

1570688

На правах рукописи

УДК 621.791.052:539.734

ЖОХОВ Александр Геннадьевич

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ
СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОБОЛОЧКОВЫХ
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ ОГРАНИЧЕННОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ
НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕДЕЛЬНОГО
СОСТОЯНИЯ РАЗРУШЕНИЯ**

Специальность

05.06.03 «Технология и машины сварочного производства»

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Мок.

Москва - 2000

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель – д.т.н., с.н.с. КУРКИН А.С.

Официальные оппоненты:

1. д.т.н., проф. Вершинский А.В.

2. к.т.н., доц. Ермаков С.И.

Ведущее предприятие - АООТ ВНИИ «НЕФТЕМАШ»

Защита состоится «28» 12 2000 г. на заседании диссертационного Совета К053.15.03 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в 1 экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Телефон для

Авторефе

Учен
диссерт
к.т

000 г.

Гирш

157 0688

Подписано к
Заказ 161-Т

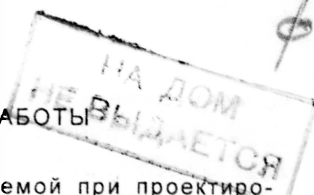
00 экз.
). Баумана



1570688

Жохов А.Г. Методика опреде

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ



1570688

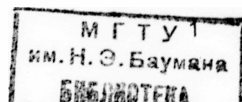
Актуальность проблемы. Основной проблемой при проектировании сосудов давления является предотвращение их внезапного разрушения. Линейная механика разрушения (ЛМР) не всегда гарантирует успешное решение этой проблемы. Во-первых, для вязких конструкционных материалов область корректности ЛМР ограничена и не охватывает всех случаев разрушения по механизму роста трещин. Во-вторых, в подходы ЛМР с большим трудом вписываются осложняющие решение факторы, характерные для сварных сосудов, такие как концентраторы напряжений, дефекты сварки, остаточные напряжения и механическая неоднородность свойств. Анализ аварий сосудов давления показывает, что разрушения являются следствием именно неучета факторов, снижающих трещиностойкость, а не недостаточной прочности материала. Учет этих факторов возможен только путем детального анализа НДС в опасной зоне. Катастрофические последствия разрушения сосудов давления и обусловленное этим требование гарантированной работоспособности определяют актуальность разработки методики расчёта трещиностойкости сосудов давления из материалов ограниченной пластичности на основе наиболее адекватных моделей деформирования материала с учётом влияния особенностей сварных соединений. Предпосылкой к разработке такой методики являются наличие весьма эффективных численных методов анализа НДС конструкций (в том числе сварных), стремительное снижение удельной стоимости вычислительных ресурсов ЭВМ, значительное количество работ, посвящённых вскрытию механизмов образования и развития разрушения материала.

Цель работы:

Область применения методики не ограничена задачами проектного расчёта. Наиболее эффективно её использование с целью оценить и обеспечить работоспособность сварных стыковых соединений при наличии дефектов при принятии решения о выбраковке (ремонте) готового (находящегося в эксплуатации) изделия.

Методы исследования:

В качестве метода анализа НДС сварной конструкции принят практически инвариантный к геометрии и свойствам материала рас-



четного элемента метод конечных элементов (МКЭ). Для достижения цели данной работы использован программный комплекс «СВАРКА», реализующий МКЭ и позволяющий решать термо-деформационные задачи с учётом структурных превращений, геометрической нелинейности расчётной модели и физической нелинейности свойств материала. Необходимые свойства материала получены расчетно-экспериментальным способом путём испытания образцов и последующего численного моделирования эксперимента вплоть до полного разрушения образца. Экспериментальные данные получены на испытательной установке EUS-100 (ГДР) и установке, разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана, и представляют собой запись на шлейфовый осциллограф (или ЭВМ через АЦП) показаний тензодатчиков, регистрирующих параметры процесса нагружения образцов.

Научная новизна работы:

1. Обоснован единый подход к хрупкому и вязкому разрушению стенки сосуда на основе модели накопления повреждений в процессе упругопластических деформаций. Показана возможность моделирования нестабильного разрушения материала на основе этого подхода.

2. Проведено и подтверждено экспериментально расчётное определение вязкости разрушения K_{IC} на основе критерия вязкого локального разрушения – предельной пластичности материала.

3. Показано, что с позиций ЛМР в качестве свойства материала, характеризующего трещиностойкость материала, правильнее использовать КИН на момент страгивания трещины K_{IQ} , который, в отличие от K_{IC} , практически не зависит от геометрических характеристик расчётного элемента.

4. Установлено, что основным дополнительным фактором, способным снизить трещиностойкость материала сварных соединений сосудов давления, являются остаточные сварочные напряжения. Для соединений сплава ИМВ-2, выполненных ЭЛС, изменение механизма разрушения с преимущественно стабильного на нестабильный происходит при толщине свыше 12 мм, тогда как в однородном материале нестабильность достигается только при толщине свыше 18 мм.

Практическая ценность и результаты работы:

1. Разработано программное обеспечение, позволяющее снизить трудозатраты на построение объёмной конечно-элементной модели расчётного элемента с поверхностной трещиной.
2. Разработана и апробирована методика испытаний мало-пластичного материала (сплав ИМВ-2) и обработки результатов испытаний для определения свойств материала, необходимых при моделировании разрушения.
3. На основе моделирования монотонного нагружения разработан способ определения величины стабильного подрастания трещины в экспериментальном образце с поверхностной трещиной.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Модель разрушения стенки сосудов давления на основе вязкого локального критерия разрушения в процессе статического (монотонного) нагружения.
2. Методика испытаний материалов для определения диаграммы предельной пластичности в области высоких значений положительной объёмности НДС.

Апробация работы:

Основные положения изложены на республиканских конференциях по научно-технической программе «Сварочные процессы» в г. Калининграде в 1993 г. и в г. Перми в 1995 г.

Методика определения диаграммы предельной пластичности и приёмы численного определения параметра трещиностойкости стенки сосуда внедрены в учебный процесс кафедры сварки МГТУ им. Н.Э.Баумана в виде серии Лабораторных работ.

Объём и структура работы:

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, основных выводов и результатов работы, списка использованных литературных источников и приложений. Изложена на 202 листах машинописного текста, содержит 81 рисунок, 4 таблицы и 89 наименований литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Методы оценки трещиностойкости материала стенки сосуда давления.

Оценка наиболее опасного - хрупкого разрушения осуществляется преимущественно методами ЛМР. Среди критериев ЛМР наибольшее распространение получил критерий K_{IC} . Для экспериментального определения K_{IC} используются образцы различной конструкции, в том числе образец с поверхностной трещиной, который наиболее близко отражает поведение стенки сосуда с дефектом. Поскольку размеры конструктивного элемента с трещиной могут оказать существенное влияние на характер НДС вблизи вершины трещины, то существует проблема как корректного определения величины K_{IC} , так и его последующего использования в оценке трещиностойкости конструкции с дефектом. Особенно сложно выдержать корректность применения ЛМР для сварных соединений, когда K_{IC} характеризует комплекс свойств: геометрию сварного соединения, размеры и положение трещины, свойства металла шва, околшово́й зоны и основного материала.

Альтернативой методам ЛМР являются интенсивно развиваемые в последнее время подходы оценки трещиностойкости, основанные на классических критериях прочности. Значительные успехи в этой области достигнуты благодаря работам Ф. Макклинтока, Г.В. Ужика, В.В. Новожилова, В.В. Болотина, В.Л. Колмогорова, Л.А. Копельмана, Г.П. Карзова и др. Вместе с тем, до настоящего времени не предложено единого критерия, описывающего как хрупкое, так и вязкое разрушение. Суть проблемы состоит в том, что разрушение – это многостадийный процесс образования и роста микродефектов, который может быть прерван нестабильностью на любой стадии. В итоге критерий разрушения, основанный на физике процесса разрушения, получается весьма сложным для практического использования, поскольку включает в себя широкий набор структурно-чувствительных свойств материала и комплекс критериальных условий разрушения.

Большую перспективу имеет подход, рассматривающий процесс разрушения на макроуровне и оперирующий интегральными характеристиками материала. В рамках этого подхода разрушение некоторого макрообъёма материала, в границах которого сохраняется

сплошность и однородность свойств, реализуется при достижении критического НДС. Всё НДС однозначно описывается тремя инвариантами напряжений и тремя - деформаций. В качестве первого инварианта можно использовать средние напряжения и деформации (гидростатическую составляющую НДС) σ_m и $\varepsilon_{пл}$, а в качестве второго – их интенсивности σ_i и ε_i . Установлено, что влияние третьих инвариантов на процесс разрушения менее существенно.

А.С. Куркиным предложено для определения трещиностойкости сварных конструкций проводить моделирование процесса разрушения на основе локального деформационного критерия предельной пластичности $\varepsilon_c(j)$, для чего разработан необходимый методический материал и программное обеспечение. Критерий $\varepsilon_c(j)$ (где $j = \sigma_m/\sigma_i$ - показатель объемности НДС) впервые был выдвинут Ф.Макклинтоком при описании вязкого разрушения как процесса образования и роста микропор. А.С. Куркину удалось продемонстрировать эффективность критерия ε_c при оценке трещиностойкости сварных оболочковых конструкций при вязком стабильном и нестабильном разрушении. Есть основания полагать, что область применения ε_c гораздо шире и возможно описание на его основе процессов хрупкого и квазихрупкого разрушения значительной части конструкционных материалов и их сварных соединений. Актуальность оценки наиболее опасного хрупкого разрушения сосудов давления позволили сформулировать тему настоящей работы: методика определения статической трещиностойкости сварных стыковых соединений оболочковых конструкций из материалов ограниченной пластичности на основе численного моделирования предельного состояния разрушения. Работа посвящена изучению вопроса использования критерия предельной пластичности при моделировании хрупкого разрушения и отвечает цели наиболее полной оценки и обеспечения работоспособности сварных стыковых соединений с дефектами.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка методики моделирования предельного состояния разрушения на ЭВМ;
2. Анализ изменения НДС в зоне концентратора (трещины) в процессе нагружения в зависимости от размеров образца и трещины;

3. Разработка методики экспериментально-расчетного определения значений предельной пластичности;
4. Разработка программного обеспечения расчётов на прочность и трещиностойкость сварных стыковых соединений с обнаруженными дефектами;
5. Определение предельной величины нагрузки, соответствующей наступлению течи сварного сосуда с трещиной.

ГЛАВА 2. Методика моделирования страгивания и движения трещины от концентратора.

Многочисленные эксперименты показывают, что разрушение – это процесс образования и роста микронесплошностей материала, который на определенном этапе деформирования обретает необратимый характер, проявляющийся в виде образования макротрещины. Проблема создания расчётной модели процесса разрушения сосуда давления состоит в обеспечении корректности сочетания микроскопической природы процесса разрушения и задачи оценки работоспособности конструкции в целом.

Определение дополнительных требований к методу моделирования разрушения стенки сосуда потребовало выявить причинно-следственную связь между НДС вблизи концентратора, свойствами материала и условием нарушения работоспособности сосуда – образованием течи. Очевидно, что такое исследование требует обработки значительного объёма экспериментальных данных. В качестве таких данных были использованы опубликованные ранее результаты двух независимых исследований.

В первом, проведённом на кафедре «Сварки» МВТУ и имитирующем нагружение стенки сосуда с характерным дефектом, вскрыты особенности формирования НДС образцов с поверхностной трещиной в процессе растяжения. Установлено, что до страгивания трещины развитие деформаций вблизи трещины протекает по единому механизму и проходит три стадии, отличающиеся размером пластической зоны. При этом характер дальнейшего разрушения определяется тем, на какой стадии деформирования образца произошло страгивание трещины. Этот очень важный вывод позволяет использовать для всех случаев разрушения стенки сосуда единый деформационный критерий вязкого разрушения.

Для оценки влияния микропроцессов, происходящих в зоне предразрушения, на НДС в вершине трещины, были рассмотрены результаты другого экспериментального исследования, проведённого в Институте проблем прочности в Киеве. В нём вскрыты закономерности формирования дефектной структуры материала 15Х2МФА в процессе растяжения цилиндрических образцов с кольцевыми надрезами различной остроты. Сопоставление диаграмм нагружения образцов и этапов формирования дефектной структуры позволило нам установить, что вплоть до момента объединения микронесплошностей в макротрещину, влияние дефектной структуры на закономерности деформирования образца в целом незначительно. То есть моделирование нагружения расчётного элемента можно проводить без учета образования микронесплошностей вплоть до момента страгивания макротрещины.

В исследованиях Лебедева А.А. и др. установлено, что форма и количество наблюдаемых несплошностей зависит от исходной остроты кольцевого надреза образца, то есть можно говорить о чувствительности процессов в зоне предразрушения к объёмности НДС. Количественно близость к моменту разрушения оценивают предложенным Качановым Л.М. скалярным параметром «поврежденности материала» ψ , равным 0 в исходном состоянии и 1 к моменту слияния микронесплошностей в макротрещину. Для моделирования разрушения при нагружении, близком к простому можно опираться на линейный закон суммирования повреждений.

Таким образом, на основе анализа литературных экспериментальных данных и привлечения существующих представлений о модели накопления поврежденности материала, выработаны основные положения методики моделирования предельного состояния разрушения сосуда давления при монотонном нагружении (рис.1). Моделирование процесса нагружения расчетного элемента выполнено в виде серии расчетов НДС при пошагово возрастающей нагрузке. На каждом шаге нагружения расчет выполняется с учетом всех видов нелинейности модели: текучести материала и разрушения тех частей элементов, в которых $\psi = 1$. Математически разрушение трактуется как мгновенное изменение свойств материала до величин, при которых его влияние на неразрушенную часть модели незначитель-

но. Учет новых свойств материала и геометрии элементов происходит на следующем шаге нагружения. Для определения характера разрушения достаточно выявить изменение компонент НДС при повторном решении без изменения внешней нагрузки.

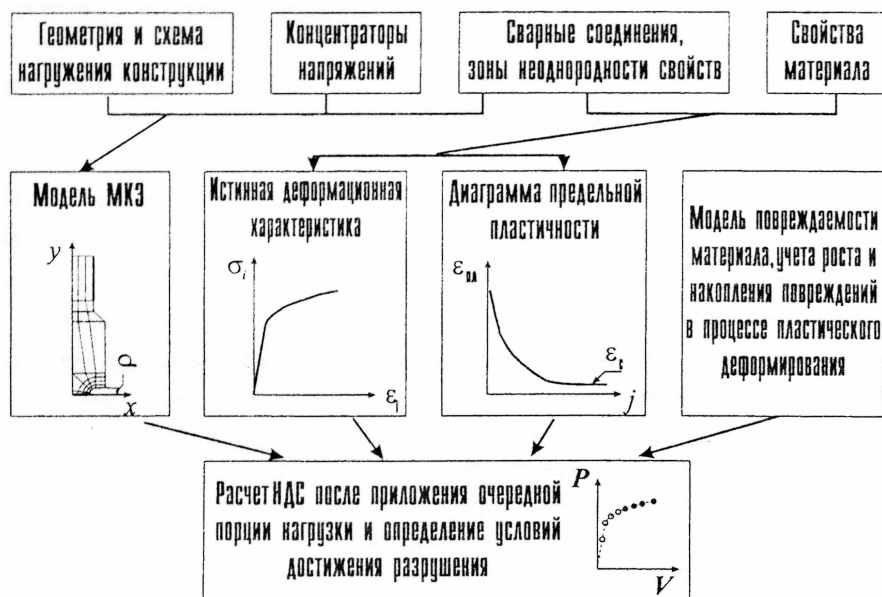


Рис. 1. Основные положения метода моделирования разрушения

Глава 3. Методика определения предельной пластичности материала.

В главе рассмотрены методические вопросы определения пластичности материала при высоких значениях положительной объемности НДС.

Разрушение стенки сосуда давления по хрупкому механизму возможно при усложнении условий работы материала вследствие конструктивных особенностей (концентраторы напряжений), технологических факторов (остаточные напряжения, неоднородность механических свойств, дефекты) или условий эксплуатации сосуда (понижение температуры, радиационное охрупчивание). Все эти факторы трудно смоделировать, но можно учесть при задании запаса пластических свойств материала. Для отработки методики определения пластичности материала, разрушающегося по механизму,

приближенному к хрупкому, выбран материала с ограниченной пластичностью: магниево-литиевый сплав ИМВ-2 ($\delta_5=14\%$, $\psi=16\%$, $\sigma_{0.2}=130$ МПа, $\sigma_B=210$ МПа). В исследованиях Куркина С.А. показано, что своеобразные свойства этого материала позволяют при нормальной температуре получать нестабильное разрушение образцов с полуэллиптической трещиной по хрупкому или вязкому механизму в зависимости от размеров образца и трещины, в то время как нестабильность на стальных образцах реализуется, как правило, только в условиях криогенных температур.

Наиболее простой экспериментальный способ определения предельной пластичности в широком диапазоне положительных значений объёмности состоит в растяжении цилиндрических образцов с кольцевым надрезом различной остроты вплоть до предельно острого – усталостной трещины. Из листовых элементов ИМВ-2 были изготовлены и испытаны образцы с кольцевым надрезом радиусом r 3,0 мм, 1,5 мм, 0,98 мм, 0,5 мм, 0,001 мм, 0 мм (усталостная трещина), а также гладкий образец. В результате обработки экспериментов получены машинные диаграммы нагружения образцов, а обмер разрушенных половинок образцов по меридиональному сечению дал профили пластического вытяжения волокон в направлении нагрузки.

Анализ существующих приемов получения предельной пластичности выявил несколько узких мест, которые потребовали разработки новых приемов, обеспечивающих точность определения как нагрузки, соответствующей возникновению факта локального разрушения материала, так и места возникновения очага разрушения в сечении экспериментального образца. Принципиальным отличием данной методики от существующих является ее расчетно-экспериментальный характер. Построение диаграммы предельной пластичности и расчетное определение места старта разрушения реализовано путем совместного рассмотрения распределений характеристик НДС $\varepsilon_{пл}$ и j в сечении с трещиной на момент страгивания, полученных численно для всех испытанных образцов. Как критерий разрушения, диаграмма предельной пластичности делит область в координатах $\varepsilon_{пл}-j$ на две части: выше (закритические значения НДС, разрушенный материал) и ниже кривой (докритические значения НДС, неразрушенный материал) (рис. 2). Если характеристики НДС $\varepsilon_{пл}$ и j некоторой области материала нанести в виде то-

чек на диаграмму, то по положению этих точек относительно кривой предельной пластичности можно судить о степени опасности НДС анализируемой области. Нанеся для заданной нагрузки на диаграмму ряд точек, соответствующих различным участкам меридионального сечения образца с надрезом, можно получить общую картину близости сечения к разрушению и выделить наиболее опасную точку.

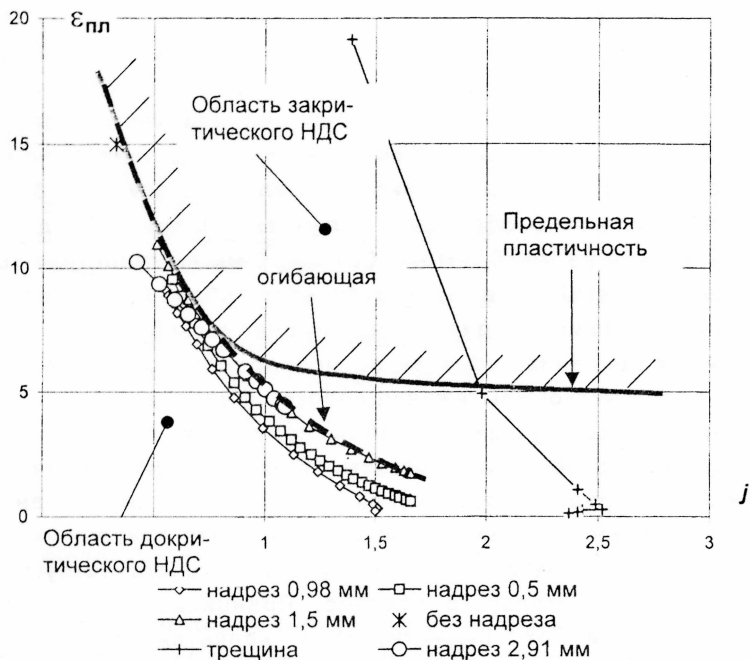


Рис. 2. Построение диаграммы предельной пластичности ИМВ-2

Очевидно, что если нагрузка соответствует моменту страгивания макротрещины, то НДС всех точек сечения должны быть ниже диаграммы предельной пластичности, а точки начала разрушения – на диаграмме предельной пластичности. Если рассмотреть точки, соответствующие НДС в сечении на момент страгивания ряда различных по форме надреза образцов, то диаграмма предельной пластичности должна быть их оггибающей сверху (рис. 2).

Используя эти приемы обработки результатов испытаний образцов из ИМВ-2 с остротой надреза ρ (рис.4) от 0,5 до ∞ (гладкий образец) удалось получить значения предельной пластичности в интервале объемности j от 0,3 до 1,6 (см. положение огибающей на рис. 2). Для этих образцов образовавшаяся макротрещина сразу становилась нестабильной, что позволило весьма точно установить критическую нагрузку и, соответственно, критические параметры НДС. При более высокой остроте надреза (усталостная трещина) нестабильному разрушению предшествует этап стабильного роста трещины. Погрешность в расчетном определении момента страгивания трещины привела к недопустимо высоким, противоречащим результатам испытаний других образцов, значениям предельной пластичности. В итоге положение диаграммы предельной пластичности при высокой объемности скорректировано так, чтобы результаты численного моделирования процесса нагружения образца с кольцевой усталостной трещиной наиболее полно соответствовали результатам эксперимента. За критерий соответствия принято совпадение машинных диаграмм, полученных экспериментально и расчётно.

На основе проведённых исследований был сформулирован инвариантный к свойствам материала и остроте исходного надреза цилиндрического образца алгоритм действий для построения диаграммы предельной пластичности.

Глава 4. Оценка трещиностойкости сварной оболочки с дефектом на основе локального критерия разрушения.

В главе 4 изложены результаты численной оценки трещиностойкости материала конструкции.

При проверке работоспособности расчётной модели были проанализированы результаты испытаний образцов с поверхностной трещиной из ИМВ-2. Из-за отсутствия вычислительной техники с производительностью, достаточной для моделирования разрушения на объёмной модели, был разработан приём, позволяющий на основе экспериментальной машинной диаграммы и численного моделирования определить положение и притупление вершины растущей полуэллиптической трещины в процессе нагружения образца. Использование этого приема позволило более точно установить K_{IC} образцов с полуэллиптической трещиной из ИМВ-2: фактическое

значение K_c составило $23 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ против $18 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, установленного экспериментально по моменту страгивания трещины.

Проведенное с использованием полученной диаграммы предельной пластичности моделирование нагружения внутренним давлением сварного сферического топливного бака из ИМВ-2 с внутренней кольцевой поверхностной трещиной позволило установить предельную нагрузку, соответствующую наступлению нестабильного разрушения по вязкому или хрупкому механизму в зависимости от исходной глубины и расположения трещины, толщины стенки (рис. 3). Фактически, это исчерпывающая информация как для определения допустимого размера дефекта и коэффициентов запаса (проектный расчёт), так и для определения остаточной прочности сосуда с дефектом (контрольный расчёт). Возможность использования альтернативных методов оценки трещиностойкости оговаривается в нормах проектирования ответственных сосудов давления условием, чтобы их результат соответствовал нормам или был более консервативным. Поскольку нормы проектирования при оценке трещиностойкости используют ЛМР, то нами было проведено сопоставление параметра трещиностойкости K_{IQ} - КИН на момент страгивания трещины, полученного по результатам численного моделирования сферического сосуда с кольцевой трещиной и по результатам экспериментального исследования Куркина С.А. образцов с полуэллиптической трещиной. Установлено, что экспериментальные значения величины K_{IQ} и полученные нами расчётные значения близки, их расхождение не превышает 20%. То есть результаты численной оценки трещиностойкости материала согласуются с общепринятым методом для тех условий, когда этот метод применим.

Для сварных соединений сплава ИМВ-2 единственным дополнительным фактором, возникающим вследствие сварки и способным изменить механизм разрушения материала, являются остаточные сварочные напряжения. Расчёт остаточных сварочных напряжений в кольцевом шве был выполнен на основе допущения, что при сварке нагревается достаточно узкая зона металла у шва. Величина температурной деформации металла найдена из условия близости интенсивность напряжений σ , материала шва к пределу текучести.

Результаты моделирования роста внутренней кольцевой трещины различной исходной глубины l , расположенной по средней линии

шва, показали, что по сравнению с расположением трещины в основном материале, рост трещины в шве происходит более интенсивно. Практически сразу после страгивания характер развития трещины становится нестабильным (рис. 4). Причиной является более высокий для случая трещины в сварном шве уровень объемности НДС j в зоне пластичности. Большая объемность является, главным образом, следствием наличия продольной компоненты остаточных напряжений. Поэтому факт локального разрушения в шве вызывает высвобождение большего количества упругой энергии. К тому же для достижения критического уровня деформаций требуется меньшая энергия. И то и другое явилось причиной для трансформации стабильного роста трещины в более опасный вид разрушения – нестабильный.

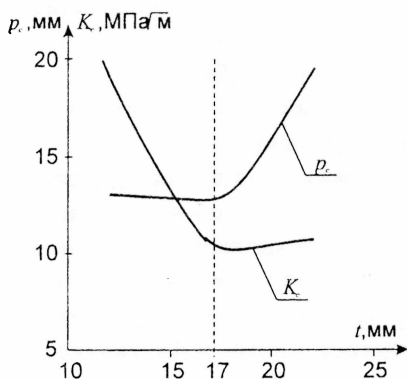


Рис. 3. Предельные состояния сфер $R=200$ мм с кольцевой трещиной $l=4$ мм, расположенной в основном материале при различной толщине стенки t (ИМВ-2)

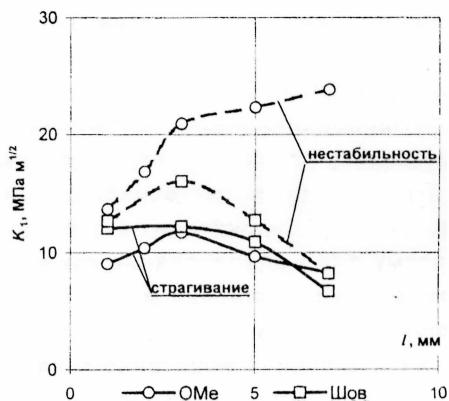


Рис. 4. КИН на момент страгивания и нестабильности внутренней кольцевой трещины в сфере $R=200$ мм, $t=12$ мм (ИМВ-2)

Расположение трещины поперек шва не только не ухудшит ситуацию, а скорее из-за действия остаточных напряжений вдоль линии действия рабочей нагрузки приведет к существенному снижению объемности и разрушению стенки сосуда по вязкому механизму.

По итогам численных экспериментов не выявлено влияние остаточных напряжений на момент страгивания трещины. Вместе с тем при формально одинаковых параметрах трещиностойкости K_{IQ} основного материала и материала сварного соединения ИМВ-2, расположение трещины в зоне сварного шва является неблагоприятным фактором, изменяющим характер разрушения с преимущественно вязкого на хрупкий. Более опасный характер разрушения при расположении трещины в шве подтверждается профилограммами поверхностей разрушения экспериментальных образцов с поверхностной трещиной, полученных другими исследователями.

Для материалов, вязких по характеру развития разрушения, но страгивание трещины в которых происходит в условиях низкого уровня пластической деформации, можно ожидать смены механизма разрушения на хрупкий при изменении схемы НДС вследствие масштабного фактора, концентраторов формы, остаточных напряжений.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Принципиальными положениями предлагаемого расчётного метода оценки трещиностойкости являются следующие:

а) Разрушение материалов, используемых в изготовлении сосудов давления, происходит в присутствии пластической деформации. Поэтому для моделирования как вязкого, так и хрупкого разрушения стенки сосуда давления может быть использован единый локальный деформационный критерий разрушения – предельная пластичность.

б) В условиях монотонного нагружения сложный и многостадийный процесс образования микродефектов в зоне предразрушения не оказывает существенного влияния на закономерности деформирования металла вплоть до момента образования макротрещины (разрушения). Поэтому расчёт НДС материала в процессе нагружения до возникновения разрушения может быть проведен по формулам механики деформирования твердого тела.

2. Для расчёта трещиностойкости сосудов давления необходимо получить значения предельной пластичности в области высокой положительной объёмности. Это достигается путём испытания цилиндрических образцов с кольцевым надрезом различной остроты, в том числе - с трещиной. Разработанный расчётно-экспериментальный метод построения диаграммы предельной пластичности в области высокой положительной объёмности, в отличие

от ранее известных, обеспечивает адекватность численного моделирования эксперименту. Это достигнуто, в том числе, благодаря более точному установлению момента страгивания макротрещины в экспериментальных образцах.

3. Проведенные экспериментальные и численные исследования магниево-литиевого сплава ИМВ-2 показали, что этому материалу свойственно разрушение по вязко-хрупкому механизму. Моделирование монотонного нагружения внутренним давлением сферического сосуда из ИМВ-2 с кольцевой трещиной показало, что разрушение по хрупкому механизму возникает на части ослабленного сечения уже при толщине стенки сосуда в 18 мм. При меньшей толщине стенки – разрушение носит вязкий характер по механизму потери пластической устойчивости ослабленного сечения.

4. С позиций ЛМР в качестве свойства, характеризующего трещиностойкость ИМВ-2, правильнее использовать КИН на момент страгивания трещины. Для ИМВ-2 численно получено K_{IQ} 8-13 МПа м^{1/2}.

5. Отличительной особенностью сварных соединений ИМВ-2, выполненных ЭЛС являются остаточные сварочные напряжения. Расположение трещины в зоне сварного шва сосуда из ИМВ-2 является неблагоприятным фактором, изменяющим характер разрушения с преимущественно вязкого – на хрупкий. При этом характеристика трещиностойкости материала K_{IQ} остаётся неизменной.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Куркин А.С., Лавряков Ю.Ю., Жохов А.Г. Моделирование условий страгивания несквозной трещины в оболочке методом конечных элементов // Производство и надежность сварных конструкций: Сб. статей. – М., 1993. – С 29.

2. Куркин А.С., Лавряков Ю.Ю., Жохов А.Г. Разработка имитационной модели страгивания поверхностной трещины // Заводская лаборатория. – 1993. – Т.59, №9. – С 50-52.

3. Численное моделирование процесса разрушения для расчетного обеспечения неразрушимости сварных конструкций/ А.С. Куркин, Ю.Ю. Лавряков, А.Г. Жохов и др. // Вестник МГТУ. Машиностроение. – 1993. – № 4. – С. 133-141.

4. Куркин А.С., Жохов А.Г. Критериальная основа моделирования процесса разрушения сварных конструкций // Современные пробле-

мы сварочной науки и техники «Сварка-95»: Сб. статей, в 2 ч. – Пермь, 1995.-Ч.2. –С. 119-122.

5. Куркин А.С., Жохов А.Г. Применение модели хрупкого и вязкого разрушения для расчётов на прочность сварных конструкций / Сварочное производство. -1995. -№7. –С. 11-13.

6. Куркин А.С., Жохов А.Г., Буранов А.М. Использование характеристик деформирования и пластичности материалов для моделирования процесса разрушения конструкций // Заводская лаборатория. –1997. –Т. 63, № 11. –С. 48-51.

7. Цикл лабораторных работ по изучению и применению в расчетах на прочность предельного состояния разрушения материала /С.А. Куркин, А.С. Куркин, А.Г. Жохов и др.// Справочник. Инженерный журнал. –1999. –№11. –С. 9-15.

8. Цикл лабораторных работ по изучению и применению в расчетах на прочность предельного состояния разрушения материала /С.А. Куркин, А.С. Куркин, А.Г. Жохов и др.// Справочник. Инженерный журнал. –1999. –№12. –С. 11-19.