



ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СПИРАЛЬНОШОВНЫХ ТРУБ КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. С. ПИСЬМЕННЫЙ, д-р техн. наук, **А. С. ПРОКОФЬЕВ**, канд. техн. наук, **Р. С. ГУБАТЮК**, инж.,
А. А. ПИСЬМЕННЫЙ, канд. техн. наук,
В. В. ПОЛУХИН, **Р. В. ЮХИМЕНКО**, **А. Р. ГАВРИК**, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изучено влияние высокотемпературной термомеханической обработки на прочностные свойства швов сварных спиральношовных труб, изготовленных из стали 08кп толщиной 1 мм. Показано, что такая обработка швов в соединениях низкоуглеродистых сталей позволяет обеспечить получение качественных сварных соединений труб с высокими эксплуатационными свойствами.

Ключевые слова: высокочастотная сварка, спиральношовные трубы, сварной шов, прочность шва, заготовки конструкционного назначения, методика расчета, бандажные кольца, образцы

Известно, что изготовление корпусов сосудов, работающих под давлением, из бесшовных труб обусловлено высокими требованиями, предъявляемыми к их изготовлению и эксплуатации [1]. Однако себестоимость производства бесшовных труб выше, чем сварных, поэтому целесообразно оценить перспективы применения для изготовления корпусов сосудов, работающих под давлением, спиральношовных труб (СШТ). Их производят с помощью высокопроизводительного и малоотходного технологического процесса соединения — высокочастотной сварки (ВЧС), применяемой для производства СШТ различных диаметров [2].

Применение ВЧС при производстве СШТ позволяет

производить трубы различного диаметра из ленты одной и той же ширины за счет изменения угла наклона шва в сварном соединении;

изготавливать трубы большого диаметра и трубные сварные конструкции при относительно несложном технологическом процессе по сравнению с производством прямошовных труб;

производить тонкостенные трубы большого диаметра с высокой точностью;

обеспечить низкие капиталовложения.

В настоящее время прослеживается тенденция повышения требований к качеству электросварных труб, в частности, по показателю прочности сварных соединений [3]. В этой связи оценку перспективности применения СШТ как альтернативы электросварным трубам следует рассматривать в свете усовершенствования ВЧС по пути автоматизации как соответственно процесса сварки, так

и операций контроля производства [4], а также его сочетания с термомеханической обработкой.

При эксплуатации емкостей под высоким давлением для достижения приемлемых экономических показателей необходимо соблюдать оптимальные соотношения давления транспортируемой среды и металлоемкости сосудов высокого давления. Это напрямую связано с прочностными показателями применяемых марок сталей, прочностью сварных швов труб [5].

С развитием и совершенствованием способа ВЧС к существенным преимуществам производства СШТ следует отнести и высокую скорость сварки по сравнению с дуговыми процессами и возможность производства тонкостенных и особотонкостенных труб, имеющих отношение диаметра к толщине стенки 50 и более.

Формирование сварного шва в процессе ВЧС при производстве СШТ происходит в трубоэлектросварочном стане, где степень деформации при получении сварного шва может быть реализована в диапазоне 15...65 % и более, в зависимости от материала заготовок и необходимой степени контактного давления для вытеснения легкоплавкой фазы [6–8].

Сварной шов формируется под давлением в твердой фазе с подплавлением свариваемых кромок, что увеличивает площадь шва и минимизирует его толщины непосредственно в процессе осадки — встречной взаимной деформации нагретых кромок деталей, в сжатом пространстве и последующей прокатки кромок. При этом процесс формирования шва происходит в условиях направленного течения и деформации металла кромок, при их взаимном скольжении по различным сопрягаемым поверхностям в сложных пространственных условиях в трубоэлектросварочном стане.

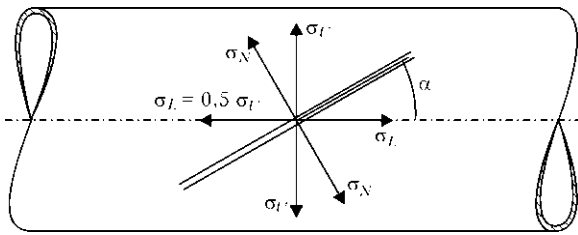


Рис. 1. Схема напряжений, действующих на спиральный шов (σ_N — нормальные; σ_L — продольные; σ_U — тангенциальные)

Важнейшим элементом в СШТ является участок шва. При эксплуатации, вследствие внутреннего давления, продольные швы трубы (например, прямошовные трубы) подвергаются более высоким нагрузкам, чем поперечные. В этом случае спиральный шов занимает как бы промежуточное положение. Значение напряжений в нем под нагрузкой зависит от угла шва к оси трубы (рис. 1). При этом нагрузки, действующие на него, составляют 60...70 % нагрузок, действующих на продольный шов [9].

Спиральный шов в процессе своего формирования подвергается комплексному воздействию ряда факторов [10, 11]: гибке исходного материала ленты (штрипса) по радиусу изготовленной трубы; растяжению штрипса под углом наклона спирального шва к образующей изготовленной трубы; прокатке полученного сварного шва; дифференцированному нагреву при сварке как основного металла, так и сварных кромок; принудительному охлаждению полученного шва; нагреву для снятия остаточных напряжений и нормализации структуры сварного шва.

Следует учитывать, что в результате резки рулона листового проката на ленту кромки штрипса имеют нагартовку и подаются на сварку в нагартованном виде, а температура шва в процессе ВЧС достигает 1200 °С, т. е. при выполнении швов в СШТ металл подвергается высокотемпературной термомеханической обработке (ВТМО).

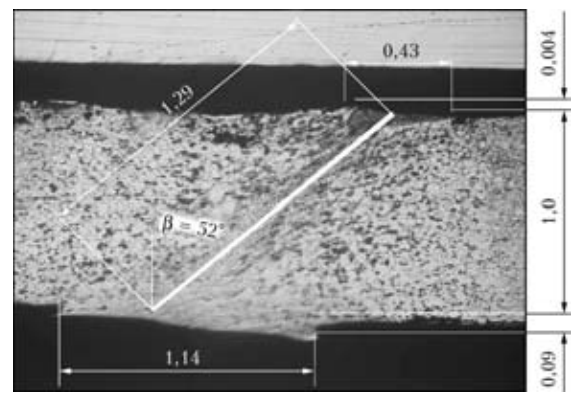


Рис. 3. Макрошлиф (×30) поперечного сечения соединения СШТ (наружная поверхность СШТ внизу)

Целью настоящей статьи является оценка влияния ВТМО на прочностные свойства СШТ. Для этого в ИЭС им. Е. О. Патона на лабораторной установке были изготовлены СШТ со швами, подвергнутыми ВТМО.

На корпусе СШТ выбирали участки с различным расположением спирального шва (рис. 2). Исследования проводили на образцах, вырезанных из корпуса СШТ, определяли прочностные свойства и проводили металлографические исследования.

Диаметр изготовленной из стали 08кп СШТ составил 108,3 мм; толщина используемого штрипса $S = 1$ мм; ширина используемого штрипса $h = 101$ мм; угол наклона спирального шва к образующей изготовленной трубы $\alpha = 25^\circ$.

Макрошлиф соединения представлен на рис. 3. Нагретые токами высокой частоты свариваемые кромки штрипса с нахлестом поступали в сварочные валки, где происходила осадка с вытеснением подплавленного металла, а затем сформированный шов подвергался прокатыванию при высоких температурах. В результате сложной пластической деформации сварной шов в поперечном сечении отклонялся от вертикали на угол β , приближающийся к 52° . Его длина при этом

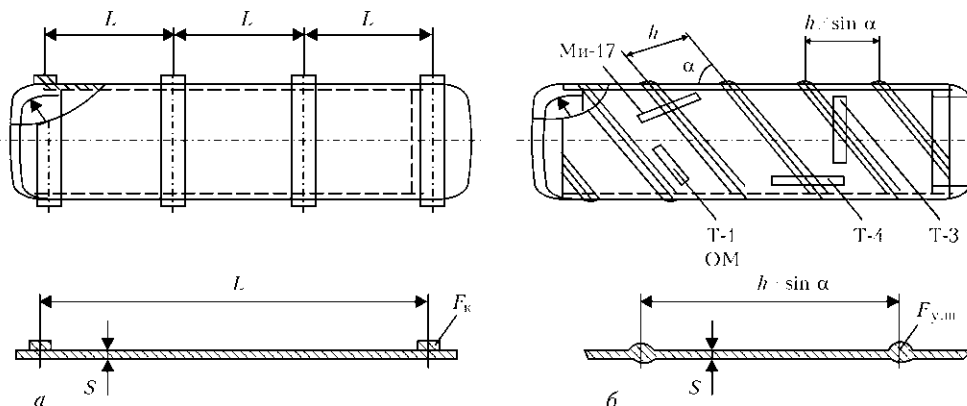


Рис. 2. Схема вырезки образцов: *a* — корпус из тонкостенной трубы и бандажными кольцами; *б* — то же, но из СШТ; Т-1 — образцы из основного металла; Ми-17 — образцы сварного соединения с классическим расположением сварного шва; Т-4 — образцы Ми-18 с наличием сварного соединения в виде косога шва, вырезанные по образующей СШТ; Т-3 — образцы Ми-18 (специальные) с наличием сварного соединения в виде косога шва, вырезанные по радиальной поверхности СШТ; F_k , $F_{y.ш}$ — соответственно площадь сечения бандажного кольца и усиления шва

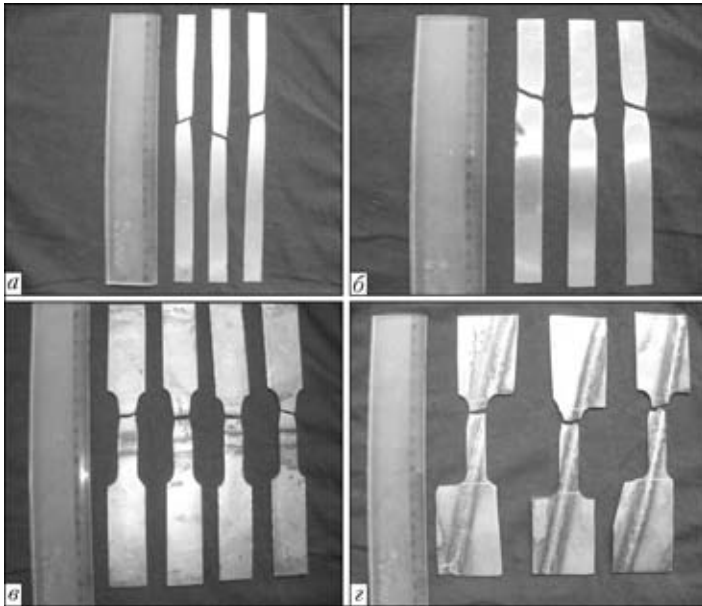


Рис. 4. Внешний вид образцов Т-1 (а), Ми-17 (б), Т-4 (в) и Т-3 (г)

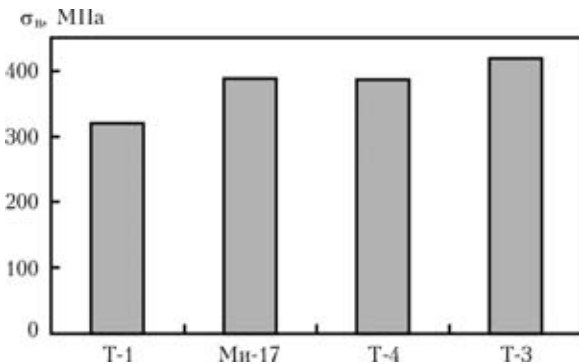


Рис. 5. Временное сопротивление разрыву образцов, испытанных в соответствии со схемой вырезки (см. рис. 2)

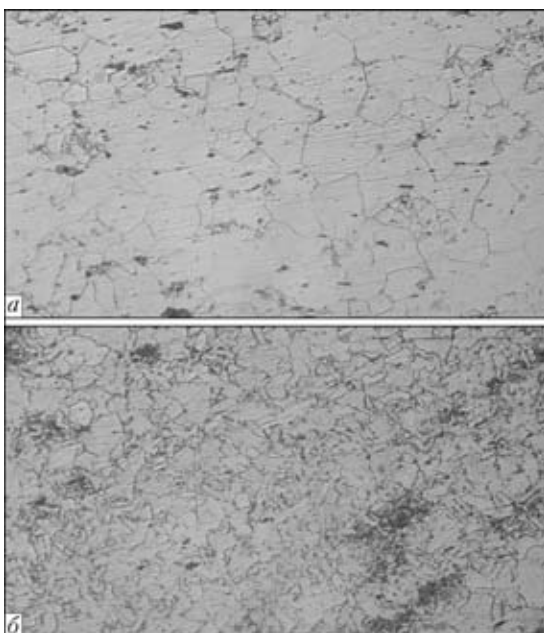


Рис. 6. Микроструктура (×400) основного металла (а) и металла шва (б)

достигала 1,29 мм при толщине основного металла 1 мм, что существенно улучшает условия сопротивления разрушению сварного соединения [12].

Наружное усиление шва составляло 0,9 мм, ширина 1,14 мм, а внутреннее — 0,04 мм при ширине 0,43 мм. При этом усилие осадки составило 1600 Н, а площадь контактного пятна — 1 мм².

Из изготовленной трубы в соответствии с ДСТУ 3245–95 [13] были отобраны следующие образцы (см. рис. 2) [14]: Т-1 — 3 шт.; Ми-17 — 3 шт.; Т-4 — 4 шт.; Т-3 — Ми-18 специальные — 3 шт., которые были подвергнуты испытаниям на растяжение.

Временное сопротивление разрыву образца Т-1 составляло 320 МПа; Ми-17 — 404,4; 380,7; 383,2; Т-4 — 384,2; 389,5; 390,5; 394,4; Т-3 — 445,4; 407,3; 408,4.

Разрушение всех образцов произошло по основному металлу (рис. 4). Образование линий Чернова (линий Людерса) (рис. 4, б) указывает на наличие сдвигов поверхностных слоев металла под действием тангенциальных напряжений σ_U (см. рис. 1) [15]. Из рис. 5 видно, что нормальные и продольные напряжения (σ_N и σ_L) образцов (см. рис. 1) сварного шва превысили нормативное напряжение разрушения образцов основного металла на 22 %, а тангенциальные напряжения σ_U на 30 %, что, очевидно, обусловлено воздействием ВТМО.

Для проведения металлографических исследований упрочненного шва из СШТ вырезали четыре образца. Они содержали участки спирального шва и были взяты равномерно по всей длине сварной конструкции.

Макроструктура зоны шва при большом увеличении (см. рис. 3) свидетельствует об отсутствии несплавлений, несплошностей, пор и других дефектов.

Установлено, что структура основного металла вблизи металла ЗТВ представляет собой полигональный феррит с выделением углерода по границам зерен в виде третичного цементита [16], а также в виде отдельных округлых карбидных включений.

Далее при переходе от основного металла в сторону шва структура меняется от чисто ферритной до ферритно-перлитной. При этом округлые включения цементита постепенно растворяются и на их месте образуется перлит, который выявляется в виде пятен с более сильной травимостью, чем феррит (см. рис. 3, 6, а).

Чем ближе к шву, тем больше реализуется процесс образования перлита в бывших местах скопления карбидов (рис. 6, б). Изменение структуры металла ЗТВ с ферритной на ферритно-перлитную

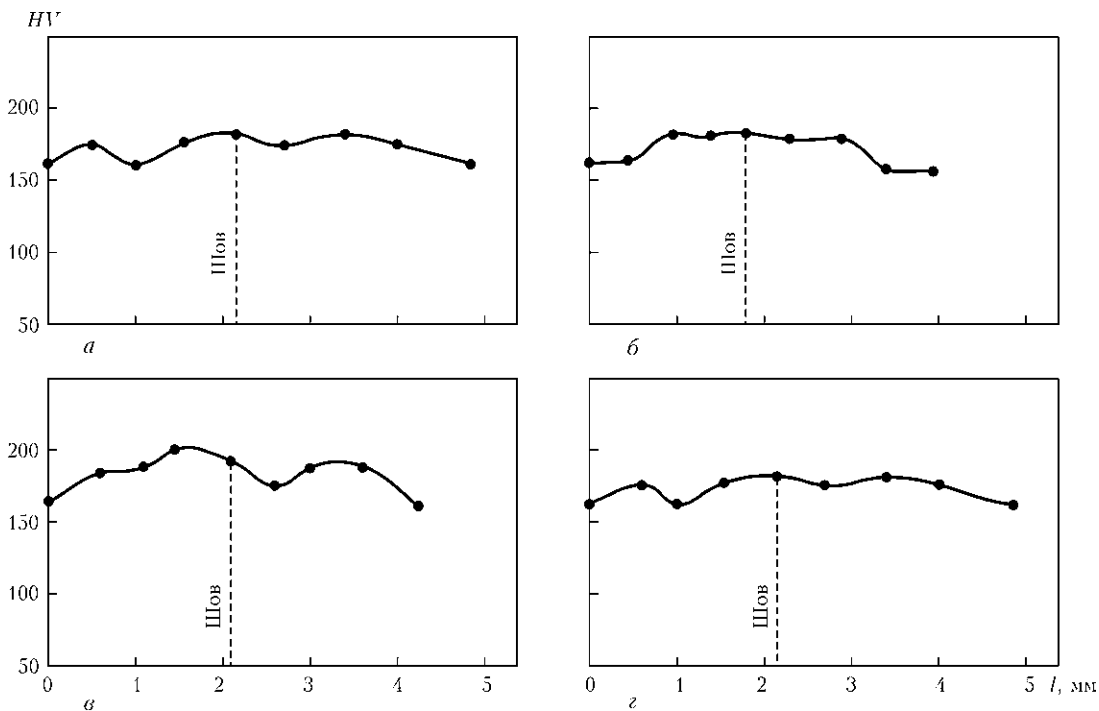


Рис. 7. Распределение твердости поперек сварного соединения: а — образец Т-1; б — Ми-17; в — Т-4; г — Т-3

свидетельствует о нагреве металла этой зоны до температуры растворения карбида железа (выше точки A_{c1}) с последующим охлаждением [16].

Твердость данной ферритно-перлитной структуры несколько выше, чем феррита в структуре основного металла, и составляет порядка HV 180...200, т. е. превышает твердость основного металла на 12...25 %. Твердость основного металла находится на уровне HV 160, а размер зерен больше, чем в металле шва (рис. 6).

В районе шва (рис. 6, б) металл имеет ферритную структуру с равномерно распределенными карбидами, размер зерен меньше, чем в основном металле и ЗТВ, что свидетельствует о нагреве до температурной области гомогенного аустенита — превышение точки A_{c3} [16]. Твердость

этого участка выше, чем твердость основного металла и составляет порядка HV 180...190.

Установлено, что твердость шва и металла ЗТВ превышает твердость основного металла на 12...25 % (рис. 7).

Упрочнение металла в сварном шве и околошовной зоне обусловлено действием ВТМО. Применение ВТМО способствует упрочнению металла шва в СШТ, что в свою очередь повышает прочностные показатели самой трубы как заготовки конструкционного назначения.

Для оценки влияния ВТМО на прочностные показатели самой СШТ как заготовки конструктивного назначения в ИЭС им. Е. О. Патона был апробирован метод расчета показателей прочности СШТ со швом, подвергнутым ВТМО. Расчет выполнен в соответствии с существующими и

принятыми методиками [1, 12, 15, 17]. При этом показатели прочности СШТ сравнивали с прочностными показателями бесшовной трубы аналогичных геометрических размеров.

Были приняты следующие допущения:

трубные заготовки имели одинаковые геометрические размеры: диаметр и толщину стенки S ; обе трубные заготовки выдерживали одинаковое внутреннее давление P ;

в результате ВТМО в районе шва СШТ наблюдалось упрочнение, т. е. прочностные показатели в шве выше, чем в основном металле;

для компенсации действия упрочненного шва в заготовке из СШТ расчет проводили с учетом последовательной установки на трубной заготовке, изготовленной из бесшовной трубы, внешних бандажных колец (действие бандажных колец эквивалентно действию упрочненного шва в СШТ).

Проведенные расчеты показали, что:

для предотвращения потери формы трубной заготовки, изготовленной из бесшовной трубы, под действием предельного внутреннего давления P необходимо на ее наружной поверхности установить последовательно на определенном в результате расчета расстоянии L внешние бандажные кольца;

расстояние между внешними бандажными кольцами L на трубной заготовке, изготовленной из бесшовной трубы, должно превышать в 2 и более раз (в зависимости от марки стали) расстояние между витками упрочненного шва $h/\sin \alpha$, т. е. $L > h/\sin \alpha$; при $h/\sin \alpha \rightarrow 1 \ll L$ плотность навивки штрипса увеличивается и соответственно возрастает прочность сварной СШТ;

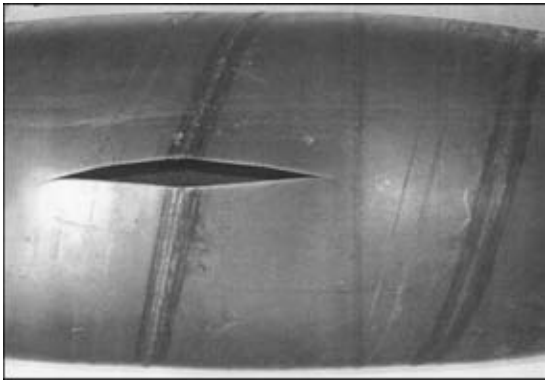


Рис. 8. Разрушение цилиндрической поверхности корпуса

суммарное действие упрочненного шва превышает упрочняющее действие бандажных колец на единицу длины СШТ.

Расчетные результаты были проведены экспериментально на реальном образце СШТ. Использован фрагмент СШТ с приваренными заглушками как макет корпуса сосуда, работающего под давлением, который был опрессован внутренним давлением и доведен до разрушения [1]. При разрушении макета корпуса сосуда гидростатическое давление разрушения превысило расчетное на 18 %. Корпус сосуда приобрел бочкообразную форму, что свидетельствует о потере формы. Само разрушение произошло по образующей цилиндрической поверхности корпуса — по основному металлу (рис. 8).

Выводы

1. Сварной шов, подвергшийся ВТМО, приобретает коэффициент усиления по отношению к основному металлу равный 1,22...1,31, а твердость превышает твердость основного металла на 12...25 %.

2. Напряжения разрушения образцов со сварным швом превышают нормативное напряжение разрушения образцов основного металла на 22...30 %.

3. ВТМО швов в СШТ из конструкционных низкоуглеродистых сталей, в частности 08кп, позволяет получать качественные соединения с высокими эксплуатационными показателями, что увеличивает конструкционную прочность СШТ на 18 %.

4. Проектирование и изготовление сварных конструкций с использованием СШТ в качестве

заготовки конструкционного назначения требует дальнейшего изучения применительно к сталям повышенной прочности.

1. *Безопасная эксплуатация паровых котлов, сосудов и трубопроводов.* Сост. В. И. Чернега. — Киев: Техніка, 1976. — 528 с.
2. *Творцы стальных артерий / Г. И. Гуляев, О. А. Семенов, А. А. Шведченко и др.* — Днепропетровск: Промінь, 1989. — 151 с.
3. *Киути М.* Новейшие тенденции в производстве электросварных труб // *Новости черн. металлургии за рубежом.* — 2011. — № 1. — С. 55–58.
4. *Wiebe J., Scheller W.* Blick uber den Tellerrand // *Praktiker.* — 2010. — № 6. — S. 248–251.
5. На ОАО «Уралтрубпром» состоялся пуск трубоэлектросварочного стана «630» и всей линии по производству электросварных труб // *Сварщик.* — 2009. — № 4. — С. 5.
6. *Структура и фазовый состав швов, выполненных капиллярной пайкой с приложением давления / В. Д. Табелев, Н. Л. Карета, А. И. Панасенко и др.* // *Автомат. сварка.* — 1985. — № 11. — С. 26–29.
7. *Лебедев В. К., Табелев В. Д., Письменный А. С.* Ударная вязкость стыковых соединений, паяных с пластическим деформированием основного металла // *Там же.* — 1993. — № 8. — С. 29–31.
8. *Табелев В. Д.* О формировании соединений при пайке с пластическим деформированием основного металла // *Материалы и технология пайки.* — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины, 1991. — С. 50–54.
9. *Анненков Н. И., Колупанов О. В.* Современное состояние производства и применения спиральношовных труб // *Стр-во трубопроводов.* — 1996. — № 4/5. — С. 12–18.
10. *Термомеханическое упрочнение арматуры большого диаметра / О. Ю. Ефимов, А. Б. Юрьев, Ю. Ф. Иванов и др.* // *Изв. вузов. Черн. металлургия.* — 2008. — № 12. — С. 49–53.
11. *Влияние больших деформаций в горячем состоянии на структуру и свойства низкоуглеродистой стали / Н. Г. Колбасников, О. Г. Зотов, В. В. Дураничев и др.* // *Металлообработка.* — 2009. — № 4. — С. 25–31.
12. *Майзель В. С., Навроцкий Д. И.* Сварные конструкции. — Л.: Машиностроение, 1973. — 304 с.
13. *Балони сталні зварні для скраплених вуглеводневих газів на тиск до 1,6 МПа. Загальні технічні умови: ДСТУ 3245-95.* — К.: Держспоживстандарт, 2003. — 15 с. — (Національний стандарт України).
14. *Каталог образцов для испытаний металлов / Под ред. В. К. Лебедева.* — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1983. — 120 с.
15. *Сопровождение материалов / Г. С. Писаренко, В. А. Агарев, А. Л. Квитка и др.; под ред. Г. С. Писаренко.* — Киев: Вищ. шк., 1973. — 672 с.
16. *Гудремон Э.* Специальные стали. Под ред. А. С. Займковского, М. Л. Бернштейна. — М.: Металлургия, 1959. — Т. 1. — [Пер. с нем.]. — 732 с.
17. *ГОСТ 8696-74.* Трубы спиральные электросварные со спиральным швом общего назначения.

Influence of high-temperature thermomechanical treatment (HTTMT) on strength properties of welds on spirally-welded pipes made from 08kp steel of 1 mm thickness was studied. It is shown that HTTMT of welds in low-carbon steel joints allows producing sound welded joints of pipes with high service properties.

Поступила в редакцию 25.10.2011