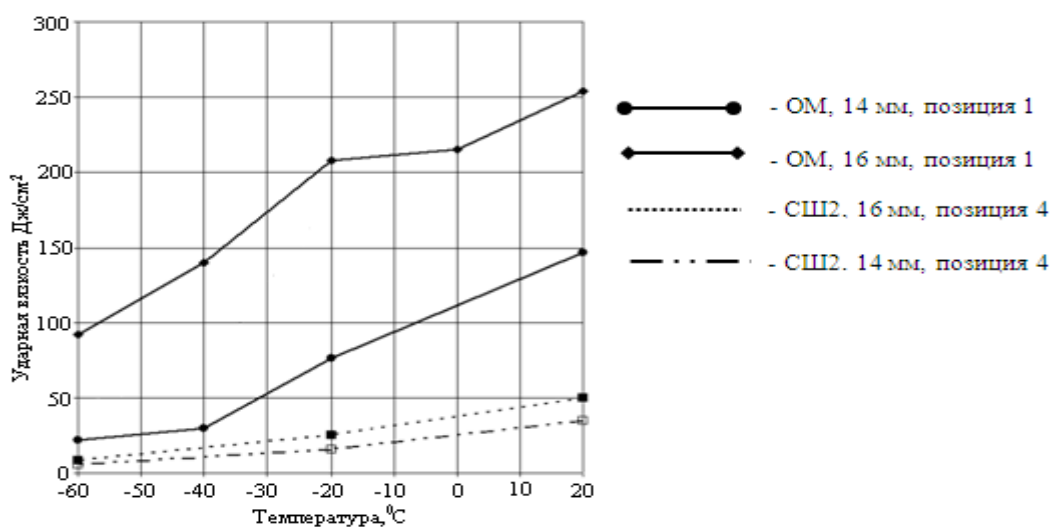


Рис. 4. Влияние процесса рулонирования на ударную вязкость материала сварного шва

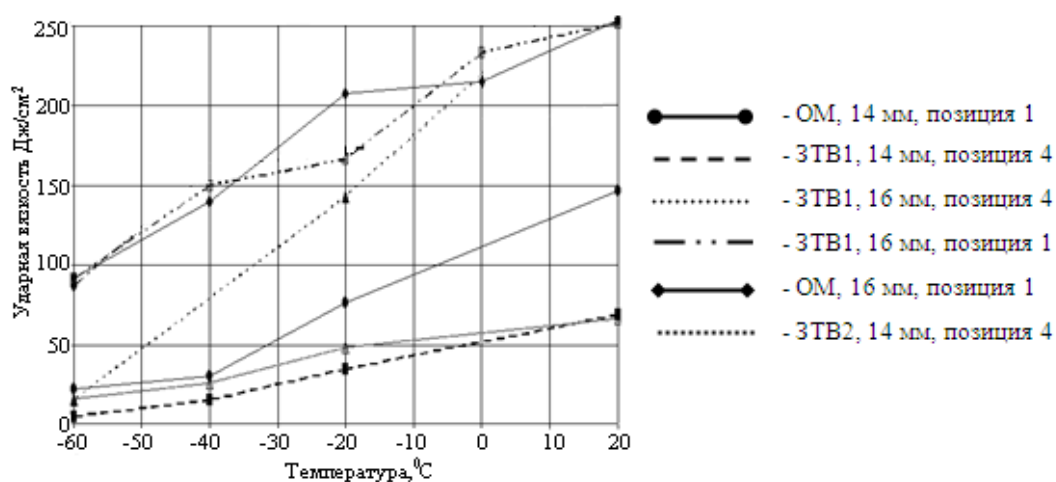


Рис. 5. Влияние процесса рулонирования на ударную вязкость стали в зоне термического влияния

Из рис. 4 следует, что для основного металла до рулонирования ударная вязкость листов толщиной 16 мм во всем диапазоне температур испытания выше, чем для листов толщиной 14 мм, что может быть связано с тем, что листы были прокатаны из разных плавок.

Испытания на ударную вязкость стандартных образцов с различной остротой надреза широко используются для оценки хладостойкости стали. При этом в исследовательской практике в качестве критериев хладостойкости применяют, как правило, критическую температуру хрупкости T_k , для определения которой используются энергетические, деформационные и структурные характеристики. Изменение указанных характеристик от максимальных значений при вязких изломах до минимальных при кристаллических происходит в достаточно широком интервале температур. Поэтому при определении T_k пользуются, как правило, пороговыми значениями измеряемых величин, в качестве которых обычно принимают величину ударной вязкости a_n от 15 до 50 Дж/см², долю вязкости составляющей в изломе B от 10 до 90 % и величину поперечной деформации Δ от 0,36 до 1,3 мм [5, 6]. Соответственно выбранным критериям значения критической температуры хрупкости могут изменяться в широких пределах [5].

Измеряемые величины характеризуют вязкость стали на различных стадиях деформирования и разрушения. Так, ударная вязкость образцов с полукруглым надрезом КСU и поперечная деформация Δ в большей степени характеризуют сопротивление стали на стадии до образования трещины, а количество вязкой составляющей в изломе и ударная вязкость образцов с трещиной – напротив, сопротивляемость хрупкому разрушению на стадии распространения трещины. При этом если хладостойкость на стадии до образования трещины нормируется посредством регламентирования ударной вязкости КСU, определяемой при испытании образцов типа I по ГОСТ 9454-78, то нормирование сопротивляемости стали хрупкому разрушению с учетом образования и распространения трещины ГОСТами и ТУ не предусматривается. Вместе с тем трещиностойкость стали в значительной степени определяет сопротивляемость хрупкому разрушению элементов конструкции. Это связано как с наличием исходных трещиноподобных дефектов, допущенных при изготовлении конструкций, так и с образованием усталостных, коррозионных и других повреждений в процессе эксплуатации. Снижение влияния трещиноподобных дефектов на несущую способность элементов конструкций, особенно в связи с возникновением хрупких состояний, может быть достигнуто применением стали с достаточной вязкостью при наличии трещины. В этой связи для нормирования хладостойкости проводят испытания на ударную вязкость образцов с острым надрезом [7]. Уменьшение радиуса надреза позволяет снизить энергетические затраты, связанные с деформированием на стадии до образования трещины. Однако распределение энергетических затрат в общем балансе поглощенной энергии может существенно зависеть от чувствительности стали к остроте надреза, что обуславливает ограниченность применения устанавливаемых эмпирических корреляций между характеристиками трещиностойкости K_c (K_{Ic}) и ударной вязкостью КСV [7].

Корреляционная зависимость между значениями КСU и КСV была получена в работе [8]:

$$КСU = 1,2 КСV + B,$$

где $B = 32,5$ Дж/см².

Воздействие сварки и технологических операций рулонирования способствует хрупкому разрушению. Тепловой цикл сварки оказывает неблагоприятное воздействие на структуру стали. Знакопеременный изгиб приводит к уменьшению ее пласти-

ческого ресурса. В результате критические температуры вязкохрупкого перехода смещаются в положительную сторону.

Нормативное требование по ударной вязкости $KCV \geq 35 \text{ Дж/см}^2$ [9] для рулонированного материала сварного шва листов 16 мм, обладавших достаточно высокой исходной ударной вязкостью $KCV = 255 \text{ Дж/см}^2$ при $20 \text{ }^\circ\text{C}$, выполняется при температуре выше $-2 \text{ }^\circ\text{C}$. Листы 14 мм в исходном состоянии обладали относительно низкими характеристиками ударной вязкости: $KCV = 35 \text{ Дж/см}^2$ соответствует примерно $-38 \text{ }^\circ\text{C}$. После рулонирования этой характеристике ударной вязкости для металла ЗТВ1, 14 мм соответствует температура $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, для металла ЗТВ2, 14 мм – температура $-33 \text{ }^\circ\text{C}$, для металла СШ2, 14 мм – температура $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Как видим, материал сварных швов не отвечает требованию обладания механическими свойствами не ниже свойств, установленных для выбираемых сталей [9].

Температура испытаний определяется по эксплуатационной температуре и толщине листа в соответствии с [9]. Используя это соответствие, из приведенных выше данных можно сделать вывод, что конструкцию из листов 14 мм не рекомендуется использовать при отрицательных температурах. Если обеспечить свойства материала сварного шва не хуже свойств материала зоны термического влияния, температура эксплуатации должна быть не менее $-40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Согласно [10] увеличение первой критической температуры хрупкости элементов конструкций вследствие каждого из двух факторов: сварки и технологической операции составляет $20 \text{ }^\circ\text{C}$, а второй критической температуры – $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Данные испытаний на ударную вязкость, приведенные на рис. 4 и 5, не всегда соответствуют этим значениям.

Твердость. Несмотря на то, что все образцы из ЗТВ вырезались строго одинаково по описанной выше методике, данные их испытаний характеризуются заметным разбросом. Это объясняется существенной стохастической неоднородностью свойств ЗТВ. В этой связи были выполнены замеры твердости шлифов сварных швов. Замер осуществлялся в соответствии с ГОСТ 22761-77, НВ 2,5/187,5/10 (шкала Бринеля). Изменение твердости в поперечном сечении сварного шва листов 16 мм свидетельствует, что в зоне термического влияния (ЗТВ) размером 2,5 мм она меняется от значения 168 НВ для сварного шва до 152 НВ для основного материала.

Заключение. Проведено систематическое экспериментальное исследование рулонированных стыковых сварных соединений стали 09Г2С толщиной 14, 16 и 18 мм. Показано, что заметное снижение способности материала к пластическому упрочнению и охрупчивание:

- 1) имеют место в сварном шве по сравнению с основным материалом;
- 2) проявляются при снижении температуры в климатическом диапазоне температур;
- 3) возникают после длительной выдержки в условиях ползучести;
- 4) особенно выражены после операций рулонирования и распрямления.

В стали 09Г2С при напряжениях выше предела текучести накапливаются заметные деформации ползучести. Скорость ползучести особенно велика в первые секунды и минуты после окончания нагружения. И хотя эта скорость с течением времени постепенно уменьшается, накопление деформаций ползучести практически не прекращается.

Сварка и изгибы соединений при рулонировании увеличивают критические температуры хрупкости на величины, примерно соответствующие известным рекомендациям [10].

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о необходимости обеспечения выполнения требований к механическим свойствам сварного шва, которые должны быть не ниже свойств, установленных в [9] для выбираемых сталей.

Полученные в статье результаты подтверждаются рекомендациями ряда отраслевых стандартов, где запрещается сооружение новых резервуаров из рулонных заготовок объемом свыше 5000 м куб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 7564-73. Общие правила отбора проб, заготовок и образцов для механических и технологических испытаний.
2. ГОСТ 1497-84. Метод испытаний на растяжение.
3. ГОСТ 9454-78. Метод испытаний на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах.
4. ГОСТ 11150-84. Методы испытаний на растяжение при пониженных температурах.
5. Махутов Н.А. Методы определения критической температуры хрупкости для материалов и элементов конструкций // Заводская лаборатория. – 1981. – № 2. – С. 78-81.
6. Баско Е.М., Махутов Н.А. Определение критических температур хрупкости строительных сталей при динамическом инициировании и распространении трещин // Заводская лаборатория. – 1981. – № 11. – С. 70-73.
7. Шур Д.Н., Шнак С.А. Деформационный критерий для определения критической температуры хрупкости материалов при испытании на ударную вязкость // Заводская лаборатория. – 1981. – № 11. – С. 73-74.
8. Исследование и определение условий возникновения, распространения и остановки хрупких трещин в сварных листовых конструкциях (Заключительный отчет) / ЦНИИпроектстальконструкция. – № ГР 01860036727. – Инв. № 02880031661. – М., 1988. – 69 с.
9. ПБ 03-381-00. Правила устройства вертикальных стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов / Госгортехнадзор России. – М.: Госгортехнадзор, 2003. – 168 с.
10. Разработка методов оценки прочности и долговечности листовых строительных конструкций с учетом трещиноподобных сварочных дефектов и усталостных трещин на основе достижений в механике разрушения материалов. Рекомендации по расчету на хрупкую прочность резервуаров, кожухов доменных печей (Отчет) / ЦНИИпроектстальконструкция. – № ГР 018800359969; Инв. № 02890852595. – М., 1989. – 68 с.

Статья поступила в редакцию 30 мая 2012 г.

DEFORMATION AND STRENGTH PROPERTY EXPERIMENTAL STUDY OF A ROLLED WELD MATERIAL

I.M. Klebanov, A.G. Burmistrov, N.N. Stoliarov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The work aims to establish the range of valid design of sizes and properties of the wall material, process parameters and minimum temperature of the construction site of vertical cylindrical tanks, manufactured by the method of rolling of.

Keywords: *Oil storage tanks, rolling of, welded assemblies, cold resistance, brittle fracture, creep, shakedown, low cycle fatigue, welding stress, plastic deformation.*

*Iakov M. Klebanov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Anatoly G. Burmistrov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Nikolay N. Stoliarov (Dr. Sci. (Phys.& Math.)), Professor.*