

Моделирование испытаний макетов транспортных упаковочных комплектов на ударное воздействие двигателя падающего самолета. Часть 2

© А.Г. Казанцев¹, В.В. Абрамов¹, О.М. Петров¹, М.В. Радченко²

¹АО «НПО «ЦНИИТМАШ», Москва, 115628, Российская Федерация

²АО «Атомспецтранс», Москва, 129085, Российская Федерация

В число анализируемых аварий при транспортировании и хранении на открытой площадке транспортных упаковочных комплектов (ТУК) с отработавшим ядерным топливом входит такое внешнее событие, как удар падающего самолета. В части 2 представлена методика испытаний макетов ТУК на данный вид воздействия, учитывающая наличие в корпусе ТУК технологических дефектов. В соответствии с предлагаемой методикой для обоснования целостности ТУК в корпусе макета создается искусственный трещиноподобный дефект в зоне действия максимальных растягивающих напряжений. Его размеры определяются допускаемой при изготовлении ТУК технологической дефектностью поковок и сварного шва, масштабом макета и рассеянием характеристик вязкости разрушения материала корпуса. Консервативность результатов имитационных испытаний обеспечивается тем, что вероятность разрушения макета с искусственным дефектом превышает вероятность разрушения натурального ТУК. С использованием концепции мастер-кривой выполнена оценка вероятностей разрушения натурального ТУК и уменьшенных макетов в зависимости от температуры испытания. Показано, что используемая для изготовления корпуса ТУК сталь 09Н2МФБА-А имеет высокие показатели динамической вязкости разрушения, обеспечивающие сохранение целостности ТУК при пониженных до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ температурах.

Ключевые слова: транспортный упаковочный комплект, удар самолета, динамическая вязкость разрушения, трещиноподобный дефект, мастер-кривая

Введение. Транспортные упаковочные комплекты (ТУК) для отработавшего ядерного топлива допускается хранить на открытых площадках. Поскольку климатические температуры в таких условиях могут достигать $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, внешнее воздействие не должно приводить к хрупкому разрушению и нарушению целостности ТУК. В части 1 работы [1] применительно к ТУК для обращения с облученными тепловыделяющими сборками реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 с корпусом из стали 09Н2МФБА-А было показано, что при таком событии, как удар самолета Phantom RF-4E по зоне ТУК, не имеющей технологических дефектов, снижение пластичности с понижением температуры до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ не станет критическим. Однако инициаторами хрупкого разрушения могут оказаться технологические дефекты в металле поковок и сварном шве.

Распределение дефектов по объему корпусных элементов, а также сварного шва ТУК носит случайный характер. При имитационных

испытаниях (ударе бойка — имитатора двигателя самолета) область максимальных напряжений локализована, она может приходиться как на зону с дефектами, так и на бездефектный металл. В связи с этим в макетах ТУК перед проведением испытаний целесообразно создать искусственные дефекты, расположение и ориентация которых обеспечивают во время испытаний реализацию наиболее неблагоприятного сценария.

Цель работы — разработка методики испытаний макетов ТУК, учитывающей масштабный фактор и наличие в металле корпуса ТУК технологических дефектов.

Определение размеров искусственных дефектов. В соответствии с ГОСТ 24507–80 величина максимальных допустимых размеров дефектов (максимальная площадь дефектов) зависит от толщины поковок и группы качества. Для обечайки корпуса ТУК, имеющей толщину 250 мм, площадь максимального допускаемого дефекта составляет 20 мм². В качестве эквивалентного дефекта с указанной площадью принят поверхностный полуэллиптический трещиноподобный дефект глубиной 2,1 мм и протяженностью 12,6 мм с соотношением полуосей 1:3 [2]. Для сварного шва, соединяющего обечайку с днищем ТУК, максимальная площадь дефекта составляет 40 мм² [3], глубина эквивалентного дефекта — 2,9 мм, протяженность — 17,4 мм.

Как показано в части 1, при пропорциональном уменьшении размеров макета и бойка уровень максимальных (окружных) напряжений не изменяется, но увеличивается их градиент по толщине стенки. При том выполняется условие подобия

$$\sigma(t) = \sigma(t/n),$$

где t — расстояние, отсчитываемое от внутренней поверхности стенки; n — масштабный коэффициент.

Обусловленная этим изменением зависимость коэффициента интенсивности напряжений K_1 от толщины стенки корпуса для дефектов различных размеров (глубиной от 1 до 4 мм) имеет вид, показанный на рис. 1, а для точки A полуэллиптического дефекта — на рис. 2.

Как следует из анализа кривых на рис. 1, при фиксированных размерах дефекта величина K_1 в вершине трещины снижается с уменьшением толщины стенки макета ввиду более резкого падения растягивающих напряжений в направлении от внутренней к внешней поверхности обечайки. С увеличением размеров трещины этот эффект усиливается.

Таким образом, для того чтобы получить одинаковые значения K_1 , размеры дефекта в уменьшенном макете ТУК должны быть больше, чем в натурном изделии. Их можно определить из решения уравнения

$$Y(t, a) \sigma(t, a) \sqrt{a} = K_1(t_0, a_0), \quad (1)$$

где Y — коэффициент формы; σ — приведенное эквивалентное напряжение [2]; t и a — толщина стенки и глубина дефекта в макете соответственно; t_0 и a_0 — то же в натурном ТУК.

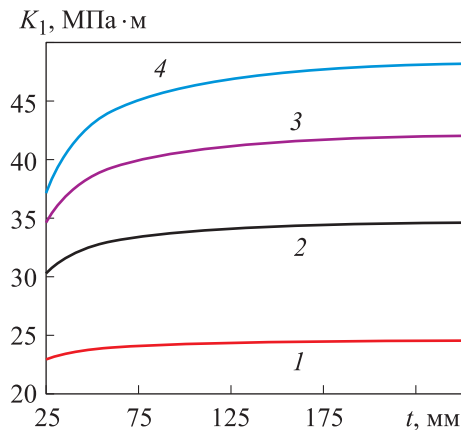


Рис. 1. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений от толщины стенки макета ТУК для дефектов различной глубины a : 1 мм (1), 2 мм (2), 3 мм (3), 4 мм (4)

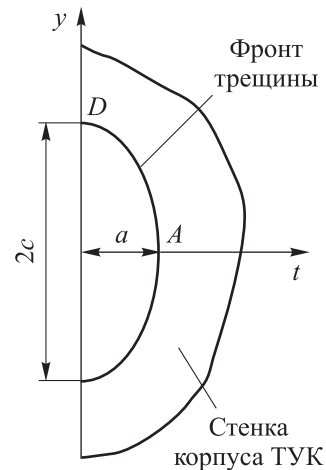


Рис. 2. Поверхностный полуэллиптический дефект: a , c — полуоси дефекта

Изменение коэффициента увеличения размеров трещины $k = a / a_0$ в зависимости от толщины стенки макета ТУК и глубины дефекта a_0 показано на рис. 3. Следует отметить, что величина k зависит от характера распределения напряжений по толщине стенки.

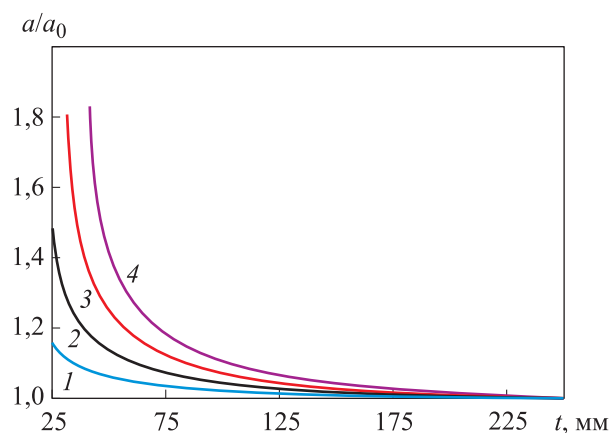


Рис. 3. Коэффициент увеличения глубины трещины в зависимости от толщины стенки макета ТУК для дефектов различной глубины a_0 , равной 1 мм (1), 2 мм (2), 3 мм (3), 4 мм (4)