

УДК 539.375

СХЕМА ПРЕДРАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТОВ ОКОЛО ОТВЕРСТИЙ

ПОЛИЛОВ А. Н.

Предложена схема описания предразрушения композитов, приводящего к «затуплению» отверстия или надреза и к снижению эффективного коэффициента концентрации напряжений. Гипотеза о постоянном характерном для данного материала размере зоны предразрушения позволяет с помощью одного экспериментального параметра описывать зависимость прочности от размеров концентраторов напряжений для широкого класса отверстий и надрезов.

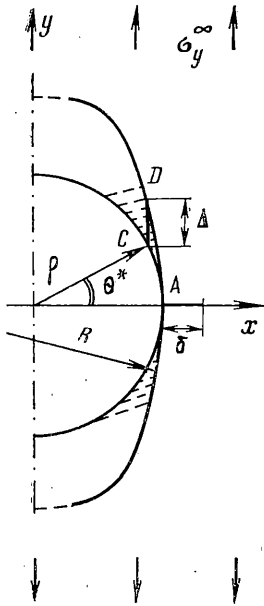
1. Решение классической задачи теории упругости о распределении напряжений около отверстий или выточек не позволяет, как правило, показать, насколько снизится несущая способность элемента из-за наличия концентратора напряжений. Основной практический результат применения в задачах о пластинах с отверстиями методов математической теории упругости состоит в вычислении так называемых теоретических коэффициентов концентрации напряжений $K_t = \sigma_*/\sigma$, где σ_* — наибольшее значение напряжения около отверстия, σ — среднее приложенное напряжение в расчете на ослабленное сечение.

Значение K_t представляет во всех известных случаях верхнюю оценку для эффективного коэффициента концентрации напряжений K_σ , характеризующего снижение прочности $K_\sigma \approx \sigma_0/\sigma'$, где σ' — прочность образца с концентратором напряжений в расчете на ослабленное сечение, σ_0 — прочность гладкого образца, строго говоря, с тем же номинальным сечением. Кроме того, для всех известных материалов K_σ растет с ростом абсолютного размера подобных концентраторов напряжений. Эти факты, с одной стороны, связаны с тем, что достижение напряжениями в одной лишь точке критического значения, равного прочности гладкого образца, не может быть принято за критерий разрушения; для полного разрушения напряжения должны достигнуть достаточного уровня в некоторой области, характерного для данного материала размера. С другой стороны, имеет несомненное значение предразрушение около концентратора напряжений, снижающее его влияние по сравнению с предсказанным по теории упругости.

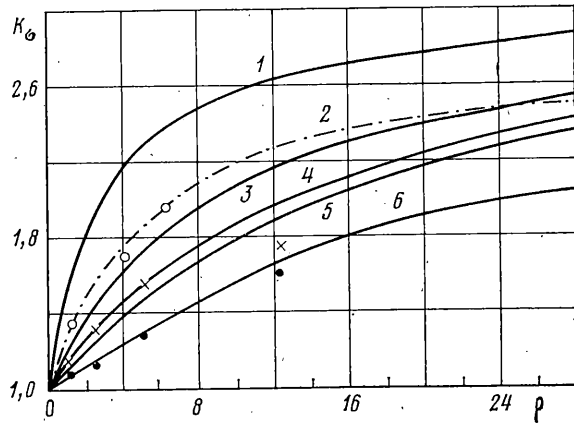
По-видимому, Нейберу [1] принадлежит идея использовать для объяснения указанных фактов «гипотезу характерного структурного размера» δ , по которому предлагается проводить усреднение напряжений, принимая за критерий разрушения достижение усредненными напряжениями предела прочности гладкого образца (обозначения ясны из фиг. 1):

$$K_\sigma = \frac{1}{\sigma' \delta} \int_p^{p+\delta} \sigma_y(x)|_{y=0} dx \quad \text{или} \quad K_\sigma = \frac{\sigma_y(\delta_1)}{\sigma'} \quad (1.1)$$

если считать за критерий разрушения около отверстия при растяжении достижение нормальными напряжениями σ_y на удалении δ_1 от дна отверстия предела прочности гладкого образца σ_0 . По сути δ (или δ_1) — подгоночный параметр для описания зависимости K_σ от диаметра отверстия или



Фиг. 1



Фиг. 2

от вида концентратора. Попытка придать параметру δ некоторый механический смысл размера элементарного объема, содержащего средний дефект материала, представлена в [2]. Критерий типа (1.1) проверен экспериментально для композитов в [3, 4].

Однако формальное использование гипотезы характерного размера не объясняет причины зависимости K_σ от размера отверстия, не позволяет понять конкретный механизм разрушения около концентраторов, приводящий к снижению K_σ по сравнению с K_t .

Учет масштабного эффекта возможен также при рассмотрении статистического характера прочности волокон. При этом с ростом абсолютного размера отверстия растет вероятность попадания слабых дефектов в достаточно напряженную зону, иными словами растет ожидание числа разорванных волокон около отверстия, что эквивалентно снижению прочности около отверстия с ростом его размера.

Интересный подход к рассмотрению масштабного эффекта с учетом предразрушения около отверстия основан на решении Бови [5] для отверстия с исходящими с его контура трещинами характерной длины, нормальными приложенной растягивающей нагрузке. В упругой постановке критерий разрушения связан с достижением в кончике трещины критического для данного материала значения коэффициента интенсивности напряжений. Это позволяет сравнивать результаты для отверстий и надрезов. Можно считать также, аналогично модели Дагдейла [6], что берега гипотетической трещины предразрушения соединены постоянными усилиями сцепления σ_0 , и тогда этот подход приводит к выражению типа (1.1). Однако для высокопрочных волокнистых композитов, растягиваемых вдоль волокон, не характерно предразрушение около отверстия в виде развития трещины поперек волокон.

Цель данной работы — показать возможность введения характерного размера материала в схему предразрушения, отражающую реальное поведение композитов. В [7] обоснована схема предразрушения в виде образования в точках C контура отверстия с координатой θ^* (Фиг. 1) продольной трещины вдоль линии $x = \rho \cos \theta^*$, уменьшающей глубину концентратора напряжений и снижающей эффективную концентрацию напряжений в опасной зоне около дна отверстия (точка A). Координата θ^* определяется из условия первого разрушения поверхности раздела вдоль оси y . Такая схема применена в [8] к ортогонально армированным композитам; дальнейшие эксперименты показали, что оценка $K_\sigma \leq 1,5-1,6$, получаемая по этой схеме, справедлива для разных композитов с круговыми отверстиями диаметром по крайней мере до 10 мм. Для больших диаметров отверстий и для композитов, не склонных к расщеплению, предположение о том, что предразрушение эквивалентно образованию длинной продольной трещины вблизи точки C , оказывается слишком смелой гипотезой. Наличие в материале слоев с различной укладкой сдерживает развитие продольной трещины, и поэтому предразрушение не носит столь выраженного характера, как в однонаправленном материале. Следовательно, и снижение влияния отверстий или выточек может быть не столь резким.

Ниже приведены данные из [9] для пластин из боропластика (первые три столбца), углепластика (четвертый столбец) и стеклопластика (пятый столбец) шириной 250 мм с центральным круговым отверстием диаметром 25 мм. В верхней строке указана схема укладки волокон

	(0,+45)	(0 ₂ ,+45,90)	(0, 90)	(0 ₂ ,+45,90)	(0 ₂ ,+45,90)
K_{σ}	1,53	2,07	2,86	2,43	1,84
K_t	3,60	3,45	5,80	3,57	3,26

Как видно, значения K_{σ} несколько превышают полученную в [7] оценку. Однако они заметно ниже значений теоретических коэффициентов концентрации K_t , которые были рассчитаны для анизотропной плоскости с эллиптическим отверстием, равномерно растягиваемой вдоль оси y , с использованием данных из [9] по известной формуле

$$K_t = 1 + \sqrt{a/\rho} (\beta_1 + \beta_2) / (\beta_1 \beta_2) \quad (1.2)$$

$$\beta_{1,2} = \left(\frac{1}{2} E_x / G_{xy} - \nu_{yx} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2} E_x / G_{xy} - \nu_{yx} \right)^2 - E_x / E_y} \right)^{1/2}$$

где E_x, E_y — модули Юнга в направлениях x и y , G_{xy} — модуль сдвига, ν_{yx} — коэффициент Пуассона, характеризующий поперечное сужение в направлении x при растяжении в направлении y , a — полуось эллипса вдоль оси x , ρ — радиус кривизны в вершине при $x=a$. Таким образом, даже для достаточно больших отверстий за счет предразрушения происходит существенное снижение эффективного влияния отверстий на прочность по сравнению с местным повышением напряжений при упругом деформировании.

2. Как показано в [8], при нагружении вдоль волокон композита с круговым отверстием условие прочности впервые нарушается на контуре отверстия в точках C (см. фиг. 1) с угловой координатой θ^* , которую можно рассчитать по известному распределению окружных напряжений, зная критерий разрушения композита. Для реальных композитов θ^* меняется в пределах $10 \div 30^\circ$. В дальнейшем для определенности примем $\theta^* = 20^\circ$; конкретное значение θ^* , как будет видно ниже, не столь важно для окончательных результатов.

Будем считать, что с ростом нагрузки вблизи точки C возникает зона предразрушения и часть материала, примыкающая к отверстию, выключается из работы. Размер зоны предразрушения будем характеризовать расстоянием Δ от точки C вдоль направления растяжения: на такую длину возможно расслоение в наиболее опасной зоне. Будем считать, что заштрихованная на фиг. 1 часть материала за счет предразрушения вышла из строя и не может участвовать в перераспределении напряжений; это эквивалентно некоторому «затуплению» отверстия. Считаем, что контур нового гипотетического отверстия проходит через прежнюю вершину отверстия $A(\rho, 0)$ и через точку D с координатами $(\rho \cos \theta^*, \rho \sin \theta^* + \Delta)$. Форма отверстия на удалении от точки $A-D$, вообще говоря, не играет существенной роли. Здесь, как и обычно, считается, что коэффициент концентрации напряжений зависит лишь от отношения глубины гипотетического отверстия к радиусу кривизны в его вершине, поэтому для удобства это отверстие принято эллиптическим с прежней полуосью $a = \rho$ и новым радиусом кривизны R в вершине $x = a$:

$$R = \rho + \Delta \left[\operatorname{ctg} \frac{\theta^*}{2} + \frac{\Delta}{2\rho(1 - \cos \theta^*)} \right] \quad (2.1)$$

Параметр материала Δ характеризует эффективную длину расслоения около отверстия. Качественное подтверждение предложенной схемы дают экспериментальные исследования, показывающие развитие предразрушения около контура отверстий в композитах в стороне от точек максимума нормальных напряжений A .

Считаем, что после предразрушения окончательный разрыв произойдет в точке A и эффективный коэффициент концентрации следует находить по формуле (1.2) с заменой ρ на R из (2.1). Будем для простоты рассматривать изотропный материал. $\beta_1 = \beta_2 = 1$, что, например, соответствует ком-

позитам с укладкой $(0, \pm 45, 90)$ (изотропными по упругим свойствам являются композиты с угловым расстоянием между равными семействами волокон π/n , где $n \geq 3$).

Полагая $\theta^* = 20^\circ$, получим

$$K_i^* = 1 + 2(1 + 5,7\lambda + 8,3\lambda^2)^{-1/2}, \quad \lambda = \Delta/\rho \quad (2.2)$$

Звездочка означает, что коэффициент концентрации рассчитывается с учетом предразрушения, изменяющего форму отверстия. Параметр материала Δ подбирается из условия наилучшего соответствия с экспериментальными значениями K_σ . Зависимость (2.2) позволяет описывать масштабный эффект.

На фиг. 2 построены зависимости K_σ от ρ (в мм) для кругового отверстия в широкой пластине при различных Δ (мм): кривая 1—1, кривая 3—3, кривая 4—4,5, кривая 5—5. Были проведены эксперименты на плоских образцах из углепластика с укладкой $(0, \pm 45, 90)$; ширина образца составляла $b = 10; 20; 40$ и 100 мм, диаметры отверстия соответственно: $2\rho = 2,5; 5; 10$ и 25 мм, так что отношение $2\rho/b$ было равным $1/4$.

Прочность гладких образцов σ_0 измерялась при различной ширине, соответствующей номинальному сечению $b - 2\rho$ образцов с отверстиями.

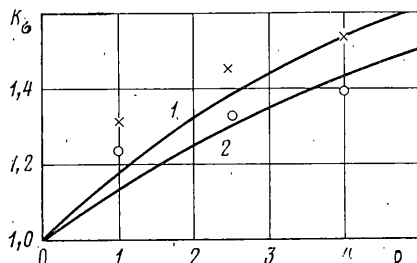
Экспериментальные данные для одной из плит отмечены на фиг. 2 крестами. На каждую точку испытывались три образца. Как видно из фиг. 2, эти данные достаточно хорошо ложатся на кривую 4, рассчитанную по зависимости (2.2) при $\Delta = 4,5$ мм.

Данные для другой плиты такого же углепластика (та же программа по образцам) отмечены на фиг. 2 темными точками; эти данные значительно отличаются от первой плиты, хотя обе плиты были из одной партии.

Описание этих результатов кривой 6 при помощи формулы (2.2) при $\Delta = 9$ мм также вполне удовлетворительно. Таким образом, на значения K_σ и на параметр Δ оказывают заметное влияние даже незначительные отклонения в свойствах компонентов или в технологии получения композитов.

На фиг. 2 светлыми точками отмечены пересчитанные экспериментальные данные из [10] для углепластика Т300/934 с укладкой $(\pm 45, 0, 90)$. Они удовлетворительно ложатся на кривую 3 для $\Delta = 3$ мм. По-видимому, параметр Δ может служить мерой монолитности композита, его склонности к растрескиванию около концентраторов напряжений. Чем выше значение Δ , тем ниже чувствительность материала к концентрации напряжений вследствие работы механизма «приспособляемости», проявляемого в виде предразрушения. Кривая 2 (штрихпунктир) на фиг. 2 перестроена из [10], где предложен довольно сложный метод описания зависимости K_σ от ρ для круговых отверстий, включающий в себя два независимых экспериментальных параметра. Как видно, характер зависимости 2 близок к полученным по предложенной выше модели.

На фиг. 3 приведены данные из [11] для ортогонально армированных стеклопластиков СВМ (кресты) и АГ-4С (светлые точки). Кривые 1, 2 построены по зависимости (2.2) при $\Delta = 4$ и 5 мм. Некоторое отклонение результатов от теоретических кривых объясняется тем, что испытания проводились при постоянной номинальной ширине образцов $b - 2\rho = 10$ мм; таким образом, отношение ρ/b не было постоянным и менялось от $0,08$ при $\rho = 1$ мм до $0,25$ при $\rho = 5$ мм. С ростом ρ растет ρ/b и, следовательно, убывает теоретический коэффициент концентрации напряжений, что не учитывается в изложенном анализе; так, например, из расчетов при $\rho/b =$



Фиг. 3

$=0,25 K_t=2,2$, при $\rho/b=0,08 K_t=2,7$. Учет конечной ширины пластины привел бы к снижению кривых в области больших ρ .

Таким образом, даже принимая фиксированным значение θ^* , можно с достаточной точностью описать масштабный эффект, т. е. зависимость K_σ от ρ для различных композитов. Изменение в реальных пределах угла начала разрушения θ^* не приводит к существенному изменению формы кривых $K_t^*(\rho)$.

Отметим еще раз, что значение θ^* можно определить точно по известному из теории упругости распределению напряжений и выбранному критерию разрушения для описания зависимости прочности от направления растяжения. Однако, чтобы не усложнять рассмотрение, и учитывая произвол в выборе Δ , будем считать в дальнейшем $\theta^*=20^\circ$.

Ограничимся лишь следующим замечанием. Для сильно анизотропных материалов, у которых $E_x/E_y=\varepsilon \ll 1$, $\beta_2 \sim \varepsilon^{1/2}$, $\beta_1 \sim 1$, согласно [7], координата начала разрушения θ^* может быть найдена разложением по малому параметру β_2 в следующем виде: $\cos \theta^*=1-\varepsilon+o(\varepsilon)$. Тогда с точностью до ε : $\text{ctg}^2 \frac{1}{2}\theta^*=2/\varepsilon-1$.

Анализ выражений (1.2), (2.1) при $\varepsilon \rightarrow 0$ показывает, что $K_t^* \rightarrow \rightarrow 1+2^{1/2}\rho/\Delta$, т. е. K_t^* для каждого Δ и ρ с ростом анизотропии стремится к конечному пределу. При уменьшении β_2 уменьшается θ^* и, следовательно, больше «затушается» отверстие, однако множитель $(\beta_1\beta_2)^{-1}$ в (1.2) компенсирует снижение коэффициента концентрации напряжений. Таким образом, учитывая произвол в выборе Δ , в первом приближении при расчете K_σ можно ограничиться рассмотрением изотропного случая. Учет анизотропии упругих свойств при нахождении θ^* в конечном счете при вычислении K_t^* приведет к незначительным поправкам.

3. Аналогичная схема предразрушения может быть рассмотрена при других способах введения характерного размера, если, например, считать, что контур нового гипотетического эллиптического отверстия проходит через точку, соответствующую полярному углу θ^* и увеличенному радиусу $\rho+\Delta$, т. е. зона предразрушения имеет протяженность Δ вдоль радиуса около точки C . Тогда, опуская промежуточные выкладки, получаем

$$R = [\rho(1-\cos \theta^*)(\rho+\Delta)+\frac{1}{2}\Delta^2]/[\rho(1-\cos \theta^*)-\Delta \cos \theta^*] \quad (3.1)$$

Коэффициент концентрации напряжений K_t^* следует подсчитывать по формуле (1.2) для изотропного случая

$$K_t^*=1+2\sqrt{\rho/R} \quad (3.2)$$

Формула (3.2) с учетом (3.1) качественно описывает зависимость коэффициента концентрации напряжений K_t от радиуса отверстия ρ , но она справедлива лишь для достаточно больших отверстий: $\rho > \Delta \cos \theta^*(1-\cos \theta^*)^{-1}$ (для $\theta^*=20^\circ$ имеем $\rho > 16\Delta$). Это означает, например, что при $\Delta=0,2$ мм материал «не замечает» отверстий с диаметром до 3 мм. Для ряда композитов такая картина имеет место: прочность материала в расчете на ослабленное сечение не снижается при нанесении достаточно малых отверстий.

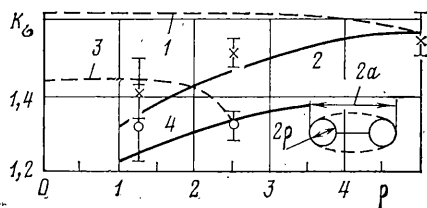
Можно считать также, что характерный размер Δ следует откладывать от точки C вдоль оси x . Тогда легко найти связь между новым радиусом R и радиусом ρ нанесенного отверстия, и при помощи (3.2) получить

$$K_t^*=1+2\sqrt{\frac{1-\cos \theta^*-\Delta/\rho}{1-\cos \theta^*-(\Delta/\rho)^2}} \quad (3.3)$$

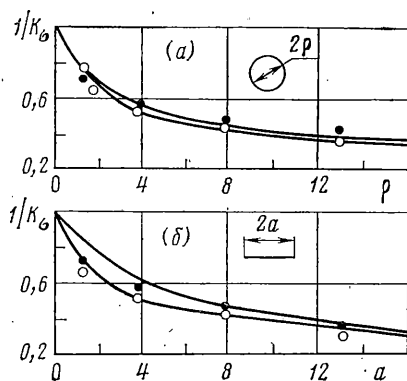
Как и (3.1), выражение (3.3) справедливо лишь для больших ρ . Когда $\Delta/\rho \ll 1$, разложением по малому параметру Δ/ρ можно привести (3.3) к удобному виду $K_\sigma=1+2(1-m\Delta/\rho)^{1/2}$, где $m=16,6$ при $\theta=20^\circ$. Выражения (3.3) или (3.2) с использованием (3.1) качественно согласуются с экспериментом, однако более точное описание дают формулы (2.1), (2.2), которые и будут использованы в дальнейшем изложении.

4. Для отверстия, отличного от кругового, например эллиптического, можно численно по методу [8] найти координату контура, где впервые выполняется условие разрушения, и предположить, как и ранее, что зона предразрушения имеет около этой точки характерную протяженность Δ вдоль направления растяжения. Таким образом, можно аналитически

определить новый радиус кривизны в вершине гипотетического отверстия, контур которого проходит через вершину отверстия и через точку, лежащую на расстоянии Δ по оси y от точки начала разрушения. Однако, чтобы не усложнять выкладки, будем предполагать просто, что в результате предразрушения радиус кривизны в вершине отверстия меняется по формуле (2.1), как для кругового отверстия. Это позволяет получить результаты в замкнутом виде. Например, для эллиптического отверстия с



Фиг. 4



Фиг. 5

полуосью a вдоль оси x и с радиусом кривизны ρ коэффициент концентрации напряжений следует определять по формуле

$$K_i^* = 1 + 2\sqrt{a}[\rho + \Delta (\operatorname{ctg}^2 \frac{1}{2}\theta^* + \Delta / (4\rho \sin^2 \frac{1}{2}\theta^*))]^{-1/2} \quad (4.1)$$

Были проведены испытания образцов из первой плиты того же углепластика, что и в п. 2, с укладкой $(0, \pm 45, 90)$, шириной $b=40$ и 20 мм. Два круговых отверстия с радиусом ρ располагались на расстоянии $2(a-\rho)$ и соединялись между собой разрезом или отверстием придавали приблизительно эллиптическую форму с радиусом кривизны u дна, равным радиусу нанесенных отверстий. Полуось отверстий a (фиг. 4) при $b=40$ мм равна 5 мм, радиус $\rho=5; 2,5; 1,25$ мм (данные по K_0 отмечены на фиг. 4 крестами). При $b=20$ мм, $a=2,5$ мм $\rho=2,5$ и $1,25$ мм (данные отмечены на фиг. 4 светлыми точками). Сплошные линии 2, 4 на фиг. 4 отражают расчет по формуле (4.1), для $a=5$ и $2,5$ мм с учетом прежнего значения $\Delta=4,5$ мм, определенного на круговых отверстиях. Как видно, для $a=5$ мм получено хорошее согласие эксперимента с расчетной зависимостью (4.1), но с уменьшением радиуса кривизны и при приближении отверстия к надрезу коэффициент K_0 становится больше рассчитанного согласно (4.1) значения K_i^* .

Формула (4.1) не обеспечивает предельного перехода от отверстий с конечным радиусом к надрезу, и эта зависимость дает лишь нижнюю оценку коэффициента K_0 для вытянутых отверстий при уменьшении радиуса кривизны в их вершине. Верхнюю оценку дает представленный в п. 5 метод учета предразрушения около надрезов. Рассчитанные согласно этому методу предельные кривые 1 (для $a=5$ мм) и 3 (для $a=2,5$ мм) нанесены на фиг. 4 штриховыми линиями.

Аналогично могут быть рассчитаны значения эффективного коэффициента концентрации напряжений для отверстий или выточек, вытянутых вдоль направления растяжения.

5. Изложенный выше подход справедлив для достаточно больших отверстий, по форме близких к круговым, радиус которых больше введенного характерного размера. Однако можно сделать разумные предположения и о схеме предразрушения около надрезов. Известно, что около

поперечной трещины в композите наблюдается область продольного предразрушения, в результате которого надрез «затупляется». Считаем, что радиус кривизны около «затупленного» надреза — наименьший из возможных по формуле (2.1), т. е. считаем, что наличие надреза приводит к наиболее «острому» краю гипотетического отверстия по рассмотренной схеме предразрушения.

Условие минимума $dR/d\rho=0$ из (2.1) дает $\rho^*=1/2\Delta/\sin 1/2\theta^*$, и тогда

$$R_{\min}=\Delta(1+\cos(\theta^*/2))/\sin(\theta^*/2) \quad (5.1)$$

т. е. гипотетический радиус кривизны около надреза пропорционален характерному размеру: $R_{\min}=k\Delta$. При $\theta^*=20^\circ$ $k=11,48$. Значение k , строго говоря, должно быть проверено экспериментально. Таким образом, из (3.2), (5.1) можно получить зависимость коэффициента концентрации напряжений от длины надреза a

$$K_t^{**}=1+2\sqrt{a/(k\Delta)} \quad (5.2)$$

Расчет по формуле (5.2) обеспечивает верхнюю оценку K_σ для эллиптического отверстия или надреза заданной длины. Эта оценка нанесена на фиг. 4 штриховыми линиями 1, 3: для рассмотренного углепластика $\Delta=4,5$ мм и при $a=5$ мм максимальное значение $K_t^{**}=1,62$, при $a=2,5$ мм $K_t^{**}=1,44$.

По мере роста ρ для заданного a коэффициент концентрации напряжений K_t^* сначала растет при $\rho<\rho^*$ согласно (4.1), но не выше предельного значения K_t^{**} для данной длины a , а затем K_t^* (и K_σ) убывает и при $\rho\rightarrow\infty$ ($a=\text{const}$) коэффициент $K_t^*\rightarrow 1$.

Например, при $\Delta=4,5$ мм ($\rho^*=12,9$ мм), $a=5$ мм, $\rho=10$ мм имеем $K_t^*=1,62$, а при $\rho=100$ мм коэффициент $K_t^*=1,4$, т. е. при $\rho>\rho^*$ начинается убывание K_t^* (и K_σ). Однако убывание K_σ с ростом ρ при заданной глубине a происходит крайне медленно. Этим объясняется, что при изготовлении галтелей в композитных образцах типа лопаток, несмотря на большой радиус кривизны, вследствие масштабного эффекта K_σ остается значительным и разрушение композитов начинается около галтелей.

Для проверки справедливости расчета по формулам (2.2), (5.2) на фиг. 5, а, б обработаны данные из [12] соответственно для круговых отверстий и надрезов в пластинах из стеклопластика с укладками $(0, \pm 45, 90)$ — темные точки и $(0, 90)$ — светлые точки. Другие данные из [12] обнаруживают аналогичную зависимость и не нанесены на фиг. 5, чтобы не загромождать рисунок. Графики на фиг. 5, а, б приведены в тех же осях, что и в [12]: $1/K_\sigma - \rho$ (мм), фиг. 5, а и $1/K_\sigma - a$ (мм), фиг. 5, б.

Кривая 1 на фиг. 5, а построена согласно предложенной схеме предразрушения по формуле (2.2) с подобранным значением $\Delta=2$ мм. Кривые 2 на фиг. 5, а, б построены по второй формуле (1.1), учитывающей напряжения на удалении δ_1 от дна отверстия. Расчеты по обеим формулам (1.1) дают весьма близкие результаты. Как видно из фиг. 5, а, предложенная схема предразрушения позволяет с достаточной точностью описывать экспериментальные данные, причем чувствительность к характерному размеру в предложенной схеме меньше, чем в формулах (1.1), и это дает возможность подбирать параметр Δ в (2.2) достаточно округленно.

На фиг. 5, б приведены результаты по снижению прочности в образцах с центральным разрезом той же длины, что и диаметры отверстий на фиг. 5, а. Кривая 1 на фиг. 5, б отражает расчет по формуле (5.2) с учетом определенного из фиг. 5, а значения $\Delta=2$ мм. Как видно, формула (5.2) дает лучшее соответствие с экспериментом, чем кривая 2. Отметим, что рассчитанные зависимости на фиг. 5, а и б для данных композитов совпадают настолько, что при наложении фигур кривые 1 сольются. Единственный параметр Δ можно подобрать по любому эксперименту на образце с отверстием или с надрезом.

Выводы. Предложенная схема предразрушения позволяет с достаточной точностью описать зависимость эффективного коэффициента концентрации напряжений в различных композитах от размеров и формы отверстий или надрезов введением единственного параметра материала с размерностью длины, характеризующего меру растрескивания около концентраторов напряжений. Разумеется, принятая схема основана на ряде весьма грубых допущений, необходимость которых была вызвана желанием получить результаты в замкнутом виде, чтобы проиллюстрировать возможность придания характерному структурному параметру материала геометрического смысла размера зоны предразрушения, форма которой отражает реальный вид разрушения композитов. Для надрезов в композитах можно не вводить понятия критического коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} , используя единый изложенный подход для надрезов (трещин) (5.2) и отверстий (2.2).

Практический вывод состоит в том, что значения K_c для отверстий и надрезов разных размеров весьма близки и верхнюю оценку снижения прочности в композите из-за наличия любого отверстия можно получить испытывая образец с надрезом той же длины, что и размер отверстия, или рассчитывая снижение прочности для надреза по изложенной схеме.

Автор благодарен И. М. Махмутову за помощь в экспериментальной части работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нейбер Г. Концентрация напряжений. М.—Л.: Гостехиздат, 1947. 204 с.
2. Бу Э. Прочность и разрушение композитов.— В кн.: Композиционные материалы. Т. 5. Разрушение и усталость. М.: Мир, 1978, с. 206—266.
3. Whitney J. M., Nuismer R. J. Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations.— J. Compos. Mater., 1974, v. 8, No. 3, p. 253—265.
4. Nuismer R. J., Labor J. D. Application of the average stress failure criterion: pt 1. Tension.— J. Compos. Mater., 1978, v. 12, No. 3, p. 238—250.
5. Bowie O. L. Analysis of an infinite plate containing radial cracks originating from the boundary of an internal circular hole.— J. Math. and Phys., 1956, v. 35, No. 1, p. 60—70.
6. Dugdale D. S. Yielding of steel sheets containing slits.— J. Mech. and Phys., Solids, 1960, v. 8, No. 2, p. 100—104.
7. Полилов А. Н. Разрушение однонаправленных композитов при наличии концентраторов напряжений.— Изв. АН СССР. МТТ, 1975, № 5, с. 139—143.
8. Махмутов И. М., Полилов А. Н. Критерий прочности для ортогонально армированных композитов с полимерной матрицей.— Изв. АН СССР. МТТ, 1976, № 5, с. 160—169.
9. Daniel I. M., Rowlands R. E., Whiteside J. B. Effects of material and stacking sequence on behavior of composite plates with holes.— Exptl Mech., 1974, No. 1, p. 1—9.
10. Pipes R. B., Wetherhold R. C., Gillespie J. W., Jr. Notched strength of composite materials.— J. Compos. Mater., 1979, v. 13, No. 2, p. 148—161.
11. Полилов А. Н., Степанычев Е. И. Влияние концентрации напряжений на прочность ортогонально армированных полимеров.— Машиноведение, 1975, № 1, с. 70—74.
12. Цай С., Хан Х. Анализ разрушения композитов.— В кн.: Механика. Вып. 16. Неупругие свойства композиционных материалов. М.: Мир, 1978, с. 104—139.

Москва

Поступила в редакцию
4.III.1980