

ного состояния в зоне зарождения трещины – метода конечных элементов (МКЭ). Однако, применение МКЭ к сталям в различных структурных состояниях достаточно дорого и нерентабельно. Полагали, что возможно построение нормированной зависимости перенапряжения ($\sigma_{11\max}/\sigma_T$) от отношения номинального напряжения к пределу текучести σ_N/σ_T с помощью МКЭ для образца и концентратора напряжений определенной геометрии при данном способе нагружения. В дальнейшем, с помощью этой зависимости можно определить локальные напряжения в зоне зарождения трещины для любого номинального напряжения до и после появления зоны пластической деформации перед концентратором

напряжений по известному пределу текучести стали. Были проведено математическое моделирование напряженно-деформированного состояния образцов с двумя типами надрезов с помощью МКЭ для шагового изменения нагрузки. В результате были построены графические зависимости $Q = \sigma_{11\max}/\sigma_T$ от σ_N/σ_T для шагового увеличения нагрузки на изгибный образец.

Таким образом, полученные зависимости позволяют без применения МКЭ оперативно в заводских условиях провести оценочный расчет локальных напряжений в зоне зарождения трещины изгибного образца при его хрупком разрушении и оценить, тем самым, характеристику стали – сопротивление сколу.

*«Компьютерное моделирование в науке и технике»,
Андора, 9-16 марта 2013 г.*

Технические науки

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В БИОЛОГИЧЕСКОЙ ТКАНИ

Потлов А.Ю.

*ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный
технический университет», Тамбов,
e-mail: zerner@yandex.ru*

Диффузионная оптическая томография (ДОТ) – перспективный метод исследования биологических тканей на глубину до 5–10 см, основанный на измерении интенсивности излучения регистрируемого после многократного рассеяния (диффузии фотонов) внутри биообъекта [1]. На сегодняшний день, основной научной проблемой ДОТ является получение картограммы неоднородностей в биообъекте, как результата решения обратной задачи диффузии излучения. В связи с этим моделирование распространения оптического излучения в биологических тканях является актуальной задачей.

В данной работе предлагается модель капли – импульса излучения с фиксированным исходным числом фотонов, который падает на объект около поверхности и диффундирует по нему с преимущественным движением к центру объекта. Такая модель позволяет описать экспериментально полученные данные, как для однородного, так и для неоднородного случаев. Предложенная модель реализована в виде специализированного программного продукта [2] на объектно-ориентированном языке программирования C#.

В качестве результата программа выдает кривые изменения во времени интенсивности излучения, регистрируемого с помощью n -го количества детекторов расположенных в указанных местах моделируемого объекта с за-

данными количеством, оптической плотностью и расположениями неоднородностей. Эти кривые имеют большую значимость, поскольку характеризуют оптическую структуру моделируемого объекта.

Список литературы

1. Проскурин С.Г., Потлов А.Ю., Фролов С.В. Детектирование поглощающей неоднородности в биологическом объекте при регистрации рассеянных фотонов // Медицинская техника. – 2012. – № 6 (276). – С. 1–5.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ в ФИПС № 2012615093 «Моделирование рассеяния света в биологической ткани» / С.Г. Проскурин, С.В. Фролов, А.Ю. Потлов (RU). Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 07.06.2012 г.

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРА ЗЕРНА НА ТЕМПЕРАТУРУ ХЛАДНОЛОМКОСТИ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ И ДЕТАЛЕЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Сибилёв А.В., Мишин В.М.

*Северо-Кавказский федеральный университет,
Пятигорск, e-mail: mishinvm@yandex.ru*

Величина зерна – важнейший структурный фактор, определяющий сопротивление металла хрупкому разрушению при понижении температуры. Механизмы разрушения сталей с учетом размера зерна рассмотрены в известных работах Петча, Коттрелла, Стро и др. [1]. В соответствии с дислокационной теорией разрушения увеличение размера зерна обуславливает повышение локальной концентрации напряжений у границ зерна, что должно приводить к понижению напряжения хрупкого разрушения и повышению критической температуры хрупкости.

Несмотря на понимание влияния размера зерна на температуру хладноломкости стали, не было перехода от оценки температуры хладноломкости образцов к температуре хладноломкости деталей с концентраторами напряжений. Однако, был разработан подход, позволяющий по результатам испытаний стандартных образцов с помощью метода конечных элементов оценить температуру хладноломкости деталей [2]. В то же время, для проектирования ответственных деталей на стадии проектирования требуется учет структуры стали, в том числе размера зерна. Полагали, что использование критерия критических локальных растягивающих напряжений и критерия хладноломкости [3] позволит выяснить закономерности влияния размера зерна на сопротивление хрупкому разрушению при понижении температуры с позиций структурной механики разрушения и, на этой основе, разработать способ прогнозирования критической температуры хрупкости по известному размеру зерна.

Целью работы являлось количественное моделирование зависимости температуры хладноломкости образцов и деталей с концентраторами напряжений от размера зерен стали на основе применения метода математического моделирования напряженно-деформированного состояния в зоне зарождения трещины.

В качестве материала исследования использовали сталь 10кп. Путем применения различных термообработок были получены различные состояния стали, различающиеся средним размером зерен: 11, 28, 45 и 60 мкм. Использовали цилиндрические образцы без надреза и с надрезами для испытаний на растяжение. Испытания проводили в диапазоне температур 77–293 К. Определение температуры хладноломкости заключалось в установлении температуры, при которой разрушающая нагрузка равна нагрузке общей текучести. Принимая во внимание микрофрактографическую картину распространения трещины сколом, полагали, что процесс разрушения образцов стали 10 кп с различным размером зерна при температурах ниже критических температур хрупкости контролируется критическим максимальным локальным растягивающим напряжением. По результатам испытаний гладких цилиндрических образцов строили зависимости предела текучести стали от температуры испытаний стали для различных размеров зерен. Были получены кривые зависимости предела текучести от температуры испытаний для различных размеров зерна (11, 28, 45 и 60 мкм). Для расчета максимальных локальных растягивающих напряжений использовали метод математического моделирования напряженно-деформированного состояния в зоне зарождения трещины перед концентратором напряжений – метод конечных элементов. С одной стороны этот метод использовали для расчета

локальных напряжений в зоне зарождения трещины в экспериментальных образцах, с другой, для расчета локальных напряжений в исследуемой детали с концентраторами напряжений.

Определяли критические максимальные локальные растягивающие напряжения для образцов по ранее изложенной методике [4], заключающейся в установлении температуры совпадения нагрузок разрушающей и общей текучести и, далее, расчете критического максимального локального растягивающего напряжения по формуле:

$$\sigma_F = \sigma_T(T_{кр}, \dot{\epsilon}, d) \cdot Q_{o.T} \quad (1)$$

где $Q_{o.T}$ – перенапряжения общей текучести; $\sigma_T(T_{кр}, \dot{\epsilon})$ – предел текучести при критической температуре хрупкости; d – размер зерна. Экспериментальную зависимость критического максимального локального растягивающего напряжения – σ_F (Н/мм²) от размера зерна – d (мм) стали 10 кп аппроксимировали выражением:

$$\sigma_F = 306 + 99 \cdot d^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Было установлено, что существует связь температуры хладноломкости с критическим максимальным локальным растягивающим напряжением, пределом текучести и перенапряжением общей текучести, учитывающим скорость нагружения, способ нагружения, геометрию концентратора напряжений и образца:

$$T_{кр} = \left[\frac{1}{T_o} + \frac{1}{\beta} \left(\ln \frac{\sigma_F}{Q_{o.T} \cdot \sigma_T(T_o, \dot{\epsilon})} \right)^{\frac{1}{n}} \right]^{-1} \quad (3)$$

С другой стороны, критическое максимальное локальное растягивающее напряжение σ_F и предел текучести стали σ_T зависят от размера зерна. Однако σ_F не зависит от температуры испытаний, а предел текучести σ_T зависит. Поэтому представляется возможным связать температуру хладноломкости непосредственно с размером зерна, учитывая геометрию концентратора напряжений, способ и скорость нагружения. Для практических целей прогнозирования температуры хладноломкости образцов или деталей с концентраторами напряжений предлагается выражение:

$$T_{кр} = \left[\frac{1}{T_o} + \frac{1}{\beta} \left(\ln \frac{A + k \cdot d^{-\frac{1}{2}}}{Q_{o.T} \cdot \sigma_T(T_o, \dot{\epsilon})} \right)^{\frac{1}{n}} \right]^{-1} \quad (4)$$

где β , n – коэффициенты кривизны кривой зависимости предела текучести образцов на растяжение от температуры испытаний. Предлагаемую зависимость критической температуры

хрупкости от размера зерна проверяли экспериментально. Было установлено, что увеличение размера зерна стали приводит к росту температуры хладноломкости. Сравнение расчетной и экспериментальной зависимости температуры хладноломкости от размера зерна указывает на возможность прогнозирования температуры хладноломкости стальных образцов по известному размеру ее зерна.

Разработанный подход к определению температуры хладноломкости образцов позволяет проводить расчет температуры хладноломкости деталей с учетом размера зерна стали. Для этого в формулу (4) вводится значение Q_{OT} определенное с помощью метода конечных элементов.

Таким образом, критическая температура хрупкости стального образца или детали с концентратором напряжений может быть оценена по заданному размеру зерна с одновременным учетом скорости, способа нагружения и геометрии образца или детали и концентраторов напряжений.

Список литературы

1. Нотт Д.Ф. Основы механики разрушения. – М.: Металлургия, 1978. – 256 с.
2. Мишин В.М., Сибилев А.Н. Критерий хладноломкости стальных деталей. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2011. – № 11. – С. 102–104.
3. Мишин В.М., Кислюк И.В., Саррак В.И. Анализ влияния легирования на порог хладноломкости железа в рамках схемы Иоффе-Орвана // Физика металлов и металловедение. – 1991. – № 7. – С. 188–192.
4. Сибилев А.Н., Мишин В.М. Влияние соотношения локальной прочности и текучести на температуру хладноломкости сталей // Физика прочности и пластичности материалов: научн. тр. XVIII Межд. конф. – Самара: СНЦ РАН, 2012.

РАЗРАБОТКА ИНТЕРВАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Фролова Т.А., Туляков Д.С., Фролов С.В.

*ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов,
e-mail: frolova@mail.gaps.tstu.ru*

При построении математических моделей нередко возникают случаи, когда некоторые входные величины не определены, и найти их численные значения не представляется возможным. Существует несколько подходов к раскрытию неопределенности.

Один подход связан с использованием теории нечетких множеств. Неопределенные параметры характеризуются функциями принадлежности, которые строятся на основе опросов экспертов. Модели, в которых неопределенные параметры характеризуются функциями принадлежности, получили название нечетких математических моделей. Недостатком этой методики является то, что для надежного построения функции принадлежности требуется мнение нескольких экспертов. Это не всегда возможно.

Другой подход – вероятностный, в котором неопределенные параметры характеризуются

функциями плотности распределения. Математические модели, в состав которых входят такие параметры, имеют названия вероятностных. В этом случае функции распределения строятся на основании накопленных статистических данных о поведении стохастических параметров. Трудность применяемой методики связана с необходимостью проведения большого числа экспериментов на объекте во время хода технологического процесса для определения параметров законов распределения стохастических величин. Чаще всего информация о значении неопределенного параметра задается в виде интервального параметра.

Разработка интервальной модели реализована на примере переработки фосфогипса. Нами создана математическая модель процесса обжига фосфогипса во вращающейся печи. В математической модели есть неопределенные параметры, численные значения которых изначально неизвестны. Это степень черноты материала, теплоемкость материала и эмпирический коэффициент. Эти параметры предлагается задавать в виде интервальных значений. Таким образом, для решения математической модели процесса обжига во вращающейся печи необходимо решить интервальную математическую модель. Решение модели представляется в виде графика зависимости границ температуры материала по длине печи и дает возможность определить оптимальные технологические режимы процесса.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОРОГОВЫХ НАГРУЗОК АВАРИЙНОЙ ДЕТАЛИ ИЗ МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ПРИ ЕЕ ЗАМЕДЛЕННОМ РАЗРУШЕНИИ

Шиховцов А.А., Мишин В.М.

*Северо-Кавказский федеральный университет,
Пятигорск, e-mail: mishinvm@yandex.ru*

Замедленное хрупкое разрушение (ЗХР) высокопрочных сталей и стальных деталей является наиболее опасным видом хрупкого разрушения. Особая опасность этого вида хрупкого разрушения связана с тем, что при разрушении деталей отсутствуют признаки пластической деформации. При замедленном хрупком разрушении зарождение и развитие микротрещины происходит по границам зерен мартенситной стали или стали содержащей мартенсит [1]. Физическая природа замедленного хрупкого разрушения изучена в ряде работ [1–2]. Авторами, ранее был разработан критерий замедленного хрупкого разрушения высокопрочных сталей [3]. Полагали, что применение критерия замедленного хрупкого разрушения возможно не только к образцам, но и к деталям. С помощью метода конечных элементов – метода математического моделирования напряженно-деформированного состояния в зоне зарождения микротрещины