

ОЦЕНКА ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ СПЛАВА Inconel 690

Н.О. ЧЕРВЯКОВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Представлены результаты оценки термонапряженного состояния в сварном соединении никелевого сплава Inconel 690. Выполнен экспериментально-расчетный анализ тепловых процессов и математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при однопроходной сварке. Верификация данных путем сравнения экспериментальных термических циклов с расчетными показала хорошую сходность результатов как по размерам шва, так и по термическим циклам в зонах на различном удалении от линии сплавления. Проанализирована кинетика напряженно-деформированного состояния в различных зонах сварного соединения с учетом возможности образования горячих трещин. Показано, что в условиях моделирования прямолинейной однопроходной сварки пластин толщиной 3 мм при погонной энергии 304 Дж/мм возникающие напряжения и деформации не превышают критических значений, тем самым не создавая условия для образования горячих трещин. Применяемая математическая модель может быть использована при оценке кинетики напряженно-деформированного состояния для различных вариантов сварки (изменение погонной энергии, различный присадочный материал и т.д.). Библиогр. 7, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: дуговая сварка неплавящимся электродом; никелевые сплавы; тепловые процессы; термические циклы; математическое моделирование, напряжения, деформации

Сплавы на никелевой основе играют важную роль как коррозионноустойчивые материалы в атомной и химической промышленности, в особенности в условиях эксплуатации при высоких температурах, значительных напряжениях и агрессивных средах. Широко используемыми сплавами на никелевой основе в данный момент являются сплавы системы легирования Ni–Cr–Fe. Один из таких сплавов — Inconel 690 с высоким содержанием хрома (30 %) [1]. Сварные соединения сплава Inconel 690 с соответствующими присадочными материалами показали высокую чувствительность к образованию горячих трещин, в особенности в условиях сварки толстостенных элементов конструкций. Наибольшую склонность сплавы проявляют к образованию трещин провала пластичности [2, 3].

Как было показано ранее [4], трещины провала пластичности при сварке сплавов системы легирования Ni–Cr–Fe возникают в температурном интервале 1050...650 °С, величина критической деформации образования трещин $\epsilon_{кр}$ примерно 1,2 %.

Тепловые процессы при сварке плавлением оказывают определяющее влияние на характер и кинетику изменения напряженно-деформированного состояния, структуру и свойства шва и зоны термического влияния. В связи с этим анализ температурных полей при сварке сплавов системы легирования Ni–Cr–Fe с целью дальнейшего исследования кинетики напряженно-деформированного состояния и оценки склонности к образованию горячих трещин является актуальной задачей.

Целью работы был сравнительный экспериментально-расчетный анализ температурных полей и моделирование напряженно-деформированного состояния при однопроходной аргонодуговой сварке сплава Inconel 690.

Компьютерное прогнозирование и расчет позволяют определить температурные поля для различных значений тепловой мощности дуги. Расчетным путем устанавливается коэффициент полезного действия дуги, изменяющийся в зависимости от способа и режимов сварки и т.д. Для уточнения входных данных математической модели требуется экспериментальное построение термических циклов и сравнение их с расчетными значениями.

Регистрация термических циклов сварки проводилась на образцах из никелевого сплава Inconel 690 размером 170×40×3 мм. Выполнялась дуговая сварка вольфрамовым электродом в аргоне без присадки на следующем режиме: $I_{св} = 72$ А, $U_{св} = 10,5$ В, $v_{св} = 7,2$ м/ч. Расход газа при сварке составлял 5 л/мин.

Для измерения термических циклов сварки в зоне термического влияния использовались термопары типа «К» (хромель-алюмель). Диаметр термоэлектродов составлял 0,2 мм, при этом диаметр горячего спая был меньше 0,5 мм. Спай термопары получали путем оплавления термоэлектродов ручной аргонодуговой сваркой. Тарирование термопар осуществлялось по температурам плавления технически чистых алюминия и меди.

Запись термических циклов проводилась в режиме реального времени с помощью АЦП



Рис. 1. Общий вид образца со швом и термопарами после сварки

EXPERT 9018P и специализированного программного обеспечения PowerGraph 3.0, позволяющих автоматически превращать значения термо-ЭДС в температуру.

К поверхности пластин спаи термопар крепились посредством конденсаторной сварки, что обеспечило постоянный стабильный контакт спаев с металлом в широком диапазоне температур. Внешний вид образца с приваренными термопарами после сварки показан на рис. 1.

После сварки шов и термопары в зоне термического влияния фотографировались на бинокулярном микроскопе с 25-кратным увеличением и выполнялось измерение расстояний от линии сплавления до спаев термопар. Кроме того, на макрошлифах измерялись ширина шва и глубина проплавления.

Расчетная оценка термонапряженного состояния выполнялась с применением специализированного программного обеспечения «Сварка никелевых сплавов», созданного на базе алгоритмов, разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона и описывающих распределение температур и напряженно-деформированного состояния вблизи сварочной ванны сложнелегированных сплавов

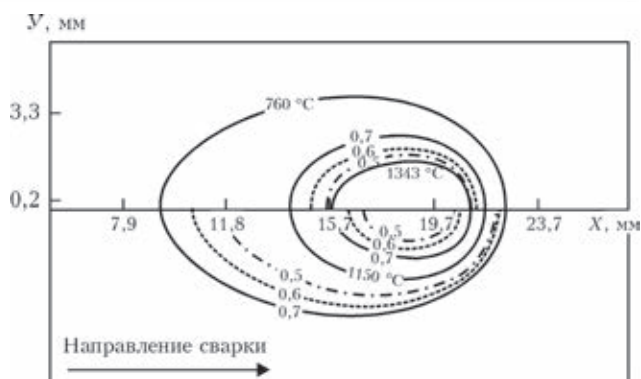


Рис. 2. Влияние значения коэффициента полезного действия дуги на распределения температур в высокотемпературной области. Сплошной линией показаны изотермы для значения коэффициента 0,7, пунктирной — 0,6 и штрихпунктирной — 0,5 соответственно

на основе никеля. Для рассматриваемой пластины в процессе сварочного нагрева определялось температурное поле $T(x, y, z, t)$ во времени. Затем по средним значениям температуры $T(x, y, t)$ решалась задача по кинетике напряжений и деформаций [5, 6]. В основу положен метод последовательного прослеживания во времени с шагом Δt и метод конечных элементов по пространству, т. е. рассматриваемая область представлялась совокупностью элементарных объемов размерами $h_x \times h_y \times h_z$. Размер единичного элемента в модели составляет $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ мм.

Для оценки закономерностей распределения температур в шве и зоне термического влияния сварных соединений расчетным методом использовали температурные зависимости изменения теплоемкости и теплопроводности исследуемого материала. Эти значения для сплава Inconel 690 были выбраны по данным литературных источников, а также с учетом собственных исследований [1, 7].

Эффективный КПД дуги η , применяемый в расчетах, для процесса сварки неплавящимся электродом в среде защитных газов составляет $0,50 \dots 0,75$. Были рассчитаны температурные поля при значениях этого коэффициента, равных $0,5$,

Температурная зависимость теплофизических свойств сплава Inconel 690

Температура, °С	Модуль Юнга, МПа	Предел текучести, МПа	Коэффициент термического расширения, 1/град	Теплопроводность, Вт/см·град	Теплоемкость, Дж/г·град
20	205000	348	0,00001406	0,115	0,453
100	204000	281	0,00001406	0,130	0,474
200	193000	248	0,00001431	0,155	0,496
300	187000	240	0,00001453	0,173	0,523
400	185000	231	0,00001480	0,190	0,557
500	177000	225	0,00001519	0,212	0,574
600	167000	215	0,00001570	0,227	0,608
700	158000	200	0,00001618	0,250	0,633
800	152000	190	0,00001660	0,269	0,660
900	145000	175	0,00001701	0,285	0,690
1000	135000	150	0,00001741	0,303	0,715
1100	125000	125	0,00001779	0,318	0,739
1200	100000	100	0,00001800	0,332	0,769

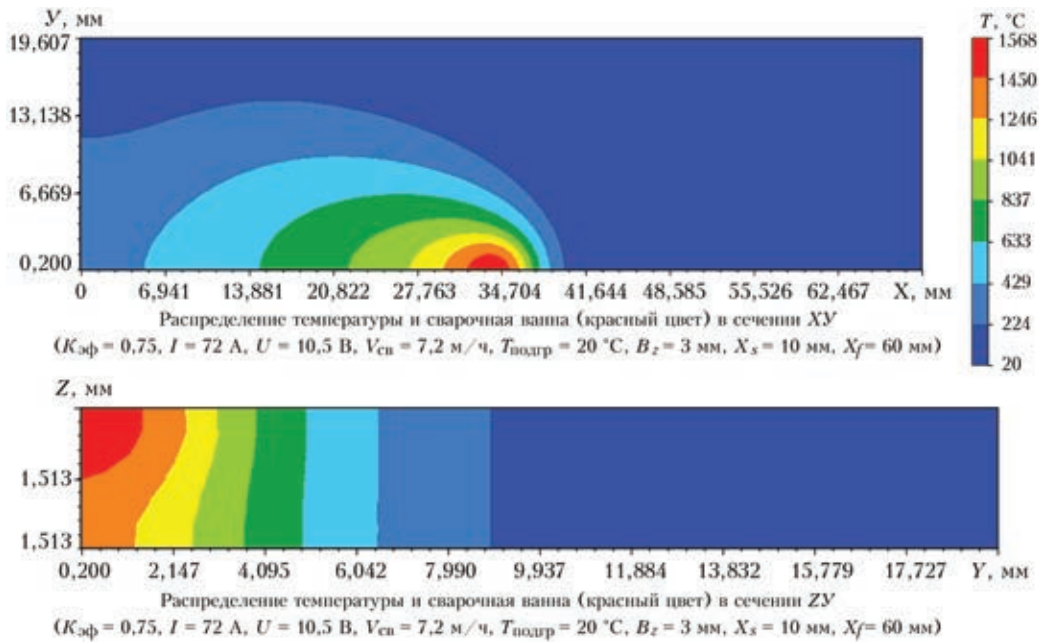


Рис. 3. Распределение температурных полей в плоскости XY и по толщине пластины

0,60, и 0,70. На рис. 2 показано, что существует значительное влияние коэффициента полезного действия дуги как на распределение тепла, так и на формы изотерм. При моделировании было выбрано значение $\eta = 0,70 \dots 0,75$, поскольку соответствующее температурное поле хорошо совпадает с экспериментальными результатами.

Первым этапом моделирования было определение температурных полей с учетом зависимых от температуры свойств материала (теплоемкости, теплопроводности) и потерь температуры вследствие конвекции и излучения.

Температуры плавления и кристаллизации были приняты 1377 и 1343 °C соответственно [1].

На рис. 3 приведены результаты расчета распределения температуры по поверхности движения источника при установившемся состоянии в области сварочной ванны и ЗТВ. В силу симметрии решаемой задачи на рисунке показана половина пластины.

Была проведена верификация рассчитанных температурных полей с измеренными с помощью термопар термическими циклами и реальными размерами сварного шва. Сравнение данных показало хорошую сходность результатов как по размерам шва (ширина шва и глубина проплавления в эксперименте составляли 4,2 и 1,3 мм соответственно, при моделировании — 4,1 и 1,4 мм), так и по термическим циклам в точках на различном удалении от линии сплавления. Таким образом, подтверждена правомерность использования исходных теплофизических характеристик для расчета распределения температур в сварном соединении при сварке сплавов системы легирования Ni–Cr–Fe.

Моделирование напряженно-деформированного состояния осуществляли с учетом температурной зависимости физико-механических свойств сплава, в том числе модуля упругости, предела текучести и коэффициента термического расширения. Все эти характеристики определялись экспериментально в интервале температур до 1100 °C. Предел текучести и модуль упругости определялся на установке MTS-810, оценку коэффициента линейного расширения выполняли на бесконтактном лазерном dilatометре. Данные по теплофизическим и механическим свойствам представлены в таблице.

С учетом рассчитанных температурных полей выполнялось моделирование напряженно-деформированного состояния при сварке. Получены распределения временных и остаточных напряжений и деформаций для различных зон сварного соединения.

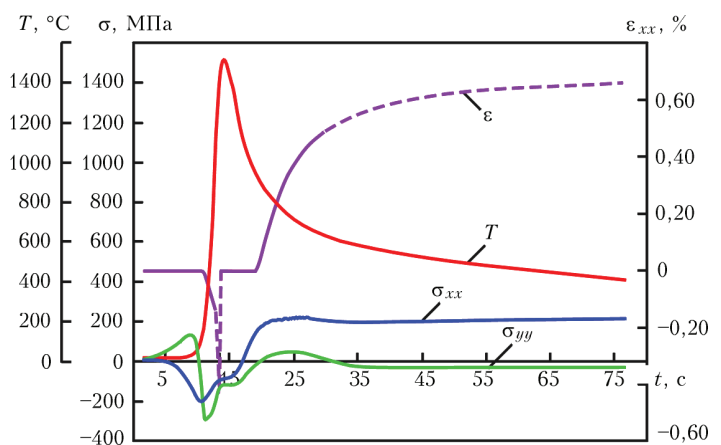


Рис. 4. Кинетика изменения температуры T , продольных σ_{xx} и поперечных σ_{yy} напряжений и продольных пластических деформаций ϵ_{xx} вдоль оси шва при сварке

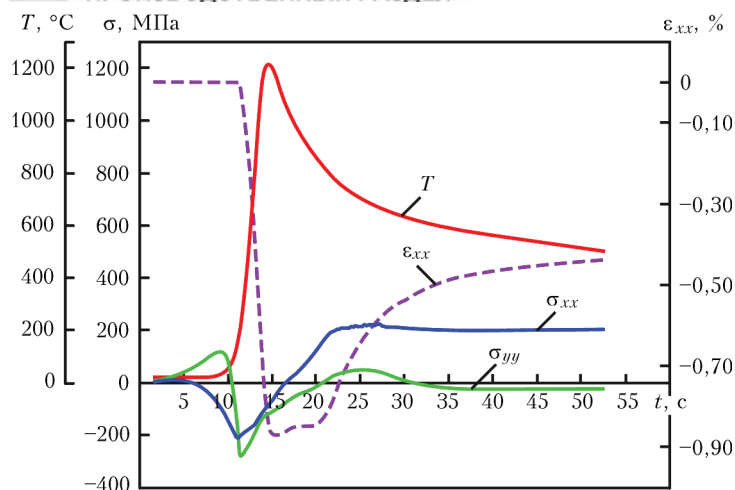


Рис. 5. Кинетика изменения температуры T , продольных σ_{xx} и поперечных σ_{yy} напряжений и продольных пластических деформаций ϵ_{xx} в ЗТВ на расстоянии 0,5 мм от линии сплавления при сварке

Исследования свариваемости сплавов системы легирования Ni–Cr–Fe показали [4], что образование трещин возможно как в шве, так и в зоне термического влияния на расстоянии 0,5...3 мм от линии сплавления. В связи с этим рассмотрена кинетика изменения термонапряженного состояния в шве и зоне термического влияния на расстоянии 0,5 мм от линии сплавления (рис. 4, 5).

С началом цикла нагрева металл подвергается сжимающим продольным σ_{xx} и поперечным σ_{yy} напряжениям. Продольные пластические деформации ϵ_{xx} также сжимающие, их величина достигает значений 0,9 %. При последующем охлаждении возникают напряжения растяжения как продольные, так и поперечные. При этом продольные напряжения достигают значений 215 МПа и значительно превышают поперечные, которые равны 40 МПа. Продольные напряжения достигают максимальных значений при охлаждении до температуры 650 °С. По мере дальнейшего охлаждения продольные напряжения остаются на постоянном уровне, а поперечные постепенно снижаются. Продольные пластические деформации при охлаждении имеют положительные приращения до 0,5 %.

На основании этих результатов можно заключить, что для данных условий моделирования однопроходной сварки максимальные приращения пластической деформации совпадают с диапазоном температурного интервала хрупкости сплава и развиваются одновременно с ростом продольных растягивающих напряжений, но являются

недостаточными для образования трещин провала пластичности.

Выводы

1. Экспериментально-расчетным путем выполнена оценка температурных полей при однопроходной сварке никелевого сплава Inconel 690. Сравнение данных показало хорошую сходность результатов как по размерам шва, так и по термическим циклам в точках на различном удалении от линии сплавления, что подтверждает правомерность использования исходных теплофизических характеристик металла для расчета распределения температур в сварном соединении.

2. С учетом экспериментально определенных физико-механических свойств сплава выполнено математическое моделирование напряженно-деформированного состояния и рассмотрена кинетика изменения напряжений и деформаций для различных зон сварного соединения. Показано, что в условиях моделирования прямолинейной однопроходной сварки пластин толщиной 3 мм при погонной энергии 304 Дж/мм возникающие напряжения и деформации не превышают критических значений и не создают условия для образования горячих трещин.

1. INCONEL® alloy 690 [Электронный ресурс]. – 2009. – 8 р. – Доступно по: URL: <http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20690.pdf>.
2. Kiser S.D., Zhang R., Baker B.A. A new welding material for improved resistance to ductility dip cracking // Proceedings of the 8th International Conference on Trends in Welding Research. – Pine-Mountain, GA, 2009. – P. 639–644.
3. Nishimoto K. Microcracking in multipass weld metal of alloy 690 Part 1: Microcracking susceptibility in reheat weld metal // Science and Technology of Welding and Joining. – 2006. – 11(4). – P. 455–461.
4. Сравнительная оценка и исследование чувствительности к образованию горячих трещин в швах и сварных соединениях сплава Inconel 690 с использованием проволоки Inconel®52 и Inconel®52MSS / К.А. Ющенко, В.С. Савченко, Н.О. Червяков и др. // Автомат. сварка. – 2011. – № 11. – С. 4–10.
5. Махненко В.И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. – Киев: Наук. думка, 1976. – 320 с.
6. Investigation of thermal-deformation state of welded joints in stable-austenitic steels and nickel alloys / К.А. Yushchenko, V.I. Makhnenko, V.S. Savchenko et al. // Welding in the world. – 2007. – 51. – № 9/10. – P. 51–55.
7. Физико-механические характеристики швов типа In690 в высокотемпературном интервале провала пластичности / К.А. Ющенко, В.С. Савченко, А.В. Звягинцева и др. // Материалы 55-й международной конференции «Актуальные проблемы прочности». – Харьков, 2014. – С. 189.

Поступила в редакцию 28.09.2015