

УДК 621.791.052:539

ИССЛЕДОВАНИЕ СКЛОННОСТИ К ОБРАЗОВАНИЮ ТРЕЩИН АУСТЕНИТНОГО МАТЕРИАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДИКИ PVR-TEST

К. А. ЮЩЕНКО, В. С. САВЧЕНКО, Н. О. ЧЕРВЯКОВ, А. В. ЗВЯГИНЦЕВА, Г. Г. МОНЬКО, В. А. ПЕСТОВ
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведено сравнительное исследование чувствительности к образованию горячих трещин промышленных сварочных проволок. Показано, что универсальным методом оценки свариваемости может быть машинный метод с регулируемой принудительной деформацией во время сварки ТИГ (метод PVR-test), который позволяет разделить условия возникновения кристаллизационных трещин и трещин провала пластичности в металле шва и околошовной зоны, а также получить исчерпывающую информацию о количественных характеристиках чувствительности к возникновению трещин. Библиогр. 6, рис. 9.

Ключевые слова: свариваемость, горячие трещины, оценка трещиностойкости, высоколегированные стали, никелевые сплавы

Аустенитные высоколегированные стали и их сварные соединения довольно чувствительны к образованию горячих трещин. Чувствительность резко усиливается при сварке плавлением стабильно аустенитных сталей и никелевых сплавов, которые сохраняют во всем температурном интервале гранецентрированную кубическую решетку. Учитывая сложность термометрических процессов, имеющих место при сварке плавлением указанных материалов и разнообразие видов возникающих трещин, оценка чувствительности материалов к образованию трещин и их классификация является актуальной задачей. Ценную информацию о чувствительности к образованию горячих трещин возможно получить только в том случае, когда исследуются практически все типы трещин на одном образце в течение одного эксперимента.

В этом случае внешнее влияние при реализации пробы одинаково для всех зон исследуемого образца, однако, имея различные механизмы образования, разные виды трещин возникают одновременно, определяя, таким образом, приоритеты при оценке трещиностойкости соединения в целом.

Согласно международному стандарту ISO 17641-1:2004 горячие трещины — это нарушения сплошности материала, образующиеся при высокой температуре вдоль границ зерен (дендритных границ), когда деформация или темп деформации превышают определенный уровень. В свою очередь трещины подразделяются на кристаллизационные, ликвационные и трещины, вызванные падением пластичности [1]. Причин возникновения трещин много, но обычно они возникают, когда локальная пластичность недостаточна для противодействия развивающимся сварочным деформациям.

Точный механизм возникновения горячих трещин пока полностью не выяснен.

Температурный интервал образования кристаллизационных трещин (BTR) зависит от интервала твердожидкого состояния металла при кристаллизации шва. Нижняя граница этого интервала определяется значением температуры солидуса при окончании кристаллизации T_S . Температурный интервал провала пластичности (DTR) определяется примерным соотношением $0,6 \dots 0,8 T_S$ (рис. 1). В этом интервале трещины зарождаются и распространяются по границам большеугловых аустенитных зерен.

Существует много методик определения чувствительности к образованию горячих трещин [3, 4]. Согласно стандарту ISO 17641-1:2004 испытания по оценке чувствительности к образованию горячих трещин подразделяются на две основные группы — испытания с естественной жесткостью и испытания с приложением внешней нагрузки. PVR-test относится ко второй группе испытаний,

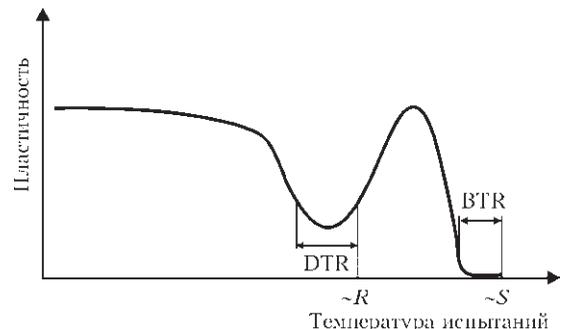


Рис. 1. Образование горячих трещин в сварных соединениях высоколегированных сталей и сплавов (R — рекристаллизация) [2]

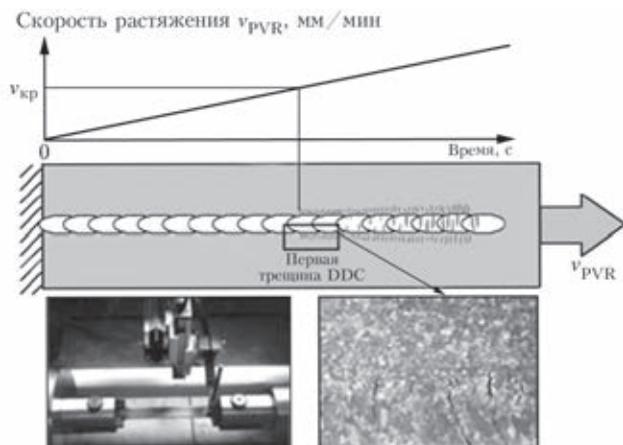


Рис. 2. Схема испытания при использовании метода PVR-test [6] наряду с MVT-test и испытанием растяжением с нагревом.

Согласно ISO 17641-3:2005 этот метод применим для оценки свариваемости конструкционных материалов при выполнении одно- и многопроходной сварки аустенитных коррозионноустойчивых сталей, сплавов на основе никеля и никелемедных сплавов. Однако он также может применяться для других материалов, таких как алюминиевые сплавы и высокопрочные стали [5].

Способ оценки реализуется путем выполнения сварки неплавящимся электродом без присадки вдоль центральной оси пластины с одновременной продольной, изменяющейся во времени деформацией образца.

Критерием чувствительности к образованию трещин выбрана критическая скорость деформации $v_{кр}$, при которой появляются первые трещины (рис. 2). При выполнении сварки возможно одновременное появление трещин как в металле шва, так и металле зоны термического влияния (ЗТВ) [6]. Причем эти трещины, как правило, появляются при разной $v_{кр}$. Это позволяет количественно охарактеризовать чувствительность к определенному типу трещин. Более точную информацию о моменте начала образования трещин можно получить, исследуя поверхность шва с применением оптических методов увеличения.

Целью работы было сравнительное исследование чувствительности к образованию горячих

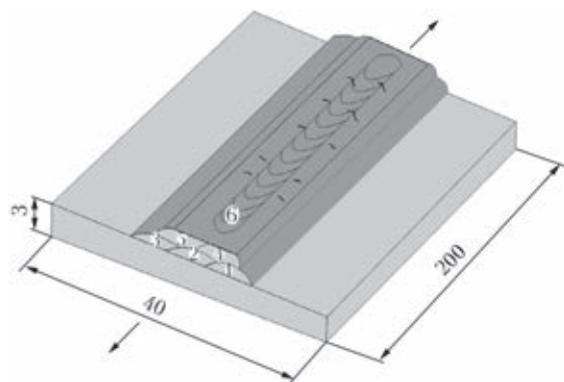


Рис. 3. Схема проведения эксперимента по оценке трещиностойкости металла сварных швов со стабильно аустенитной структурой. Цифрами 1–5 указана очередность выполнения сварных швов при подготовке образца сваркой ТИГ с присадочной проволокой; 6 – контрольный шов с одновременной принудительной деформацией (ТИГ без присадки). Стрелками показано направление принудительного деформирования трещин промышленных сварочных проволок методом PVR-test.

Проволока Св-06Х18Н10 используется для сварки конструкций из высоколегированных сталей общего назначения и имеет в швах некоторое количество δ -феррита, который противодействует возникновению горячих трещин.

Проволока ЭП-690 рекомендована для сварки конструкций из аустенитных сталей со стабильно аустенитной структурой. В составе швов δ -феррит, который в некоторых случаях является нежелательной составляющей из-за охрупчивания металла в процессе эксплуатации, отсутствует. В этом случае достаточная трещиностойкость при сварке должна достигаться дополнительным легированием швов такими элементами, как марганец, молибден, азот.

Химический состав сварочных проволок, приведен в табл. 1.

Также исследовали высокохромистые присадочные материалы на никелевой основе типа сплава Inconel 690, которые широко используют при изготовлении узлов ядерных энергетических установок (табл. 2). Изучали влияние молибдена и ниобия, дополнительно легирующих проволоку Inconel 52MSS, на чувствительность к образованию горячих трещин.

Таблица 1. Химический состав исследуемых сварочных проволок, мас. %

Марка проволоки	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	S	P
Св-06Х18Н10 (ГОСТ 2646–70)	0,05	0,7	1,5	19,1	10,1	-	-	<0,02	<0,02
ЭП-690	≥0,03	0,50	9,8	18,2	14,1	2,5	0,06	<0,02	<0,02

Таблица 2. Химический состав высокохромистых сварочных материалов на никелевой основе, мас. %

Марка материала	C	Mn	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	S	P	Al	Si
Inconel 690	0,025	0,24	Основа	29,72	10,3	-	-	0,28	0,002	0,005	0,87	0,32
Inconel 52	0,026	0,31	->-	28,8	8,5	0,03	0,03	0,51	0,001	0,004	0,72	0,12
Inconel 52MSS	0,024	0,29	->-	30,3	7,2	2,52	3,51	0,25	0,0008	0,0006	0,22	0,15

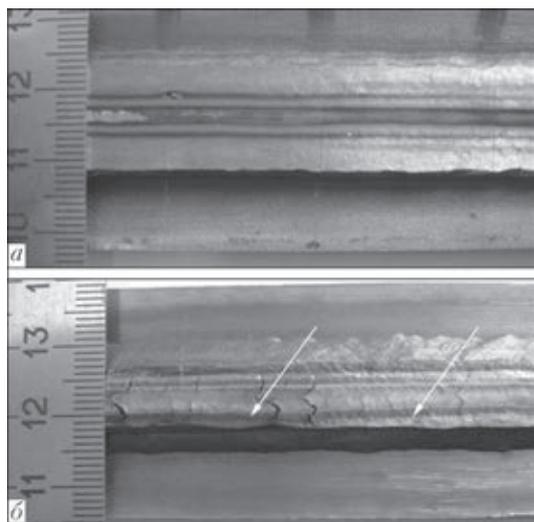


Рис. 4. Общий вид поверхности образцов после испытаний по методике PVR-test: *а* — сварочная проволока Sv-06X18H10; *б* — ЭП-690 (стрелками показаны горячие трещины)

При изготовлении образцов использовалась стабильно аустенитная высоколегированная сталь X20H16AG6, на которую были выполнены наплавки сварочной проволокой Sv-06X18H10 и ЭП-690, а также никелевый сплав Inconel 690, на котором выполняли многослойные наплавки проволоками Inconel 52 и Inconel 52MSS.

Схема выполнения наплавки для получения образцов при принудительном нагружении согласно методике PVR-test приведена на рис. 3.

Контрольный шов выполняли сваркой ТИГ на режиме: $I_{св} = 60$ А; $U_{д} = 9,5$ В; $v_{св} = 7,2$ м/ч; без присадки.

Сварку с одновременным деформированием образца осуществляли на разрывной машине FP100/1 с жесткой системой нагружения. В процессе испытания происходит регистрация нагрузки при деформировании образца, а также регистрация величины и скорости перемещения захватов образца.

Анализ поверхности швов, выполненных проволокой Sv-06X18H10, показал полное отсутствие горячих трещин в металле контрольного шва и зоны термического влияния при выполнении контрольного шва (рис. 4, *а*, 5). Таким образом, можно сделать вывод, что хромоникелевые высоколегированные швы, выполненные проволокой Sv-06X18H10, нечувствительны как к кристаллизационным трещинам, так и к трещинам провала пластичности.

Исследование поверхности швов, выполненных проволокой ЭП-690, показало, что в металле швов и зоны термического влияния контрольного шва, особенно при высоких значениях скорости деформирования, возникают горячие трещины (рис. 6), причем с увеличением скорости деформирования количество трещин увеличивается (рис. 7). Если принять во внимание факт, что склонность к возникновению трещин пропорциональна количеству трещин, которые возникли при сварке по методике PVR-test, можно считать, что исследованные сварные соединения должны быть наиболее чувствительны к возникновению трещин провала пластичности (рис. 8).

Обобщение данных по результатам испытания швов, выполненных высокохромистыми материа-

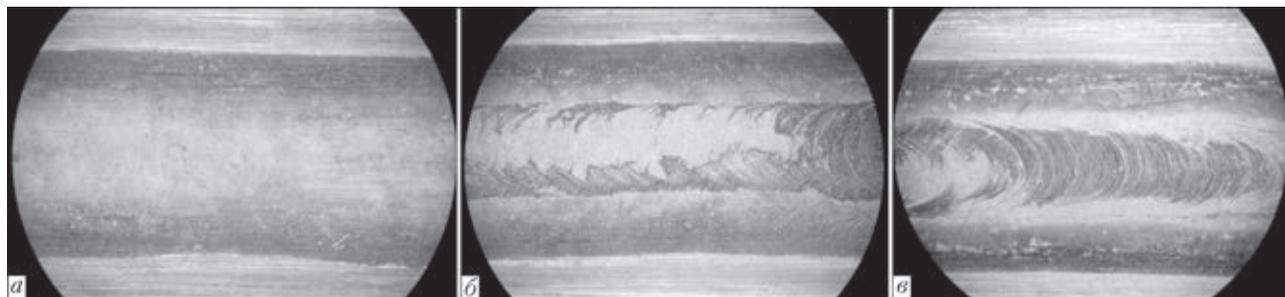


Рис. 5. Фрагменты поверхности швов ($\times 50$), выполненных проволокой Sv-06X18H10 при испытаниях с использованием метода PVR-test на скорости принудительного деформирования: *а* — 2; *б* — 8; *в* — 12 мм/мин



Рис. 6. Фрагменты поверхности швов ($\times 50$), выполненных проволокой ЭП-690 при испытаниях с использованием метода PVR-test на скорости принудительного деформирования: *а* — 2; *б* — 8; *в* — 12 мм/мин (стрелками показаны трещины провала пластичности)

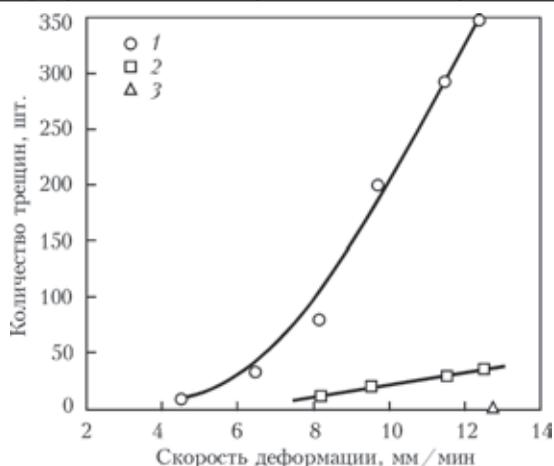


Рис. 7. Зависимость количества горячих трещин в металле швов, исследованных с помощью метода PVR-test, имеющих стабильно аустенитную структуру: 1, 2 — трещины провала пластичности и кристаллизационные трещины (проволока ЭП-690) соответственно; 3 — трещин нет (проволока Св-06Х18Н10)

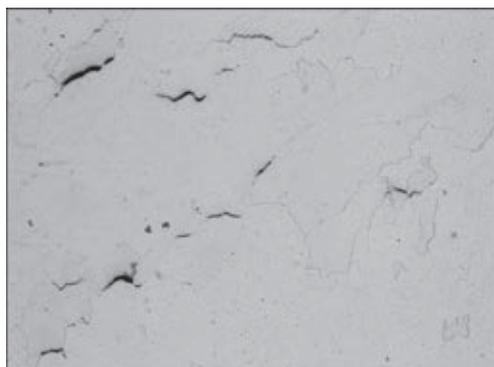


Рис. 8. Микроструктура ($\times 100$) шва с трещинами провала пластичности

лами (рис. 9), показывает, что швы, выполненные сварочной проволокой Inconel 52 со стабильно аустенитной структурой, чувствительны к образованию трещин провала пластичности, возникающих в ЗТВ сварного соединения, особенно при выполнении многопроходных швов. В то же время, дополнительное легирование швов ниобием и молибденом (проволока Inconel 52MSS), приводит к резкому уменьшению количества трещин. Таким образом, дополнительное легирование стабильно аустенитных швов молибденом и ниобием является эффективным способом улучшения свариваемости никелевых сплавов.

Выводы

1. Универсальным методом оценки свариваемости может быть машинный метод с регулируемой принудительной деформацией во время сварки ТИГ (метод PVR-test). Этот метод позволяет разделить условия возникновения кристаллизационных трещин и трещин провала пластичности, а также получить исчерпывающую информацию о коли-

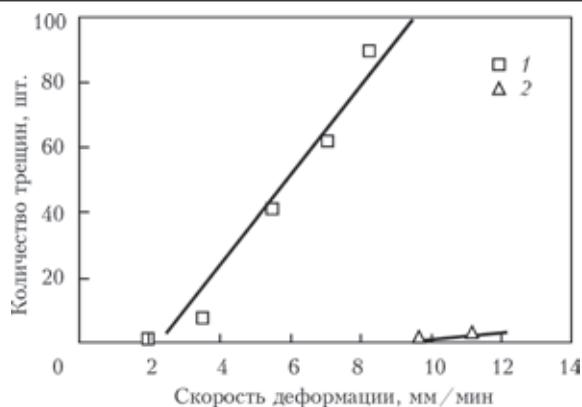


Рис. 9. Количество трещин провала пластичности в металле швов, исследованных с помощью метода PVR-test, выполненных сварочной проволокой: 1 — Inconel 52; 2 — Inconel 52MSS

чественных характеристиках чувствительности к возникновению трещин.

2. Основным типом трещин при сварке указанных материалов современными сварочными проволоками со сниженным количеством примесных элементов являются не кристаллизационные трещины, а трещины провала пластичности.

3. Подтверждено, что присутствие δ -феррита является кардинальным способом предупреждения горячих трещин. В случае, когда такой способ невозможно использовать из-за условий эксплуатации сварных соединений, целесообразно дополнительное легирование швов элементами, которые изменяют термомеханические условия в процессе сварки и способствуют, таким образом, предупреждению возникновения трещин.

4. Сварные швы с базовой системой легирования Ni–Cr–Fe чувствительны к образованию трещин провала пластичности. В то же время дополнительное легирование швов ниобием и молибденом приводит к значительному уменьшению количества трещин провала пластичности при многопроходной сварке.

1. ISO 17641-1:2004. Destructive tests on welds in metallic materials. Hot cracking tests for weldments. Arc welding processes. – Pt 1: General.
2. Hensworth W., Boniszewski T., Eaton N. F. Classification and definition of high temperature welding cracks in alloys // Metal Constr. and Brit. Weld. J. – 1969. – 1, № 2S. – P. 5–16.
3. Lippold J. C., Kotecki D. J. Welding metallurgy and weldability of stainless steels. – John Wiley&Sons, 2005. – 357 p.
4. Технологическая прочность и анализ причин ухудшения свариваемости и образования трещин / В. В. Дерломенко, К. А. Ющенко, В. С. Савченко, Н. О. Червяков // Автомат. сварка. – 2010. – № 9. – С. 26–30.
5. ISO/TR 17641-3:2005. Destructive tests on welds in metallic materials. Hot cracking tests for weldments. Arc welding processes. – Pt 3: Externally loaded tests.
6. Herold H., Streitenberger M., Pchemnikov A. Modelling of the PVR-test to examine the origin of different hot cracking types. – [2000]. – (Intern. Inst. of Welding; Doc. IX-II-474-00).

Поступила в редакцию 11.04.2014