

<http://dx.doi.org/10.15589/jnn20140402>

УДК 621.791/.792

Ч-45

## EVALUATION OF HOT CRACKING SUSCEPTIBILITY OF NICKEL-BASED ALLOYS DURING WELDING WITH FORCED DEFORMATION

### ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ К ОБРАЗОВАНИЮ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН В НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ ПРИ СВАРКЕ С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Mykola O. Chervyakov  
[savchenko@paton.kiev.ua](mailto:savchenko@paton.kiev.ua)

ORCID: 0000-0003-4440-7665

Н. О. Червяков,  
канд. техн. наук

The E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv

Институт электросварки им. Е.О. Патона, г. Киев

**Abstract.** Nickel alloys are widely used in the nuclear power industry, turbine construction, chemical engineering. The alloys have high mechanical properties, corrosion resistance, but they are prone to the hot cracking in welding. One of such alloys is Inconel 690. The aim of the article is to estimate the hot cracking susceptibility of Inconel 690 alloy in welding. The hot cracking resistance of the joint was determined according to the Varestraint-test method (longitudinal extension), the Transvarestraint-test method (lateral extension) and the PVR-test method (the in-plane tensile load acting along the weld with a programmable rate of deformation). The welding of the samples was performed by the nonconsumable electrode in the inert gas without additives (TIG) and by the multilayer cladding with the Inconel 52 wire, respectively. The criteria for evaluation of the hot cracking resistance according the first two methods were the total crack length as well as the maximum crack length or the temperature range of brittleness. The criterion of hot cracking susceptibility at the PVR-test was the critical strain rate at which the first cracks appear. The selected test methods allow one to set quantitative and qualitative assessment of the tendency against crystallization and undersolidus cracks. It is stated that the welds formed with the Inconel 52 wire are more susceptible to crack formation of holes of plasticity (undersolidus cracks ( $V_{cr} = 3$  mm / min) than to the formation of crystallization cracks ( $V_{cr} = 9$  mm / min)). The temperature range of the plasticity cracking holes is 1150 ... 600 °C. The destruction occurs on the big angle grain boundaries.

**Keywords:** Ni-based alloys, hot cracking, weldability tests, Varestraint-test, PVR-test.

**Аннотация.** Рассмотрена сравнительная оценка чувствительности к образованию горячих трещин методами Varestraint-test и PVR-test. Проведена оценка трещиностойкости сварных швов, выполненных проволокой Inconel 52, которая используется при изготовлении конструкций из никелевого сплава Inconel 690. Показано, что сварные швы имеют повышенную чувствительность к образованию трещин провала пластичности.

**Ключевые слова:** сплавы на никелевой основе, горячие трещины, оценка свариваемости, Varestraint-test, PVR-test.

**Анотація.** Розглянуто порівняльну оцінку чутливості до утворення горячих тріщин методами Varestraint-test і PVR-test. Проведено оцінку зварних швів, виконаних зварювальним дротом Inconel 52, який використовується при виготовленні конструкцій з нікелевого сплаву Inconel 690. Показано підвищену чутливість зварних швів до утворення тріщин провалу пластичності.

**Ключові слова:** сплави на нікелевій основі, гарячі тріщини, оцінка зварюваності, Varestraint-test, PVR-test.

## REFERENCES

- [1] Collins M.G., Ramires A.J., Lippold J.C. An investigation of ductility dip cracking in nickel-based filler materials – Part II. *Welding Journal*, 2003, no. 82. pp. 348–354.
- [2] Yushchenko K.A., Savchenko V.S., Chervyakov N.O., Zvyagintseva A.V., Guyot E. Comparative hot cracking evaluation of welded joints of alloy 690 using filler metals INCONEL 52 and 52 MSS. *Welding in the world*, 2011, vol. 55, no. 9–10, pp. 28–35.
- [3] Matsuoka T., Yamaoka Y., Hirano K., Hirano T. Development of Welding Methods for Dissimilar Joint of Alloy and Stainless Steel for PWR Components. *IHI Engineering Review*, 2013, vol. 45, no. 2, pp. 39–43.

- [4] Dave V.R., Cola M.J., Kumar M., Schwartz A.J., Hussen G.N.A. Grain Boundary Character in Alloy 690 and Ductility-Dip Cracking Susceptibility. *Welding Journal*, 2004, no. 83, pp. 1–5.
- [5] Hemsworth W., Boniszewski T., Eaton N.F. Classification and definition of high temperature welding cracks in alloys. *Metal Construction and British Welding journal*, 1969, vol. 1, no. 2S, pp. 5–16.
- [6] *INCONEL® alloy 690*, 2009. 8 p. Available at: <http://www.specialmetals.com>.
- [7] *ISO 17641-1:2004 Destructive tests on welds in metallic materials. Hot cracking tests for weldments. Arc welding processes. Part 1: General.* 5 p.
- [8] *ISO/TR 17641-3:2005. Destructive tests on welds and metallic materials – Hot cracking tests for weldments. Arc welding processes. Part 3: Externally loaded tests.* 14 p.
- [9] Noecker F.F., DuPout J.N. Metallurgical Investigation into Ductility Dip Cracking in Ni-Based Alloys. *Welding Journal*, 2009, pp. 62–77.
- [10] Ramires A.J., Lippold J.C. New Insight into the Mechanism of Ductility-Dip Cracking in Ni-base Weld Metals. *Hot Cracking Phenomena in Welds*, 2005, pp. 19–41.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Сплавы на основе никеля типа Inconel широко используются в атомной энергетике и химическом машиностроении. Эти материалы содержат более 50 % никеля и свыше 15 % хрома, имеют хорошие механические свойства, а также прекрасную сопротивляемость коррозии.

Сплав Inconel 690 является высокохромистым никелевым сплавом, используемым в настоящее время в нефтехимической и атомной промышленности [3, 6]. Высокое содержание хрома в сплаве (около 30 %) и никеля (более 58 %) оказывают определяющее влияние на сопротивляемость коррозии данного материала. В то же время сварочные материалы, используемые для сварки данного сплава, оказались склонными к образованию горячих трещин, преимущественно трещин провала пластичности.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В течение последних десятилетий проведено большое количество исследований, связанных с условиями образования трещин как в процессе сварки, так и при последующей эксплуатации, и предложены различные теории для описания механизмов растрескивания. Образование трещин принято классифицировать по температурному интервалу их образования. Трещины провала пластичности – это межзеренные разрушения, образующиеся в твердом состоянии при относительных температурах 0,5...0,8 температуры солидуса. Этот механизм разрушения свойственен сплавам с ГЦК-решеткой. Сообщается о нескольких факторах, влияющих на возникновение трещин провала пластичности [1, 2, 4, 9, 10]: химический состав, размер зерна, ориентация границ зерен относительно прикладываемого напряжения и морфология границ зерен. Однако механизм возникновения трещин провала пластичности до сих пор не ясен. Одна из причин недостаточного понимания этого явления состоит в сложности разделения трещин провала пластичности от кристаллизационных или ликвационных тре-

щин. Объективную информацию о чувствительности к образованию горячих трещин можно получить в том случае, если способ оценки даст возможность образования практически всех типов трещин на одном образце в течение одного эксперимента.

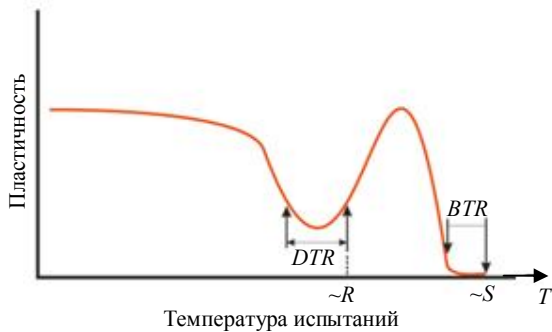
**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** – оценка склонности к образованию горячих трещин никелевого сплава Inconel 690 при испытаниях с приложением внешней нагрузки Vareststraint-test и PVR-test.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В соответствии с международным стандартом ISO 17641-1:2004 горячие трещины – это нарушения сплошности материала, происходящие при высокой температуре вдоль границ зерен (дендритных границ), когда деформация или темп деформации превышают определенный уровень. Они подразделяются на следующие три типа: кристаллизационные трещины, образующиеся при кристаллизации жидкой фазы металла сварного шва; ликвационные трещины, возникающие при расплавлении ликватов в зоне термического влияния (ЗТВ) основного металла или в многопроходных швах, когда наплавленный металл повторно нагревается при выполнении последующих проходов сварки; трещины, вызванные падением пластичности и образующиеся при сварке из-за снижения высокотемпературной пластичности (могут возникать как в швах, так и в ЗТВ, или в многопроходных швах) [7].

Причин возникновения трещин много, но обычно они возникают, когда локальная пластичность недостаточна для противодействия развивающимся сварочным деформациям. 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)  $T_s$  (рис. 1) [5]. В этом

интервале трещины зарождаются и распространяются по границам большеугловых аустенитных зерен.



**Рис. 1.** Изменение пластичности металла в сварных соединениях высоколегированных сталей и сплавов при охлаждении: *BTR* – кристаллизационные трещины; *DTR* – трещины провала пластичности; *S* – солидус; *R* – рекристаллизация

В этом же стандарте испытания по оценке чувствительности к образованию горячих трещин сплавов на основе никеля подразделяются на две основные группы: испытания с естественной жесткостью и испытания с приложением внешней нагрузки. При испытаниях с естественной жесткостью деформация шва образца происходит за счет напряжений, обусловленных жесткостью узла. Во время испытания с приложением внешней нагрузки деформация шва образца происходит под действием внешней силы, создаваемой специальным испытательным оборудованием.

Методика проведения испытаний с приложением внешней нагрузки регламентирована ISO/TR 17641-3:2005 [8]. В этом стандарте установлены следующие испытания по оценке трещиностойкости:

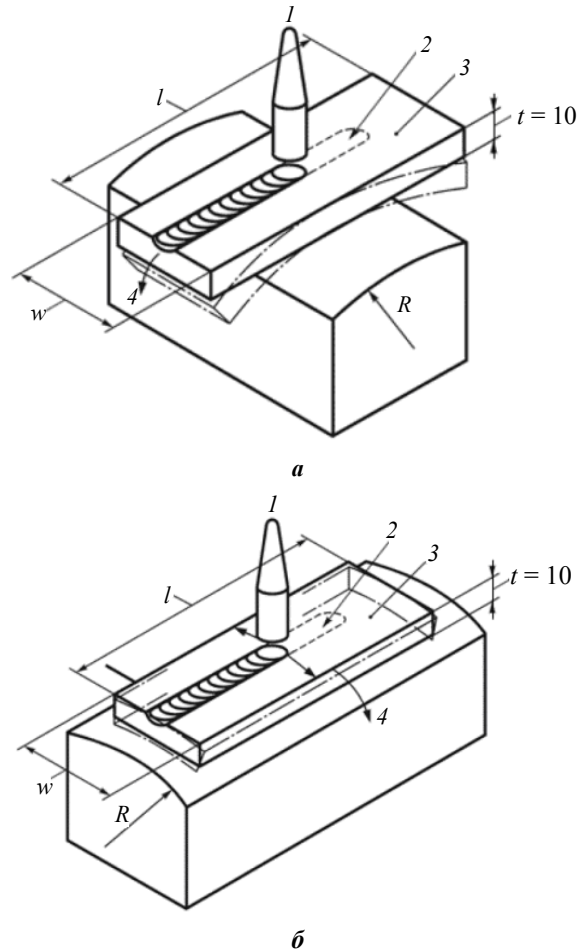
- растяжение в горячем состоянии;
- с приложением нагрузки, действующей вдоль сварного шва (*Varestraint-test*), и нагрузки, действующей поперек сварного шва (*Transvarestraint-test*);
- плоскостное растяжение (*PVR-test*).

Испытания по методике *Varestraint-test* либо *Transvarestraint-test* выполняются с использованием таких критериев, как общая длина трещин (*TCL*), максимальная длина трещины (*MCL*) или температурный интервал хрупкости (*BTR*). Температурный интервал хрупкости определяется исходя из максимальной длины трещины путем преобразования ее длины в температуру с использованием кривой охлаждения и скорости сварки.

При реализации этого метода сварка образца из исследуемого сплава осуществляется на специализированной установке неплавящимся электродом (*TIG*) в защитном газе без присадки. Скорость динамического деформирования образца во время сварки, благодаря применению пневматических систем напряжения, достигает величины  $300 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ . Заданная величина скорости деформации, реализуемая в спе-

циализированной установке, выбирается из условия уменьшения погрешности оценки *BTR* и определяется минимальной величиной продвижения фронта кристаллизации за время деформирования.

Схема проведения испытания *Varestraint-test* либо *Transvarestraint-test* показана на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема проведения испытания *Varestraint-test* (а) и *Transvarestraint-test* (б) [8]: 1 – положение горелки при изгибе образца; 2 – окончание сварки; 3 – образец; 4 – изменяемая гидравлической системой скорость изгиба образца

Процедура проведения опыта предусматривает проплавление пластины без присадки вольфрамовым электродом. Начальная часть шва выполняется без деформации. В момент нахождения сварочной ванны над верхней точкой оправки включается пневмопривод, перемещающий прижимы вниз. При этом процесс сварки не прекращается, продолжаясь еще некоторое время. В результате металл жидкой ванны и всех зон как в шве, так и в зоне термического влияния подвергается заданной деформации, инициируя образование горячих трещин.

Деформацию наружных слоев образца  $\varepsilon$  при изгибе рассчитывают по формуле

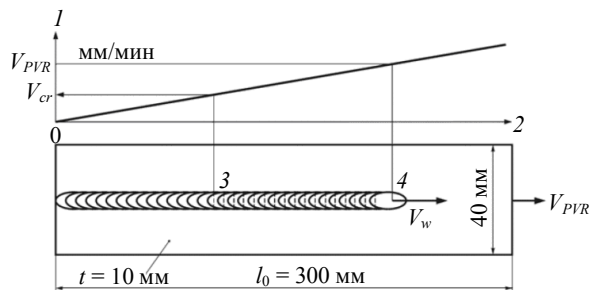
$$\varepsilon = \frac{t \times 100}{2R} \%,$$

где  $t$  – толщина свариваемой пластины;  $R$  – радиус оправки, на которой выполняется гибка.

Параметры сварки могут быть выбраны в зависимости от частных применений, но стандартными условиями являются 12,5 В, 85 А, 18 см/мин (малое вложение тепла); 13,5 В, 205 А, 11 см/мин (большое вложение тепла). В данной работе оценка трещиностойкости выполнялась в условиях малого тепловложения.

Процедура PVR-test (программируемым деформированием) отличается от испытаний нагрузкой, действующей вдоль сварного шва, и нагрузкой, действующей поперек сварного шва, фактически тем, что программируемое деформирование с линейным увеличением скорости растяжения происходит во время наплавки валика в том же направлении. Испытание можно проводить с применением присадочных материалов и без них [8].

Критерием чувствительности к образованию трещин выбрана критическая скорость деформации ( $V_{кр}$ ), при которой появляются первые трещины (рис. 3). При выполнении сварки возможно одновременное появление трещин как в шве, так и в зоне термического влияния. Причем эти трещины, как правило, появляются при разной величине скорости критической деформации  $V_{кр}$ . 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.

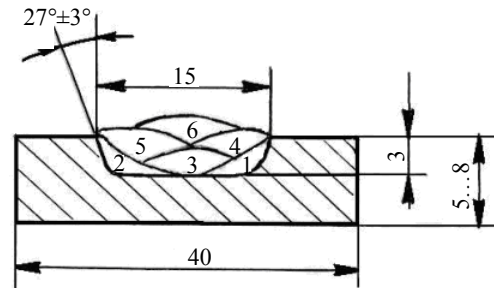


**Рис. 3.** Процедура испытания на сопротивляемость образованию горячих трещин программируемым деформированием (PVR-test) [8]: 1 – линейно увеличивающаяся скорость растяжения; 2 – время, с; 3 – первая горячая трещина; 4 – скорость сварки

Критическая скорость нагружения соответствует возникновению первой трещины, которая обнаруживается визуально при 25-кратном увеличении. Эту скорость используют в качестве критерия для PVR-test, чтобы определить сопротив-

ляемость образованию горячих трещин. Он может быть установлен для каждого из типов горячих трещин.

Изготовление образцов для испытания проводилось в соответствии со схемой, изображенной на рис. 4.



**Рис. 4.** Схема порядка заполнения канавки валиками при наплавке образцов для испытаний Varestreint-test и PVR-test

В основном металле из никелевого сплава Inconel 690 выстрагивалась канавка, в которую потом выполняли многослойную наплавку проволокой Inconel 52. Химический состав используемых материалов представлен в табл. 1.

Заполнение выборки исследуемой проволокой проводилось сварочным аппаратом марки АД-228 с блоком управления УПНС-304 и источником питания БП-500, оборудованным системой колебания, горелкой и присадочной проволокой для наплавки вольфрамовым электродом в среде защитного газа. После выполнения наплавки образцы подвергаются шлифованию до требуемых размеров.

Внешний вид установки динамического деформирования при сварке Varestreint-test и Transvarestreint-test, используемой в ИЭС им. Е.О. Патона, приведен на рис. 5.

Режим сварки при испытании методом Varestreint-test был выбран следующим:  $I_{св} = 90$  А;  $U_{д} = 9,7$  В;  $V_{св} = 8$  м/ч. Расход аргона около 9 л/мин.

Размер образца для исследования трещиностойкости методом Varestreint-test составляет 170×60×3,5 мм.

Величина принудительной деформации выбиралась в диапазоне от 0,2 до 2,0 %, что соответствует радиусам оправки  $R$  от 850 до 85 мм. Общий вид образцов после испытаний с различной величиной принудительной деформации показан на рис. 6.

**Таблица 1.** Химический состав используемых материалов

Марка сплава	Массовая доля элементов, %											
	C	Mn	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	S	P	Al	Si
In 690	0,025	–	Осн.	29,72	10,30	–	–	0,28	0,002	0,005	0,87	0,32
In 52	0,026	0,31	Осн.	28,80	8,50	0,03	0,03	0,51	0,001	0,004	0,72	0,12



Рис. 5. Внешний вид установки динамического деформирования для реализации испытаний Varestraint-test

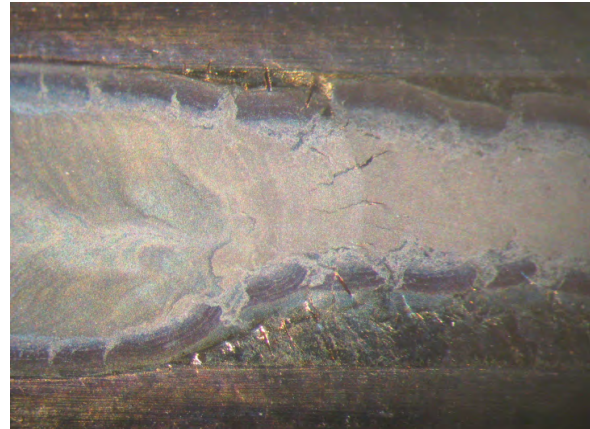


Рис. 7. Общий вид сварного шва с кристаллизационными трещинами при испытании с принудительной деформацией 2 %

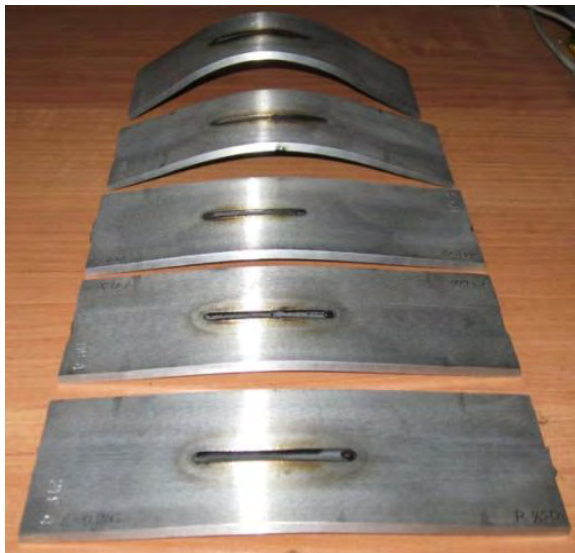


Рис. 6. Общий вид образцов после сварки на установке Varestraint-test с принудительным деформированием на оправках различного радиуса

Минимальная величина деформации, при которой еще не происходит образование трещин, составляет 0,25 %. Максимальное количество трещин как в шве, так и в околошовной зоне возникло при деформации 2 %, которая является максимально возможной для данной толщины металла, что связано с имеющимися в наличии радиусами оправок.

На рис. 7 и 8 показан сварной шов с кристаллизационными трещинами при испытании с принудительной деформацией в 2 %. Трещины провала пластичности возникают при деформации свыше 1 % в зоне термического влияния.

На рис. 9 показана зависимость между суммарной длиной трещин и величиной деформации. Видно, что швы данной проволоки проявляют увеличенный риск к образованию трещин.

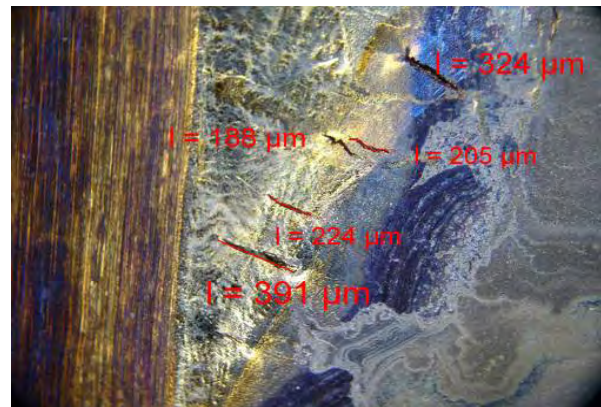


Рис. 8. Фрагмент сварного шва с измеренными длинами трещин при деформации 2 %

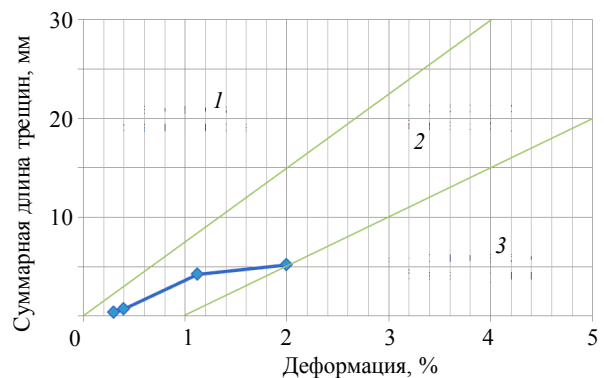


Рис. 9. Зависимость между деформацией и суммарной длиной трещин швов проволоки Inconel 52 после испытания Varestraint-test: 1 – высокий риск образования трещин; 2 – увеличенный риск образования трещин; 3 – высокая сопротивляемость образованию трещин

Одновременно в опыте регистрируется изменение температуры в момент кристаллизации и последующего охлаждения шва путем погружения в жидкую ванну вольфрамиевой термпары для определения граничных температур, при которых возникают трещины.

Измерив максимальные длины трещин, полученных при сварке с различной величиной принудительной деформации, и совместив их с распределением температур в шве и ЗТВ, построили температурные интервалы хрупкости (*BTR* – температурный интервал образования кристаллизационных трещин и *DTR* – температурный интервал образования трещин провала пластичности) (рис. 10).

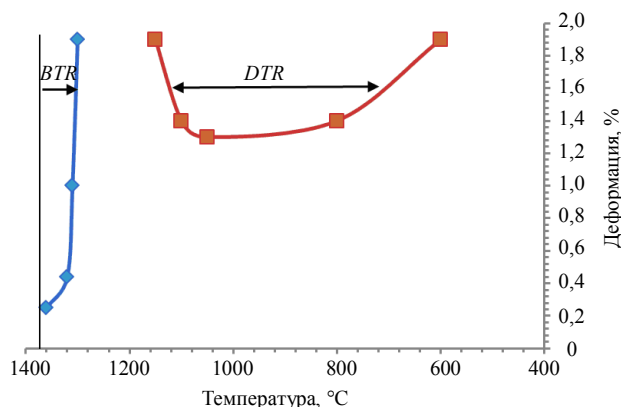


Рис. 10. Температурные интервалы хрупкости

Температурный интервал образования трещин провала пластичности составляет 1150...600 °С, величина критической деформации образования трещин провала пластичности около 1,2 %. Критическая величина образования кристаллизационных трещин составляет 0,25 %.

Исследование склонности к образованию трещин программируемым деформированием (PVR-испытание) в ИЭС им. Е.О. Патона выполняется на разрывной машине FP100/1 с жесткой системой нагружения (рис. 11,а). Внешний вид узла деформирования образцов для испытаний со сварочной горелкой приведен на рис. 11,б.

В данном исследовании использовали ступенчатое изменение величины перемещения захватов с увеличением абсолютной величины. Для этого образец разделяли на восемь участков, в каждом из которых скорость деформирования была постоянной, однако она увеличивалась от участка к участку на постоянную величину по мере прохождения сварочной дуги.

Образец размерами 200×40×3 мм сваривается в захваты разрывной машины и проводится испытание на следующем режиме сварки:  $I_{св} = 65$  А;  $U_{д} = 10$  В;  $V_{св} = 7,2$  м/ч. Расход аргона около 10 л/мин. Скорость нагружения изменялась от 2 до 14 мм/мин.



а



б

Рис. 11. Внешний вид машины PVR-test для проведения испытаний (а) и узел деформирования с образцом и сварочной горелкой (б)

В процессе нагружения выполняется регистрация нагрузки при деформировании, а также регистрация величины и скорости перемещения захватов образца. Эти параметры фиксируются с использованием тензометрических датчиков.

Количественную оценку чувствительности к образованию трещин с использованием методики PVR-test определяли по изменению критической скорости

перемещения захватов нагружающего устройства  $V_{кр}$  путем оценки суммарного количества видимых микротрещин на поверхности предварительной наплавки на образце по обе стороны контрольного переплавленного шва. Анализ подвергали каждый из восьми участков.

Общий вид образца в захватах после проведения испытаний показан на рис. 12.



Рис. 12. Общий вид образца со сварным швом в захватах разрывной машины после испытания

После выполнения сварки образец отрезается от захватов абразивным инструментом и подвергается анализу.

Анализ чувствительности к образованию трещин провала пластичности проводили путем подсчета количества трещин, которые образовались на некотором расстоянии от линии сплавления в сторону металла ЗТВ. Кристаллизационные трещины, как правило, образуются в контрольном сварном шве во время испытания на установке PVR-test.

Подсчет количества трещин в образцах проводили на оптическом микроскопе «Jenavert» с 50-кратным увеличением.

Фрагмент одного из участков с зонами образования трещин представлен на рис. 13. Стрелками указаны места образования трещин провала пластичности.

Трещины провала пластичности образуются в ЗТВ по большеугловым границам аустенитных зерен (рис. 14).

Подсчет количества трещин, образовавшихся в результате испытания, а также оценка критической скорости их образования позволили определить, что сварные швы, выполненные сварочной проволокой Inconel 52, имеют разную степень чувствительности как к образованию трещин провала пластичности (*DDC*), так и к образованию кристаллизационных трещин (*SC*) (рис. 15).

Многослойные швы, выполненные проволокой данного химического состава, менее чувствительны к образованию кристаллизационных трещин (первая трещина возникает при скорости перемещения захватов 9 мм/мин) и в то же время они имеют высокую чувствительность к образованию трещин провала пластичности (первая трещина возникает при скорости перемещения захватов 3 мм/мин).

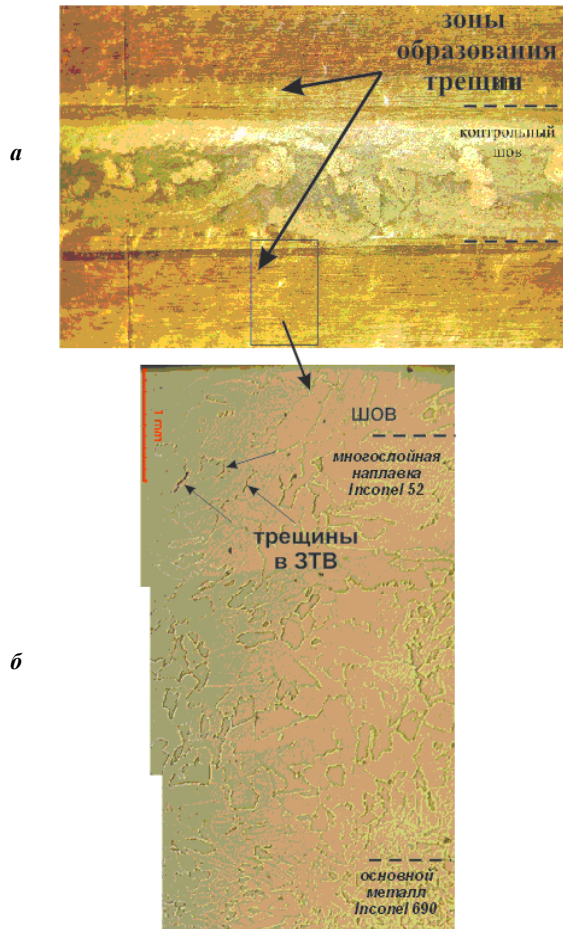


Рис. 13. Места образования трещин провала пластичности (а) и микроструктура с трещинами в ЗТВ (б)

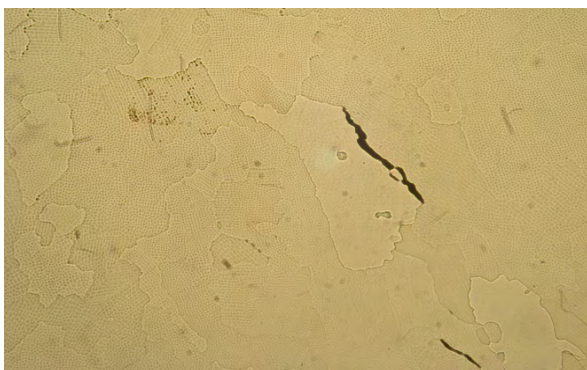


Рис. 14. Микроструктура ЗТВ с трещинами провала пластичности

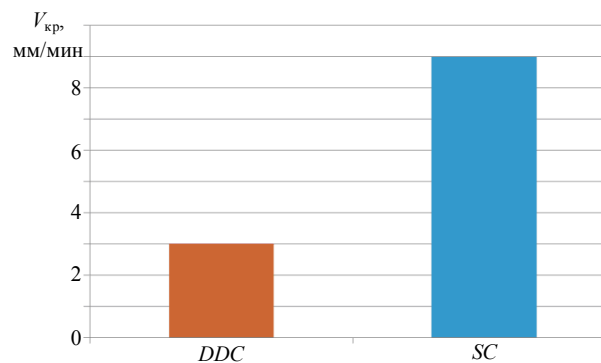


Рис. 15. Критическая скорость деформирования при испытании PVR-test

## ВЫВОДЫ

1. Выполненные исследования показали эффективность и достоверность использованных методик Varestraint-test и PVR-test для оценки свариваемости сплавов на никелевой основе. Они позволяют устанавливать не только качественные, но и количественные зависимости условий образования как кристаллизационных трещин, так и трещин провала пластичности.

2. Оценка свариваемости по методу Varestraint-test показала, что швы, выполненные данной проволокой, имеют увеличенный риск образования горячих трещин. При испытании образовались кристаллизационные трещины и трещины провала

пластичности. Температурный интервал образования трещин провала пластичности составляет 1150...600 °С, величина критической деформации около 1,2 %. Критическая величина деформации при образовании кристаллизационных трещин около 0,25 %.

3. По результатам испытания PVR-test установлено, что швы, выполненные проволокой Inconel 52, более чувствительны к образованию трещин провала пластичности ( $V_{кр} = 3$  мм/мин), чем к образованию кристаллизационных трещин ( $V_{кр} = 9$  мм/мин). Трещины провала пластичности образовывались в ЗТВ по большеугловым границам зерен.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Collins, M. G. An investigation of ductility dip cracking in nickel-based filler materials. Part II [Text] / M. G. Collins, A. J. Ramires, J. C. Lippold // *Welding J.* – 2003. – Vol. 82. – P. 348–354.
- [2] Comparative hot cracking evaluation of welded joints of alloy 690 using filler metals INCONEL 52 and 52 MSS [Text] / K. A. Yushchenko, V. S. Savchenko, N. O. Chervyakov, A. V. Zvyagintseva, E. Guyot // *Welding in the world.* – 2011. – Vol. 55, № 9/10. – P. 28–35.
- [3] Development of Welding Methods for Dissimilar Joint of Alloy and Stainless Steel for PWR Components [Text] / T. Matsuoka, Y. Yamaoka, K. Hirano, T. Hirano // *IHI Engineering Review.* – 2013. – Vol. 45, nr 2. – P. 39–43.
- [4] Grain Boundary Character in Alloy 690 and Ductility-Dip Cracking Susceptibility [Text] / V. R. Dave, M. J. Cola, M. Kumar, A. J. Schwartz, G. N. A. Hussen // *Welding J.* – 2004. – Vol. 83. – P. 1–5.
- [5] Hemsworth, W. Classification and definition of high temperature welding cracks in alloys [Text] / W. Hemsworth, T. Boniszewski, N. F. Eaton // *Metal Construction and British Welding J.* – 1969. – Vol. 1, nr 2S. – P. 5–16.
- [6] INCONEL®alloy 690 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.specialmetals.com>.
- [7] ISO 17641-1:2004. Destructive tests on welds in metallic materials. Hot cracking tests for weldments [Text] // *Arc welding processes. Part 1: General.* – 5 p.
- [8] ISO/TR 17641-3:2005. Destructive tests on welds and metallic materials. Hot cracking tests for weldments [Text] // *Arc welding processes. Part 3 : Externally loaded tests.* – 14 p.
- [9] Noecker, F. F. Metallurgical Investigation into Ductility Dip Cracking in Ni-Based Alloys. Part II / F. F. Noecker, J. N. DuPout // *Welding J.* – 2009. – March. – P. 62–77.
- [10] Ramires, A. J. New Insight into the Mechanism of Ductility-Dip Cracking in Ni-base Weld Metals [Text] / A. J. Ramires, J. C. Lippold // *Hot Cracking Phenomena in Welds.* – Berlin : Springer, 2005. – P. 19–41.

© М. О. Черв'яков

Надійшла до редколегії 07.05.2014

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. В. Ф. Квасницький