

О ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН ПРИ СВАРКЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Кубейсинов Мирослав Какенович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетика» Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана.

090000, Республика Казахстан, Западно-Казахстанская область, г. Уральск, ул. 8 Марта, 131.

Тел.: 8 (7112)51-43-96.

Ключевые слова: сварка, сталь, холодные, трещины, стандартизация.

Рассмотрена возможность и предложена модель формализации методов предотвращения холодных трещин в стандартах по сварке высокопрочных низколегированных сталей.

Современная направленность мировой практики на изготовление металлоконструкций из высокопрочных низколегированных сталей делает проблему формализации методов идентификации и оценки рисков появления холодных сварочных трещин особенно актуальной [2, 3].

Цель исследований – выявить возможность формализации методов предотвращения образования холодных трещин при сварке сталей.

Задачи исследований – сравнить методы оценки возможности образования холодных трещин, выявить возможность обобщения этих методов.

Оценка появления холодных трещин как следствие мартенситных превращений нашла отражение в применении таких косвенных критериев, как эквивалент углерода CEV и параметр нормирования трещины $R_{ст}$ [1].

В то же время, современная практика весьма осторожно подходит к применению указанных выше критериев, что связано:

- с тем, что поведение стали в течение и после сварки будет зависеть не только от химического состава стали, но также от использованных расходных материалов для сварки и от условий подготовки и проведения сварки;
- с современными исследованиями в области холодных сварочных трещин, результаты которых оценивают мартенситные превращения только как один из основных факторов, способствующих образованию холодных трещин.

Стандарт ИСО в области сварки трубопроводов [2], учитывая фактор мартенситных превращений требованиям измерений твердости, устанавливает требование обеспечивать величину твердости в зоне термического влияния не более 350 по Виккерс.

Одновременно стандарт ИСО [2] устанавливает требования:

- подвергнуть неразрушающему контролю пробные сварные швы для утверждения сварочных процедур, применяемых в заводских условиях, минимум через 24 ч после завершения сварки;
- учитывать необходимость применения нагрева после сварки для удаления водорода;
- строго соблюдать установленный процедурой сварки промежуток времени между начальной заваркой корня шва и вторым проходом при применении материалов и проведении сварки в условиях, когда процесс наводороживания не находится под контролем, например, при применении электродов с целлюлозным покрытием;

Стандарт ИСО [2] также устанавливает, что для марок стали с увеличенной восприимчивостью к замедленному водородному растрескиванию вследствие сварки, например, при заданном минимальном пределе текучести 556 МПа или выше, сварочные процедуры могут быть составлены с учетом предотвращения образования холодных трещин. При этом в стандарте отмечается, что при сварке труб из таких марок стали может потребоваться применение особых процессов обработки для снижения содержания водорода, например, термическая обработка после сварки и задержки по времени до приемочного контроля.

Между тем, сопоставление стандартов **ГОСТ ИСО 3183-3-2007** и **ISO 13847:2000** [1, 2] показывает, что количественные методы оценки возможности образования холодных трещин указанные стандарты не устанавливают. Приведенный в указанных стандартах метод расчета эквивалента углерода подверг критике Э. Л. Макаров и др. [3]:

- для статистических данных зависимости величины твердости от CEV характерен значительный разброс в 50-100%;
- при частичной закалке, что характерно для сварочных процессов, взаимосвязь твердости и CEV зависит от скорости охлаждения, и чем меньше скорость охлаждения, тем выше влияние легирующих компонентов на

упрочнение стали относительно углерода, т.е. для каждой скорости охлаждения должны быть свои коэффициенты при легирующих элементах;

- показатель твердости в околошовной зоне не может служить критерием склонности к образованию трещин, так как указывает ориентировочно только на состав структуры, тогда как на образование холодных трещин влияет размер аустенитного зерна, микрохимическая неоднородность зерна закаленной структуры, количество и характер неметаллических включений, содержание водорода.

Метод оценки склонности к образованию холодных трещин на основе расчета параметра нормирования трещины $P_{ст}$ [1, 2] внешне схож со способом оценки по эквиваленту углерода, причем его применение в виде, приведенном в **ГОСТ ИСО 3183-3-2007** и **ISO 13847:2000** [1, 2], не позволяет учитывать следующие факторы: содержание диффузионного водорода в наплавленном металле и его локализацию в зонах концентрации напряжений; погонную энергию сварки; «жесткость» и конструктивные особенности сварного соединения; усадочные явления при сварке.

Изложение применения параметра нормирования трещины $P_{ст}$ в **ГОСТ ИСО 3183-3-2007** и **ISO 13847:2000** [1, 2] отличается от «классического метода», основанного на стандартной пробе Тэккен и позволяющего определять уровень минимальной температуры предварительного подогрева сварного соединения для пробы Тэккен.

Для сварных соединений других конструкций, при использовании «классического метода», применяют понятие «температурно-временной фактор», учитывающий интенсивность выделения водорода из сварного шва. При этом прямые методы оценки возможности образования холодных трещин, учитывающие такие же факторы и условия проведения сварки, как и в стандартной пробе Тэккен, регламентированы в **ГОСТ Р ИСО 17642-1-2011** [5].

Процедуры, принятые указанными стандартами, позволяют определить экспериментальным путем наименьшие значения погонной энергии сварки, температур предварительного, сопутствующего нагревов и нагрева после окончания сварки, наибольшее содержание диффузионного водорода и величину критического напряжения.

Таким образом, **ГОСТ ИСО 3183-3-2007** и **ISO 13847:2000** [1, 2] не позволяют расчетным путем учесть все факторы, способствующие образованию холодных трещин, и произвести расчет параметров необходимых технологических воздействий, например, температуры предварительного подогрева и т.д.

Тенденция на замену экспериментальных методов определения склонности металла при сварке к образованию холодных трещин расчетными методами, в принципе, основывается на экспериментальном выявлении основного фактора, способствующего появлению трещин.

Так, в работах Э. Л. Макарова, Д. С. Розанова [3, 7] к оценке стойкости к образованию трещин при сварке высокопрочных низколегированных сталей, зонам термического влияния которых типична бейнитно-мартенситная и бейнитная структуры типов, подходят, принимая, что наиболее значимым фактором для образования холодных трещин является диффузионный водород.

Разработанная расчетная методика позволяет рассчитать величины температур предварительного, сопутствующего и последующего нагревов сварного соединения.

Исследования механизма образования холодных трещин при двухдуговой автоматической сварке высокопрочных среднелегированных сталей в защитных газах [4] отмечают важность учета напряжений II рода. Влияние структуры на вероятность образования холодных трещин подчеркивается в работе С. Н. Гончарова [4]. Причем, отмечается, что среди основных факторов, способствующих образованию холодных трещин, наиболее сложным для учёта является структурный фактор. Влияние структурного фактора учитывается размером бывшего аустенитного зерна, процентным содержанием в структуре металла составляющих мартенситно-бейнитного типа, свойства которых зависят от химического состава и, в первую очередь, от содержания углерода [6].

Учет всех основных факторов позволяет подобрать при сварке режимы, позволяющие отказаться от предварительного и последующего нагревов [6].

Между тем, попытки производить оценку возможности образования холодных трещин расчетным путем с учетом всех возможных факторов при стандартизации процессов сварки привели к созданию стандарта **ISO/TR 17844:2004 Welding – Comparison of standardized methods for the avoidance of cold cracks** (Сварка. Сопоставление стандартизованных методов предотвращения холодных трещин) [8]. Анализ стандарта демонстрирует существование различных подходов к оценке влияния основных факторов на вероятность образования холодных трещин и выбору приоритетного фактора.

Установленные авторами методик требования к областям применения расчетных способов позволяют отнести их к оценке свариваемости высокопрочных низколегированных сталей.

Стандарт ISO/TR 17844:2004 [8] выделяет следующие основные факторы: химический состав стали, тепловложение (эффективная погонная энергия), форму и размеры сварного соединения и толщину материала, уровень содержания водорода в сварном шве, предварительный подогрев.

ISO/TR 17844:2004 [8] сравнивает четыре метода:

- CE (EN 1011-1:2009 Welding – Recommendations for welding of metallic materials – Part 1: General guidance for arc welding (Сварка. Рекомендации по сварке металлических материалов. Часть 1. Общее руководство по сварке электрической дугой);
- EN 10025-1:2004 2) European structural steel standard – Part 1:);
- CET (EN 1011-2:2001 Welding – Recommendations for welding of metallic materials – Part 2: Arc welding of ferrite steels (Сварка. Рекомендации по сварке металлических материалов. Часть 2. Дуговая сварка ферритных сталей);
- CEN (JIS B 8285);
- Pcm (ANSI/AWS D1.1).

Общим для всех методов является оценка углеродного эквивалента, внесение водорода сварочным материалом и видом сварки, учет толщины листа, вид сварного соединения.

Сопоставление указанных методов производилось на сравнении рассчитываемых величин температур предварительного подогрева сварного соединения. При этом варьировались типы сталей, их химический состав, диапазоны допустимых уровней содержания водорода, толщины листов и сравнивались два вида сварных швов – это стыковые и угловые.

Результаты сравнения перечисленных в ISO/TR 17844:2004 [8] методов можно свести к следующему: величины температур предварительного подогрева различаются, причем различия ощутимы для высокопрочных низколегированных сталей. В связи с этим ISO/TR 17844:2004 [8] рекомендует – какой бы ни был выбран метод как обеспечивающий наилучшее приближение к практической ситуации, он должен использоваться для определения предварительных условий сварки, которые будут впоследствии проверяться соответствующим испытанием технологического процесса сварки. При этом необходимо отметить следующие риски, вытекающие из рассмотрения текста ISO/TR 17844:2004 [8].

Для метода CE характерен разброс при оценке содержания уровня водорода при использовании электродов с основным покрытием. Метод также не гарантирует предотвращение образования холодных трещин при возникновении факторов – таких как содержание марганца более 1,5%, больших значений эффективной погонной энергии, при низких значениях углеродного эквивалента. Метод также не учитывает влияние неметаллических включений и обычно прогнозирует более низкие температуры предварительного подогрева.

CET-метод дает более высокие величины температур предварительного подогрева, чем CE-метод и не учитывает влияние остаточных напряжений и неметаллических включений. Методу в сравнении с другими методами характерна более детальная проработка влияния факторов образования холодных трещин.

CEN-метод применительно к высокопрочным низколегированным сталям предсказывает более высокие температуры предварительного подогрева, чем CET-метод. Метод недостаточно разработан в части учета влияния водорода в зоне термического влияния.

Pcm-метод предусматривает два подхода при оценке необходимого уровня температуры предварительного подогрева: 1) через оценку значения твердости зоны термического влияния; 2) через оценку содержания водорода в сварочном соединении.

Риски Pcm-метода с учетом значения твердости зоны термического влияния раскрыты в работе Э. Л. Макарова и др. [3] и подтверждаются информацией ISO/TR 17844:2004 [8] о предпочтительности применения метода для нелегированных углеродистых и углеродисто-марганцевых сталей. Влияние водорода и остаточных напряжений данный метод не учитывает.

Pcm-метод – метод, построенный на оценке содержания водорода в сварочном соединении, разработан применительно к высокопрочным низколегированным сталям.

В отличие от него, метод, изложенный в работе Э. Л. Макарова и др. [3], учитывает распределение и кинетику десорбции диффузионного водорода в сварном соединении, что позволяет точнее прогнозировать температуру и время выдержки при нагреве, и избежать неоправданно большие энергозатраты.

Необходимо отметить, что упоминаемое в ISO/TR 17844:2004 [8] применение аустенитных электродов как способа снижения влияния водорода, как фактора образования холодных трещин, из-за его способности играть роль «ловушки» для водорода, требует некоторой осторожности в виду того, что сам аустенит может в некоторых случаях служить потенциальным источником водорода в металле шва.

Также недостатком ISO/TR 17844:2004 [8] и других стандартов в области сварки является недостаточное внимание к материаловедческим методам снижения влияния водорода, таким как применение

сварочных материалов, легированных титаном, бором, редкоземельными элементами, регулирование содержания и дисперсности в сварном шве неметаллических включений – сульфидов и оксидов.

Факт негативного влияния уменьшения содержания неметаллических включений, таких как сульфиды, но также и оксиды, отмечается в ISO/TR 17844:2004 [8]. Отмечается, что уменьшение содержания неметаллических включений в стали, главным образом уменьшение включений серы, но также и содержания кислорода, может привести к риску повышения твердости зоны термического влияния и, возможно, увеличению вероятности образования водородных трещин в ней. Точная оценка риска не указывается.

Таким образом, анализ расчетных методов оценки образования холодных трещин показывает:

- вопрос применения того или иного метода определяется опытом специалиста сварочного производства в области конкретного использования;
- при этом существует неопределенность в вопросе выявления степени влияния того или иного фактора на образование трещин;
- в ходе применения любого из методов имеется вероятность необходимости экспериментальных методов оценки холодных трещин.

Внесение в стандарты по сварке методов экспериментальной оценки сопротивляемости образованию холодных трещин [5] в разделы стандартов касательно требований к испытаниям, обеспечит специалиста сварочного производства практическим инструментарием по выработке режимов сварочных операций, предупреждающих холодные трещины.

Включение в стандарты по сварке ссылок на методы ISO/TR 17844:2004 [8] создаст для специалиста сварочного производства основу для выбора направления поиска основного фактора с последующей постановкой опыта по ее подтверждению.

ISO 13847:2000 [2] установил требование для марок стали с увеличенной восприимчивостью к замедленному водородному растрескиванию вследствие сварки, например, при установленном минимальном пределе текучести 556 МПа или выше, составлять процедуры сварки с учетом предотвращения образования холодных трещин. Согласно **ISO 13847:2000** [2] сварка труб из таких марок стали может также потребовать, чтобы применялись особые процессы обработки для снижения содержания водорода, например, последующая термическая обработка и задержки по времени до приемочного контроля.

Таким образом, **ISO 13847:2000** [2] создал прецедент для возможности формализации в стандартах по сварке мероприятий по сопоставлению расчетных методов оценки склонности к образованию холодных трещин и применения экспериментальных методов по проверке сварочных процедур на обеспечение предотвращения образования трещин.

Кроме того, специалист сварочного производства должен быть обеспечен формализованным инструментарием по оценке рисков образования холодных трещин, учитывать как предыдущий опыт сварки в аналогичных условиях и аналогичных конструкций, так и результаты расчетных и экспериментальных исследований сварочной процедуры.

Формализацию такой методологии можно произвести актуализацией в стандартах по сварке положений ГОСТ Р ИСО/ТО 10017-2005 и ГОСТ Р 51901.1-2002 [9, 10], позволяющих предложить специалисту сварочного производства апробированный современной практикой и ставшей признанной практикой инструментарий идентификации и оценки рисков.

Основанием для внесения в стандарты по сварке такого подхода – оценки рисков на основе предыдущего опыта и результатов оценки возможностей образования холодных трещин при разработке сварочной процедуры, является тот признанный факт, что природа влияния того или иного фактора на риски появления трещин не выяснена в полном объеме. При выборе сварочной технологии модель принятия решения всегда несет в себе риск неопределенности.

Формализация алгоритма «сопоставление расчетных методов оценки образования холодных трещин – эксперименты по оценке сопротивлению сварного шва образованию холодных трещин – методология оценки риска выбранной модели на основе учета предыдущего опыта и результатов расчетных и экспериментальных оценок» позволит:

- специалисту сварочного производства быть уверенным в выборе сварочной процедуры;
- организации накопить и формализовать свой уникальный опыт для управления выбором сварочных процедур;
- стандартизировать процедуру управления рисками сварочного производства;
- накопить опыт для современной практики для улучшения расчетных методов по оценке возможности образования холодных трещин.

Библиографический список

1. ГОСТ ИСО 3183-3-2007. Промышленность нефтяная и газовая. Трубы стальные для трубопроводов.

Технические условия поставки. Ч. 3: Требования к трубам класса С. – Введ. 2007–12–27. – М. : Стандартиформ. – 41 с.

2. ISO 13847:2000. Промышленность нефтяная и газовая. Системы транспортировки по трубопроводам. Сварка трубопроводов. – Введ. 15.09.00. – М. : Изд-во стандартов, 2000. – 41 с.

3. Макаров, Э. Л. Моделирование процесса перераспределения и десорбции диффузионного водорода при сварке / Э. Л. Макаров, Д. С. Розанов // Сварка и Диагностика. – 2009. – №2. – С. 58-59.

4. Гончаров, С. Н. Исследования и разработка технологии двухдуговой автоматической сварки в защитных газах корпусов из высокопрочных среднелегированных сталей : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Гончаров Сергей Николаевич. – Набережные Челны, 2009. – 170 с.

5. ГОСТ Р ИСО 17642-1-2011. Испытания разрушающие сварных швов металлических материалов Испытания на сопротивляемость образованию холодных трещин в сварных соединениях Процессы дуговой сварки. Ч. 1: Общие положения. – Введ. 2011–10–30. – М. : Стандартиформ. – 41 с.

6. Колновалов, А. В. Теория сварочных процессов : учебник для вузов / А.В. Коновалов [и др.] ; под ред. В. М. Неровного. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 752 с.

7. Розанов, Д. С. Разработка методики расчета процесса перераспределения и десорбции диффузионного водорода в многослойных сварных соединениях низколегированных сталей : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Розанов Дмитрий Сергеевич. – М., 2011. – 21 с.

8. ISO/TR 17844:2004. Welding – Comparison of standardized methods for the avoidance of cold cracks (Сварка. Сопоставление стандартизованных методов предотвращения холодных трещин). – Брюссель : Европейский комитет по стандартизации (CEN). – 78 с.

9. ГОСТ Р ИСО/ТО 10017-2005. Статистические методы. Руководство по применению в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001. – М. : Стандартиформ, 2005. – 24 с.

10. ГОСТ Р 51901.1-2002. Менеджмент риска (поправка ИУС 8-2005 г.) Анализ риска технологических систем. – М. : Госстандарт России, 2002. – 41 с.