

МЕТОД ДИСКРЕТНО-ВИРТУАЛЬНОГО ПРОДВИЖЕНИЯ ТРЕЩИНЫ**METHOD OF DISCRETE-VIRTUAL CRACK PROPAGATION****Александр Гондлях, Роман Пашинский***Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
Киев, Украина***Henry Sklyut***Alcoa Technical Center, Alcoa, Inc., PA, USA***Abstract**

The discrete-virtual propagation method of delamination zones is developed for research of fracture processes of multilayered constructions of chemical mechanical engineering. Based on discrete-virtual propagation method of delamination zones the new multilayered final element is developed for modeling processes of cracks propagation in multilayered spatial systems.

Keywords: fracture, crack, delamination zone, cyclic crack-resistance.

ВВЕДЕНИЕ

Сложные условия эксплуатации машин и аппаратов химических производств, выход из строя которых влечет за собой не только большие материальные потери и существенные затраты на восстановление и ремонт, но также может причинить значительный вред окружающей среде и здоровью людей, существенно ужесточают требования, предъявляемые к созданию нового и усовершенствования существующего оборудования химических производств для обеспечения необходимых условий реализации химико-технологических процессов. В мире ежедневно регистрируются десятки аварий техногенного характера, связанных с выбросом химически активных веществ в окружающую среду, основными причинами которых эксперты называют, прежде всего, возникновение и накопление дефектов в оборудовании, и лишь затем – отклонение от технологических норм эксплуатации и человеческий фактор. Статистика отказов сосудов высокого давления химической и нефтехимической промышленности свидетельствует о том, что более 94% отказов происходит по причине развития в них трещин.

По этой причине актуальным является вопрос разработки новых методов исследования,

расчета и конструирования машин и аппаратов химических производств с учетом эволюционных процессов накопления и распространения в них дефектов и трещин для повышения показателей их надежности и долговечности.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Современное поколение сосудов и аппаратов высокого давления все чаще изготавливают с применением различных многослойных композиций. Такие многослойные металло-композиты состоят, как правило, из сравнительно тонких высокопрочных пластин с повышенными антикоррозионными свойствами, слоев термо- и гидроизоляции и т.д. В качестве межслоевого заполнителя используются различные полимерные смолы, синтетические клеи и т.д. Использование подобного рода многослойных металло-композитов позволяет существенно снизить стоимость изготовления и эксплуатации аппаратов химического комплекса без ущерба их несущей способности и ресурса эксплуатации, однако при этом необходима и разработка новых, уточненных методик проектирования и расчета на прочность данной аппаратуры. Сложность пространственной компоновки таких металло-композитов и

условий их нагружения (наличие нормальных и тангенциальных компонент напряжений) обуславливает сложность и неоднородность механизма развития зон разрушения в процессе их эксплуатации.

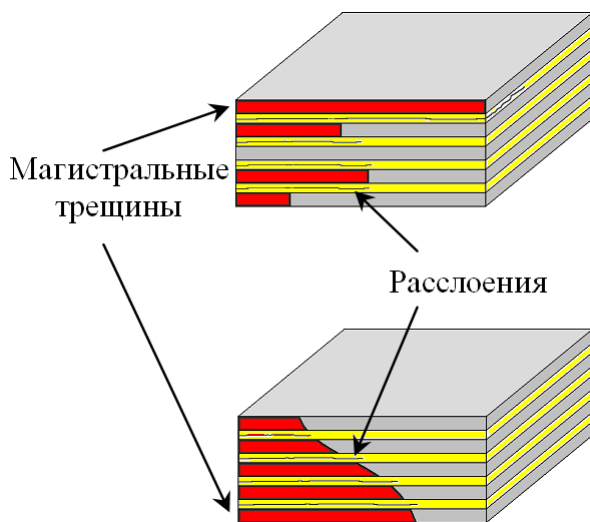


Рис. 1. Основные виды разрушения многослойных пакетов

Основным механизмом разрушения, присущим металлическим слоям многослойных пакетов, является появление и развитие в них «магистральных» трещин. К тому же, как свидетельствует анализ результатов численных экспериментов по определению циклической трещиностойкости и остаточной прочности многослойных плит, скорости роста магистральных трещин в отдельных металлических слоях пакета могут существенно отличаться.

В свою очередь, появление зон пластических деформаций в устье трещины и раскрытие ее берегов в металлическом слое приводит к появлению и дальнейшему росту вторичных зон разрушения в плоскости, перпендикулярной направлению роста магистральных трещин, в межслоевом заполнителе - «расслоений», которые существенно влияют на процесс разрушения многослойного металло-композитного пакета в целом, позволяя отдельным участкам металлических слоев функционировать независимо один от другого, что естественным образом снижает общую жесткость конструкции и ее трещиностойкость.

Исходя из вышесказанного, очевидным является необходимость совместного учета всех видов разрушения при моделировании

процессов распространения трещин в многослойных композициях. Корректное решение поставленной задачи предусматривает детальное дискретное описание зон концентрации напряжений, прежде всего устьев трещин в каждом слое и фронтов зон расслоения между ними. Применение традиционных методик к построению таких дискретных моделей (с использованием методов конечных элементов, граничных элементов и т.д.) приводит к созданию системы разрешающих уравнений слишком высокого порядка, требующей для своего решения значительного времени и вычислительных мощностей. Тот факт, что эту процедуру необходимо повторять на каждом этапе распространения зон разрушения, практически исключает возможность применения общепринятых методов адаптивной дискретизации.

Предложенный в данной работе метод дискретно-виртуального продвижения (МДВП) фронтов расслоения позволяет эффективно моделировать не только эволюционные процессы распространения зон расслоения в межслоевых заполнителях, но также и продвижение магистральных трещин в металлических слоях. МДВП базируется на представлении действительного фронта расслоения в виде его дискретного аналога.

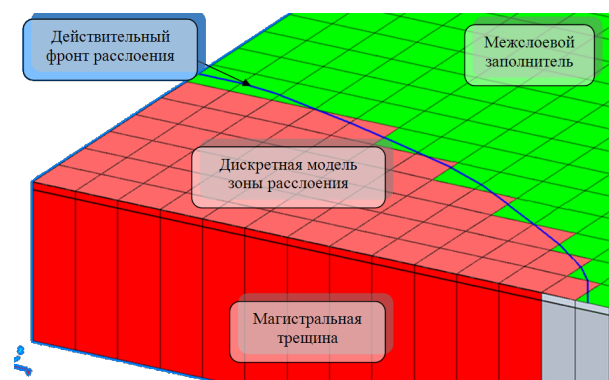


Рис. 2. Конечно-элементная дискретизация рассматриваемой конструкции с учетом магистральных трещин и зон расслоения по МДВП

В отличие от существующих методик, дискретный фронт расслоения определяется на основе соотношений площадей частей дискретной области, находящихся внутри и снаружи действительной зоны расслоения

$A_1^i \geq A_2^i$, где A_1^i – площадь, лежащая внутри действительной зоны расслоения, A_2^i – площадь, лежащая снаружи действительной зоны расслоения.

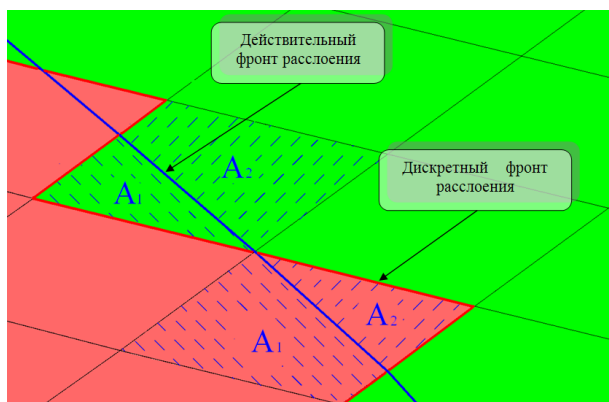


Рис. 3. Условие принадлежности конечного элемента дискретному фронту расслоения по МДВП

Применение данного критерия при построении дискретного фронта расслоения позволяет гораздо точнее с энергетической точки зрения учитывать действительную зону расслоения, поскольку общая площадь дискретной зоны будет отличаться от площади действительной зоны не более чем на половину суммарной площади элементов, образующих фронт расслоения, независимо от размера зоны расслоения.

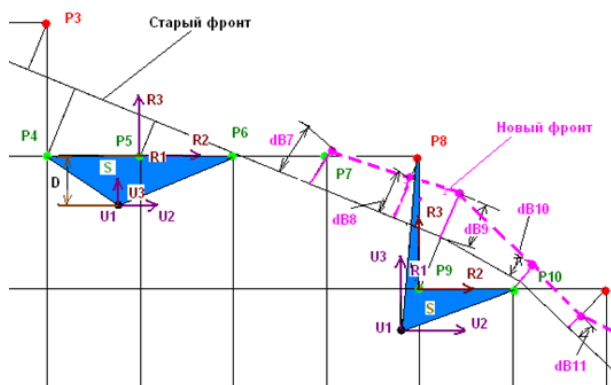


Рис. 4. Определение направления дальнейшего продвижения фронта расслоения

Дальнейшее продвижение фронта расслоения осуществляется не по дискретному, а по «виртуальному» фронту расслоения, которым на начальном этапе является действительный фронт зоны расслоения. Это позволяет полностью учитывать всю историю развития фронта расслоения и адекват-

но корректировать соответствующую ему дискретную модель на каждом этапе продвижения зоны.

Определение величины удельной энергии, необходимой для продвижения расслоения на единицу площади, осуществляется на основе соотношений метода виртуального закрытия трещины. При этом, для корректного учета «искусственных» изломов, вызванных дискретным представлением действительного фронта, используются следующие соотношения:

$$G_i^p = -\frac{1}{2s^p} R_i^p \Delta U_i^p \quad (1)$$

(для всех, кроме внешних узловых точек)

$$G_{i(sr)}^p = G_{i(l)}^p + (G_{i(r)}^p - G_{i(l)}^p) \frac{a_l}{a_r + a_l} \quad (2)$$

(для внешних узловых точек)

$$G^p = \sum_{i=1}^3 G_i^p, \quad (3)$$

где R_i^p и ΔU_i^p - соответственно реакции в рассмотренной точке и раскрытие фронта расслоения.

Постепенно, с ростом виртуального фронта расслоения, в дискретный фронт будут добавляться все новые и новые элементы. Кроме того, использование виртуального фронта расслоения, не привязанного к дискретной модели, позволяет сохранить истинную конфигурацию зоны расслоения при неизбежном периодическом сгущении-разряжении дискретной сетки, вызванным сменой положения и конфигурации других зон расслоения и трещин в конструкции.

Для проверки алгоритма решения задачи по автоматическому усталостному продвижению зоны расслоения с применением МДВП была решена задача по численному моделированию натурного эксперимента [3], целью которого было определение количества циклов нагружения DCB образца до момента его разрушения.

В качестве исходной информации были приняты геометрические и физико-механические параметры образца, указанные в статье, а также диаграмма $da/dN - \Delta G$ для материала BFG528E.

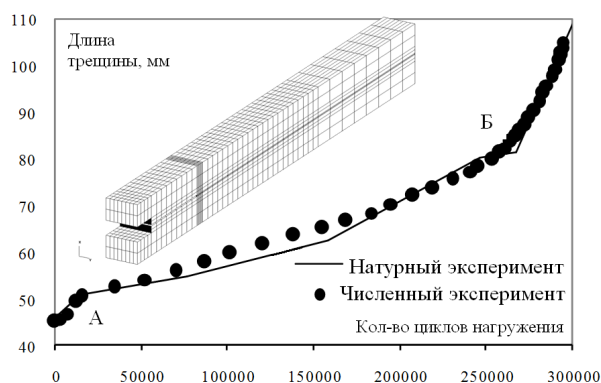


Рис. 4. Моделирование процесса роста трещины в стандартном образце под действием циклического нагружения

Анализ результатов численного эксперимента позволил установить практически полное (до 3.5%) согласование с результатами натурного эксперимента как по параметру уровня высвобождаемой упругой энергии, так и по скорости роста зоны расслоения в зависимости от количества циклов нагружения. Помимо этого, численный эксперимент позволил качественно воссоздать все этапы распространения трещины: стадию начального роста трещины (до точки «А»), стадию последовательного роста расслоения (отрезок «А-Б»), а также начало и характер быстрого лавинообразного разрушения балки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует отметить, что безусловной ценностью предложенного в данной работе метода является его универсальность в отношении применения любых численных методов исследований, базирующихся на дискретном представлении континуальных сред (МКЭ, метод сеток и др.). Так, на базе метода дискретно-виртуального продвижения зон расслоения разработан новый многослойный конечный элемент для моделирования процессов распространения магистральных трещин в многослойных про-

странственных системах с учетом расслоения на базе итерационно-аналитической теории оболочек. Разработана, программно реализована и апробирована на ряде контрольно-тестовых задач основанная на МКЭ методика исследования процессов распространения трещин в машинах и аппаратах химического машиностроения, работающих в условиях статического и циклического нагружения с учетом физической и геометрической нелинейности.

Сравнение результатов численных экспериментов по МДВП с экспериментальными и аналитическими данными свидетельствует об их хорошем согласовании по последовательности образования и развития зон пластического деформирования в геометрически линейной и нелинейной постановках; характеру, величине и скорости развития магистральных трещин и зон расслоения при циклическом нагружении; предельном уровне нагружения при оценке остаточной прочности пространственных подкрепленных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. S. Sakharov. Moment Schema of Finite Element Method (MSFEM) including rigid body rotation. *Strength of Materials and Theory of Structures*. – 1974. Vol. 24. Pages 147-156.
- [2] H. Sklyut, M. Kulak, M. Heinimann, M. James, O. V. Gondliakh, R. Pashinskij. Automated finite element based predictions of simultaneous crack growth and delamination growth in multi-layers in advanced metallic hybrid stiffened panels using the Alcoa ASPANFP tool. *Sixth International Conference on Computation of Shell & Spatial Structures*, Ithaca, New York, USA, May 28-31, 2008, p. 52.
- [3] D. L. Erdman and J. M. Starbuck, Fatigue Crack Growth in Adhesive Joints, *Proc. SAMPE-ACCE-DOE-SPE Midwest Advanced Materials and Processing Conferences*, Dearborn MI, September 12 - 14, 2000, pp. 155 – 163.