трубчатых печей условия первая от стенки узловая точка должна располагаться на расстоянии $x_p = 4 - 8$ см.

На рисунках 2 и 3 представлены расчетные распределения плотностей лучистых, конвективных потоков тепла к поверхности нагрева и профиль температуры продуктов сгорания по высоте камеры радиации, определенные в S_2 -приближении метода дискретных ординат на неравномерных конечно-разностных сетках 11×17 и 11×27 . Следует отметить, что использование более подробной сетки 11×27 не вносит существенную поправку в результаты расчета. Расхождение по интегральному тепловосприятию поверхностью нагрева составляет 1,6%, в распределении температуры продуктов сгорания не превышает 12°C . В большей степени сгущение конечно-разностной сетки влияет на тепловые потоки конвекцией к поверхности нагрева, для которых отличие составляет 9,8%. Доля конвекции в тепловом балансе радиантной камеры невелика, поэтому погрешность в расчетах конвективной составляющей не оказывает существенного влияния на точность суммарных (излучение плюс конвекция) тепловых потоков.

На рисунке 3 представлено также распределение плотности лучистых потоков тепла, определенное в S_4 -приближении метода дискретных ординат на конечно-разностной сетке 11×17 . Модель излучения оказывает большее влияние на точность результатов по сравнению с численной диффузией. Расхождение значений плотности лучистых потоков по сравнению с S_2 -приближением составляет 8%.

Применение в расчетах S_n -приближения более высоких порядков в сочетании со спектральной моделью излучения продуктов сгорания и ограждающих поверхностей не представляется возможным. Например, при выполнении расчетов в S_4 -приближении в сочетании с шестиполосной моделью спектра излучения для определения дивергенции лучистых потоков необходимо решить систему из 72 нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка, что неприемлемо с точки зрения вычислительной экономичности метода. Использование более подробной сетки также приводит к резкому увеличению времени решения задачи. Отклонения результатов расчета, обусловленные численной диффузией и приближенным характером модели излучения, находятся в пределах погрешности метода. Поэтому расчет сложного теплообмена в камерах сгорания пламенных технологических печей с достаточной для практики точностью можно выполнять в S_2 -приближении с использованием неравномерной адаптированной конечно-разностной сетки с приемлемым количеством узловых точек.

1. Абдуллин А.М., Вафин Д.Б. Численное моделирование локального теплообмена в топках трубчатых печей на основе дифференциальных приближений для лучистого переноса тепла // Инж.-физический журн. 1991. Т. 60. №2. С. 291-297.
2. Абдуллин А.М. Численный метод определения температуры излучающей стенки в трубчатых печах // Известия вузов: Проблемы энергетики. Казань: КГЭУ, 2011, №11 –12. С.30-39.
3. Абдуллин А. М. Расчет лучистого теплообмена в трубчатой печи методом дискретных ординат // Бюллетень науки и практики. 2018. Т. 4. №10. С. 13-17. Режим доступа: <http://www.bulletennauki.com/abdullin-a> (дата обращения 15.10.2018). DOI:10.5281/zenodo.1461827.

Аносов М.С., Шатагин Д.А., Мансуров Р.Ш., Клочкова Н.С.

Исследование особенностей деформации и разрушения стали 07X25H13, полученной путем аддитивного электродугового выращивания с регистрацией сигнала акустической эмиссии

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
(Россия, Нижний Новгород)*

doi: 10.18411/trnio-12-2021-144

Аннотация

Исследованы особенности деформации и разрушения стали 07X25H13, полученной с использованием аддитивного электродугового выращивания на основе регистрации сигнала

акустической эмиссии. При понижении температуры испытания стали наблюдается уменьшение работы затрачиваемой на растяжении образца на всех стадиях деформации материала. Установлено, что к числу наиболее информативных характеристических параметров сигнала АЭ относятся: скорость счета импульсов, суммарный счет и энтропия сигнала АЭ. При снижении температуры испытания наблюдается значительное увеличение интенсивности сигнала АЭ, общего количества импульсов на всех стадиях деформации и разрушения стали. Механизмы разрушения стали при снижении температуры меняются незначительно, однако наблюдается значительное снижение пластичности металла, о чем свидетельствует также уменьшение размера чашек вязкого разрушения.

Ключевые слова: деформация, 07X25H13, 3D-печать, акустическая эмиссия, фрактографические исследования.

Abstract

The features of deformation and fracture of AISI 309 steel obtained with the use of additive electric arc growing based on the registration of the acoustic emission signal are investigated. With a decrease in the temperature of steel testing, a decrease in the work expended on stretching the sample is observed at all stages of material deformation. It was found that the most informative characteristic parameters of the AE signal include: the pulse count rate, total count and the AE signal entropy. With a decrease in the test temperature, there is a significant increase in the intensity of the AE signal, the total number of pulses at all stages of deformation and destruction of steel. The fracture mechanisms of steel change insignificantly with decreasing temperature; however, a significant decrease in the ductility of the metal is observed, which is also evidenced by a decrease in the size of the ductile fracture cups.

Keywords: deformation, AISI 309, 3D printing, acoustic emission, fractographic studies.

Активное освоение стратегически важных районов Крайнего Севера и Арктики требует обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов и конструкций в условиях пониженных температур. При понижении температуры, механизмы разрушения металлов существенно меняются, наблюдается переход от вязкого к хрупкому разрушению материала, что сказывается и на диагностических параметрах неразрушающих методов контроля.

В процессе нагружения образцов и конструкций происходит динамическая локальная перестройка структуры материала, что в свою очередь вызывает испускание акустических волн [1, 2]. Данные упругие волны образуют сигнал акустической эмиссии (АЭ), который представляет собой последовательность импульсов различной энергии, длины, амплитуды и частоты, которые несут информацию о структурном состоянии материала и процессах, происходящих на различных структурных уровнях.

Для исследования выбрана сталь 07X25H13, обладающая хорошей хладостойкостью. Образцы для испытаний были получены методом электродуговой наплавки по технологии 3D-печати на специализированном стенде [3]. Было изготовлено 2 группы образцов – вдоль и поперек направления наплавки.

Исследование микроструктуры выполнялось на микроскопе Olympus BX41M-LED. Для проведения испытаний на растяжение были изготовлены образцы по ГОСТ 11150-84. Растяжение образцов проводили на разрывной силовой машине Tinius Olsen H100KU с использованием разработанной криокамеры с возможностью регистрации и обработки сигналов АЭ.

Исследования проводили в диапазоне температур от -196 до +20°C. Для контроля температуры использовали датчики pt100, устанавливаемые на поверхности образца. Сигнал АЭ регистрировали широкополосными датчиками GT350 и АЦП модели 6636 фирмы National Instruments. Для обработки сигналов АЭ разработали программное обеспечение с графическим приложением LabVIEW. Такой способ обработки приведен в работе [4].

Т.к. геометрия образцов одинаковая для всей серии испытаний, для сравнения деформационных процессов при растяжении и их энергоемкости рассчитывалась работа на различных стадиях деформации металла, как площадь, заключенная под диаграммой растяжения, построенной в координатах Н – мм.

По результатам испытаний на растяжение определены значения механических характеристик стали 07Х25Н13 (табл. 1).

Таблица 1

Механические свойства стали 07Х25Н13 от температуры испытания

$t, ^\circ\text{C}$	Механические свойства			
	$\delta, \%$	$\sigma_{0,2}$	σ_v	$\sigma_v/\sigma_{0,2}$
		МПа		
+20	32	329	521	1,58
-40	24	389	596	1,53
-80	15	447	675	1,51
-100	14	516	765	1,48

Анализ полученных данных показывает (табл. 1), что при уменьшении температуры происходит значительное повышение условного предела текучести и предела прочности с понижением пластичности, что хорошо согласуется с литературными данными по металлам, полученным классическими методами. Коэффициент упрочнения, выраженный отношением $\sigma_v/\sigma_{0,2}$ для исследуемых металлов с понижением температуры снижается, что объясняется снижением пластичности металлов.

В процессе испытаний на растяжение производилась регистрация сигнала АЭ. Осциллограммы сигнала АЭ и диаграммы растяжения показаны на рис. 1 для исследуемой стали при различных температурах.

Рисунок 1. Диаграммы растяжения и осциллограмма сигнала АЭ при температурах: а) $t=+20^\circ\text{C}$; б) $t=-80^\circ\text{C}$; в) $t=-100^\circ\text{C}$ (сталь 07Х25Н13)

На рис. 1 выделены отдельные стадии деформации и разрушения материала (стадия упругой деформации, условная стадия текучести, деформационного упрочнения, а также распространения трещин (границы показаны пунктиром)). Для сравнения энергоемкости процессов деформации стали при различных температурах оценивалась работа,

затрачиваемая на растяжение образца до образования шейки, т.е. до образования макротрещины (табл. 2).

Таблица 2

Работа, затрачиваемая на растяжение образца

$t, ^\circ\text{C}$	Работа, затрачиваемая на растяжение на стадиях		
	упругой деформации $A_{упр.}, \text{Дж}$	текучести $A_{тек.}, \text{Дж}$	деформационного упрочнения, $A_{деф.}, \text{Дж}$
+20	0,3	-	5,6
-80	0,265	-	3,66
-100	0,26	0,45	3,2

Как показывает анализ таблицы 2, при понижении температуры наблюдается уменьшение работы затрачиваемой на растяжении образца, как на стадии упругой деформации, так и на стадии деформационного упрочнения. Также уменьшается суммарная работа, затрачиваемая на образование макротрещины в шейке образца. Это объясняется, прежде всего, значительным снижением пластичности стали 07X25H13

Как показали результаты обработки сигнала АЭ, к числу наиболее информативных характеристических параметров сигнала АЭ относятся: скорость счета импульсов N [имп./с], суммарный счет N_Σ [имп.] и энтропия сигнала АЭ H [нат.].

Для удобства анализа особенностей сигнала АЭ, полученные данные сведены в таблицу 3. Анализ (рис. 1, табл. 3) показывает, что при снижении температуры испытания наблюдается значительное увеличение интенсивности сигнала АЭ, общего количества импульсов на всех стадиях деформации и разрушения стали.

Таблица 3

Анализ сигнала АЭ и характеристических параметров на разных стадиях деформации и при различных температурах (07X25H13)

$t, ^\circ\text{C}$	Стадия деформации материала	Параметры сигнала АЭ		
		N [имп./с]	N_Σ [имп.] *	H [нат.] ($\times 10^5$) **
+20	упругой деформация	10...140	500	15
	условной текучести	90...140	600	22
	деформационного упрочнения	0...45	1100	7
	шейкообразование	0...5	1120	7
	предразрушения	150	1400	18
-80	упругой деформация	1500...2200	25000	11
	условной текучести	2200...3000	45000	11
	деформационного упрочнения	150...1500	80000	6
	шейкообразование	150...400	88000	8
	предразрушения	250...400	90000	12
-100	упругой деформация	4500...6200	50000	22
	условной текучести	~4400	65000	18
	деформационного упрочнения	3500...6200	290000	11
	шейкообразование	~3500	340000	26
	предразрушения	~3500	350000	19

Наибольшее количество импульсов во всем температурном диапазоне наблюдается в стадии текучести и начальной стадии деформационного упрочнения, а также на стадии предразрушения. Минимальное значение энтропии H сигнала АЭ проявляются на стадии деформационного упрочнения, а наибольшие значения - на начальных стадиях деформирования и стадии предразрушения.

Полученные закономерности изменения характеристических параметров сигнала АЭ могут быть использованы в качестве диагностических признаков, как при оценке стадии деформации и разрушения материала, так и структурного состояния материала.

При значительном снижении температуры испытания стали 07X25H13 до -100°C начинает проявляться площадка текучести, которой при комнатной температуре для этой

стали не наблюдается (рис. 1). Для стали 07X25H13 в изломе во всем исследуемом диапазоне температур наблюдается преимущественно вязкая составляющая. При понижении температуры размер чашек вязкого разрушения уменьшается. Это свидетельствует о снижении пластичности стали и коррелирует с полученными результатами по оценке механических характеристик (табл. 1).

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации «Оценка хладостойкости и изучение механизмов разрушения металлов полученных на основе 3D-печати для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в условиях Арктики и Крайнего Севера»

1. Стрижало, В.А. Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций [Текст]/ В.А. Стрижало, Ю.В. Добровольский, В.А. Стрельченко [и др.]; Отв. Ред. Писаренко Г.С.; АН УССР. Ин-т проблем прочности.- Киев: Наук. Думка, 1990.- 232с.
2. Семашко, Н.А. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении / Н.А. Семашко, Б.Н. Марьин [и др.]; под ред. Н.А.Семашко.- М.: Машиностроение, 2002.-240 с.
3. Разработка цифрового двойника процесса 3D-печати электродуговой наплавкой на станке с ЧПУ с использованием методов машинного обучения и численного моделирования Шатагин Д.А., Аносов М.С., Кабалдин Ю.Г., Галкин А.А., Клочкова Н.С. Тенденции развития науки и образования. 2020. № 67-2. С. 55-62.
4. Пат. 2671152 Рос. Федерация: МПК G01N 29/14. Способ обработки сигнала акустической эмиссии.

Лавров В.В.¹, Лучкина М.В.², Рындин К.Ю.³, Рындин Ю.Г.¹, Тестов А.В.¹, Тюрин В.С.⁴
Алгоритм оценки орбитальных параметров по совокупности угловых измерений

¹ПАО Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел»

²ООО «Компания АСТРА»

³ОАО «Российские космические системы»

⁴Акционерное общество «Астрономический научный центр»
 (Россия, Москва)

doi: 10.18411/trnio-12-2021-145

Аннотация

Рассмотрен метод определения орбитальных параметров околоземных космических объектов (КО) по совокупности угловых измерений, содержащих аномальные “замеры”. Начальную оценку параметров орбиты предлагается искать по трём угловым измерениям с использованием модифицированного метода Гаусса, а дальнейшую обработку – с использованием метода поиска М-оценок параметров. Имитационным моделированием найдена оценка качества работы синтезированного алгоритма. Метод предназначен для обнаружения некаталогизированных космических объектов с одновременной оценкой их орбитальных параметров по результатам оптических обзоров.

Ключевые слова: аномальные измерения, М-оценка параметров, орбитальные параметры, определение орбит, метод Гаусса, угловые измерения.

Abstract

A method for determining the orbital parameters of near-Earth space objects (SO) from a set of angular measurements containing anomalous “measurements” is considered. It is proposed to search for the initial estimate of the orbit parameters by three angular measurements using the modified Gaussian method, and further processing – using the search method for M-estimates of parameters. An estimate of the quality of the synthesized algorithm is found by imitation modeling. The method is designed to detect uncataloged space objects with a simultaneous assessment of their orbital parameters based on the results of optical surveys.

Keywords: abnormal measurements, M-assessment of parameters, orbital parameters, determination of orbits, Gauss method, angular measurements.