



ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ТОЛСТОЛИСТОВЫХ ЗАКАЛИВАЮЩИХСЯ СТАЛЕЙ С МНОГОСЛОЙНЫМИ ШВАМИ

А. Т. НАЗАРЧУК, В. В. СНИСАРЬ, кандидаты техн. наук, Ю. А. ЗАБУРАННЫЙ, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены особенности разработки нового подхода к оценке технологической прочности соединений закаливаемых сталей с многослойными швами. На их основе обоснована и экспериментально подтверждена возможность применения методики составных образцов для оценки не только металла шва, но и сварного соединения в целом.

Ключевые слова: закаливающиеся стали, технологическая прочность, холодные трещины, методы испытаний, инструментальные, технологические пробы

Решение проблемы качества сварки закаливаемых сталей неразрывно связано с нахождением методов повышения технологической прочности в связи со склонностью сварных соединений указанных сталей к образованию трещин. Наиболее сложной задачей является предотвращение образования холодных трещин [1–4]. На сегодня она не имеет приемлемого решения, особенно для сварки высокопрочных закаливаемых сталей равнопрочными швами, однородными с основным металлом.

Традиционно для оценки технологической прочности соединений закаливаемых сталей используются количественные (инструментальные) и качественные (технологические пробы) методы испытаний. Преимущества и недостатки их хорошо известны [1–4]. При использовании количественных методик испытания соединений с многослойными швами необходимо учитывать ряд особенностей. Они связаны прежде всего с повышенной склонностью соединений к образованию поперечных холодных трещин. На опасность их образования в сварных соединениях с многослойными швами обращалось внимание давно [1, 2].

На протяжении многих лет накоплено достаточно данных по комплексной оценке технологической прочности соединений закаливаемых сталей с привлечением качественных и количественных методов испытаний [1–3, 5]. В свое время особое внимание уделяли закалочной гипотезе образования холодных трещин, а также отрицательному влиянию водорода на образование этих трещин (водородная гипотеза) [1–4].

В последнее время в литературе также рассматриваются различные аспекты влияния закалочных явлений [6–10], появляются новые данные о распределении водорода в сварных соединениях и его значении в образовании холодных трещин, о роли температуры при индуцированном водородном растрескивании сталей и сварных соединений [11–13]. Широко анализируются вопросы предварительного и послесварочного подогрева с

учетом содержания водорода при сварке высокопрочных сталей, особенностей образующихся структур, скорости деформации.

Учитывая роль закалочных явлений и исключительную важность влияния водорода на технологическую прочность соединений, на основе анализа испытания сварных соединений с многослойными швами [14–16] нами предпринята попытка разработки комплексного подхода к оценке технологической прочности соединений с этими швами при сварке толстолистовых закаливаемых сталей.

Суть его состоит в следующем. Используемые методики испытания должны давать объективную комплексную оценку стойкости сварных соединений как против продольных, так и поперечных холодных трещин. Соединения закаливаемых сталей с многослойными швами имеют разную стойкость против последних. Однако наиболее сложной задачей в этом случае является предупреждение образования поперечных холодных трещин. Экспериментально установлено [15], что при получении сварных соединений, стойких против поперечных холодных трещин, гарантируется достаточная стойкость и против продольных, при этом обратной зависимости не наблюдается.

Большинство количественных методик не учитывает на стойкость против каких именно (продольных или поперечных) холодных трещин проводится оценка. Качественные методы испытания (технологические пробы) позволяют получить оценку стойкости сварных соединений как против продольных, так и поперечных холодных трещин. Учитывая преимущества и недостатки технологических проб, следует отметить, что их применение (из-за большой трудоемкости) целесообразно на завершающем этапе исследований.

При использовании количественных методик для оценки стойкости сварных соединений против трещин предпочтение следует отдавать тем из них, которые не только оценивают стойкость против конкретных холодных трещин (продольных или поперечных), но и в наибольшей мере учитывают влияние изменения напряжений при сварке в результате взаимодействия временных напряжений, обусловленных изменениями объема металла в

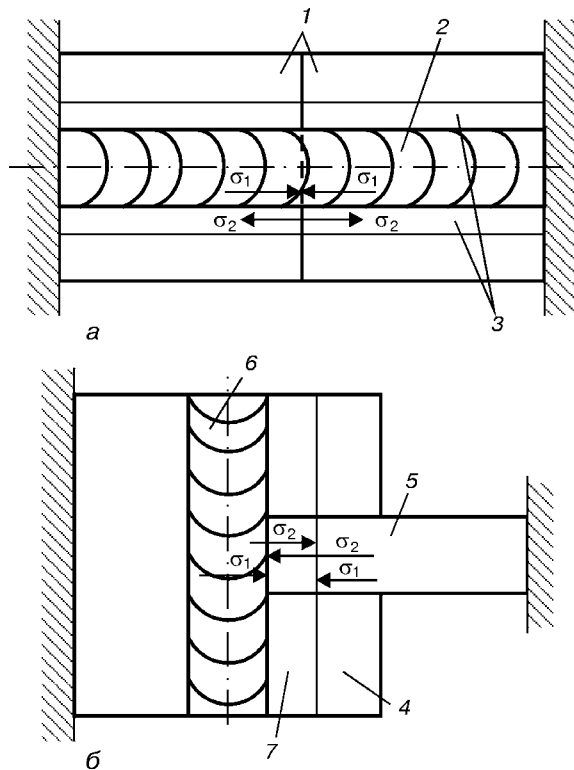


Рис. 1. Схема взаимодействия временных напряжений растяжения σ_1 и сжатия σ_2 в зоне сварки: *a* — составной образец, в металле ЗТВ которого происходят фазовые превращения с увеличением объема (1 — составные образцы; 2 — шов; 3 — ЗТВ); *б* — образец-вставка (4, 5 — соответственно образец и вставка жесткозакрепленные; 6 — шов; 7 — ЗТВ)

результате нагрева и фазовых превращений. В связи с этим следует обратить внимание на то, что продольные трещины образуются под преимущественным воздействием поперечных напряжений, а поперечные — продольных [4], поэтому все количественные методики, предусматривающие поперечную нагрузку образцов, целесообразно рассматривать как испытания только на продольные холодные трещины. Это замечание полностью согласуется с данными по сварке сталей 14ХН4МДА и 30Х2Н2М, когда соответствующие испытания с использованием количественных методик показали достаточную стойкость таких соединений против продольных трещин при низкой их стойкости против поперечных [15].

Для испытания на поперечные холодные трещины выбрана и усовершенствована методика, предусматривающая использование продольной нагрузки испытываемых составных образцов, сваренных многослойным швом, перпендикулярным поверхности их контактирования [14, 15, 17]. Усовершенствованию этой методики способствовал анализ оценки стойкости сварных соединений против образования холодных трещин по результатам фазового изменения объема металла в сварочной зоне [16] как продольных, так и поперечных трещин.

При увеличении объема металла (например, при сварке составных образцов для испытания на поперечные трещины) имеет место возрастание напряжений сжатия в металле ЗТВ (наблюдается увеличение объема металла) и в то же время (за счет тех же фазовых превращений) увеличиваются растягивающие напряжения в объемах металла шва, которые соприкасаются с металлом ЗТВ (рис. 1, *a*). При испытаниях по методу вставки (рис. 1, *б*) в результате увеличения объема металла в ЗТВ (если в ней протекают фазовые превращения с увеличением объема) будет наблюдаться уменьшение растягивающих напряжений.

Описанные выше обстоятельства позволяют применять предлагаемую методику для оценки не только металла шва, но и (хотя и косвенно) сварного соединения в целом при сварке закалывающихся сталей, когда в металле ЗТВ наблюдается увеличение объема металла при фазовых превращениях. Предлагаемая методика позволяет учитывать влияние металла шва на ЗТВ и влияние металла ЗТВ на шов, а именно такое взаимное влияние имеет место в реальных сварных соединениях (при этом для оценки соединений с многослойными швами рекомендуется выполнять их с четырьмя-пятью слоями).

Результаты, полученные с использованием выбранной количественной методики, должны иметь четкую корреляцию с результатами, получаемыми при исследовании жестких крупногабаритных проб.

Ранее проведены работы [15] по установлению корреляции результатов испытания на замедленное разрушение (с применением упомянутой выше усовершенствованной методики) с результатами оценки образования продольных и поперечных трещин с использованием крупногабаритных жестких технологических проб типа ЦНИИТС при сварке ста-

Таблица 1. Технологические показатели процесса сварки

Марка стали	Толщина, мм	Размер пробы или изделия, мм, масса, кг	Марка сварочной проволоки	Показатели оптимизации процесса сварки					
				Однодуговая			Двухдуговая		
				Длина участка автоподогрева, мм	Погонная энергия, кДж/см	Температура автоподогрева, °С	Расстояние между дугами, мм	Погонная энергия, кДж/см	Температура автоподогрева, °С
14ХН4МДА	40	Проба «ЦНИИТС», 1200×1600, 585	Св-07ХГСНЗМД	250...275 2 слоя за проход	24...25	220...230	250...275	24,5...25,5	220...230
30Х2Н2М	80	Проба «ЦНИИТС», 1200×1600, 1170	Св-07ХГСНЗМД	265...285 3 слоя за проход	26,0...28,5	250...275	265...285	26,0...28,5	250...275
35ХН3М+Ст3	100+30	Зубчатое колесо Ø1800, 2200, до 8000	Св-08Г2С	—	—	—	275...325	≈ 40,0	300...320



Таблица 2. Зависимость коэффициента замедленного разрушения $K_{з.р.}$ от показателей процесса сварки

Марка стали	Способ сварки	Сварочная проволока	Замедленное разрушение $\sigma_{кр}$, МПа	Предел текучести металла шва $\sigma_{МШ}$, МПа	$K_{з.р.} = \frac{\sigma_{кр}}{\sigma_{МШ}}$
14ХН4МДА	Двухдуговая сварка	Св-10ГН2СМД	612...580	681...697	0,89...0,83
	Однодуговая сварка, два слоя за проход		575...555	710...712	0,80...0,78
30Х2Н2М	То же	Св-10ХГ2СМА	275...255	780...796	0,35...0,32
	Однодуговая сварка, один слой за проход		0*	798...820	0
35ХН3М+Ст3	Двухдуговая сварка	Св-08Г2С	330...320	367...374	0,89...0,85

* После выполнения пяти слоев наблюдалось разрушение сварных образцов из стали 30Х2Н2М без приложения внешней нагрузки.

лей 14ХН4МДА и 30Х2Н2М соответственно толщиной 40 и 80 мм.

Комплексную оценку технологической прочности соединений использовали при разработке технологии сварки закаливаемых сталей различных толщин (табл. 1) для корпусного производства [15] и при изготовлении крупногабаритных зубчатых колес массой до 8 т.

Разрабатывали технологию сварки плавящимся электродом в углекислом газе закаливаемых сталей швами, однородными с основным металлом без применения подогрева. Содержание диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле, определяемое по методу спиртовой пробы, не превышало 1,5 см³ на 100 г металла. Для предотвращения холодных трещин использовали автоподогрев. Выбор параметров процесса сварки проводили таким образом, чтобы на определенном расстоянии от дуги обеспечивалась температура автоподогрева металла в зоне сварки, при которой удастся предотвратить образование холодных трещин. Основные показатели оптимизации процесса с использованием одно- и двухдуговой сварки представлены в табл. 1. Для обеспечения необходимой технологической прочности и требуемых механических свойств соединений оптимизация параметров режима и показателей автоподогрева осуществлялась с использованием двухдуговой сварки или выполнения процесса сварки одной дугой по схеме «за один проход два или три слоя». При оптимизации однодуговой сварки по схеме «за один проход один слой» возможно снижение механических свойств соединений из-за увеличения длительности пребывания металла при температурах выше $A_{с3}$.

Результаты многоразовых экспериментов (табл. 2) показали, что при получении соотношения $\sigma_{кр}/\sigma_{МШ} = 0,7...0,9$ ($\sigma_{кр}$ — показатель оценки на замедленное разрушение в течение 24 ч с использованием методики составных образцов, $\sigma_{МШ}$ — предел текучести высокопрочного металла шва, однотипного с основным металлом) практически гарантируется получение сварных соединений, стойких против продольных и поперечных холодных трещин. На возможность использования показателя, аналогичного $\sigma_{кр}/\sigma_{МШ}$, указывалось также в работе [18], однако относительно предельного значения этого отношения у авторов имеются расхождения.

Использование других инструментальных методов для оценки сварных соединений с многослойными швами (например, имплант с различными вариантами усовершенствования, классическое испытание на замедленное разрушение [1, 2]) не гарантируют необходимой корреляции применительно к оценке стойкости на поперечные и продольные трещины соединений с многослойными швами. Так, например, при сварке пробы типа ЦНИИТС размером 1200×1600 мм (сталь 30Х2Н2М толщиной 80 мм) по технологии, которая обеспечила высокую стойкость против образования продольных трещин, через 3–5 сут. имело место образование большого количества поперечных трещин по всей длине шва.

Существует точка зрения, что многие инструментальные методы следует применять для сравнительных испытаний. Однако сравнительные возможности этих методик исчерпываются раньше, чем необходимо для получения оптимального варианта. Не случайно, например, используя методику «имплант», были намерения ее усовершенствовать, применяя кольцевую выточку или винтовую нарезку образцов, и т. п.

Следует отметить, что получение термического и деформационного циклов, близких к соответствующим циклам сварки реальных соединений, обеспечивается при использовании предлощенной методики составных образцов. При этом нет проблем с нагрузкой образцов даже больших размеров, поскольку нагрузке подвергается фактически только металл шва независимо от размера образцов.

Оценку склонности к трещинообразованию в соответствии с работой [16] целесообразно проводить по сумме двух или трех слагаемых напряжений в жесткозакрепленном образце или вставке. Они включают значения напряжения непосредственно перед началом фазовых превращений, значения уменьшения напряжений растяжения в результате фазового изменения объема и значения напряжений после полного охлаждения образца или вставки [16]. В работах [6, 7] в качестве оценки склонности сварных соединений к образованию трещин принят показатель $\Delta\sigma_p$, представляющий собой разницу между напряжениями, действующими перед началом фазовых превращений, и непосредственно после их протекания с учетом температуры при $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращении. Основываясь на работах [6, 7, 16] и результатах

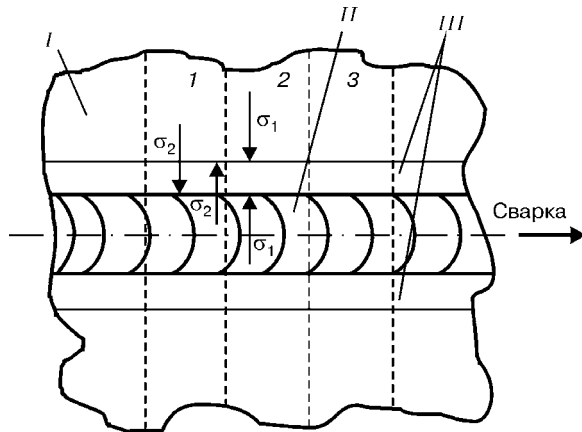


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая возможность возникновения поперечных временных пиковых напряжений по мере прохождения превращений в металле ЗТВ с увеличением объема: I — фрагмент соединения (условно разбит на участки 1–3); II — сварной шов; III — металл ЗТВ; σ_1 и σ_2 — соответственно напряжения растяжения и сжатия

испытаний на поперечные трещины по методике составных образцов [14, 15] (где наблюдается возрастание растягивающих напряжений в металле шва вследствие увеличения объема металла в ЗТВ в результате фазовых превращений) можно сделать следующее предположение. Если рассматривать реальное сварное соединение (а не вставку или жесткозакрепленный образец ограниченного сечения), формирование напряжений растяжения в металле ЗТВ по мере охлаждения (когда происходит уменьшение объема металла, а затем и увеличение его при $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращении) может приводить к возникновению временных пиковых напряжений.

Примером может послужить схема фрагмента соединения с условной разбивкой его на составные участки (рис. 2). Если рассматривать изолированно участки 1 и 2 (когда на первом участке происходит превращение с увеличением объема, а на втором его еще нет), то на условном их стыке будут возникать кратковременные пиковые напряжения. Их уровень будет определяться суммой двух слагаемых: напряжений, действующих непосредственно перед началом фазового превращения, и значения, на которое уменьшаются напряжения растяжения в результате фазового увеличения объема металла образца ограниченного сечения. По мере протекания превращения в металле ЗТВ вдоль шва (что реально имеет место в сварном соединении), указанные пиковые напряжения будут формироваться синхронно с изменением места протекания превращения в металле ЗТВ.

Предлагаемый анализ стойкости соединений закаливаемых сталей с многослойными швами против образования трещин позволяет рекомендовать новый подход к комплексной оценке технологической прочности сварных соединений. Использование изложенного подхода может оказаться полезным не только при сварке швами, однородными с основным металлом, но и при сварке, например, высоколегированными аустенитно-мартенситными швами [19].

Выводы

1. Применительно к использованию количественных методов испытаний предложен комплексный подход к оценке технологической прочности соединений толстолистовых закаливаемых сталей с многослойными швами, основанный на оценке стойкости соединений против продольных и поперечных трещин с учетом взаимодействия напряжений, возникающих при сварке в результате термического воздействия и фазовых превращений. Представленные обоснования подтверждаются данными, полученными при исследовании жестких крупногабаритных проб.

2. С учетом изложенного подхода обоснована и экспериментально подтверждена возможность использования методики составных образцов для оценки не только металла шва, но и сварного соединения в целом, поскольку она позволяет оценить взаимное влияние металла шва на ЗТВ и наоборот.

3. Высказано предположение, что данные по взаимному воздействию термических напряжений и напряжений, вызванных фазовыми изменениями объема металла в зоне сварки, при изучении образцов ограниченных размеров (типа вставки или жестко зафиксированного образца), требуют существенного уточнения при трактовке взаимодействия этих напряжений в реальных сварных соединениях.

1. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
2. *Макара А. М., Мосендз Н. А.* Сварка высокопрочных сталей. — Киев: Техніка, 1971. — 140 с.
3. *Макаров Э. Л.* Холодные трещины. — М.: Машиностроение, 1981. — 248 с.
4. *Шоршоров М. Х.* Металловедение сварки стали и титана. — М.: Наука, 1965. — 336 с.
5. *Касаткин С. Б., Миходуй Л. И., Гордонный В. Г.* Методические подходы к комплексному исследованию замедленного и хрупкого разрушения сварных соединений высокопрочных низколегированных сталей // Там же. — 1996. — № 2. — С. 58–60.
6. *Оценка* сопротивляемости сварных соединений стали 15Х2МФА образованию холодных трещин / Б. С. Касаткин, В. И. Бреднев, А. К. Царюк, Ю. М. Журавлев // Автомат. сварка. — 1993. — № 5. — С. 3–7.
7. *Царюк А. К., Бреднев В. И.* К вопросу о природе образования холодных трещин при сварке закаливаемых сталей // Там же. — 1998. — № 10. — С. 9–13.
8. *Царюк А. К., Бреднев В. И.* Проблемы предупреждения холодных трещин // Там же. — 1996. — № 1. — С. 36–40.
9. *Касаткин С. Б., Бреднев В. И.* Особенности механизма образования холодных трещин в сварных соединениях высокопрочных сталей // Там же. — 1985. — № 8. — С. 1–6, 18.
10. *Миходуй Л. И., Позняков В. Д., Ющенко А. К.* Сопротивляемость замедленному разрушению сварных соединений стали 12ХГН2МФДРА // Там же. — 2000. — № 11. — С. 5–10.
11. *Мусияченко В. Ф., Касаткин С. Б.* Распределение водорода в сварном соединении легированной стали и его влияние на образование холодных трещин (Обзор литературы) // Там же. — 1985. — № 9. — С. 3–8.
12. *Походня И. К., Швачко В. И.* Физическая природа обусловленных водородом холодных трещин в сварных соединениях конструкционных сталей // Там же. — 1997. — № 5. — С. 3–12.
13. *Походня И. К., Степанюк С. Н., Швачко В. И.* Роль температуры при индуцированном водородном растрескивании конструкционных сталей в сварных соединениях // Там же. — 2000. — № 2. — С. 3–8.
14. *Назарчук А. Т., Стеренбоген Ю. А., Косяков В. П.* Методика оценки склонности металла шва к образованию по-



- перечных трещин // Там же. — 1984. — № 12. — С. 7–10.
15. Назарчук А. Т., Свердел И. П. Стойкость соединений закаливаемых сталей с многослойными швами против образования трещин // Там же. — 1994. — № 1. — С. 15–19.
 16. А. с. 1585709 СССР, МКИ G01 № 3/00. Способ испытания сварных соединений закаливаемых сталей на склонность к образованию холодных трещин / А. Т. Назарчук, В. П. Косяков. — № 4423299/25-28; Заявл. 07.05.88; Оpubл. 15.08.90; Бюл. № 30.
 17. Шлепаков В. Н., Гулюк С. П. Использование валиковой щелевой пробы для определения влияния водорода на образование холодных трещин // Автомат. сварка. — 1987. — 4. — С. 37–39.
 18. Стеренбоген Ю. А., Бурский Г. В. Метод оценки стойкости ЗТВ сварных соединений высокопрочных сталей против образования холодных трещин // Там же. — 1987. — № 3. — С. 1–5.
 19. Стисарь В. В., Демченко Э. Л., Иванченко Э. В. Перспективные технологии сварки высокопрочных сталей без подогрева и термической обработки // Там же. — 2000. — № 11. — С. 35–38.

Peculiarities of development of a new approach to estimation of technological strength of the joints with multilayer welds in hardenable steel are considered. The possibility of using the method of composite specimens for evaluation of the weld metal and, in addition, of the welded joint as a whole has been substantiated on the basis of the above peculiarities and experimentally proved.

Поступила в редакцию 29.10.2002

