

ОТЗЫВ

на диссертационную работу Жаббарова Рамиля Муритовича

«Идентификация коэффициентов М. Уильямса: теоретический подход, вычислительное обоснование и экспериментальный аспект», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертационная работа Р.М. Жаббарова посвящена комплексному теоретическому, экспериментальному и численному изучению и описанию механических полей, ассоциированных с вершиной трещины и надреза в изотропных линейно упругих средах. Проблема точного определения напряженно-деформированного состояния у вершины трещины являлась и продолжает являться одной из актуальных вопросов современной механики разрушения. Поэтому совокупность обсуждаемых в диссертации вопросов относится к числу актуальных научных проблем современной механики деформируемого твердого тела.

Диссертационная работа Жаббарова Р.М. содержит введение, 4 главы, в каждой из которых представлены результаты и выводы, заключение и список литературы.

Во введении обосновывается актуальность диссертационного исследования, формулируются цели и задачи исследования, отражается научная новизна, достоверность и практическая ценность полученных результатов. В итоге четко сформулирована и обоснована направленность и актуальность исследований, представленных в диссертационной работе.

Первая глава посвящена вопросам теоретического сравнения распределений угловых распределений напряжений вблизи вершины трещины, полученных с помощью классических решений плоской задачи теории упругости и посредством многопараметрического асимптотического разложения М. Уильямса, в котором удерживается различное число слагаемых. В главе проанализирована серия плоских конфигураций образцов с дефектами, для которых имеются точные аналитические решения, полученные с помощью комплексных потенциалов Колосова-Мусхелишвили.

На базе существующих комплексных потенциалов для образцов всех конфигураций получены коэффициенты асимптотического ряда Уильямса и исследовано воздействие увеличения размеров рассматриваемой зоны вокруг трещины на количество удерживаемых регулярных слагаемых ряда Уильямса: чем больше расстояние до кончика трещины или надреза, тем больше слагаемых должно удерживать.

Показано, что высшие приближения играют первостепенную роль для целостного описания поля напряжений, количество слагаемых зависит от геометрии образца с дефектом и совокупности приложенных нагрузок.

Результаты, полученные в настоящей главе, полезны для интерпретации и обработки экспериментальной информации, которую можно получить на основе интерференционно-оптических методов, поскольку для корректного извлечения и последующего использования экспериментальных данных, необходимо ясное понимание о размере области, окружающей вершину дефекта, в пределах которой исследователем собираются экспериментальные данные. Отмечается, что результаты исследования можно использовать в задаче восстановления масштабных коэффициентов ряда Уильямса из расчетов, получаемых с помощью метода конечных элементов, так как это позволяет более аккуратно решать проблему выбора массива значений из узлов конечно-элементной сетки, необходимых для дальнейшей обработки.

Таким образом, в процессе интерференционно-оптических экспериментов и вычислительного анализа выбор экспериментальных данных требуется проводить с учетом теоретических решений классической механики разрушения, поскольку:

Применение многопараметрического разложения Уильямса дает возможность существенного расширения области, окружающей вершину трещины или разреза, внутри которой можно точно определить напряженное состояние с помощью экспериментального и/или вычислительного подходов.

Сохранение регулярных слагаемых ведет к значительному увеличению точности решения. Отказ от регулярных (неособых) слагаемых более высоких порядков приводит к серьезным погрешностям, которые могут появиться при выборе даже сравнительно небольших зон измерений. Поэтому, с учетом проведенного исследования, не остается сомнений, что первых двух приближений редко хватает для достижения точного результата, а построение приближений более высокого порядка зачастую представляет собой нетривиальную задачу. По этой причине, экспериментальное и вычислительное определение коэффициентов ряда Уильямса должно происходить на основе имеющихся теоретических оценок.

Технику проведенного исследования можно распространить на задачу построения асимптотических решений нелинейных задач определения напряженного состояния в окрестности вершины трещины в условиях ползучести (в том числе для сред с нелинейными определяющими уравнениями).

Вторая глава посвящена экспериментальному определению коэффициентов многопараметрического ряда Уильямса для серии образцов с трещинами на

основе интерференционно-оптических методов. В качестве основного метода был избран метод цифровой фотоупругости, к которому в последнее время возвращается научный интерес в связи с многоплановыми приложениями

Во второй главе 1. описано назначение и функциональные возможности разработанного приложения для анализа интерференционных картин изохром, получаемых методом фотоупругости; 2. показано, что предлагаемое приложение позволяет осуществлять быструю обработку изображения и находить точки с наименьшей освещенностью, принадлежащие изохроматическим полосам различного порядка; 3. с помощью метода цифровой фотоупругости определены коэффициенты аппроксимации М. Уильямса, представляющей поля у вершины трещины или надреза.

Автор приходит к заключению, что цифровая обработка изохроматических картин обеспечивает аналитическую реконструкцию поля напряжений вблизи вершины трещины и позволяет проводить детальный анализ поля напряжений у вершины трещины. Цифровая обработка является эффективным средством повышения точности фотоупругих данных за счет нахождения скелетона контуров интерференционных полос. Разработанные процедуры значительно упрощают анализ механических полей и позволяют существенно увеличить размеры области, из которой собираются экспериментальные данные.

С помощью разработанного приложения появляется возможность быстрого извлечения экспериментальных точек из картины изохроматических полос.

На основании развитого подхода получены параметры разрушения для нормального отрыва и смешанного режима нагружения для целого ряда образцов. Вычислены КИН, Т-напряжения и коэффициенты ряда Уильямса слагаемых более высокого порядка малости.

Третья глава диссертационной работы посвящена численному определению коэффициентов многопараметрического разложения Макса Уильямса, представляющего собой распределения напряжений и перемещений вблизи устья трещины и клиновидного выреза в изотропном линейно упругом материале с удержанием регулярных (неособых) слагаемых в разложении и получение вычислительной базы для вывода аппроксимационных формул для коэффициентов высших приближений. В третьей главе на основании полученных в первой главе выводов удерживается пятнадцать слагаемых для построения ряда Уильямса, обеспечивающего асимптотическую структуру полей напряжений, деформаций и перемещений вблизи вершины трещины в образцах, ранее испытанных с помощью метода цифровой фотоупругости. С целью конечно-элементного восстановления коэффициентов ряда Уильямса был выполнен обширный вычислительный эксперимент, в рамках которого были получены конечно-элементные решения цикла задач о нагружении

плоских образцов с разрезами, испытанных с помощью техники фотоупругости. Таким образом, в третьей главе приведены результаты широкого конечно-элементного эксперимента, нацеленного на разработку, апробирование и использование переопределенного метода, опирающегося на конечно-элементные решения для компонент тензора напряжений, с целью вычисления коэффициентов аппроксимации Уильямса полей напряжений у вершины надреза, трещины или выреза. Установлено, что переопределенный метод, основанный на поле напряжения, которое найдено посредством МКЭ-анализа, позволяет с высокой точностью отыскать коэффициенты ряда Уильямса с учетом высших приближений. Проведен анализ количества удерживаемых слагаемых ряда Уильямса, необходимых для целостного описания полей, ассоциированных с трещиной. Показано, что число слагаемых, подлежащих сохранению в ряде, обуславливается размером области, охватывающей трещину. Чем больше область, выбранная для анализа, тем больше слагаемых ряда Уильямса требуется для реконструкции поля напряжений, совпадающего с численным решением краевой задачи.

Четвертая глава посвящена получению аппроксимационных формул, позволяющих определить масштабные (амплитудные) коэффициенты ряда Уильямса, в том числе и коэффициенты высших приближений, для серии образцов с вырезами и трещинами. В четвертой главе на основании широкого конечно-элементного моделирования получены аппроксимирующие формулы для масштабных (амплитудных) коэффициентов ряда Макса Уильямса высоких порядков для рассмотренных в настоящей диссертации образцов с дефектами. Аппроксимирующие формулы выведены для пятнадцати коэффициентов ряда Уильямса, что позволяет без обращения к конечно-элементным расчетам вычислять коэффициенты многопараметрического разложения М. Уильямса для пластины с центральным разрезом, для пластины с одним боковым надрезом, для пластины с двумя симметричными краевыми надрезами. В четвертой главе разработана и реализована методика расчета постоянных обобщенного закона Париса, опирающегося на функцию плотности энергии упругой деформации. Предложенная усовершенствованная методика оценки ресурса трубы позволяет учесть влияние неособых слагаемых в ряде Уильямса на показатели эксплуатационных свойств трубопроводных систем.

На основании вышеизложенного можно сделать выводы, что основными результатами диссертационной работы Р.М. Жаббарова, в которой проведен теоретический, экспериментальный и численный анализ поля напряжений вблизи поверхности разрыва в изотропном линейном упругом материале на основе многопараметрического асимптотического разложения М. Уильямса поля напряжений с удержанием слагаемых высокого порядка, являются следующие положения.

- 1) Выполнено теоретическое сравнение асимптотических распределений напряжений у вершин надрезов и трещин, полученных с помощью усеченных на разном количестве слагаемых рядов М. Уильямса, с точными аналитическими решениями, построенными посредством теории функции комплексного переменного, и выполнен анализ вклада высших приближений в описание полей напряжений и перемещений, ассоциированных с вершиной трещины. Выявлены закономерности зависимости количества удерживаемых слагаемых от расстояния до вершины трещины.
- 2) Проведен цикл экспериментальных исследований, проведенных с помощью метода цифровой фотоупругости, для новых конфигураций образцов, предназначенных для изучения проблем нормального отрыва и смешанного нагружения (образцы с двумя горизонтальными коллинеарными трещинами, образцы с одним боковым и двумя боковыми горизонтальным надрезами, образцы с двумя боковыми наклонным надрезами) и экспериментально определены коэффициенты ряда Уильямса с учетом неособых слагаемых высшего порядка.
- 3) Разработано и применено новое цифровое приложение, нацеленное на цифровую обработку всей совокупности экспериментальных данных, получаемых методом фотоупругости (построение скелетона картин изохроматических полос и запись в текстовый файл координат точек с наименьшей освещенностью, принадлежащих изохроматическим полосам различных порядков).
- 4) Численно определены амплитудные (масштабные) параметры ряда М. Уильямса с удержанием неособых слагаемых высших порядков на основе переопределенного метода, базирующегося на поле напряжений, найденного методом конечных элементов в многофункциональном расчетном комплексе SIMULIA Abaqus, для серии образцов с размерами и системами нагружений, идентичным рассмотренным в натурном эксперименте.
- 5) Выведены аппроксимационные формулы для вычисления параметров механики разрушения - амплитудных (масштабных) коэффициентов разложения М. Уильямса, содержащего слагаемые более высоких порядков, для широкой серии образцов.
- 6) Предложена усовершенствованная методика оценки усталостного роста трещины на основе размаха функции плотности энергии упругой деформации. Реализована методика расчета постоянных обобщенного закона Париса на основе функции плотности энергии упругой деформации, учитывающей мультипараметрическое разложение М. Уильямса.

Автореферат диссертации и научные публикации автора соответствуют ее содержанию, выбранной проблематике и отражают основные положения работы.

По диссертационной работе могут быть сделаны следующие замечания:

1. При сопоставлении точных решений и асимптотических представлений М. Вильямса предлагается оценивать погрешности визуальным сопоставлением графиков (стр. 38 и далее). Полагаю, что более объективным была бы оценка погрешности с посредством какой-либо нормы в пространстве функций, которое содержит эти распределения. Можно предложить, например, квадратичную норму, позволяющую дать энергетическую оценку погрешности. Отмечу, что на стр. 80 указывается количественная оценка погрешности ($10 \cdot 10^{-6}$), но не написано, как она вычислялась. Возможная интерпретация этого значения как максимума разности точных и асимптотических распределений не спасает ситуацию, поскольку для физически обоснованной оценки предпочтительной является энергетическая норма, вычисление которой вновь приводит к вопросу о функциональном пространстве.
2. В работе указаны результаты серий экспериментов, в том числе тарировочных, однако ничего не сказано о статистической обработке экспериментальных результатов. На мой взгляд, подобная первичная обработка эксперимента чрезвычайно важна, поскольку позволяет заранее (без идентификации математической модели) оценить повторяемость экспериментальных результатов и их разброс. Например, можно было бы для серии однотипных испытаний определить расстояния от центра образца до реперных точек изохроматических полос и построить распределения этих значений.
3. При идентификации системы изохроматических полос (построении скелетона) использовалось осреднение значений интенсивности пикселей цифровой фотографии. Здесь, на мой взгляд, требуется оценка погрешности, вносимой таким изменением первичных данных эксперимента, особенно в областях сгущения полос.
4. Судя по изображениям скелетонов их элементы – изохроматические полосы – не являются непрерывными кривыми. Такая фрагментарность связана с поточечным характером алгоритмической реализации распознавания. В

качестве пожелания предлагаю воспользоваться алгоритмом распознавания, в котором области минимальной интенсивности определяются как непрерывные траектории. Их направление уточняется в процессе построения на поле интенсивности цифровой фотографии. Кроме того, интересно было бы сравнить предлагаемый в диссертации алгоритм распознавания с работой известных вычислительных программ, например, OpenFringe или atmosfringe (<https://www.atmos-software.it/AtmosFringe.html>).

Однако, указанные замечания не снижают значимость диссертационной работы.

Соответствие работы требованиям ВАК.

На основании вышеизложенного, считаем, что диссертационная работа «Идентификация коэффициентов разложения М. Уильямса: теоретический подход, вычислительное обоснование и экспериментальный аспект» является логически завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, имеющей теоретическое и прикладное значение. Результаты, продемонстрированные в диссертационной работе, отвечают критериям научной новизны и имеют значение для развития моделей и критериев разрушения в механике деформируемого твердого тела.

Диссертация Жаббарова Р.М. соответствует направлениям исследований, указанным в пунктах паспорта специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела ВАК Министерства науки и высшего образования РФ: п. 3. «Задачи теории упругости, пластичности и ползучести»; п. 10. «Прочность при сложных режимах нагружения. Теория накопления повреждений. Механика разрушения твердых тел»; п. 13 «Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях».

Диссертационная работа Жаббарова Рамиля Муритовича является самостоятельной завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные технические решения расчета напряженно-деформированного состояния вокруг вершины трещины и могут быть использованы для оценки напряженно-деформированного состояния в ответственных элементах конструкций машиностроения и нефтегазовой отрасли.

Поэтому диссертационная работа Жаббарова Рамиля Муритовича, выполненная на тему «Идентификация коэффициентов разложения М. Уильямса: теоретический подход, вычислительное обоснование и экспериментальный аспект», соответствует требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Жаббаров Рамиль Муритович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Ведущий научный сотрудник
лаборатории моделирования
технологических процессов
ИПМех РАН,

д.ф.-м.н., доцент

Лычев С.А.

Подпись Лычева С.А. за

Ученый секретарь ЦНМ



подпись Комарова М.А.

2