



# СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ОБРАЗОВАНИЮ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА INCONEL 690

Академик НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО**, **В. С. САВЧЕНКО**, д-р техн. наук,  
**Н. О. ЧЕРВЯКОВ**, **А. В. ЗВЯГИНЦЕВА**, **Г. Г. МОНЬКО**, кандидаты техн. наук,  
**В. А. ПЕСТОВ**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проведена оценка склонности к образованию горячих трещин металла швов, полученных с помощью проволок Inconel®52 и Inconel®52MSS. Используются машинные методы испытаний (Varestraint-Test и PVR-Test), предусматривающие принудительную деформацию испытуемых образцов при сварке. Показано, что швы, выполненные проволокой Inconel®52MSS, более стойки к образованию трещин провала пластичности, но в несколько раз более чувствительны к образованию кристаллизационных трещин. Оценка характеристик пластичности металла сварных швов на установке «Ало-Тоо» показала, что в металле шва типа Inconel®52MSS отсутствует провал пластичности, тогда как для металла шва типа Inconel®52 характерно выраженное уменьшение показателей относительного удлинения.

*Ключевые слова:* сварка ТИГ, никелевые сплавы, присадочная проволока, металл шва, оценка трещиностойкости, интервал провала пластичности, граница зерна, принудительная деформация

Известна высокая чувствительность к образованию горячих трещин при сварке плавлением сварных соединений высоколегированных сталей со стабильно аустенитной структурой и никелевых суперсплавов. Горячие трещины по своей природе разделяют на два типа (рис. 1): кристаллизационные (тип 1) и подваликовые (тип 2) трещины, возникшие в процессе термосилового нагружения зон металла многопроходных швов [1]. Температурный интервал образования кристаллизационных трещин 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 определяется примерным соотношением  $(0,6...0,8)T_S$  [2]. В этом интервале трещины зарождаются и распространяются по границам большеугловых аустенитных зерен [3].

Чувствительность к образованию горячих трещин определяется следующими факторами [4–8]:

химическим составом металла шва по основным и примесным элементам, имеющим ограниченную растворимость в твердом растворе и определяющим температурный интервал кристаллизации;

значением и темпом нарастания деформации при кристаллизации шва и последующего охлаждения;

наличием условий для перераспределения примесных элементов углерода, серы, кислорода и

прочих с высокой диффузионной подвижностью при термосиловом воздействии процесса сварки плавлением на металл;

формированием тонкой структуры при одно- и многопроходной сварке в швах, определяющей механизм пластической деформации в металле поликристаллических швов;

когезионной прочностью границ зерен в швах со стабильно аустенитной структурой, определяющей условия зарождения горячих трещин.

Целью настоящей работы являлось проведение сравнительной оценки и исследования чувствительности к образованию горячих трещин в швах и сварных соединениях сплава Inconel 690 с использованием сварочных проволок Inconel®52 и Inconel®52MSS.

Разработаны специальные образцы для моделирования условий деформации наплавленного металла при выполнении многопроходных сварных швов в реальных конструкциях. Оценка чувствительности к образованию горячих трещин, в том числе в многопроходных швах, выполняется на технологических пробах, имитирующих реализацию термосилового воздействия процесса сварки на формирование структуры и образование горячих трещин. Применяют также машинные методы с дозированной принудительной деформацией. В этом случае наиболее эффективны Varestraint-Test и PVR-Test (Programmierter Verformungs-Riss Test) [9]. С помощью этих методов оценивали чувствительность к образованию кристаллизационных горячих трещин, а также трещин провала пластичности при многопроходной сварке никелевого сплава Inconel 690 сварочной проволокой Inconel®52MSS, имеющей по предвари-

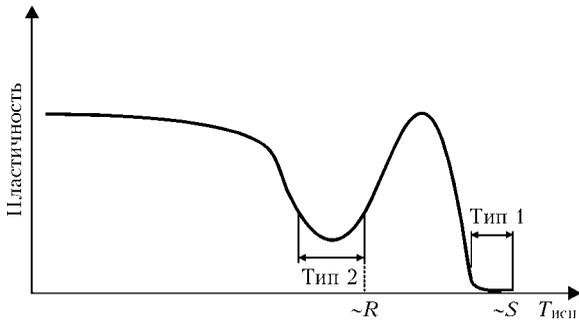


Рис. 1. Температурные интервалы, в которых низкая пластичность приводит к трещинам двух типов во время сварки [1] (S — солидус, R — рекристаллизация)

тельным данным высокую стойкость против образования трещин в низкотемпературной области провала пластичности. Исследования предусматривали построение температурных интервалов хрупкости и определение критического значения деформации  $\epsilon_{кр}$  при сварке плавлением. Кроме того, определяли критическую скорость деформации (PVR-Test), что позволяет оценить чувствительность к образованию как кристаллизационных, так и трещин провала пластичности.

Химический состав основного металла и сварочных проволок приведен в таблице.

Микроструктура сплава Inconel 690 является мелкозернистой, не текстурированной, состоит из аустенитных зерен и двойников отжига, расположенных внутри зерен. Значительного количества избыточных фаз либо пограничных выделений не обнаружено.

При подготовке образцов для исследования свариваемости по методам Vareststraint-Test и PVR-Test на образцах сплава Inconel 690 размерами соответственно  $8 \times 40 \times 170$  и  $8 \times 50 \times 200$  мм выстрагивали канавку, которую предварительно заполняли многослойным швом с использованием проволок Inconel@52 и Inconel@52MSS. Элементы разделки кромок и порядок наложения швов приведены на рис. 2.

Наплавку проводили проволоками Inconel@52 и Inconel@52MSS диаметром 0,9 мм импульсно-дуговой сваркой вольфрамовым электродом в среде аргона. Устойчивое формирование шва достигалось применением колебательных движений вольфрамового электрода и присадочной проволоки с заданной амплитудой и частотой при оптимальных параметрах режимов сварки. Из наплавленных пластин вырезали образцы для испы-

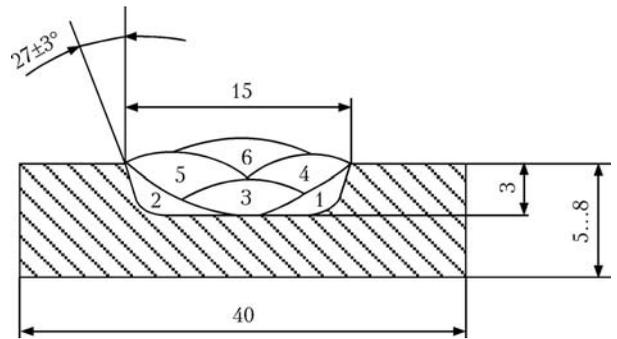


Рис. 2. Схема порядка заполнения канавки валиками (швы наплавки) образцов проб для испытаний по методикам Vareststraint-Test и PVR-Test

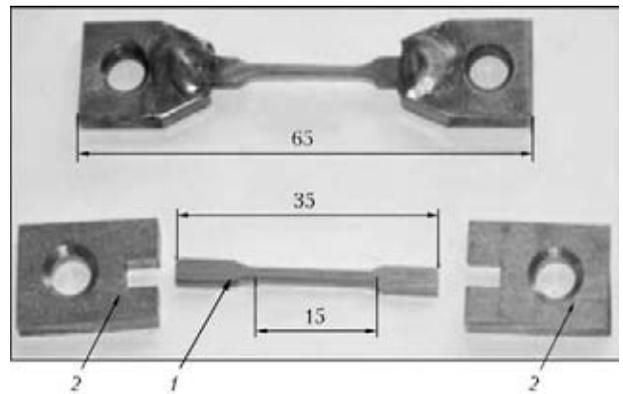


Рис. 3. Внешний вид составного образца для оценки высокотемпературных свойств многопроходных швов: 1 — рабочая часть составного образца из соединения In 690, выполненного проволокой Inconel@52MSS и Inconel@52; 2 — захват из стали типа 304

таний: для пробы Vareststraint-Test размером  $170 \times 70 \times 3,5$  мм для PVR-Test — размером  $200 \times 40 \times 3,5$  мм. Кроме того, из металла швов вырезали образцы (рис. 3) для оценки пластичности наплавленного металла в интервале провала пластичности [10].

Для оценки свариваемости металлических материалов перспективно применение машинных проб с принудительной деформацией свариваемого образца, обеспечивающих дозированную по значению и скорости деформацию.

Способ оценки предусматривает выполнение сварки ТИГ без присадки плоской пластины с одновременной продольной относительно направления сварки, меняющейся во времени деформации пластины.

Принцип реализации PVR-Test показан на рис. 4 [11]. Характерной особенностью испыта-

**Химический состав основного металла и сварочных проволок Inconel@52 и Inconel@52MSS, мас. %**

Материал	C	Mn	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	S	P	Al	Si
In 690	0,020	—	Основа	29,72	10,30	—	—	0,28	0,002	0,005	0,87	0,32
In 52MSS	0,024	0,29	54,55	30,30	7,24	2,52	3,45	0,25	0,002	0,0055	0,22	0,15
In 52	0,021	0,24	59,17	29,19	9,99	—	0,01	0,51	0,001	0,003	0,72	0,12

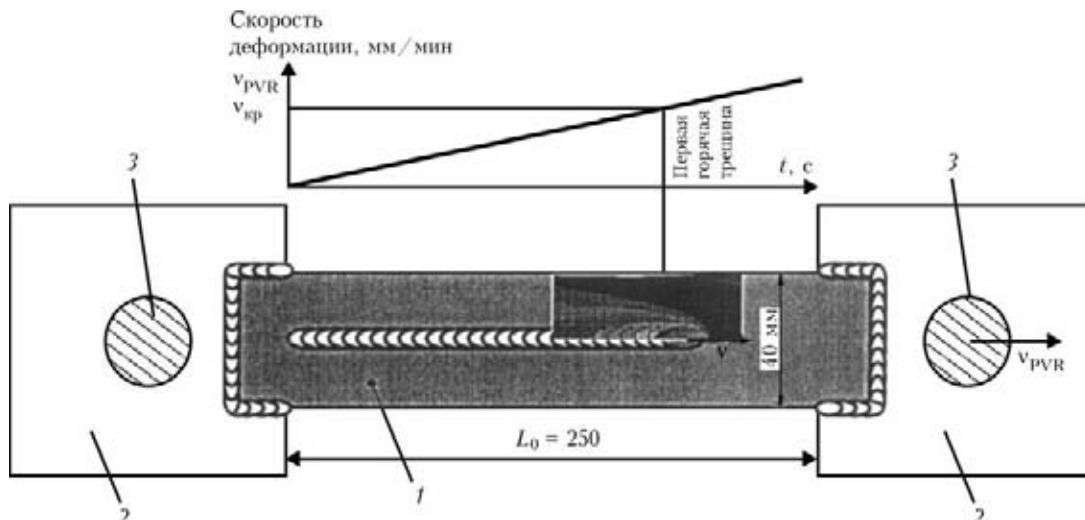


Рис. 4. Схема принципа реализации PVR-Test [11]: 1 — образец; 2 — захваты; 3 — крепежные штифты для нагружения образцов

ний является обеспечение требуемого диапазона величины принудительных деформаций исследуемого образца в процессе сварки и скорости их изменения. В этом случае необходима реализация двух зависимостей формирования деформаций:

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = v, \quad \frac{\Delta v}{\Delta t} = \text{const},$$

где  $l$  — перемещение захватов 2 (рис. 4);  $v$  — скорость перемещения захватов;  $t$  — время перемещения.

Критерием чувствительности к образованию трещин является критическая скорость деформации  $v_{кр}$ , при которой появляются первые трещины. При выполнении сварки возможно одновременное появление трещин как в шве, так и в металле ЗТВ. Причем эти два типа трещин имеют различную природу образования [12] и, как правило, проявляются при различной скорости кри-

стической деформации  $v_{кр}$ . Кристаллизационные трещины возникают из-за развития процесса ликвации и образования межзеренных жидких прослоек в температурном интервале, близком к  $T_c$ . Они располагаются по границам зерен в металле шва. Трещины провала пластичности образуются в результате потери пластичности металла и располагаются на некотором расстоянии от линии сплавления в металле ЗТВ, температура которой не достигала температуры плавления. Это позволяет количественно характеризовать чувствительность к определенному типу трещин. На рис. 5, 6 показаны положение образца после сварки и внешний вид его поверхности.

В процессе проведения эксперимента на установке PVR фиксируется диаграмма перемещения захватов установки от времени и, исходя из данных диаграммы, определяется скорость деформации металла в каждом из восьми участков. Такие замеры позволяют построить зависимость количества трещин исследуемого типа от скорости деформации и из графика путем экстраполяции при пересечении прямой с осью абсцисс определить критическую скорость деформации  $v_{кр}$ .

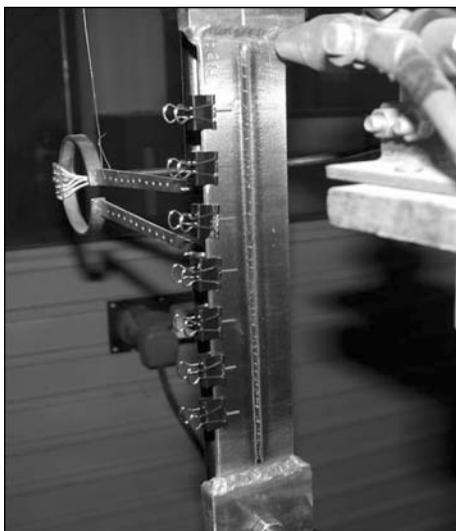


Рис. 5. Общий вид образца после сварки на установке PVR-Test

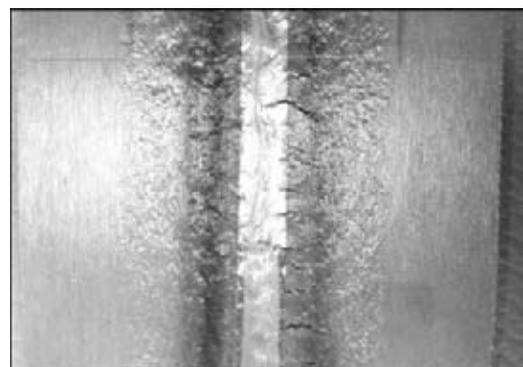


Рис. 6. Поверхность образца после испытаний на свариваемость по методике PVR-Test



Рис. 7. Кристаллизационные трещины в швах, выполненных проволокой Inconel@52MSS (×10)

Количество трещин, классифицированных как трещины провала пластичности, подсчитывали, выбирая трещины, которые начинались и оканчивались в металле ЗТВ. При этом использовали оптический микроскоп с увеличением 50.

В качестве кристаллизационных принимали трещины, образовавшиеся в сварном шве. Некоторые из них останавливаются в металле ЗТВ, образуя в месте остановки характерную пластическую деформацию. Анализ чувствительности к образованию горячих трещин проводили путем подсчета количества трещин провала пластичности, располагающихся на некотором удалении от линии сплавления, а также кристаллизационных трещин, образующихся, как правило, в сварном контрольном шве. Схему классификации трещин (рис. 7) принимали аналогично схеме, приведенной в работе [13].

При исследовании свариваемости по методике Varestraint-Test [14] применяется принудительная деформация изгибом пластинки металла при сварке. При этом скорость деформации должна значительно превышать скорость сварки, чтобы по возможности уменьшить перемещение сварочной ванны за время деформации. Критерием оценки свариваемости являются параметры температурного интервала хрупкости, а также критичес-

кое значение деформации  $\epsilon_{кр}$ , при котором еще нет трещин. Исследование оценки устойчивости проволоки к образованию трещин проводили на серии пластин размером 170×60×3,5 мм. Значения принудительной деформации выбирали в интервале 0,2...2 %, что соответствует радиусам оправки от 850 до 85 мм. Параметры сварки для Varestraint-Test были следующими:  $I_{св} = 90$  А,  $U_{д} = 9,7$  В,  $v_{св} = 8$  м/ч, скорость потока аргона примерно 8,5 л/мин.

Испытания проводили с целью определения кратковременной прочности и относительного удлинения  $\delta$  исследуемого металла в температурном интервале 20...1100 °С с использованием установки «Ала-Тоо» (типа Gleeble). Поддержание заданной температуры, регистрация нагружения, расчет и представление в графическом виде кривой нагрузка — перемещение осуществляется компьютерной программой.

Системы нагружения установки «Ала-Тоо» позволяют оценивать пластичность металла в широком температурном интервале в вакууме ( $10^{-5}$  мм рт.ст) (рис. 8).

Результаты исследований показали значительное отличие в чувствительности к образованию кристаллизационных трещин и трещин провала пластичности металла швов, выполненных проволоками Inconel@52 и Inconel@52MSS. Швы, выполненные проволокой Inconel@52, в минимальной мере чувствительны к образованию кристаллизационных трещин и чувствительны к трещинам провала пластичности. Трещины провала пластичности расположены на участках металла ЗТВ, температура которых во время сварки не достигала  $T_s$ , на расстоянии от 100 мкм до 2 мм от линии сплавления.

Швы, выполненные проволокой Inconel@52MSS, наоборот, весьма чувствительны к образованию кристаллизационных трещин и практически не чувствительны к трещинам провала пластичности. Схематически эта зависимость показана на рис. 9.

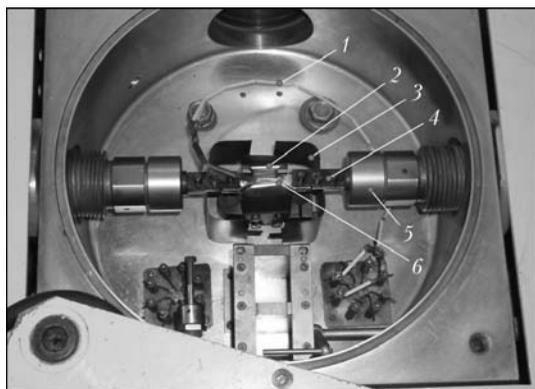


Рис. 8. Вид вакуумной камеры установки «Ала-Тоо» с устройством для деформирования образца: 1 — платиново-родиевая термопара; 2 — устройство радиационного нагрева; 3 — тепловой экран; 4 — захват; 5 — тяга; 6 — образец

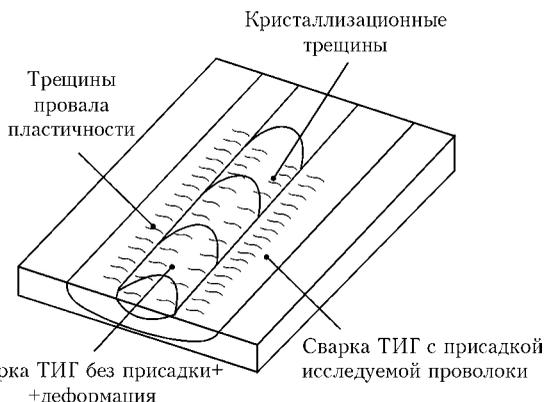


Рис. 9. Схема преимущественного расположения трещин в швах после испытания по методике PVR-Test

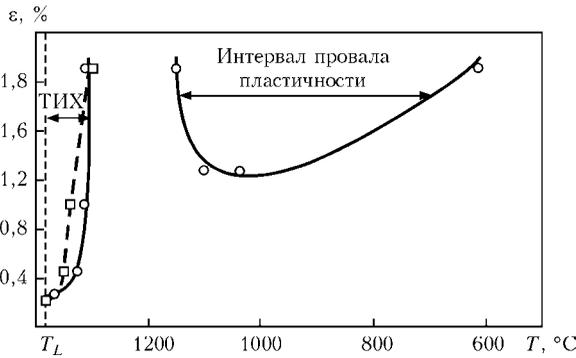


Рис. 10. Температурные интервалы хрупкости швов, выполненных проволокой Inconel@52 (сплошная кривая) и Inconel@52MSS (штриховая), при оценке свариваемости по методике Vareststraint-Test

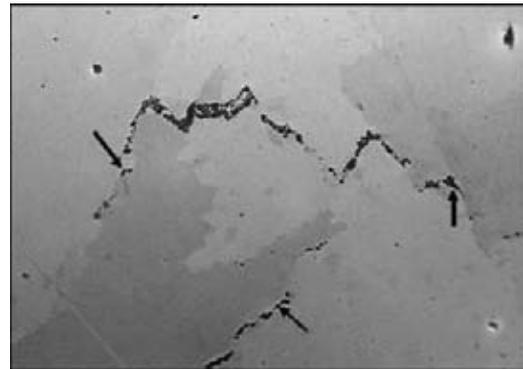


Рис. 11. Характер распространения кристаллизационных трещин (указаны стрелками) в металле шва, выполненном проволокой Inconel@52MSS (×200)

Построение температурных интервалов хрупкости (ТИХ) с использованием методики Vareststraint-Test подтверждает полученные результаты (рис. 10). Для проволоки Inconel@52 показано наличие двух температурных интервалов хрупкости — высоко- и низкотемпературного.

При испытаниях проволоки Inconel@52MSS с принудительной деформацией до 2,3 % низкотемпературного интервала хрупкости не выявлено, что свидетельствует о более высокой стойкости данных швов к образованию трещин провала пластичности.

Микроструктура металла исследуемых швов с гранцентрированной кубической решеткой является поликристаллической структурой, состоящей из зерен различной кристаллографической ориентации в пределах каждого зерна, разделенной границами. По границам зерен при возникновении соответствующих условий могут образовываться горячие трещины, в первую очередь, трещины провала пластичности. В соответствии с условиями кристаллизации швы имеют направленную ячеистую либо ячеисто-дендритную структуру, формирующую механизм образования кристалли-

зационных трещин. Температурный интервал провала пластичности присутствовал в швах Inconel@52 и отсутствовал в швах Inconel@52MSS во всем интервале принятых деформаций.

С учетом полученных результатов можно полагать, что кристаллизационные трещины образуются преимущественно по большеугловым границам вытянутых аустенитных зерен в процессе их формирования при кристаллизации (рис. 11).

Металлографические исследования многослойных швов, выполненных сваркой ТИГ с присадкой проволоки Inconel@52MSS, и контрольного шва, полученного сваркой ТИГ без присадки во время принудительной деформации по методике PVR-Test, позволили подтвердить данные, что металл исследуемых швов практически не чувствителен к образованию трещин провала пластичности, являющихся основным видом микротрещин при выполнении многопроходных сварных швов со стабильноаустенитной структурой.

Результаты оценки температурной зависимости пластичности металла швов, выполненных проволоками Inconel@52MSS и Inconel@52, приведены на рис. 12.

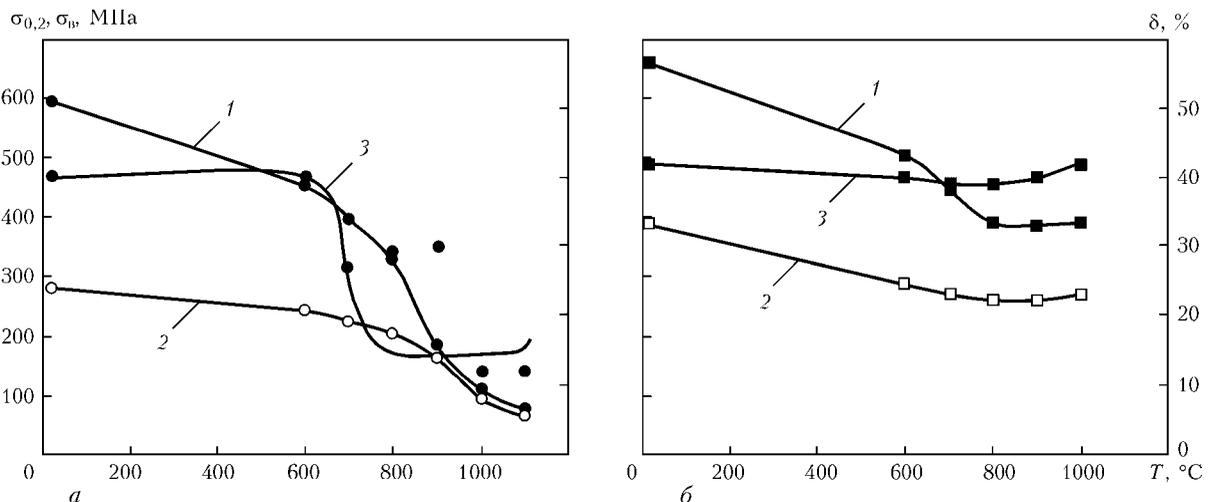


Рис. 12. Температурная зависимость прочности и пластичности образцов из сварного соединения, выполненного проволокой Inconel@52 (а) и Inconel@52MSS (б): 1 —  $\sigma_B$ ; 2 —  $\sigma_{0,2}$ ; 3 —  $\delta$

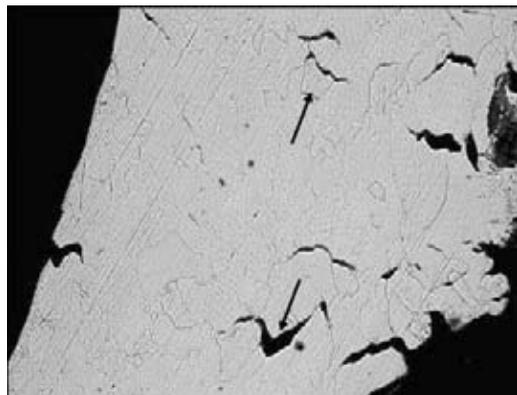


Рис. 13. Микроструктура ( $\times 100$ ) металла многопроходного шва, выполненного проволокой Inconel®52, при температуре провала пластичности (стрелками показано межзеренное разрушение)

В противоположность образцам из соединения, выполненного проволокой Inconel®52, на кривой пластичности соединения сплава, выполненного проволокой Inconel®52MSS, слабо просматривается провал в характерной температурной области (рис. 12, б), что вызвано особенностями состава данной проволоки.

Анализ микроструктуры образцов из металла швов показывает, что в результате нагружения швов Inconel®52 происходит хрупкое межзеренное разрушение (рис. 13).

Таким образом, основной причиной образования трещин провала пластичности в швах со стабильно аустенитной структурой является миграция ряда примесных элементов на границы зерен в многопроходных сварных швах, ускоряемая термопластической деформацией.

Анализ опубликованных данных [15], а также полученные результаты исследований позволяют выдвинуть гипотезу о возможном механизме образования трещин при многопроходной сварке аустенитных высоколегированных сталей и никелевых сплавов. Согласно этой гипотезе трещины образуются по большеугловым границам зерен из-за сегрегации на границы активно диффундирующих примесных элементов, таких как углерод, кислород, сера, фосфор [16, 17]. Механизм влияния примесей на охрупчивание границ зерен в температурном интервале провала пластичности требует дополнительного изучения, что планируется в дальнейших исследованиях.

**Выводы**

1. Для исследований использовали машинные методики испытаний (Varestraint-Test и PVR-Test), предусматривающие принудительную деформацию испытуемых образцов при выполнении сварки, а также технологическую пробу — многослойную наплавку.

2. Построены температурные интервалы хрупкости швов при испытаниях на установке Vares-

taint-Test. Показано, что при сварке швов, выполненных проволокой Inconel®52MSS, во всех защитных атмосферах образуются только кристаллизационные трещины. При этом критическая деформация  $\epsilon_{кр} \approx 0,43\%$ . В температурном интервале  $700...1000\text{ }^\circ\text{C}$ , а также для всех вариантов швов трещины провала пластичности отсутствуют.

3. С использованием методики PVR-Test показано, что чувствительность к образованию трещин провала пластичности очень низкая, в то же время в сварных швах Inconel®52MSS при определенных условиях деформации наблюдается образование кристаллизационных трещин.

4. Оценка характеристик пластичности металла сварных швов, выполненных исследуемыми проволоками на установке «Ало-Тоо», показала, что в металле шва типа Inconel®52MSS отсутствует провал пластичности, тогда как для металла Inconel®52 характерно явно выраженное уменьшение показателей относительного удлинения. Полученные данные подтверждают высокую стойкость швов Inconel®52MSS против образования трещин провала пластичности (тип 2) и склонность к кристаллизационным трещинам в температурном интервале хрупкости (тип 1).

5. Возможной причиной межзеренного разрушения швов является понижение значений когезионной прочности границ зерен.

1. *Hemsworth W., Boniszewski T., Eaton N. F.* Classification and definition of high temperature welding cracks in alloys // *Metal Constr. and British Welding J.* — 1969. — 1, № 25. — P. 5–16.
2. *In situ scanning electron microscopy high temperature deformation experiments to study ductility dip cracking of Ni–Cr–Fe alloys / E. A. Torres, F. G. Petermella, R. Caram, A. J. Ramirez* // *In situ studies with phonons, neutrons and electrons scattering.* — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. — P. 27–39.
3. *Lippold J. C., Kotecki D. J.* *Welding Metallurgy and Weldability of stainless steels.* — John Wiley&Sons, 2005. — 357 p.
4. *Collins M. G., Lippold J. C.* An investigation of ductility dip cracking in nickel-based weld metals. Pt I // *Welding J.* — 2003. — 82, № 10. — P. 288–295.
5. *Collins M. G., Ramirez A. J., Lippold J. C.* An investigation of ductility dip cracking in nickel-based weld metals. Pt II // *Ibid.* — 2003. — 82, № 10. — P. 348–354.
6. *Collins M. G., Ramirez A. J., Lippold J. C.* An investigation of ductility dip cracking in nickel-based weld metals. Pt III // *Ibid.* — 2004. — 83, № 2. — P. 39–49.
7. *Lippold J. C., Nissley N. E.* Further investigation of ductility dip cracking in high chromium, nickel-based filler metals // *Welding in the World.* — 2007. — 51, № 9/10. — P. 24–30.
8. *Noecker F. F., DuPont J. N.* Metallurgical investigation into ductility dip cracking in nickel-based alloys. Pt II // *Welding J.* — 2009. — 88, № 3. — P. 62–77.
9. *Cross C. E., Coniglio N.* Weld solidification cracking: critical conditions for crack initiation and growth // *Hot cracking phenomena in welds II.* — Berlin, Heidelberg Springer-Verlag, 2008. — 49 p.
10. *Ющенко К. А., Савченко В. С., Звягинцева А. В.* Влияние структурных изменений при высокотемпературном нагреве на характеристики пластичности никелевых сплавов // *Автомат. сварка.* — 2001. — № 4. — С. 14–18.
11. *Herold H., Hubner A., Zinke M.* Investigation of the use of nitrogenous shielding gas in welding and its influence on the



- hot-crack behaviour of high temperature resistant fully austenitic Ni- and Fe-base alloys. — [2004]. — 16 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IX-2110-04).
12. *Yushchenko K. A., Savchenko V. S.* Classification and mechanisms of cracking in welding high-alloy steels and nickel alloys in brittle temperature ranges // Hot cracking phenomena in welds II. — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. — P. 95–114.
  13. *Vallant R., Cerjak H.* Investigation on the mechanical values and the hot crack susceptibility of Ni-base weld metals type 70/20 and 70/15 of different Nb contents. — [2004]. — 21 p. — (Intern. Inst. of Welding; IIW Doc. II-1535-04).
  14. *Savage W. F., Lundin C. D.* The vareststraint test // Welding J. — 1965. — 44, № 10. — P. 433–442.
  15. *Савченко В. С., Ющенко К. А.* Механизм образования и пути предотвращения подваликовых трещин при сварке аустенитных сталей // Автомат. сварка. — 1993. — № 12. — С. 8–11.
  16. *К возможному механизму образования трещин в стабильно аустенитных швах вследствие сегрегации кислорода / К. А. Ющенко, В. С. Савченко, Н. О. Червяков, А. В. Звягинцева // Там же. — 2010. — № 5. — С. 10–15.*
  17. *Исследование влияния локализованной сдвиговой деформации на состав поверхности стали, разрушенной в вакууме / В. И. Трефилов, В. П. Майборода, С. А. Фирстов, Ю. Н. Иващенко // Металлофизика. — 1986. — 8, № 3. — С. 78–83.*

Assessment of hot cracking susceptibility of the metal of welds made with Inconel®52 and 52MSS wires was performed. Machine testing methods (Varestraint test and PVT test) were used, which envisage forced deformation of tested samples in welding. It is shown that welds made with Inconel®52MSS wire are more resistant to ductility dip cracking, but are several times more sensitive to solidification cracking. Evaluation of ductility characteristics of weld metal in «Alo-Too» system showed that ductility dip is absent in weld metal of Inconel®52MSS type, whereas weld metal of Inconel®52 type is characterized by a pronounced lowering of relative elongation characteristics.

Поступила в редакцию 14.07.2011



## 12 МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА СВАРКА И РЕЗКА

10–13 апреля 2012

г. Минск ЗАО «МинскЭкспо»

### Направления экспозиций

- *Материалы для сварки, наплавки и пайки*
- *Оборудование и технологии сварки, резки, наплавки, пайки и термообработки*
- *Источники питания и системы управления сварочным оборудованием*
- *Оборудование для орбитальной сварки и обработки труб*
- *Электронно-лучевая, лазерная, плазменная сварка и резка*
- *Автоматизированные комплексные системы и агрегаты для сварки и резки*
- *Автоматизация сварочных производственных и технологических процессов, программное обеспечение*
- *Приборы для неразрушающего контроля сварных соединений*
- *Научное и информационное обеспечение сварки*
- *Система подготовки, переподготовки и аттестации сварщиков*
- *Охрана труда и экологическая безопасность в сварочном производстве*
- *Сертификация сварочного оборудования.*

*Выставка проводится одновременно с международным специализированным салоном «Защита от коррозии. Покрытия» и международной специализированной выставкой «Машиностроение-2012».*

*В программе выставки: конференции, семинары, пресс-конференции, деловые встречи, презентации отечественных и зарубежных фирм.*

**Контакты:** тел.: +375 17 226 98 58, 226 90 83, факс: +375 17 226 98 58, 226 99 36  
E-mail: e\_fodorova@solo.by, marta@minskexpo.com