



УДК 539.375

**А. А. Каминский**

## **О моделировании зоны предразрушения у фронта трещины**

*(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины В. Л. Богдановым)*

*Приведен критический анализ современного состояния проблемы моделирования процесса разрушения материала в окрестности вершины трещины. Рассмотрены теоретические подходы к адекватному описанию наблюдаемого в экспериментах характера поведения материала в процессе разрушения вследствие распространения трещины. Дана оценка перспективности различных подходов к дальнейшему совершенствованию современных моделей.*

Современная механика разрушения в своем развитии опирается на модели и методы механики сплошной среды, материаловедения, физики металлов и полимеров и других разделов естественных наук, поскольку многочисленные современные материалы имеют разнообразную структуру, различные механические и прочностные свойства, а также различные механизмы процесса разрушения.

На первом этапе построения механики разрушения (линейной механики разрушения) основное внимание уделялось математическим исследованиям структуры напряженно-деформированного состояния в окрестности трещины, моделируемой математическим разрезом (модель Гриффитса) в линейно упругом теле, анализу сингулярности напряжений и деформаций в вершине трещины и введению понятия коэффициентов интенсивности напряжений (КИН), а также разработке энергетического критерия Гриффитса и силового критерия Ирвина [1].

Эти коэффициенты играют исключительно важную роль в механике хрупкого разрушения, поскольку на их основе можно описать асимптотическое распределение напряжений в малой окрестности возле вершины произвольной трещины в упругом теле.

Следует отметить, что КИН нужны не только для расчетов по критерию Гриффитса–Ирвина, но и в других областях механики разрушения, таких как исследование роста трещин в линейно вязкоупругих телах [2], исследование локальной потери устойчивости материала в окрестности трещин [3], а также ряд других актуальных исследований механизмов

---

© А. А. Каминский, 2015

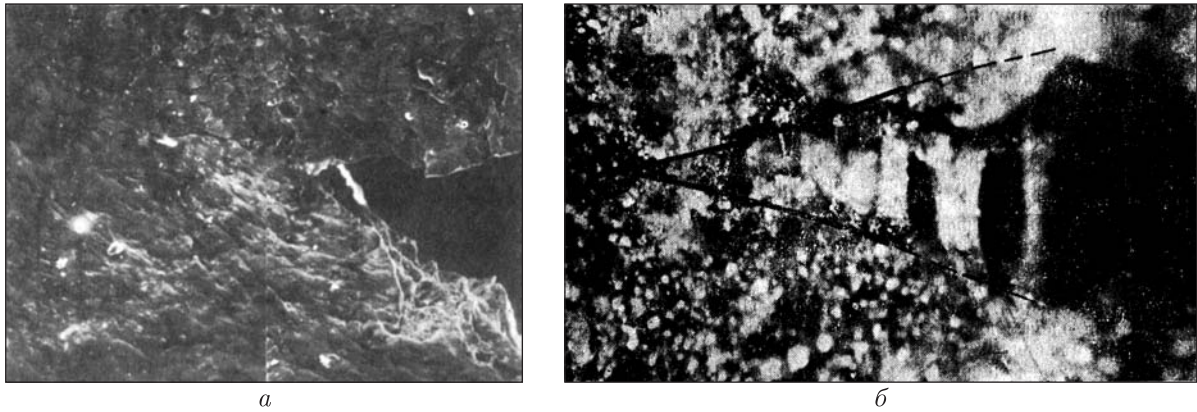


Рис. 1

процесса разрушения [1, 4]. В нашей стране и за рубежом опубликованы многочисленные монографические и справочные издания, посвященные этому вопросу [1, 4, 10].

Однако подходы линейной механики разрушения не учитывают реальное состояние высоконапряженного материала в окрестности вершины трещины.

Как показали многочисленные экспериментальные исследования [1, 5, 6, 11–15], впереди трещины образуются зоны предразрушения (process zones), которые затем перемещаются вместе с фронтом трещины. Образование зон предразрушения вызвано высоким уровнем напряжений у фронта трещины. Материал в зоне предразрушения находится в полуразрушенном состоянии (к примеру “трещины серебра” в полимерах, в металлах — в состоянии деструкции). В волокнистых композитах эта зона представляет собой клиновидную область у фронта трещины, в которой разрушено связующее и часть армирующих волокон; берега этой зоны связаны неразрушенными волокнами.

Форма зоны предразрушения, ее структура и размеры имеют важное значение для правильного описания механизма разрушения. Как показали исследования последних лет, применение моделей мезомеханики разрушения, учитывающих зоны предразрушения, оказалось наиболее эффективным для описания развития трещин в полимерах и композитах. Эти модели называют еще двухфазными, так как материал претерпевает две фазы разрушения, в отличие от однофазных моделей типа Гриффитса–Ирвина, где сплошной материал в процессе разрушения сразу (без переходной зоны) переходит в разрушенное состояние. К двухфазным относятся  $\delta_c$ -модель Леонова–Панасюка [4], модель Дагдейла [1], модифицированная  $\delta_c$ -модель [2] и др. Выбор той или иной модели разрушения для описания роста трещин обуславливается прежде всего физическими и механическими свойствами материала.

Электронно-микроскопическое и рентгеноструктурные исследование зоны у фронта трещины в стальном образце [5] показали, что зона предразрушения — это очень малая зона деструкции материала у вершины трещины (значительно меньше размеров всей пластической зоны), содержащая большое количество микротрещин (рис. 1, *a*), при этом, как следует из работы [5], деформации в этой зоне предельно высоки. Поэтому многие попытки описать процесс деформирования в этой области на основе подходов механики сплошной среды приводит к физически некорректным результатам, не согласующимся с экспериментальными данными [6].

На рис. 1, *б* показана зона предразрушения в полимерном материале, которая имеет аналогичную картину деструкции материала, содержащего микродефекты [2].

В связи с этим и другими экспериментальными данными [6] утверждение, приведенное в работах [7, 8], о том, что параметры области предразрушения можно определить на основе теории малых упругопластических деформаций, не соответствует действительности.

В статьях [7, 8] решены задачи о бесконечной упругопластической пластине с трещиной (разрезом) без зоны предразрушения приближенным методом дискретизации, включающую равномерную схему разбиения области. Определены границы пластических зон у вершины трещины, которые авторы необоснованно называют зоной предразрушения, хотя при этом используют теорию малых упругопластических деформаций.

В статье [8] приведено утверждение о том, что согласно этому приближенному решению напряжения в вершине трещины должны быть конечны, хотя это противоречит строгому математическому анализу [1, 9], согласно которому напряжения в вершине трещины (разреза) в упрочняющемся упругопластическом теле имеют сингулярность, хотя и другого порядка, чем в линейно упругом теле.

Как отмечается во многих работах (см. библиографию в [10]), обычные приближенные методы с равномерной схемой разбиения области, подобно статьям [7, 8], не могут адекватно описать распределение напряжений и деформаций вблизи вершины трещины (разреза). Для более точного моделирования асимптотики напряжений и деформаций вблизи вершины трещины в упругих и упругопластических телах применяют методы со специальным неравномерным разбиением области [10].

Отметим, что факт обращения в бесконечность теоретически определенных напряжений в вершине трещины (разреза) является следствием идеализации математической постановки физической проблемы. Одной из причин такого поведения решения задачи является пренебрежение конечностью деформаций (эффектом геометрической нелинейности). Это же утверждение относится к большинству исследований упругих и упругопластических задач для тел с трещинами (разрезами) [1, 6].

Следует отметить, что в 50–70-х годах XX в. получено большое количество решений аналогичных упругопластических задач для бесконечных тел с трещинами (разрезами) [6], при этом результаты расчетов этих работ в некоторых случаях не согласуются с результатами вычислений, полученными в работах [7, 8]. Так, в работе [10] на основе численного метода установлено, что в тонкой пластине из упругопластического материала пластическая зона вытянута вдоль линии продолжения трещины (разреза), что не соответствует выводам работы [8]. Авторы работ [7, 8] утверждают, что их расчеты носят универсальный характер и на их основе логично заключение о некорректности моделей типа Леонова–Панасюка–Дагдейла, поскольку считают, что узких полос предразрушения в реальности не бывает.

Экспериментальные данные [6, 11, 12] напротив показывают, что во многих случаях, особенно на ранних стадиях нагружения тела с трещиной, из-за тенденции к локализации нелинейных деформаций в узких слоях у вершины трещины, зоны предразрушения представляют собой узкие клинообразные области на продолжении трещин. На рис. 2 показаны такие зоны, соответственно, в стальной пластине (рис. 2, а) [6] и в тонких полимерных пленках (рис. 2, б, в) [11, 12].

Недостаток знаний о закономерностях напряженно-деформированного состояния этой малой зоны предразрушения, материал которой находится в состоянии деструкции, восполняется с привлечением различных моделей трещин. Поскольку во многих случаях (рис. 2) зона предразрушения располагается на продолжении трещины и имеет, как правило, малый (по сравнению с ее длиной) размер, то обычно ее представляют, развивая модели Леонова–Панасюка–Дагдейла, в виде разреза, к поверхностям которого приложены само-

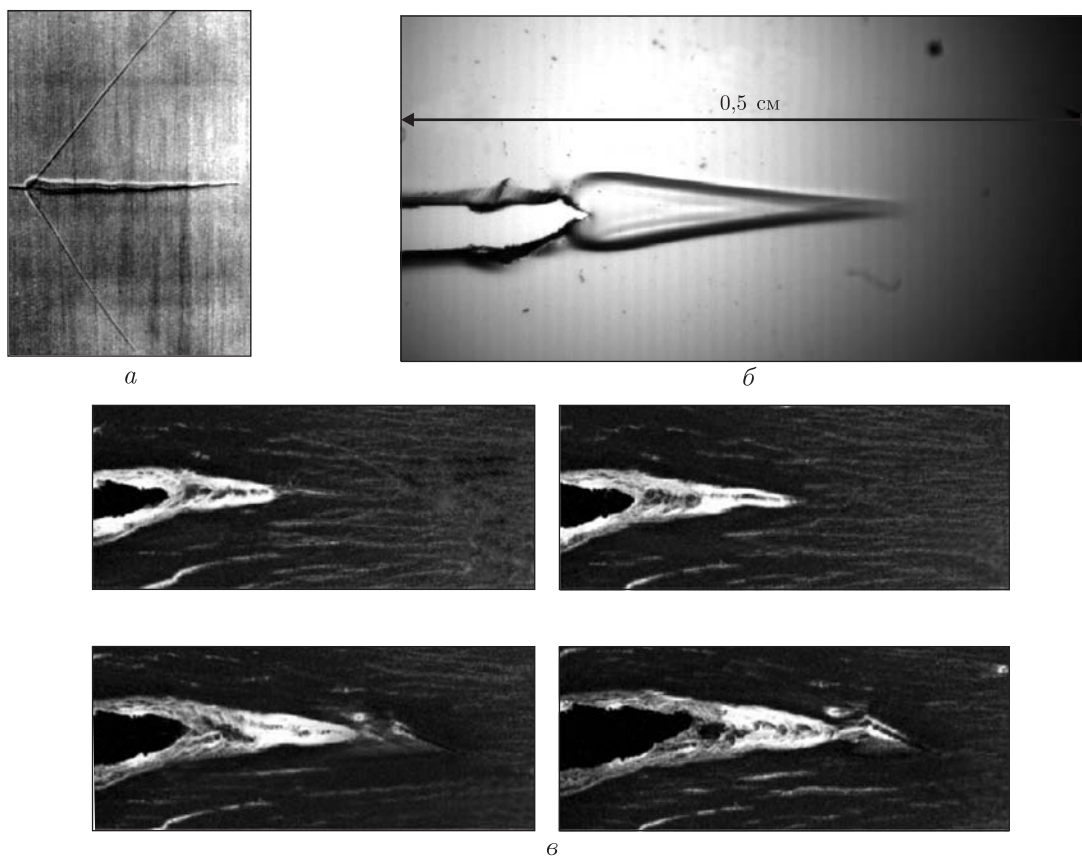


Рис. 2

уравновешенные напряжения, величина которых определяется расчетно-экспериментальными методами [13], при этом должно быть выполнено условие о конечности напряжений в конце трещины и зоне предразрушения [2, 4].

Зоны предразрушения у многих полимеров, таких как полиметилметакрилат, полистирол, поликарбонат и другие аморфные стеклообразные полимеры имеют специфическое строение и не похожи на зоны предразрушения у краев трещин в других твердых телах, к примеру, в металлах. Если в металлах это пластические зоны с деструкцией материала, то в полимерах “трещины серебра”, “craze zone”.

Согласно опубликованным данным [2, 13, 14], “craze zones” представляют собой резко очерченные области, заполненные расслоившимся несплошным материалом, состоящим из однонаправленно ориентированных нитей-фибрилл. Их плотность распределения составляет 40–60% плотности исходного материала, а диаметр равен 25–50 нм ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ). При раскрытии трещины фибриллы вытягиваются из матричного материала, удлиняются, при большом удлинении разрываются (рис. 3).

В работах [2, 14] разработаны двухуровневые модели мезомеханики длительного разрушения, учитывающие структуру и вязкоупругие свойства полимеров и композитов в зоне предразрушения у фронта растущей трещины. Эти модели имеют два структурных уровня. Первый структурный уровень — это модель трещины в рамках механики деформируемого твердого тела, к нему относится определение вязкоупругого раскрытия трещины (разреза) под действием некоторой системы сил, нормальных плоскости расположения трещины

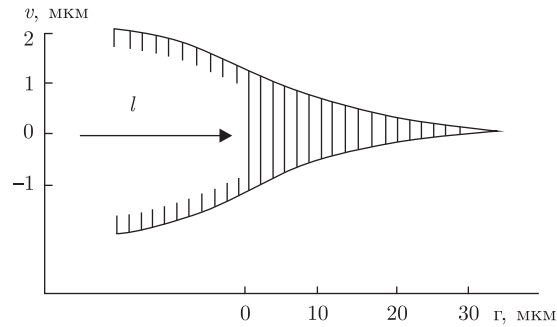


Рис. 3

(mode I). Второй структурный уровень определяет характер моделирования зоны предразрушения у края трещины, включая: систему связей (тяжей), соединяющих берега разреза, моделирующего область предразрушения (сгазе зона); их вязкоупругие свойства, в общем, отличные от характеристик матричного материала; характер взаимодействия тяжей с матричным материалом.

Эти двухуровневые модели мезомеханики разрушения более сложны, чем обычно применяемые в таких ситуациях модели типа Дагдейла или Леонова–Панасюка. В одной из первых работ в этой области была разработана дискретная структурная модель зоны предразрушения в полимерах [14], основанная на экспериментальных данных о строении “трещин серебра” у вершин трещин.

В последние годы в связи с интенсивным развитием экспериментальной техники исследования микрзон у вершин трещин разработаны расчетно-экспериментальные методы определения параметров зон предразрушения в полимерах, композитах и других материалах [13].

Подавляющее число публикаций по этой проблеме посвящено разнообразным моделям зон предразрушения в линейно упругих телах [1, 6, 14].

В статье [15] в отличие от этих публикаций рассмотрена нелинейная задача механики разрушения, когда зона предразрушения представляется модифицированной моделью Леонова–Панасюка и расположена внутри зоны нелинейности. Исследовано влияние зоны предразрушения на размеры и конфигурацию зоны нелинейности у вершины трещины нормального разрыва, а также ее влияние на величину критического раскрытия берегов трещины.

В заключение отмечу, что отмеченные модели зон предразрушения, конечно, не охватывают всего многообразия механизмов процессов разрушения современных материалов, тем не менее они позволяют видеть перспективы развития этой проблемы.

1. *Fracture. An advanced treatise* / Ed. by H. Liebowitz. Vol. 1–6. – New York; London: Academic Press, 1968. – 1974.
2. Каминский А. А. Разрушение вязкоупругих тел с трещинами. – Киев: Наук. думка, 1990. – 312 с.
3. Богданов В. Л., Гузь А. Н., Назаренко В. М. Напряженно-деформированное состояние материала с периодической системой соосных круговых трещин радиального сдвига при действии направленных вдоль них усилий // Прикл. механика. – 2010. – 46, № 12. – Р. 3–16.
4. Панасюк В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами – Киев: Наук. думка, 1968. – 246 с.
5. Каминский А. А., Усикова Г. И., Дмитриева Е. А. Экспериментальное исследование распределения пластических деформаций в окрестности вершины трещины при статическом нагружении // Прикл. механика. – 1994. – 30, № 11. – С. 69–75.

6. *Витвицкий П. М., Панасюк В. В., Ярема С. Я.* Пластические деформации в окрестности трещины и критерии разрушения (обзор) // Пробл. прочности. – 1973. – № 2. – С. 3–18.
7. *Хорошун Л. П.* Дискретизация плоской задачи о растяжении тела с трещиной при нелинейном законе деформирования // Прикл. механика. – 2010. – 46, № 11. – С. 31–48.
8. *Хорошун Л. П., Левчук О. И.* Плоская задача о распределении напряжений в окрестности трещины при растяжении линейно упрочняющихся материалов // Там же. – 2014. – 50, № 2. – С. 27–40.
9. *Hutchison J. W.* Singular behaviour at the end of a tensile crack in a hardening material // J. Mech. Phys. Solids. – 1968. – 16, No 1. – P. 13–22.
10. *Партон В. З., Морозов Е. М.* Механика упругопластического разрушения. – Москва: Наука, 1985. – 502 с.
11. *Cortet P. P., Santucci S., Vanel L., Ciliberto S.* Slow crack growth in polycarbonate films // Europhys. Lett. – 2005. – 71, No 2. – P. 242–248.
12. *Desai C. K., Kumar A. S., Basu S., Parameswaran V.* Measurement of cohesive parameters of crazes in polystyrene films // Conf. Proc. of the Society for Experim. Mech. Ser. – 2011. – P. 519–526.
13. *Gain A. L., Carroll J., Paulino G. H., Lambros J.* A hybrid experimental/numerical technique to extract cohesive properties for mode-I fracture of quasi-brittle materials // Int. J. Fracture. – 2011. – 169, No 2. – P. 113–131.
14. *Савин Г. Н., Каминский А. А.* Рост трещин при разрушении твердых полимеров // Прикл. механика. – 1967. – 3, № 3. – С. 33–39.
15. *Каминский А. А., Курчаков Е. Е.* Моделирование зоны предразрушения в вершине трещины в нелинейно упругом теле // Там же. – 2011. – 47, № 6. – С. 149–159.

*Институт механики им. С. П. Тимошенко  
НАН Украины, Киев*

*Поступило в редакцию 02.09.2014*

**А. О. Камінський**

### **Щодо моделювання зони передруйнування поблизу фронту тріщини**

*Наведено критичний аналіз сучасного стану проблеми моделювання процесу руйнування матеріала у околі вершини тріщини. Розглянуто теоретичні підходи до адекватного описання характеру поведінки матеріала у процесі руйнування внаслідок поширення тріщини, що спостерігається у експериментах. Дано оцінку перспективності різноманітних підходів до подальшого удосконалення сучасних моделей.*

**A. A. Kaminsky**

### **On the modeling of a prefracture zone near the crack front**

*A critical analysis of the current state of the modeling problem for the fracture of a material in a vicinity of the crack tip is performed. Theoretical approaches to an adequate description of the experimental behavior of materials during their fracture as a result of the crack propagation are considered. The assessment of the perspectives of various approaches to the future development of the current models is given.*