

К вопросу о прочности полимерных композитов, применяемых в автомобилестроении

к.т.н. проф. Осипов Н.Л., к.т.н. доц. Пирожков В.А., к.т.н. доц. Чабунин И.С.
 Университет машиностроения
 8(495)223-05-23, tchabunin@rambler.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию вопроса о влиянии размера радиуса скругления вершины трещинообразного надреза на критические значения коэффициентов интенсивности напряжений в дисперсно-упрочненных композиционных материалах.

Ключевые слова: дисперсно-упрочненные композиты, трещиностойкость, нормальный отрыв, антиплоский сдвиг.

Современные дисперсно-упрочненные композиционные материалы с полимерной матрицей находят широкое применение при изготовлении и ремонте широкого спектра узлов и деталей автомобилей, включая и сам кузов. Применение композиционных материалов позволяет значительно улучшить их весовые характеристики, от которых напрямую зависят практически все технико-эксплуатационные показатели транспортного средства, включая такие важнейшие, как тягово-скоростные, топливно-экономические, устойчивость, управляемость и др. Помимо этого, улучшается эстетичность экстерьера и интерьера.

Введение в состав композита минеральной дисперсной фазы позволяет существенно сократить расход дефицитных полимерных смол, а также повысить твердость, жесткость и износостойкость материала. Весьма ощутимое влияние оказывает объемное содержание дисперсной фазы и на способность хрупкой полимерной матрицы сопротивляться развитию в ней трещин. Так как трещиностойкость самым непосредственным образом зависит от интенсивности развития в малой окрестности конца трещины процессов, предшествующих акту локального разрушения, настоящая работа посвящена определению связи между размерами зон предразрушенного материала в вершинах трещин нормального отрыва и антиплоского сдвига и объемным содержанием в композите частиц минерального дисперсного наполнителя.

С этой целью была проведена серия опытов, в которых цилиндрические образцы с кольцевой усталостной трещиной и трещинообразным надрезом (рисунок 1) с различными значениями радиуса скругления его вершины подвергали нагружению до разрушения осевой растягивающей силой и скручивающим моментом. Образцы были изготовлены из эпоксидного компаунда холодного отверждения на основе смолы ЭД-20 и композитов, состоящих из указанного эпоксидного компаунда с 25 и 50% содержанием тонкодисперсной фазы – кварцевого песка с размером частиц 10^{-6} м. Методика подготовки и проведения испытаний была принята в точном соответствии с указаниями [1]. Затем исследовался вопрос о влиянии размера радиуса скругления вершины кольцевого трещинообразного надреза на критические значения коэффициентов интенсивности напряжений (КИН). Вычисление значений параметров трещиностойкости K_{IC} и K_{IIIc} осуществляли соответственно по данным работ [2, 3]:

$$K_{IC} = \frac{4F^*}{d^2} \cdot \sqrt{\frac{D}{\pi}} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{2} \cdot \frac{1-\varepsilon}{4-3,2\varepsilon} \right); \quad K_{IIIc} = \frac{6M^*}{d^3} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon D}{2\pi}},$$

где: D – диаметр образца;

d – диаметр нетто-сечения;

$$\varepsilon = \frac{d}{D};$$

F^* и M^* – значения нагрузки, соответствующие старту трещин.

Результаты проведенных исследований представлены на рисунке 2.

Анализ зависимостей, изображенных на этих рисунках, позволяет заключить, что как при нормальном отрыве, так и при антиплоском сдвиге, квазитрещина до определенного предела остается нечувствительной к увеличению степени своей притупленности. На осно-

вании концепции о тонкой структуре конца трещины [2] логично предположить, что независимость КИН от степени притупленности конца квазитрещины может иметь место до тех пор, пока величина радиуса ρ при ее вершине не будет превосходить размера r^* зоны предразрушения (рисунок 3), в пределах которой материал уже нельзя рассматривать как однородный, бесконечно делимый, бесструктурный и т.д. Притупленность трещинообразного надреза, не выходящая за рамки характерного размера зоны предразрушения, не способна, очевидно, оказать сколь-нибудь заметного влияния на распределение напряжений в упругой области вокруг конца трещины, а следовательно, в конечном итоге и на значение параметров трещиностойкости.

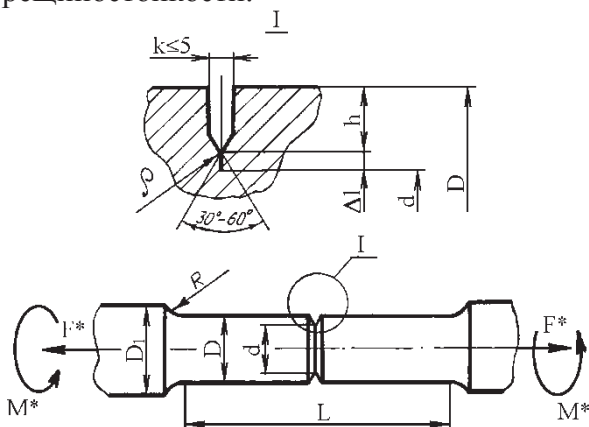


Рисунок 1. Цилиндрический образец для испытаний на осевое растяжение:
 $d=(0,6...0,7)D$; $D_1=1,5D$; $h=0,16D$; $R=0,5D$;
 $L=5D$

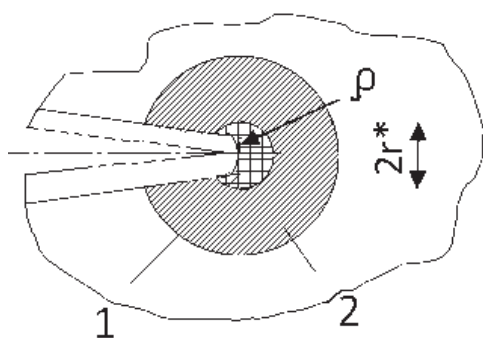


Рисунок 3. Схема структуры конца трещины: 1 – зона предразрушенного материала; 2 – область упругой асимптотики; ρ – радиус скругления вершины трещины; r^* – характерный линейный размер зоны предразрушения

Результаты проведенных исследований позволяют констатировать, что в композитах с большим объемным содержанием наполнителя образуются и большие по размеру зоны предразрушения в вершинах трещин, как нормального отрыва, так и антиплоского сдвига. Согласно данным (рисунок 2а), при введении в эпоксидный компаунд 25 и 50 об% дисперсной фазы, размер радиуса зоны предразрушения в вершине трещины нормального отрыва

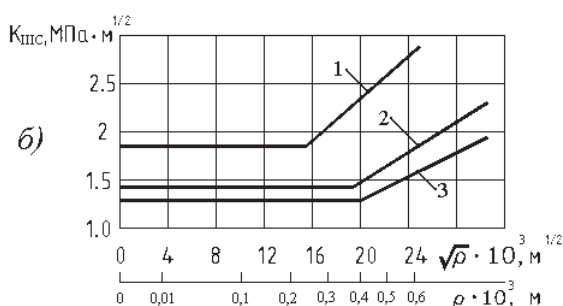
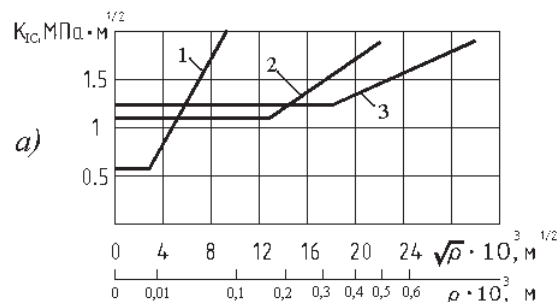


Рисунок 2. Графики зависимости K_{IC} и K_{IIS} от радиуса ρ скругления вершины надреза: 1 – компаунд без наполнителя; 2, 3 – композиты, содержащие 25 и 50 об.% наполнителя, соответственно

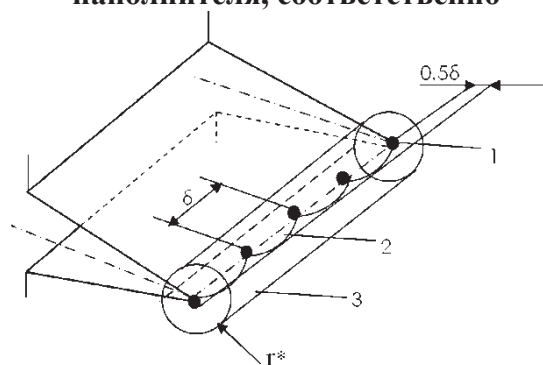


Рисунок 4. Схема взаимодействия фронта трещины с дисперсными неоднородностями: 1 – частица наполнителя; 2 – искривленная линия фронта трещины перед прорывом; 3 – зона предразрушения

увеличивается, соответственно, с $5 \cdot 10^{-6}$ м до $160 \cdot 10^{-6}$ м и $350 \cdot 10^{-6}$ м. Графики, приведенные на рисунке 2б, показывают, что размеры радиуса r^* зон предразрушения при вершинах трещин антиплоского сдвига при введении в компаунд 25 и 50 об% тонкодисперсного минерального наполнителя увеличиваются от $250 \cdot 10^{-6}$ м до $360 \cdot 10^{-6}$ и $410 \cdot 10^{-6}$ м соответственно.

Полученные данные о размерах зон предразрушения ставят под сомнение универсальность и достоверность предложенной в работе [4] модели влияния включений дисперсной фазы на энергию разрушения хрупких композитов, согласно которой увеличение энергии разрушения хрупкого композиционного материала происходит в результате увеличения длины фронта трещины за счет его изгиба по полуокружности между каждой парой рядом расположенных частиц наполнителя, превышающих по размеру структурные элементы матрицы. Так, при объемном содержании дисперсной фазы $V_f = 12,5\%$, при котором, как показали дополнительные исследования [5], выбранному для изучения классу композиционных материалов соответствует максимальное значение энергетического критерия разрушения, среднее расстояние δ (рисунок 4) между частицами наполнителя величиной $\theta = 10^{-6}$ м, вычисленное по известной формуле $\delta = \theta(1 - V_f) / 3V_f$, составляет всего лишь $\delta = 4,7 \cdot 10^{-6}$ м. Энергетический критерий хрупкого разрушения γ – энергию, необходимую для образования единицы площади свободной поверхности тела, определяли по полученной в рамках линейной механики разрушения формуле [6]:

$$\gamma = \frac{K_{IC}^2}{2E} (1 - \mu^2),$$

где: E – модуль упругости первого рода;

μ – коэффициент Пуассона.

Нетрудно видеть, что даже в этом случае, которому, согласно мнению автора [4], должно соответствовать максимальное проявление эффекта искривления фронта трещины, область предразрушения размером $2r^*$ способна поглотить все предполагаемые прогибы фронта трещин, обусловленные его взаимодействием с частицами дисперсного наполнителя.

Полученные результаты позволяют более обоснованно подойти к моделированию процесса растрескивания хрупких дисперсно-наполненных композитов, а также могут быть использованы при выборе оптимального, с точки зрения трещиностойкости, содержания в этих материалах частиц дисперсной фазы.

Литература

1. Методические рекомендации. Расчет и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей. Определение характеристик трещиностойкости полимерных композиционных материалов при статическом нагружении. – Львов: Физ.-механич. ин-т им. Г.В. Крапенко, 1984.
2. Панасюк В.В., Андрейкин Л.Е., Ковчик С.Е. Методы оценки трещиностойкости композиционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1997.
3. Партон В.В., Перлин П.И. Методы математической теории упругости. – М.: Наука, 1981.
4. Шевченко А.А. Физикохимия и механика композиционных материалов. – СПб: Профессия, 2010.
5. Пирожков В.А. Влияние дисперсной фазы на энергетический критерий вязкости разрушения эпоксидных композитов // Химическая техника, № 11, 2005.
6. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 2001.