



Червяков Н. О.  
Ющенко К. А.  
Савченко В. С.  
Звягинцева А. В.

*Институт  
электросварки  
им. Е. О. Патона  
НАН Украины*

Chervyakov N. O.  
Yushchenko K. A.  
Savchenko V. S.  
Zvyagintseva A. V.

*E. O. Paton Electric  
Welding Institute NASU*

УДК 621.791.052:539

## ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ К ОБРАЗОВАНИЮ ТРЕЩИН И АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ СВАРКЕ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

*Выполнена оценка чувствительности к образованию горячих трещин при сварке сплавов на никелевой основе системы легирования Ni-Cr-Fe с использованием машинных методов испытаний. Показано, что сварные швы типа Inconel 52 имеют высокую чувствительность к образованию горячих трещин. Методом математического моделирования изучены особенности термомеханических процессов в сварном шве и зоне термического влияния на макро- и мезоуровнях.*

*Ключевые слова:* никелевые сплавы, свариваемость, горячие трещины, численное моделирование.

Высоколегированные стали и никелевые сплавы являются одними из наиболее востребованных конструкционных материалов, способных выдерживать экстремальные температурные и силовые нагрузки, а также противостоять воздействию агрессивных сред. Они наиболее часто применяются в химическом, нефтяном, энергетическом машиностроении и других отраслях промышленности для изготовления конструкций, работающих в широком диапазоне температур.

Большинство этих материалов имеет ряд существенных недостатков. Прежде всего – высокую чувствительность к образованию горячих трещин при сварке плавлением. Основные трудности сварки рассматриваемых материалов обусловлены их легированием и разнообразием условий эксплуатации сварных конструкций. Главной и общей особенностью таких материалов является склонность к образованию в шве и околошовной зоне горячих трещин, имеющих межзеренный характер.

Механизм образования трещин до сих пор остается дискуссионным. При разработке технологических рекомендаций для предотвращения образования горячих трещин необходимо оценить влияние условий сварки

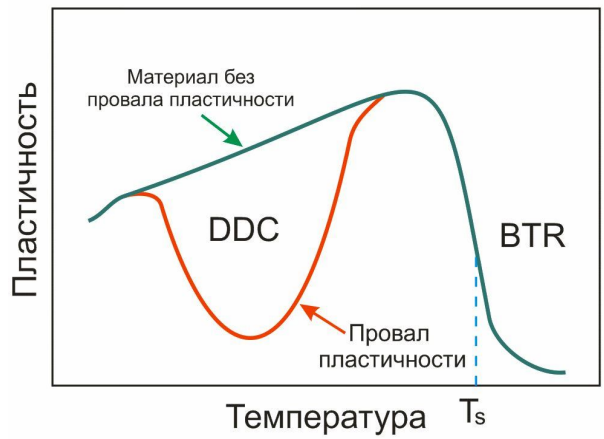
на процессы, которые определяют межзеренное разрушение и, в первую очередь, развитие высокотемпературных деформаций.

В соответствии с международным стандартом ИСО 17641-1:2004, горячие трещины (hot cracks) – это нарушения сплошности материала, происходящие при высокой температуре вдоль границ зерен (дендритных границ), когда деформации, развивающиеся при охлаждении сварного соединения или под действием извне, превосходят пластичность металла в определенной зоне сварного соединения. Горячие трещины в сварных соединениях разделяют на следующие типы: кристаллизационные трещины (solidification cracks), ликвационные трещины (liquation cracks) и трещины, вызванные падением пластичности (ductility dip cracks). Они имеют размеры от очень малых трещин ликвационного типа (длина менее 1мм) в ЗТВ или многопроходных швах до крупных кристаллизационных трещин. [1].

Температурный интервал образования кристаллизационных трещин (BTR) зависит от интервала твердожидкого состояния металла при кристаллизации шва. Нижняя граница этого интервала определяется значением



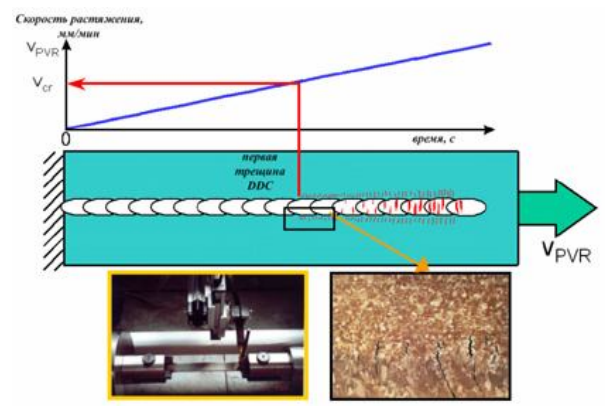
температуры солидуса при окончании кристаллизации ( $T_s$ ). Температурный интервал провала пластичности (DTR) определяется примерным соотношением (0,6-0,8)  $T_s$  (рис. 1). В этом интервале трещины зарождаются и распространяются по большеугловым границам аустенитных зерен.



**Рис. 1. Схема образования горячих трещин в сварных соединениях высоколегированных сталей и сплавов: BTR – кристаллизационные трещины; DCC – трещины провала пластичности [2]**

Оценка чувствительности к образованию горячих трещин выполнена с использованием машинного метода испытания PVR-Test, рекомендованного Международным институтом сварки для оценки свариваемости конструкционных материалов. Согласно международному стандарту ИСО 17641-3:2005 [3] способ оценки PVR-Test 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 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 испытуемого материала к определенному типу трещин.



**Рис. 2. Схема испытания PVR-Test [3]**

Химический состав исследуемых материалов приведен в таблице 1.

**Таблица 1**

**Химический состав исследуемых материалов**

Материал	Массовая доля элементов, %											
	C	Mn	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	S	P	Al	Si
Inconel 690	0.025	0,24	Base	29.72	10.3	-	-	0.28	0.002	0.005	0.87	0.32
Inconel 52	0.026	0.31	base	28.8	8.5	0.03	0,03	0.51	0.001	0.004	0.72	0.12

По результатам испытаний показано наличие двух типов горячих трещин в образцах – кристаллизационных трещин и трещин, вызванных падением пластичности, возникающих в соответствующих температурных интервалах провала пластичности (рис. 3).

Анализ данных показывает, что сварные швы, выполненные сварочной проволокой Inconel52 имеют разную степень чувствительности как к образованию трещин

провала пластичности, так и к образованию кристаллизационных трещин. Сварочная проволока данного химического состава почти нечувствительна к образованию кристаллизационных трещин (первая трещина возникает при скорости перемещения захватов 9 мм/мин.) и, в тот же время, она имеет высокую чувствительность к образованию трещин провала пластичности (первая трещина возникает при скорости перемещения захватов 3 мм/мин.).

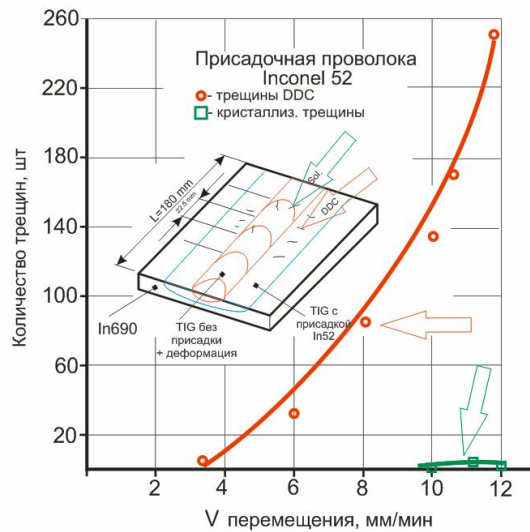
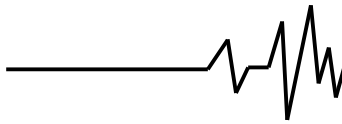


Рис. 3. Зависимость количества трещин от скорости перемещения захватов

Для более полного понимания причин образования горячих трещин при сварке и разработки эффективных методов их предотвращения необходимо иметь представление по кинетике сварочных напряжений и деформаций в различных зонах сварного соединения.

В связи с этим было выполнено численное моделирование изменения напряженно-деформированного состояния при сварке сплавов системы легирования Ni-Cr-Fe на макро- и мезоуровнях.

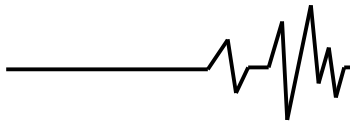
Условия сварки моделировали применительно к случаю наплавки на пластину размерами  $V_x$ ,  $V_y$  и толщиной  $\delta$ . В процессе сварочного нагрева определяется температурное поле  $T(x, y, z, t)$  во времени и по средним значениям температуры  $T(x, y, t)$  решается задача по кинетике распределения напряжений и деформаций. В основу положен метод последовательного прослеживания во времени с шагом  $\Delta t$  и метод конечных элементов по пространству, т.е. рассматриваемая область представлялась совокупностью элементарных объемов размерами  $h_x \times h_y \times h_z$ . При расчетах на макроуровне размер элемента составлял  $0,5 \times 0,5 \times 0,5$  мм, на мезоуровне -  $0,025 \times 0,025 \times 0,025$  мм. Моделирование выполнялось с учетом реальных физико-механических свойств материала от температуры.

Кинетика изменения напряжений и деформаций в шве и зоне термического влияния в местах вероятного образования горячих трещин показана на рис. 4. Полученные данные для макроуровня использованы при моделировании термодформационных процессов на

мезоуровне. Распределение зерен в модели задавали на основании полученных экспериментально методом EBSD кристаллографических ориентаций зерен в сварном соединении. Распределение зерен в модели задавали на основании полученных экспериментально методом EBSD кристаллографических ориентаций зерен в сварном соединении после испытания PVR-Test.

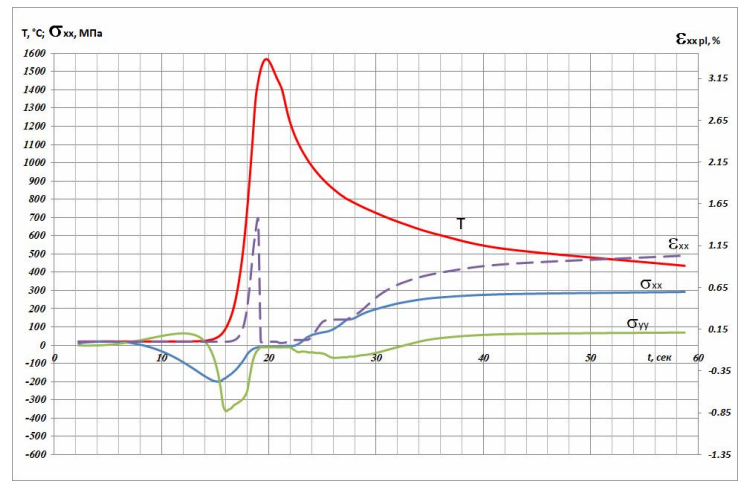
С началом цикла нагрева металл подвергается сжимающим продольным ( $\sigma_{xx}$ ) и поперечным ( $\sigma_{yy}$ ) напряжениям. Продольные пластические деформации ( $\varepsilon_{xx}$ ) также сжимающие, их величина достигает значений ( $\sim -1,6\%$ ). При охлаждении и в шве, и в зоне термического влияния возникают напряжения растяжения. Продольные напряжения достигают значений 250 МПа (что несколько ниже предела текучести) и значительно превышают поперечные, которые равны 20 МПа. Продольные напряжения достигают максимальных значений при охлаждении до температуры 650-700°C. По мере дальнейшего охлаждения продольные напряжения остаются на постоянном уровне, а поперечные постепенно снижаются до нуля. Продольные пластические деформации при охлаждении имеют положительное приращение до 0,7%, совпадают с диапазоном температурного интервала хрупкости сплава (DTR  $\sim$  700-1000°C) и развиваются одновременно с ростом продольных растягивающих напряжений, что может способствовать вероятности возникновения трещин в этом температурном интервале.

Для построения распределения зерен в математической модели использован образец, вырезанный из сварного соединения после

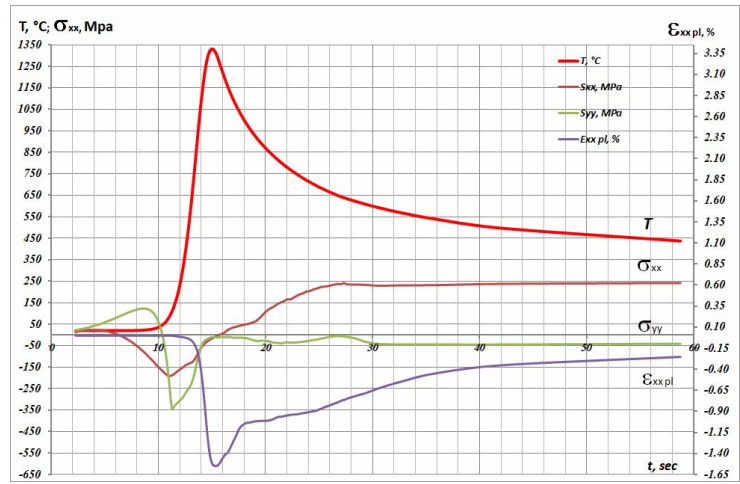


принудительного деформирования (PVR-test). Был выбран участок с трещинами провала пластичности в наплавленном шве (рис. 5а), на котором методом EBSD определены

кристаллографические ориентации зерен (рис. 5б), на основании которых построено распределение зерен в математической модели.

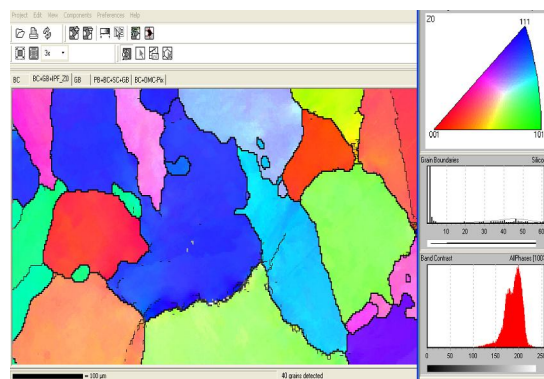


а

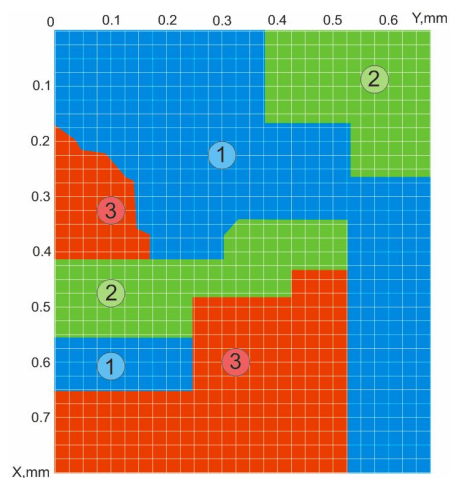


б

Рис. 4. Кинетика изменения напряжений и деформаций в шве (а) и зоне термического влияния на расстоянии 0,5 мм от линии сплавления (б)

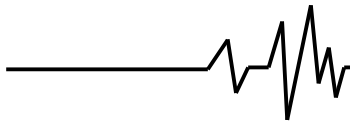


а



б

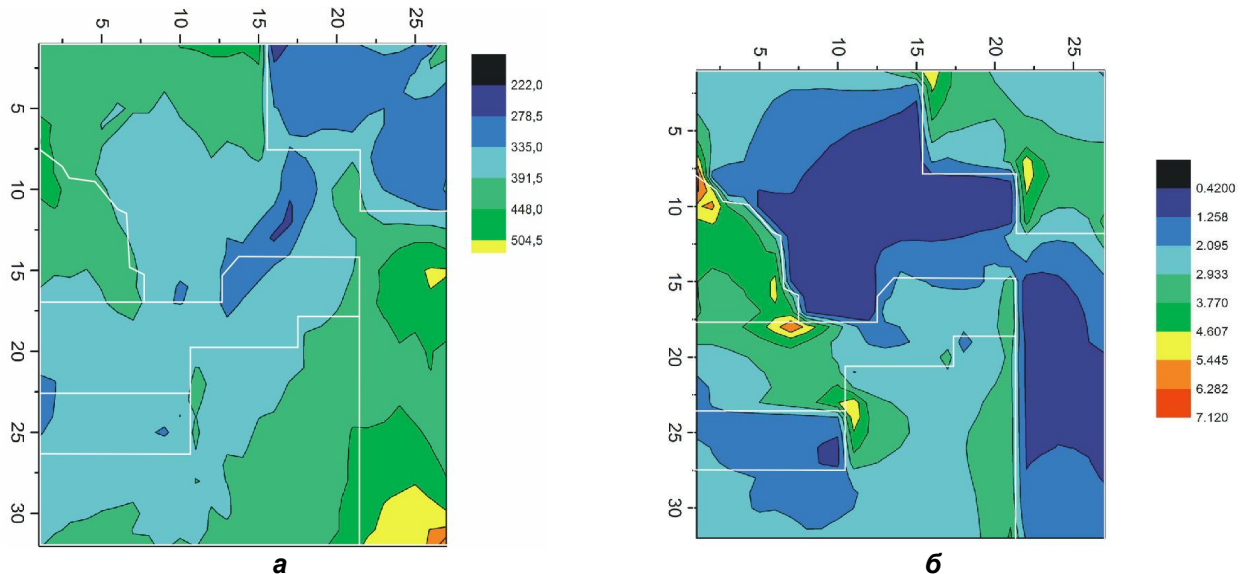
Рис. 5. Кристаллографические ориентации зерен в зоне термического влияния, полученные с помощью EBSD анализа (а) и (б)



Для зерен кристаллографической ориентации 111 (1), 011 (2) и 001 (3) были заданы соответствующие температурные зависимости модуля упругости и предела текучести. Измерением микротвердости зерен шва, выполненного проволокой Inconel52 установлено, что существует различие по значениям модуля упругости в зернах с различной кристаллографической ориентацией при комнатной температуре. Эти данные использованы при численном моделировании

напряженно-деформированного состояния в пределах смежных зерен.

По результатам моделирования показано, что при расчетах с учетом анизотропии физико-механических свойств в пределах смежных зерен происходит неравномерное распределение напряжений и пластических деформаций по телу зерна (рис. 6). Изменение деформаций носит градиентный характер с локализацией деформации у границ зерен.



**Рис. 6. Распределение продольных напряжений (а) и интенсивности пластических деформаций (б) в пределах зерен**

Продольные напряжения на мезоуровне достигают значений в 400-450МПа значительно превышают напряжения на макроуровне (~ 300МПа).

Наибольшие градиенты деформаций возникают на стыке зерен с ориентациями 011 и 111, причем деформации максимальны в зерне с ориентацией 011. Интенсивность пластических деформаций максимальна в зоне термического влияния в местах тройного стыка зерен и достигает 5%. Расчеты хорошо согласуются с литературными данными о зарождении трещин в районе тройного стыка зерен при сварке никелевых сплавов [4].

Это может служить одной из причин возникновения в данной зоне трещин в температурном интервале провала пластичности, проявляющихся в реальных сварных соединениях.

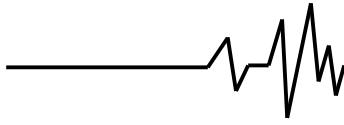
### **Выводы**

1. Методом PVR-Test выполнена оценка чувствительности к образованию

горячих трещин сварных соединений никелевого сплава системы легирования Ni-Cr-Fe. По результатам испытаний определено наличие двух типов горячих трещин в образцах – кристаллизационных, и трещин, вызванных провалом пластичности. Показана высокая чувствительность сплава к образованию трещин провала пластичности

2. В условиях моделирования однопроходного шва на макроуровне распределение пластических деформаций и напряжений носит однородный характер. При моделировании с учетом различной кристаллографической ориентации соседних зерен термонапряженное состояние на мезоуровне становится неоднородным. Возникают градиенты пластической деформации с ее локализацией у границ зерен в зависимости от их кристаллографической ориентации.

3. Интенсивность пластической деформации достигает значений 5% у тройного стыка зерен с различной ориентацией, что может служить одной из причин возникновения



трещин провала пластичности в этом месте в реальных сварных соединениях.

#### **Список использованных источников**

1. ISO 17641-1:2004 Destructive tests on welds in metallic materials. Hot cracking tests for weldments. – Arc welding processes. – Part 1: General.
2. Lippold, J.C. and Kotecki, D.J. Welding metallurgy and Weldability of stainless steels, 2005, John Wiley&Sons, 357p.
3. Herold H, Streitenberger M, Pchennikov A (2000) Modelling of the PVR-test to Examine the Origin of Different Hot Cracking Types // IIW doc IX-H-474-00.
4. Collins M.G., Ramirez A.J., Lippold J.C. (2004) Welding Journal 83 (2), An investigation of ductility-dip cracking in Nickel-based weld metals - Part III: 39s–49s.

#### **ОЦІНКА СХИЛЬНОСТІ ДО УТВОРЕННЯ ТРІЩИН ТА АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ ЗВАРЮВАННІ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ**

**Анотація.** Виконано оцінку чутливості до утворення гарячих тріщин при зварюванні плавленням сплавів на основі нікелю системи

легування Ni-Cr-Fe з використанням машинних методів випробування. Показано, що зварні шви типу Inconel 52 мають високу чутливість до утворення гарячих тріщин. Методом математичного моделювання вивчено особливості термодформаційних процесів в зварному шві та зоні термічного впливу на макро- та мезорівнях.

**Ключові слова:** нікелеві сплави, зварюваність, гарячі тріщини, математичне моделювання.

#### **EVALUATION OF SUSCEPTIBILITY TO CRACKING AND ANALYSIS OF STRESS- STRAIN STATE DURING WELDING OF NICKEL- BASED ALLOYS**

**Annotation.** The estimation of sensitivity to hot cracking during welding of nickel alloy of alloying system Ni-Cr-Fe using machine test methods was performed. It is shown that welds of wires Inconel 52 has a high sensitivity to hot cracking. Numerical modelling was carried out to study thermal-deformation processes in the weld and heat-affected zone on macro- and mesoscales.

**Key words:** nickel-based alloys, weldability, hot cracks, numerical modeling.