

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА СВАРИВАЕМОСТЬ (PVR-TEST)

К. А. ЮЩЕНКО, Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО, Н. О. ЧЕРВЯКОВ, Г. Ф. РОЗЫНКА, Н. И. ПИВТОРАК

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Горячие трещины, возникающие в процессе сварки, являются важной проблемой, определяющей свариваемость многих конструкционных материалов. Несмотря на то, что это явление очень широко изучается в течение многих десятилетий, природа возникновения горячих трещин при сварке плавлением все еще остается актуальной проблемой для многих современных сплавов. Для обеспечения более глубокого понимания механизма образования горячих трещин методом конечных элементов выполнено математическое моделирование испытания PVR-Test. Реализация математической модели с использованием экспериментальных данных, полученных в результате такого испытания, позволила получить распределение напряжений и деформаций в зонах образования трещин. Выявлены зоны положительных приращений пластических деформаций в пределах температурного интервала хрупкости, способствующих образованию трещин. Прогнозирование зон повышенной склонности к возникновению горячих трещин в результате снижения пластичности материала хорошо согласуется с экспериментальными исследованиями. Библиогр. 8, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: горячие трещины, испытания свариваемости, сварка, PVR-Test, никелевые сплавы, метод конечных элементов

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. Подавляющее большинство высоколегированных сталей и никелевых сплавов относятся к структурному классу аустенитных конструкционных материалов, которым свойственна стабильность структуры в широком интервале эксплуатационных температур, высокая жаростойкость, жаропрочность, стойкость к воздействию агрессивных сред.

Большинство стабильно аустенитных материалов проявляют высокую чувствительность к образованию горячих трещин при сварке плавлением. Основные трудности при сварке рассматриваемых материалов обусловлены многокомпонентностью их легирования и разнообразием условий эксплуатации сварных конструкций. Главной и общей особенностью этих материалов является склонность к образованию в шве или околошовной зоне горячих трещин, имеющих межзеренный характер [1]. Склонность к образованию трещин оценивается с помощью современных методов оценки свариваемости Vareststraint-Test и PVR-Test [2–4].

Метод PVR-Test рекомендован Международным институтом сварки для оценки свариваемости конструкционных материалов при выполнении одно- и многопроходной сварки, в первую очередь материалов со стабильно аустенитной структурой, довольно чувствительной к образованию трещин.

В основу принципа работы PVR-Test заложены положения теории технологической прочности, разработанные Н. Н. Прохоровым [5]. Способ оценки трещиностойкости 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. 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.

Целью работы было математическое моделирование способа испытания на свариваемость (PVR-Test) для более полного анализа особенностей

локализации напряжений и деформаций, а также определение вероятных зон образования трещин.

Проведенное исследование выполнялось применительно к сплаву системы легирования Ni–Cr–Fe, который широко используется в атомной энергетике.

Основываясь на данных, полученных экспериментально при принудительном деформировании для оценки склонности к образованию трещин [6], создана математическая модель испытания PVR-Test с использованием метода конечных элементов [7]. Это позволило рассчитать поля температур, напряжений и деформаций для различных зон сварного соединения на макроуровне.

Для оценки кинетики напряженно-деформированного состояния образца использовалась расчетная методика [8], основанная на последовательном прослеживании развития упруго-пластических деформаций в точках x, y рассматриваемого образца по мере изменения температуры в процессе движения источника.

Использовалась гипотеза плоского напряженного состояния, согласно которой тензор напряжений σ_{ij} в любой точке x, y в момент времени t представляется в виде

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} \end{pmatrix}, \quad (\sigma_{yx} = \sigma_{xy}), \quad (1)$$

где компоненты тензора σ_{ij} в каждой точке x, y рассматриваемой области удовлетворяют уравнениям равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0. \quad (2)$$

Тензор деформаций ϵ_{ij} имеет аналогичную тензору σ_{ij} структуру, т. е.

$$\epsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} \end{pmatrix}, \quad (\epsilon_{xy} = \epsilon_{yx}), \quad (3)$$

где компоненты $\epsilon_{xx}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yy}$ связаны с перемещениями U_x и U_y соотношениями

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial U_x}{\partial x}, \quad \epsilon_{yy} = \frac{\partial U_y}{\partial y}, \quad (4)$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \right).$$

В произвольный момент времени t тензор ϵ_i можно представить в виде суммы тензоров [1]

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p + \epsilon_{ij}^c, \quad (5)$$

где ϵ_{ij}^e — тензор упругой деформации, ϵ_{ij}^p — тензор неупругой деформации мгновенной пластичности, ϵ_{ij}^c — тензор неупругой деформации ползучести.

Связь между тензором σ_i и тензором ϵ_{ij}^e определяется законом Гука, т. е. с учетом температурных и микроструктурных изменений 3ϕ в точке x, y в момент времени t по сравнению с $t = 0$ имеют место зависимости

$$\epsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma}{2G} + \delta_{ij} [K\sigma + \phi(t) - \phi(0)], \quad (6)$$

$$(i, j = x, y),$$

где δ_{ij} — единичный тензор или символ Кронекера, т. е. $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$ и $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$; $\sigma = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})/3$, $G = E/(2(1+\nu))$ — модуль сдвига, E — модуль нормальной упругости, ν — коэффициент Пуассона, $K = (1-2\nu)/E$ — модуль объемного сжатия.

Связь тензора напряжений σ_i с деформациями мгновенной пластичности ϵ_{ij}^p в современных коммерческих пакетах компьютерных программ, также как и в пакете «Weldpredictions», формулируется на основе теории течения, ассоциированной с условием текучести Мизеса, т. е. фиксируется связь между тензором приращений пластических деформаций $\Delta\epsilon_{ij}^p$ и девиатором напряжений $\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma$ в виде

$$\Delta\epsilon_{ij}^p = d\lambda(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma), \quad (i, j = x, y), \quad (7)$$

где скалярная функция $d\lambda$ определяется условием текучести через поверхность текучести

$$f = \sigma_i^2 - \sigma_{0,2}^2(T), \quad (8)$$

где

$$\sigma_i = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + \sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + 6\sigma_{xy}^2}, \quad (9)$$

$\sigma_{0,2}(T)$ — предел текучести материала в точке x, y при температуре $T(t)$.

$$d\lambda = 0, \text{ если } f < 0 \text{ либо } f = 0, \text{ но } df < 0;$$

$$d\lambda > 0, \text{ если } f = 0 \text{ и } df > 0; \quad (10)$$

состояние $f > 0$ недопустимо.

Также, как прослеживание развития температурного поля $T(x, y, t)$ во времени осуществляется последовательно через конечные приращения времени Δt , прослеживание развития упруго-пластических деформаций осуществляется поэтапно, начиная с момента $t = 0$ через определенные промежутки времени Δt .

За этот шаг прослеживания тензор деформаций получит конечное приращение

$$\Delta\epsilon_{ij} = \Delta\epsilon_{ij}^e + \Delta\epsilon_{ij}^p \quad (11)$$

или с учетом (6), (7)

$$\Delta\epsilon_{ij} = \Psi \left(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma \right) + \delta_{ij} K\sigma - b_{ij}, \quad (12)$$

где

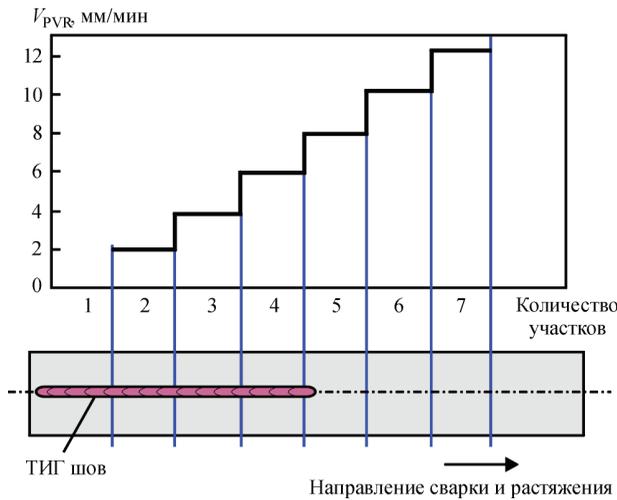


Рис. 1. Образец и схема его нагружения

$$\Psi = \frac{1}{2G} + \Delta\lambda,$$

$$b_{ij} = \left(\frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma}{2G} \right)_{t-\Delta t} + \delta_{ij} [(K\sigma)_{t-\Delta t} - \Delta\phi]. \quad (3)$$

Функция Ψ отражает состояние материала в точке x, y в момент времени t . Она либо равна $1/2G$ (упругое поведение), либо больше $1/2G$ — упруго-пластическое поведение. Условие текучести (8) позволяет построить итерационный процесс уточнения функции Ψ . Величина b_{ij} известна для этапа прослеживания (момента времени t), если известно решение на этапе $(t - \Delta t)$.

Зависимость (12) на каждой итерации по Ψ, t . е. когда Ψ задано, сводит рассматриваемую задачу к хорошо известной задаче теории термоупругости с дополнительно заданными деформациями b_{ij} . Для решения таких задач достаточно хорошо развиты численные методы, основанные на методе конечных элементов [8]. Такого типа алгоритм используется в пакете программ «Weldpredictions», на основе которого проводились исследования остаточных напряжений в зависимости от

Зависимость механических и теплофизических свойств от температуры для исследуемого материала

$T, ^\circ\text{C}$	$E \cdot 10^{-5}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{гс}}, \text{МПа}$	$\alpha \cdot 10^6, 1/^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Дж}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C})$	$c\gamma, \text{Дж}/(\text{см}^3 \cdot ^\circ\text{C})$
20	2,06	350,0	14,1	0,120	0,450
100	2,03	280,0	14,1	0,135	0,470
200	1,95	250,0	14,3	0,154	0,500
300	1,87	240,0	14,5	0,173	0,530
400	1,85	230,0	14,8	0,191	0,550
500	1,77	225,0	15,2	0,210	0,580
600	1,67	215,0	15,7	0,229	0,600
700	1,58	200,0	ϕ	0,248	0,630
800	1,52	190,0	ϕ	0,266	0,660
900	1,45	175,0	17,0	0,285	0,680
1000	1,35	150,0	17,4	0,301	0,710
1100	1,25	125,0	17,8	0,316	0,740
1200	1,00	100,0	18,0	0,330	0,770

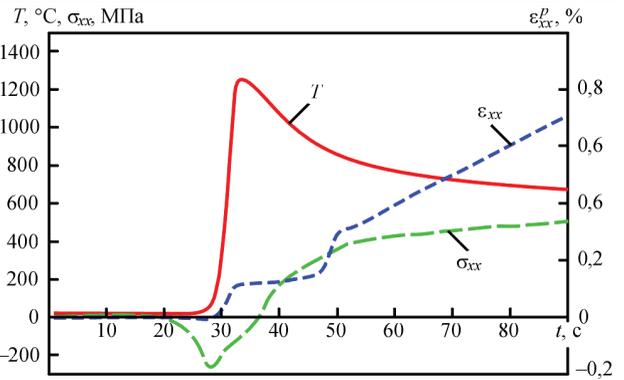


Рис. 2. Кинетика изменения температуры, напряжений и деформаций на участке 2

приложенной нагрузки, а также от тепловложений (или режима сварки).

На рис. 1 представлена модель для макроуровня (образец и схема его нагружения). Образец разбивался на 8 участков, в пределах которых скорость деформирования оставалась постоянной. Для каждого из участков (2...8) на макроуровне рассчитывалась кинетика напряженно-деформированного состояния в шве и зоне термического влияния (ЗТВ) на расстоянии 0,5 мм от линии сплавления в местах возникновения трещин провала пластичности при реальных условиях испытания.

В модели учтены все тепловые и механические воздействия в процессе реального испытания PVR-Test швов, выполненных проволокой Ni-Cr-Fe, в зависимости от времени. Используются физические свойства материала, зависящие от температуры (табл.), параметры режима сварки ($I_{\text{св}} = 60 \text{ А}, U_{\text{д}} = 10,5 \text{ В}, v_{\text{св}} = 6,5 \text{ м/ч}$), характер механического нагружения и изменение геометрических размеров образца. Моделировался процесс испытания плоского образца размером $200 \times 40 \times 3 \text{ мм}$. Размер конечного элемента при расчетах составлял $0,5 \times 0,5 \times 0,5 \text{ мм}$. Сравнительная кинетика изменения температуры, напряжений и деформаций в ЗТВ для участка 2 и 4 показана на рис. 2, 3.

На стадии нагрева, при одновременном растяжении образца, в шве и зоне термического вли-

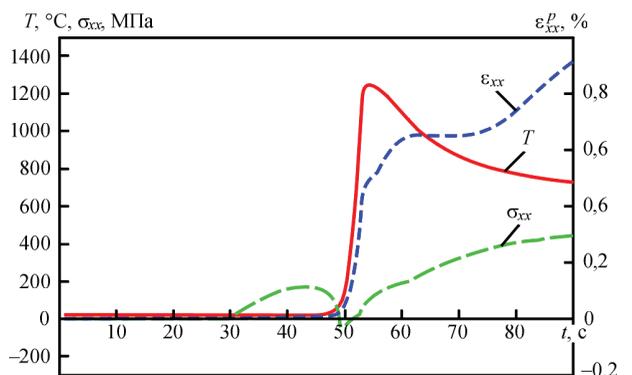


Рис. 3. Кинетика изменения температуры, напряжений и деформаций на участке 4

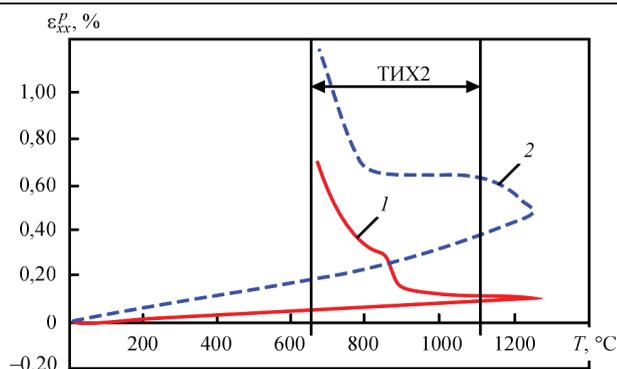


Рис. 4. Кинетика изменения продольных пластических деформаций от температуры на участках 2 (1) и 4 (2)

ния увеличиваются пластические деформации растяжения. При достижении максимума температуры в шве пластические деформации снижаются до нуля и по мере дальнейшего снижения температуры начинают повторно увеличиваться. Несколько отличная картина для ЗТВ. Так как в ЗТВ нет расплавления металла, пластические деформации нарастают непрерывно. При скорости растяжения 2 мм/мин на участке 2 на стадии охлаждения темп пластической деформации составляет 0,00119 %/°C, что значительно ниже темпа пластической деформации (0,00539 %/°C) на участке 4 при скорости растяжения 4 мм/мин. Это определяет более высокую склонность материала к образованию трещин на данном участке. Кинетика изменения продольных пластических деформаций на участках 2 и 4, а также границы температурного интервала хрупкости ТИХ 2 показаны на рис. 4.

Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными исследованиями трещиностойкости по методу PVR-test, когда образование трещин снижения пластичности в реальных испытаниях происходило при скорости принудительного растяжения более 3 мм/мин.

Выводы

1. С использованием метода конечных элементов выполнено математическое моделирование

испытания свариваемости PVR-Test и получены расчетные данные о распределении температур, напряжений и деформаций для различных зон сварного соединения.

2. Для плоского образца из никелевого сплава системы легирования Ni–Cr–Fe рассчитаны локальные деформации, возникающие при высоких температурах, и получены данные относительно положительных приращений пластических деформаций в пределах температурного интервала хрупкости. Показано, что темп пластической деформации для данных условий моделирования изменяется от 0,00119 до 0,00539 %/°C. Это будет определять более высокую склонность к образованию горячих трещин в ТИХ 2 на данном участке.

3. Результаты численного прогнозирования склонности материала к образованию горячих трещин хорошо согласуются с экспериментальными данными, что позволяет использовать модель для оценки риска возникновения трещин в различных зонах сварного соединения.

1. Boellinghaus T. Cracking phenomena in welds iv / T. Boellinghaus, J. Ippold, C. Cross – Editors, 2016. – Springer. – 512 p.
2. 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.
3. Fink C. Evaluation of hot cracking susceptibility of Ni-based alloys by the PVR Test / C. Fink, D. Keil, M. Zinke / Welding in the world. – 2012. – vol. 56, № 7/8. – P. 37–43.
4. Vallant R. The influence of different Nb/C ratio in Ni-base weld metals type 70/20 and 70/15 on the hot cracking susceptibility / R. Vallant, H. Cerjak // 2004, Intern. Inst. of Welding; Doc. II-1535-04, 14 p.
5. Прохоров Н. Н. Проблема прочности металлов при сварке в процессе кристаллизации / Н. Н. Прохоров // Сварочное производство. – 1956. – № 6. – С. 5–11.
6. Yushchenko K. A. Comparative hot cracking evaluation of welded joints of alloy 690 using filler metals FM 52 and 52 MSS / K. A. Yushchenko, V. S. Savchenko, N. O. Chervyakov [et al.]. // Welding in the world. – 2011. – vol. 55, № 9/10. – P. 28–35.
7. Lindgren L.-E. Numerical modeling of welding / L.-E. Lindgren // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2006 – № 195 – P. 6710–6736.
8. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций / В. И. Махненко. – К.: Наукова думка, 1976. – 320 с.

Поступила в редакцию 19.10.2016



ЗАКАЖИТЕ ИНФОРМАЦИОННЫЙ БЮЛЛЕТЕНЬ!
Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас подписаться на бесплатное получение электронного информационного бюллетеня журнала «Автоматическая сварка».

Для подписки необходимо выслать по электронной почте письмо с темой «Информационный бюллетень/АС» на адрес редакции журнала: journal@paton.kiev.ua.