

Обоснование исключения послесварочной термической обработки кольцевых стыков магистральных газопроводов с толщиной стенки свыше 30 мм из стали к65

05, май 2013

DOI: 10.7463/0513.0552162

Куркин А. С., Королев С. А., Пономарев П. А.
УДК.621.791

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

korolevsa@bmstu.ru

aveel22@gmail.com

Введение

Для диверсификации поставок российского природного газа в Европу и снижения зависимости поставщиков и покупателей от стран – транзитёров, в частности от Украины и Турции, создается проект газопровода «Южный поток». Его планируемая мощность – 63 млрд. кубометров газа в год. Подводный отрезок газопровода будет иметь протяжённость 900 км. Для обеспечения заданной производительности и подачи газа на расстояние 900 км между компрессорными станциями планируется использовать трубы диаметром 812,8 мм (320 дюймов), рассчитанные на давление 280 атм. (28,45 МПа). Трубы изготовлены из стали К65 с пределом текучести основного металла 555 МПа, зоны термического влияния 700 МПа, металла шва 520 МПа. Толщина стенки труб составляет 40 мм. Согласно нормативной документации ОАО «Газпром», при такой толщине стенки требуется проведение послесварочной термической обработки [1].

Термообработка сварных соединений проводится с целью снятия остаточных сварочных напряжений, а также выравнивания механических свойств по сечению сварного соединения. Есть основания предполагать, что она не является необходимой.

Во-первых, существует положительный опыт эксплуатации аналогичных газопроводов ОАО «Газпром» с толщиной стенки до 27,7 мм, строительство и ремонт которых осуществлены без послесварочной термообработки. Например, газопровод «Северный поток» был спроектирован по европейским нормам, согласно которым послесварочная термообработка требуется только при толщине более 50 мм.

Во-вторых, труба изготовлена из высокопрочной трубной стали, механические свойства которой получены с помощью контролируемой прокатки и охлаждения. Существует вероятность, что после термической обработки механические свойства основного металла только ухудшатся [2].

В-третьих, существуют работы, результаты которых показывают, что увеличение толщины стенки не всегда приводит к повышению уровня сварочных напряжений [3, 4].

Для оценки необходимости проведения термообработки после сварки нами было проведено сопоставление распределения остаточных сварочных напряжений в стенках труб толщиной 40,1 мм, для которой согласно нормативно – технической документации необходимо проведение термической обработки, и толщиной 27,7 мм, для которой послесварочная термообработка не требуется [1].

Проанализированы две технологии сварки кольцевых стыков труб с толщиной стенки 40,1 мм:

- 1) Ручная дуговая сварка электродами с основным видом покрытия (РД).
- 2) Комбинированная технология: корень шва – механизированная сварка проволокой сплошного сечения в среде углекислого газа методом STT, заполняющие и облицовочные слои шва – механизированная сварка порошковой проволокой в смеси газов (75%Ar и 25%CO₂) сварочными головками M300 (STT+M300).

1. Моделирование

Расчет полей остаточных и эксплуатационных напряжений выполняли методом конечных элементов в научно – исследовательском программном комплексе (НИПК) «СВАРКА» [5], разработанном на кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Причиной возникновения сварочных напряжений является воздействие тепловой «нагрузки» на металл. Таким образом, для определения полей сварочных напряжений необходимо определить поле температур в стенке трубы.

Процедура моделирования включает этапы:

- решение тепловой задачи;
- расчет структуры и твердости;
- расчет остаточных сварочных напряжений;
- расчет суммарных напряжений от сварки и эксплуатационной нагрузки.

В процессе решения тепловой задачи моделировали последовательную укладку валиков с учетом скорости сварки и временных интервалов между проходами. Значения параметров сварки соответствовали типовым технологическим процессам сварки стыков труб. Результатами решения тепловой задачи являются распределения температур и сварочные термические циклы.

К стыковому кольцевому соединению труб предъявляются требования по твердости основного металла и металла шва: 300 HV₁₀ в ЗТВ и 280 HV₁₀ в основном металле. Чтобы убедиться, что полученные значения твердости не превышают допустимых значений, необходимо проведение расчета фазового состава.

Расчет сварочных напряжений проводили в НИПК «СВАРКА» совместно с решением тепловой задачи. Расчет фазового состава проводили по программе MDF, в которую экспортировали сварочные термические циклы (СТЦ), полученные при решении тепловой задачи.

2.1. Построение геометрии

На первом этапе была построена геометрическая модель сварного соединения с разделкой кромок и смоделирована раскладка валиков. Вид геометрии разделки, реализованной в НИПК «Сварка», представлен на рисунке 1. Разделка выполнена согласно нормативной технологической документации [1].

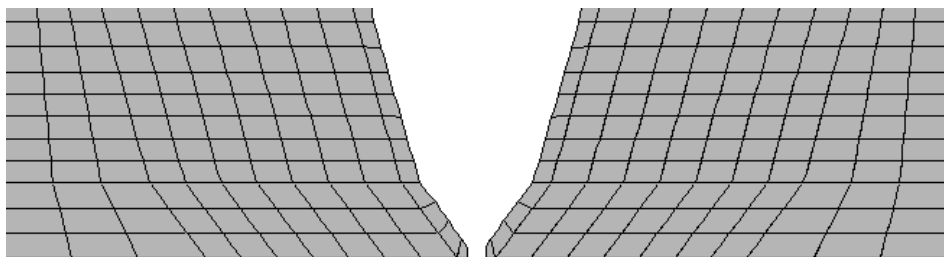


Рис. 1. Модель разделки кромок в НИПК «Сварка»

1.2. Результаты решения тепловой задачи

На рисунке 2 приведены результаты решения тепловой задачи при моделировании процесса сварки комбинированной технологией. Представлено распределение максимальных температур по толщине стенки трубы, которое позволяет оценить границы зоны проплавления основного металла.

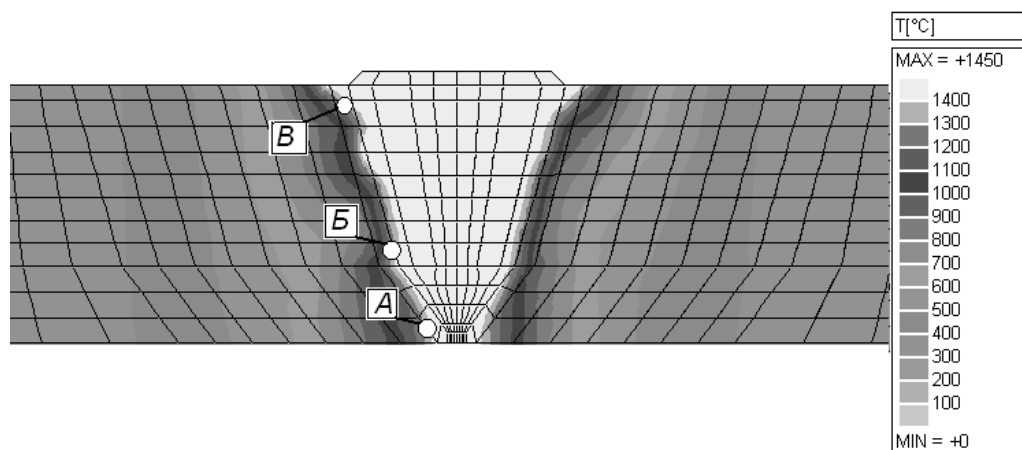


Рис. 2. Распределение максимальных температур при комбинированной технологии сварки

На рисунках 3 и 4 приведены сварочные термические циклы в корне шва для комбинированной технологии и для ручной дуговой сварки.

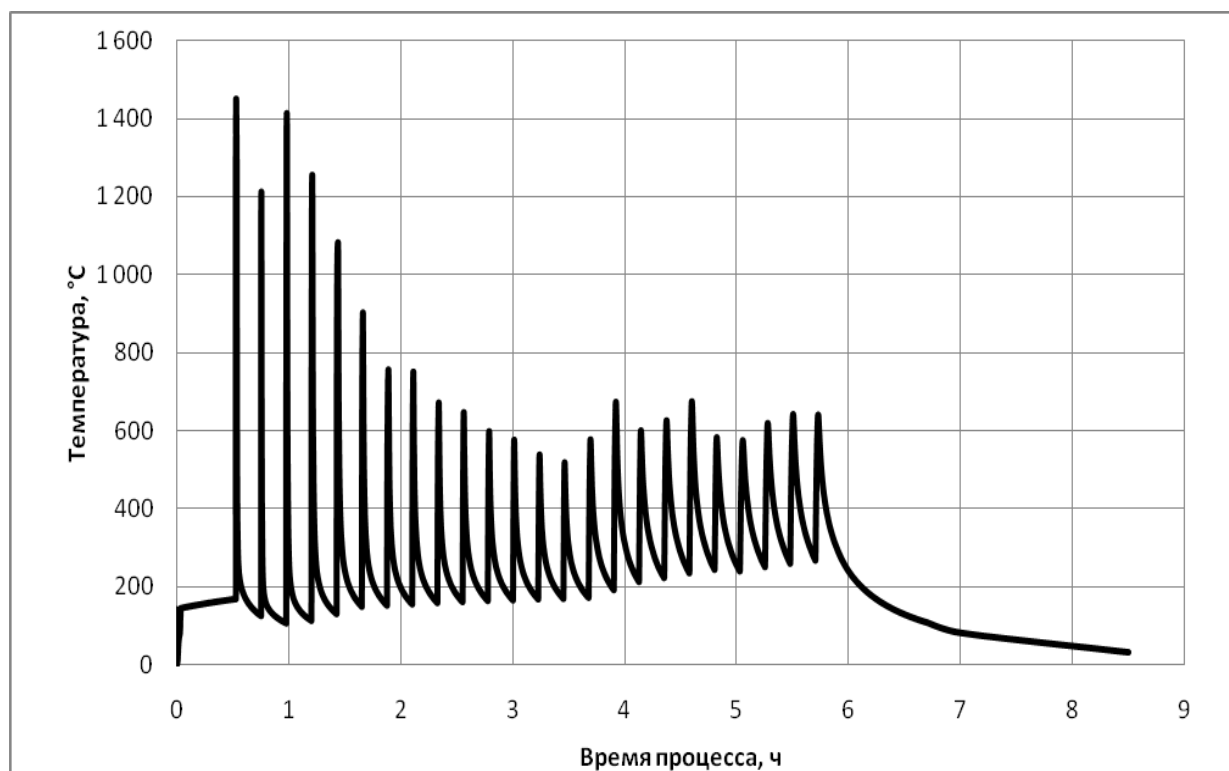


Рис. 3. Сварочный термический цикл в точке А при комбинированной технологии сварки

В обоих случаях температура между проходами не выходит за пределы, установленные СТО «Газпром»: 50...250 °С [1]. Кроме того, режимы сварки обеспечивают протекание процессов автоподогрева и автоотпуска.

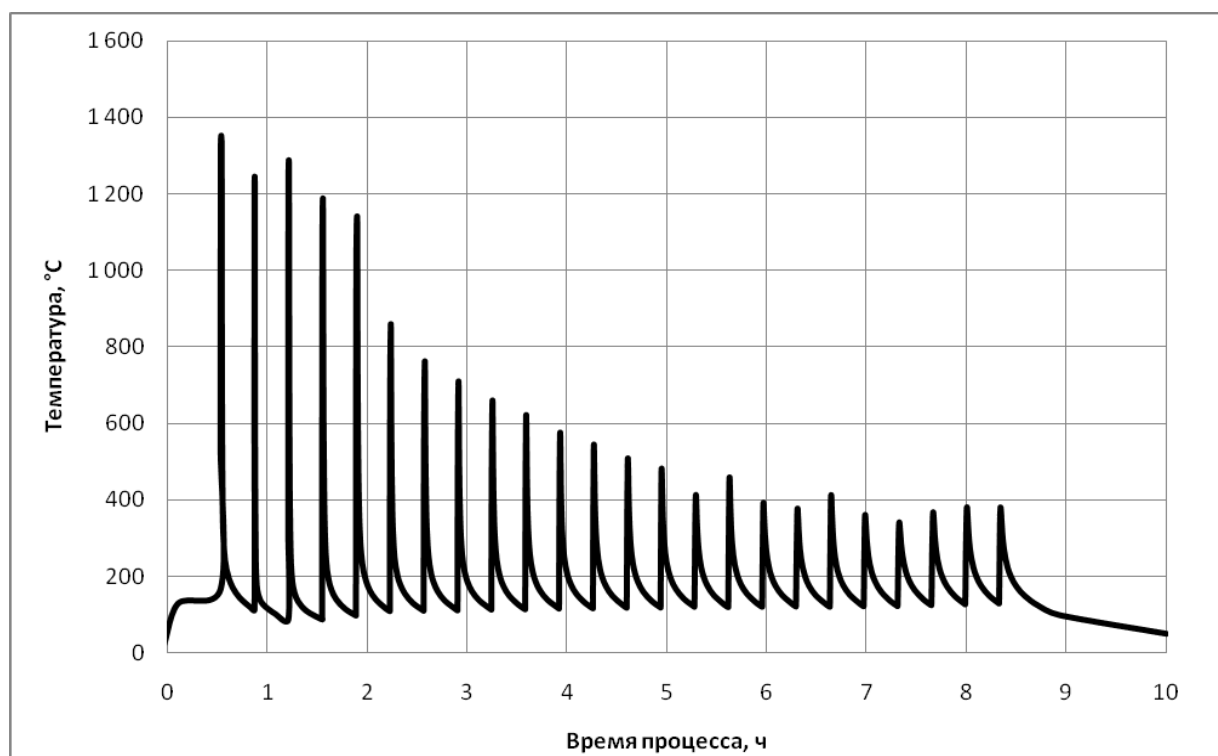


Рис. 4. Сварочный термический цикл в точке А при ручной дуговой сварке

На рисунке 5 представлен характер изменения межслойной температуры в процессе сварки. Межслойная температура оказывает влияние на скорость охлаждения следующего валика, и ее повышение способствует образованию благоприятной структуры.

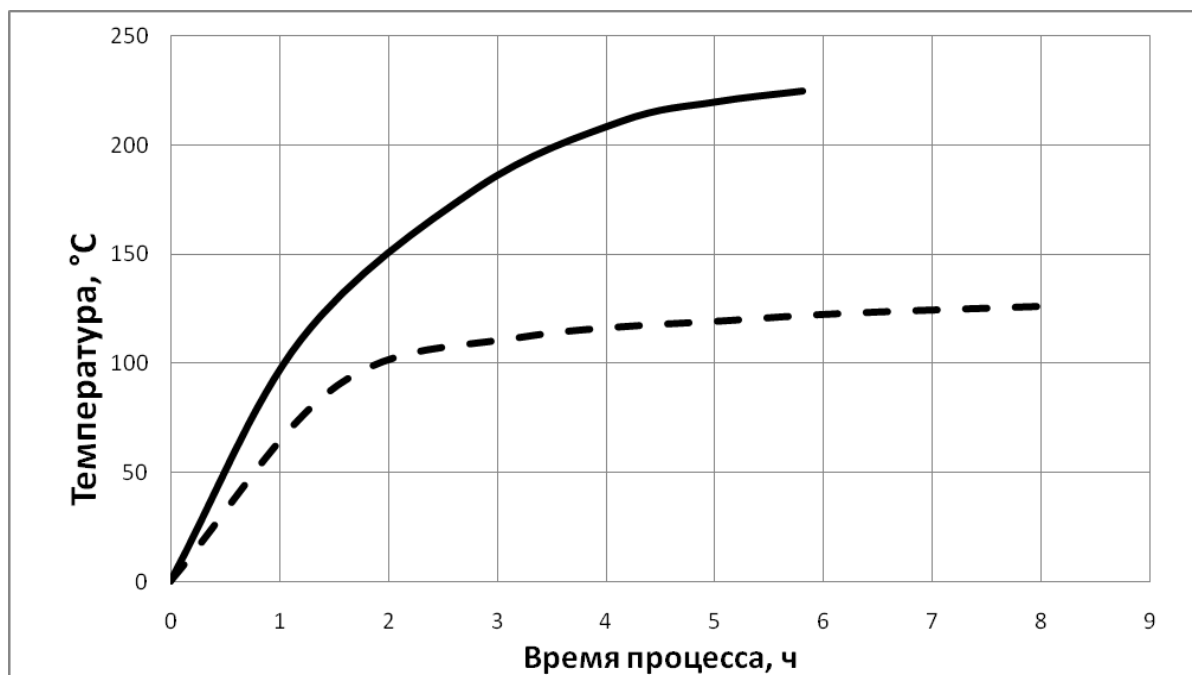


Рис. 5. Изменение межслойной температуры от времени сварки (сплошная линия – комбинированная сварка, штриховая – ручная дуговая сварка).

1.3. Расчет твердости

Исходными данными для расчета являются химический состав свариваемой стали и сварочные термические циклы. Сварочные термические циклы для комбинированной технологии сварки без послесварочной термообработки приведены в разделе 2.2. Химический состав стали и эквиваленты содержания углерода приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Химический состав стали K65

Химический элемент	Массовая доля, %, не более
Углерод (C)	0,09
Марганец (Mn)	1,90
Кремний (Si)	0,35
Фосфор (P)	0,012
Сера (S)	0,006
Азот (N)	0,008

Алюминий (Al)	0,010-0,060
Никель (Ni)	0,50
Молибден (Mo)	0,30
Хром (Cr)	0,30
Медь (Cu)	0,30
Ванадий (V)	0,10
Ниобий (Nb)	0,08
Титан (Ti)	0,03
Кальций (Ca)	0,006
Cr+Ni+Cu	1,00
V+ Nb+Ti	0,15
CE (IIW)	0,45
CE(Pcm)	0,24

Результатов моделирования, представленные на рисунке 6, показывают, что при комбинированной технологии сварки твердость в зоне термического влияния не превышает допустимого значения, однако при ручной сварке она выходит за допустимые пределы (в точке В, см. рис. 2).

Объяснением этого является слабое протекание процесса автоподогрева при ручной дуговой сварке, приводящее к повышению скорости охлаждения и, как следствие – к росту твердости в ЗТВ.

Таким образом, для обеспечения заданных механических свойств по твердости ЗТВ при ручной дуговой сварке необходимы дополнительные технологические приемы.

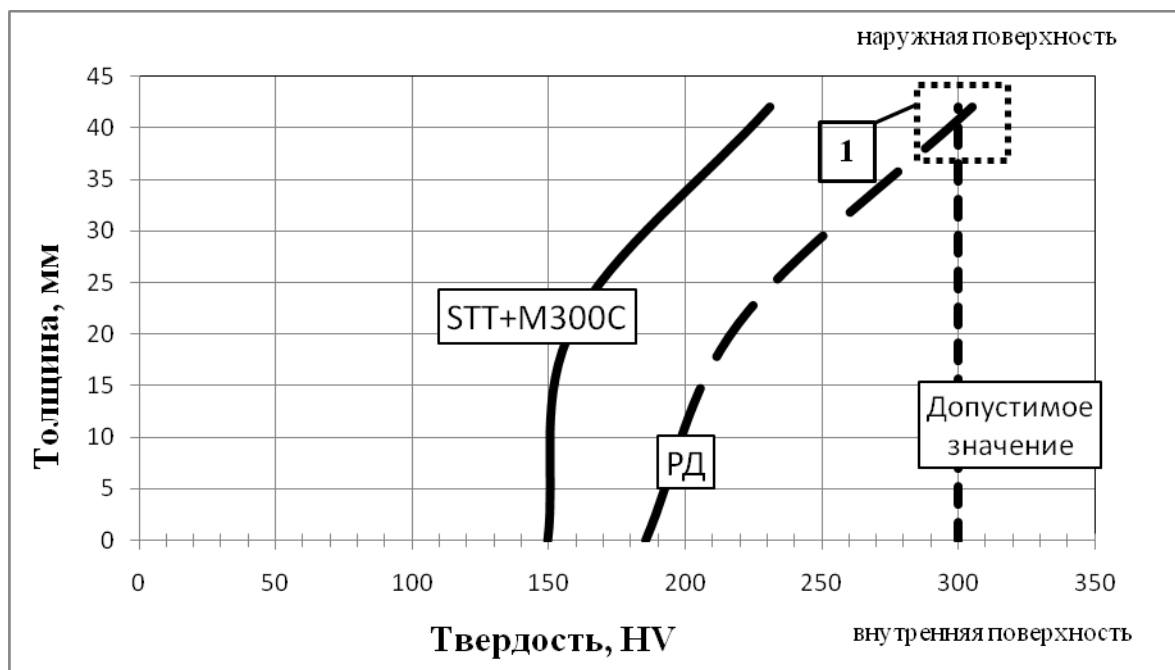


Рис. 6. Распределение твердости по толщине стенки трубы после сварки (см. рис. 2) в сопоставлении с уровнем допустимых значений (1 – зона превышения допустимых значений твердости)

1.4. Результаты расчета напряжений

При сварке в результате расширения металла при нагреве и последующего его охлаждения в условиях жесткого закрепления возникают остаточные сварочные напряжения, близкие к пределу текучести. Для моделирования остаточных напряжений использована конечно–элементная модель сварного соединения.

В соответствии с технологией, перед пуском газопровода необходимо провести гидроиспытания с давлением 110% от рабочего давления. В работе были последовательно проведены расчеты остаточных сварочных напряжений, затем их взаимодействия с напряжениями от испытательной нагрузки и их взаимодействия с напряжениями от рабочего давления после проведения гидроиспытаний.

Сравнение вариантов технологии сварки проводили по состоянию после сварки и гидроиспытаний, при совместном действии остаточных сварочных напряжений и напряжений от рабочего давления. На рисунках 7 и 8 приведены распределения по толщине тубы продольных и кольцевых сварочных напряжений для стыков толщиной 40,1 мм, сваренных STT+M300, а на рисунках 9 и 10 - распределения сварочных напряжений продольных и кольцевых для стыков такой же толщины, сваренных РД. Оба эти технологии сварки были сопоставлены с базовым вариантом – ручной дуговой сваркой трубы с толщиной стенки 27,7 мм

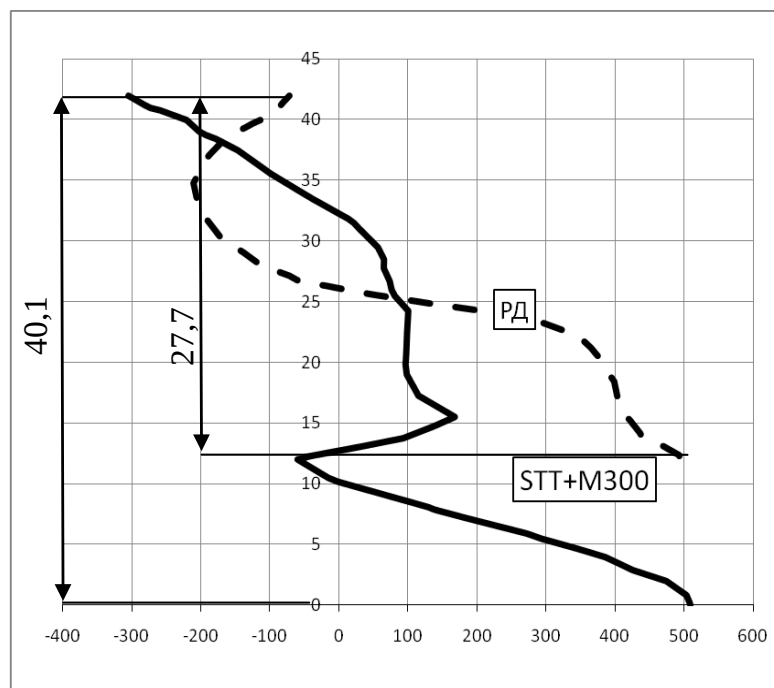


Рис. 7. Сравнение распределения продольных напряжений по толщине стенки при эксплуатации для сварки STT+M300 толщины 40,1 мм и сварки РД толщины 27,7 мм

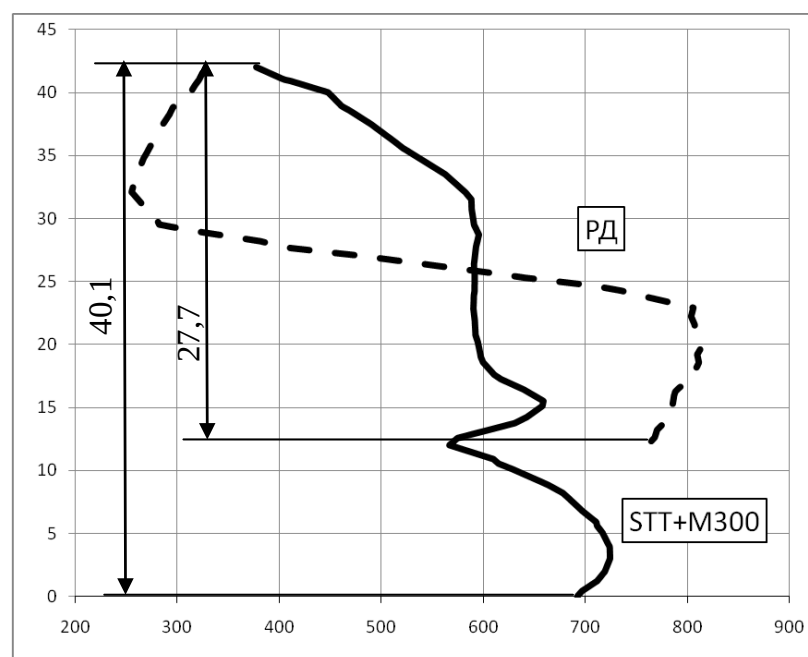


Рис. 8. Сравнение распределения кольцевых напряжений по толщине стенки при эксплуатации для сварки STT+M300 толщины 40,1 мм и сварки РД толщины 27,7 мм

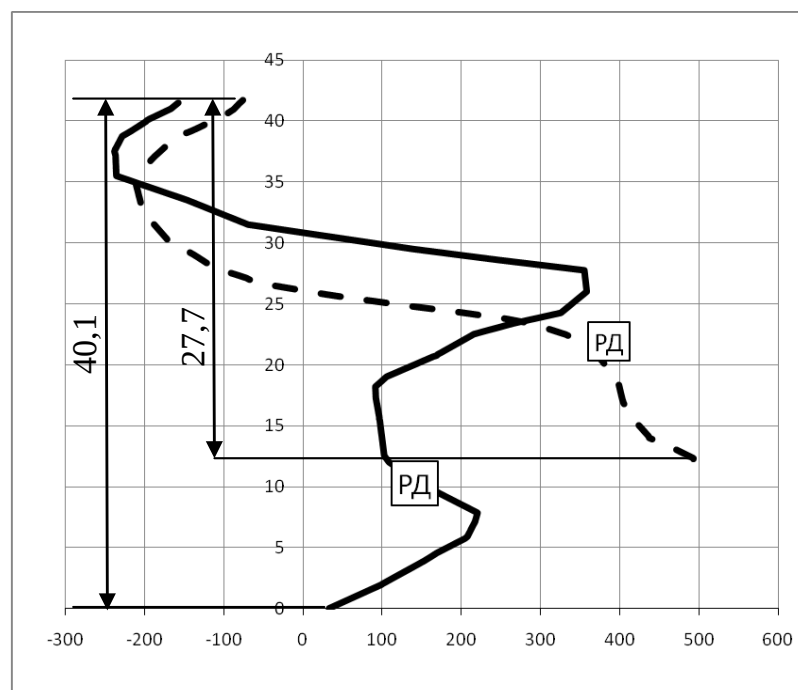


Рис. 9. Сравнение распределения продольных напряжений по толщине стенки при эксплуатации для ручной дуговой сварки труб толщиной 40,1 мм и РДС сварки труб толщиной 27,7 мм

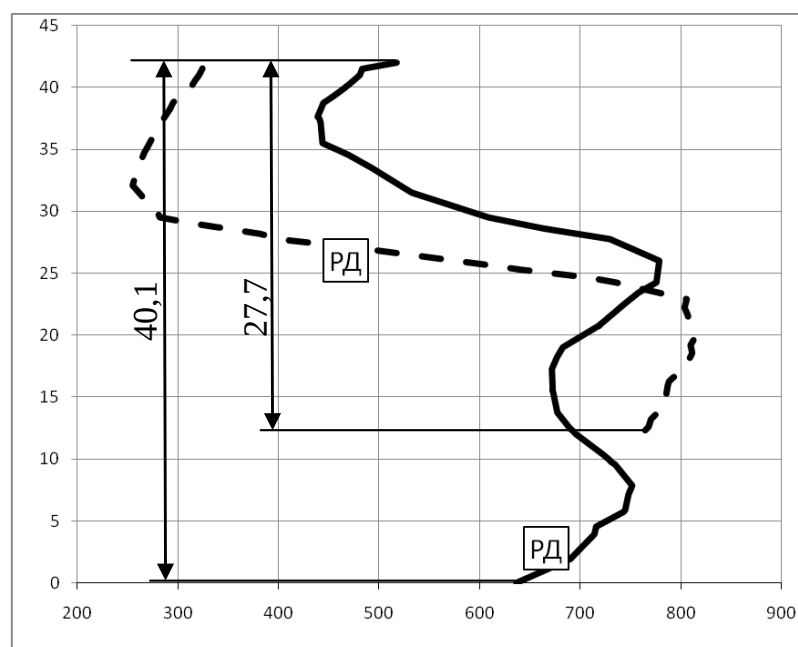


Рис. 10. Сравнение распределения кольцевых напряжений по толщине стенки при эксплуатации для ручной дуговой сварки труб толщиной 40,1 мм и РД сварки труб толщиной 27,7 мм

Результаты расчетов показывают, что уровень напряженного состояния в работающей трубе с толщиной стенки 40,1 мм для ручной и комбинированной технологии сварки без послесварочной термической обработки не превышает напряжений в трубе с толщиной стенки 27,7 мм.

2. Заключение.

На основании полученных результатов можно сделать вывод об отсутствии необходимости проведения послесварочной термической обработки кольцевого стыкового сварного соединения труб с толщиной стенки до 40 мм из стали класса прочности К65, предусмотренной в нормативной документации ОАО «Газпром».

Отмена термообработки сварного соединения, которая, согласно [1] проводится по режиму высокого отпуска с выдержкой до 60 минут при температуре 600-620 °С, даст существенную экономию ресурсов и времени.

Результаты работы переданы в ОАО «ВНИИГАЗ», где намечена сварка контрольных стыков с учетом полученных рекомендаций с последующими механическими испытаниями вырезанных из стыкового соединения образцов.

Проведенный анализ может быть применен для других аналогичных трубопроводов, а также для пересмотра отраслевых норм по проведению термообработки монтажных стыков труб.

Список литературы

1. СТО Газпром 2-2.2-136-2007. Документы нормативные для проектирования, строительства и эксплуатации объектов ОАО «Газпром». Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промышленных и магистральных газопроводов. Часть I. М.: ОАО "Газпром", 2007. 247 с.
2. Рыбнин В.В., Малышевский В.А., Хлусова Е.И., Орлов В.В., Шахпазов Е.Х., Морозов Ю.Д., Настич С.Ю., Матросов М.Ю. Высокопрочные стали для магистральных газопроводов // Вопросы материаловедения. 2009. № 3. С. 127-137.
3. Пономарева И.Н. Остаточные сварочные напряжения при многопроходной сварке стыков трубопроводов // Сварочное производство. 2009. № 1. С. 7-11.
4. Пономарева И.Н. Расчетное обоснование исключения послесварочной термической обработки стыков магистральных трубопроводов из высокопрочной стали класса X80 большой толщины // Сварка и диагностика. 2009. № 4. С. 23-27.

5. Работа программного обеспечения метода конечных элементов на примере комплекса «СВАРКА» ; Моделирование упругопластического поведения материала в комплексе «СВАРКА» // Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций: учеб. пособие для вузов / С.А. Куркин, В.М. Ховов, Ю.Н. Аксенов и др.; под ред. С.А. Куркина, В.М. Ховова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. Гл. 2, разд. 2.3; 2.4. С. 83-109.

Justification of elimination of post-weld heat treatment of welded circular butts in a gas pipelines made of X80 steel with wall thickness over 30 mm

05, May 2013

DOI: 10.7463/0513.0552162

Kurkin A.S., Korolev S.A., Ponomarev P.A.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

korolevsa@bmstu.ru

aveel22@gmail.com

The authors consider necessity of heat treatment after welding circular butts of thick-walled gas pipelines. They analyzed two main welding technologies of fixed butts in gas pipelines – hand arc welding by an electrode with the basic type of coating, and combined welding. The weld root is produced by machine welding with a solid section wire using the STT method; filling and facing layers of the weld are produced by auto-welding with a flux-cored wire in the mixture of shielding gases using M300-C welding heads. Results of the thermal and stress analysis allow to justify elimination of post-weld heat treatment of circular butts.

Publications with keywords: [welding](#), [gas pipeline](#), [post-weld heat treatment](#)

Publications with words: [welding](#), [gas pipeline](#), [post-weld heat treatment](#)

References

1. STO Gazprom 2-2.2-136-2007. *Dokumenty normativnye dlia proektirovaniia, stroitel'stva i ekspluatatsii ob'ektov OAO «Gazprom». Instruksiiia po tekhnologiiam svarki pri stroitel'stve i remonte promyslovykh i magistral'nykh gazoprovodov. Chast' I.* [Standard of organization Gazprom 2-2.2-136-2007. Regulatory documents for the design, construction and exploitation of objects of JSC "Gazprom". Instructions for welding technologies in the construction and repair of field and main gas pipelines. Part I.]. Moscow, OAO "Gazprom" publ., 2007. 247 p.
2. Rybnin V.V., Malyshevskii V.A., Khlusova E.I., Orlov V.V., Shakhpazov E.Kh., Morozov Iu.D., Nastich S.Iu., Matrosov M.Iu. Vysokoprochnye stali dlia magistral'nykh gazoprovodov [High-strength steels for the main pipelines]. *Voprosy materialovedeniia*, 2009, no. 3, pp. 127-137.

3. Ponomareva I.N. Ostatochnye svarochnye napriazheniia pri mnogoprokhodnoi svarke stykov truboprovodov [Residual welding voltage at multipass welding of the conduit annular joints]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2009, no. 1, pp. 7-11.
4. Ponomareva I.N. Raschetnoe obosnovanie iskliucheniia poslesvarochnoi termicheskoi obrabotki stykov magistral'nykh truboprovodov iz vysokoprochnoi stali klassa Kh80 bol'shoi tolshchiny [Calculation substantiation of exceptions post-weld heat treatment of the joints of the main pipelines made of high grade steel X80 of great thickness]. *Svarka i diagnostika*, 2009, no. 4, pp. 23-27.
5. Kurkin S.A., Khovov V.M., Aksenov Iu.N., Kasatkin O.G., Kiselev A.S., Konovalov A.V., Kurkin A.S., Kurkin N.S., Legezo A.A., Luk'ianov V.F., Lykov A.V., Liudmirskii Iu.G., Makarov E.L., Markov V.A., Marmuzevich S.S., Pashkevich A.P., Soltavets M.V., Super A.S. *Komp'iuternoe proektirovanie i podgotovka proizvodstva svarnykh konstruksii* [Computer design and pre-production of welded structures]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002, sect. 2, subsect. 2.3; 2.4, pp. 83-109.