

МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 539.4:678.5.066

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПОРИСТЫХ ФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИТОВ С ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕЙ

А. И. СТОЛЯРОВ

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, пр. Октября 48, 246746 г. Гомель, Беларусь.

Изучена кинетика разрушения пористых композитных материалов с полимерной матрицей. Приводится расчет напряженно-деформированного состояния модельной структуры фрикционного композита на основе разработанного алгоритма процесса возникновения и распространения микротрещин. Дан анализ влияния начальной пористости и остаточных напряжений на прочность композита.

Введение

Известно, что остаточные напряжения в полимерных композитах металлополимерных изделий являются следствием тепловых и химических процессов. В настоящей работе предполагается, что химические процессы завершены и, следовательно, они не оказывают существенного влияния на уровень остаточных напряжений и определяющую роль в формировании напряженного состояния композитов играют тепловые процессы, поскольку термические остаточные напряжения возникают в изделии в процессе его охлаждения после формования при повышенной температуре.

Используемое в расчетах известное соотношение теории упругости для определения напряжений [1]

$$\sigma = [D]\varepsilon^{el},$$

где $\varepsilon^{el} = \varepsilon - \varepsilon^{th}$, $\varepsilon^{th} = \Delta T[\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 \alpha_6 \alpha_7 \alpha_8 \alpha_9 \alpha_{10}]^T$, $\Delta T = T_{отв} - T_c$, показывает, что чем больше разность между температурой отверждения $T_{отв}$ и температурой окружающей среды T_c , тем выше величина термических деформаций, а, следовательно, и напряжений.

Анализируя величины параметров ε^{th} и ΔT , можно сделать вывод о том, что для снижения величины остаточных термических напряжений необходимо уменьшить температуру отверждения. Однако, поскольку ее снижение приведет к незавершенности химических процессов (недоотверждению связующего) и снижению прочности и износостойкости композита, то единственно эффективный путь уменьшения остаточных напряжений

– это увеличение прочности материала матрицы композита при незначительном понижении ее жесткости. Применение известных пластификаторов фенолоформальдегидных смол, например, каучука, для снижения напряжений в материале приводит к существенному снижению термостойкости.

Для снижения уровня остаточных напряжений используются различные методы [2, 3].

Один из известных способов, позволяющих достигнуть снижения и локализации остаточных напряжений – создание пористой структуры материала за счет введения ингредиентов со сходной структурой или путем использования порообразователей. Кроме того, пористая структура композитов способствует снижению тепловой напряженности узла и позволяет стабилизировать фрикционно-износные характеристики композитов за счет локализации продуктов деструкции полимерного связующего и образовавшихся в процессе трения абразивных частиц износа [4].

Поэтому представляло интерес исследовать влияние пор на прочность фрикционных материалов.

Теоретические предпосылки

Стохастическую структуру композита моделировали путем размещения на модельном поле случайным образом непересекающихся кругов. Средний диаметр круга, моделирующего частицу наполнителя – 40 мкм. Реализацию структуры композита с объемной долей наполнителя 50% получали размещением на модельном поле с размерами 0,7×0,7 мм 200 кругов, которое проводили по одному из алгоритмов, описанных в работе [5].

Значения постоянных упругости компонен-

тов модельной структуры принимали равными: для наполнителя – модуль Юнга $E_n = 70$ ГПа, коэффициент Пуассона – $\mu_n = 0,2$; для связующего – $E_c = 3$ ГПа и $\mu_c = 0,35$ соответственно. Поскольку рассматривается стадия после завершения технологического процесса прессования, предполагали, что оба компонента ведут себя упруго вплоть до разрушения. Разрушающее напряжение при растяжении связующего $\sigma_c = 48$ МПа, предельная деформация $\epsilon_{пр} = 1,6\%$.

Внешнюю нагрузку задавали как одноосное растяжение, одноосное сжатие и сдвиг, прикладывая ее по сторонам модельного поля. Нагружение производили ступенями с шагом 0,5 МПа при растяжении, 1 МПа – при сжатии и 0,1 МПа при сдвиге. На каждой ступени нагрузки рассчитывали напряжения и деформации в компонентах модельной структуры.

В качестве критерия разрушения использовали критерий максимальных деформаций. Эффективность этого критерия связана с тем, что причиной растрескивания и появления в материале дефектов типа пор является несовместимость деформаций его компонент, т. е. различия физико-механических характеристик наполнителя и полимерной матрицы. При превышении деформацией некоторых предельных значений полимерная матрица разрушается [6]. Повреждения такого рода не обязательно приводят к объемному разрушению при действии статической нагрузки, но могут послужить причиной разрушения при усталостном нагружении.

Таким образом, предполагается, что микроповрежденность в композите возникает в результате прогрессирующих случайных разрушений полимерной матрицы при монотонно возрастающей внешней нагрузке.

Для модельной структуры порами будем называть компонент структуры композита с аномально низким модулем упругости; под микроповреждениями – вновь образованные дефекты, возник-

шие в результате отдельных актов разрушения полимерной матрицы между частицами наполнителя.

Исходную пористость, определяемую как отношение совокупной площади пор A_p к площади полимерной матрицы A_m , получали в результате действия термических напряжений в компонентах модельной структуры. Исходная пористость для 2 и 3 варианта структуры составляла $\approx 2\%$ объема.

Рассматривали 3 варианта структуры композита: 1 – структура исходная не напряженная; 2 – структура с заданной пористостью; 3 – структура с заданной пористостью и остаточными напряжениями, которые возникли после охлаждения на 100°C .

Напряженное и деформированное состояние элементов структуры фрикционного композита рассчитывали с использованием метода конечных элементов, реализованного в программе ANSYS. Для этого модельное поле разбивали на конечные элементы (использовался изопараметрический 6-узловой конечный элемент) с общим числом более 50 тыс. При этом плотность конечно-элементной сетки изменялась в зависимости от взаимного расположения кругов.

Алгоритм описания процесса возникновения и распространения микротрещин заключается в следующем: в каждом элементе по критерию наибольших относительных удлинений проверяли условие прочности. Если в каких-либо элементах это условие не выполнялось, то в этих элементах вводили «повреждения» (т. е. задавали нулевые значения модулей Юнга) и затем вновь рассчитывали напряжения и деформации для всего модельного поля при той же исходной нагрузке. Эту операцию пересчета повторяли до тех пор, пока приращение доли поврежденных элементов не прекращалось. Таким же образом задавали исходную пористость.

За достигнутый при данной нагрузке уровень микроповрежденности (M) принимали относительную долю площади «разрушенных» элементов. Поскольку «разрушались» только элементы связующего, то эту долю рассчитывали как условную, т. е. от-

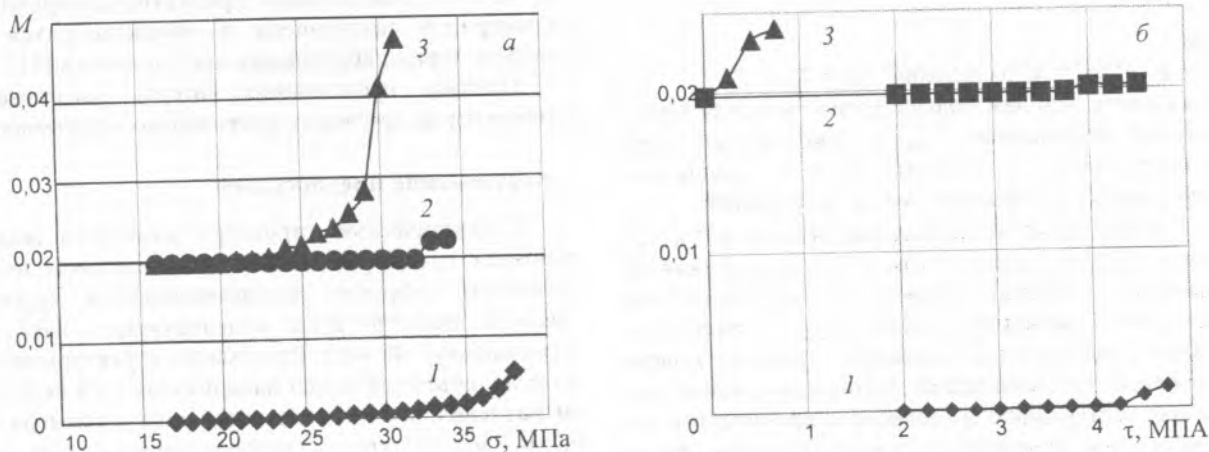


Рис. 1. Диаграмма микроповрежденности при сжатии (а) и сдвиге (б) в исходном ненапряженном состоянии (1), при наличии дефектов типа пор (2) и температурных напряжений (3)

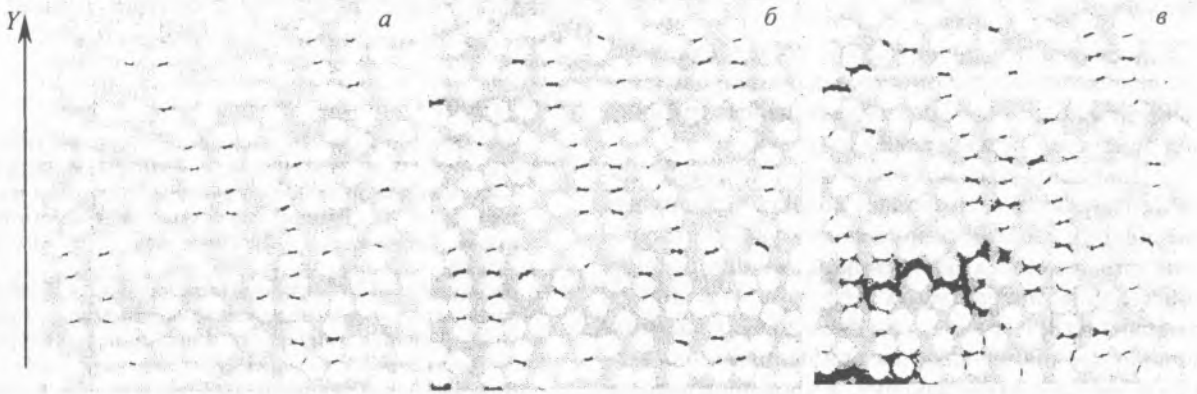


Рис. 2. Схематическое изображение кинетики накопления микроповреждений и разрушения при растяжении в направлении оси Y

несенную к площади модельного поля, занятой связующим. В результате получали диаграммы микроповрежденности – зависимости доли площади разрушенных элементов от внешней нагрузки (рис. 1).

Обсуждение результатов расчета

В результате расчетов установлено, что накопления поврежденности композита при увеличении нагрузки до некоторого критического значения характеризуется малыми скоростями (рис. 1). Перераспределение напряжений, вызванное накопленной поврежденностью материала матрицы, создает неустойчивость, проявляющуюся в появлении трещины или волны напряжений, приводящих к фактически мгновенному нарушению сплошности композита. Показано, что поры зарождаются, как правило, на границах раздела фаз при нарушении адгезионного взаимодействия в системе наполнитель-матрица. Высокие локальные напряжения инициируют процесс зарождения пор и способствуют их последующему росту и объединению (рис. 2, а–в). Рост образовавшихся или возникновение новых пор носит случайный характер и зависит от взаимного расположения частиц, в частности, расстояния между близлежащими частицами. Максимальные деформации достигаются на некотором расстоянии от вершины трещины в направлении ее распространения, причем это расстояние связано с раскрытием вершины трещины. Таким образом, механизм разрушения композита заключается в образовании во фронтальной области трещины цепочки постепенно растущих и сливающихся с трещиной пор, что соответствует существующим представлениям о разрушении хрупких тел [7–10].

Установлено, что первые микроповреждения для моделируемой структуры появляются при растягивающих напряжениях 5–10 МПа, т. е. при напряжениях в 2–4 раза меньше разрушающих. Заметный рост микроповреждений начинается при напряжениях выше 10 МПа. Уровень микроповреждений, соответствующий началу разрушения составляет 0,2–0,5% объема композита. При действии сжатия значение напряжений, соответствующее заметному росту микроповреждений соответствует 25–30 МПа (рис. 1, а). При дости-

жении нагрузки в 35 МПа достигается предельная скорость роста пор, при этом дальнейшее увеличение нагрузки ведет к разрушению.

Микротрещины в процессе формирования структуры образуются как вокруг дисперсных частиц вследствие различия теплофизических свойств составляющих композит веществ, так и в матрице между частицами наполнителя вследствие возникновения областей с высокой концентрацией локальных напряжений. Образовавшиеся микротрещины, как и поры, не передают напряжения и способствуют снижению модуля упругости и увеличению податливости материала [10].

Анализ микроструктуры композитов с пористостью показывает, что степень реализации в них средней прочности уменьшается с ростом длины пор и их содержания. Наибольшую опасность представляют вытянутые поры, длина которых превышает критический размер частиц наполнителя в композиции (рис. 2, в).

Влияние пористости на снижение прочности композитов зависит от вида их напряженного состояния. В наибольшей степени оно сказывается на сопротивлении материалов сдвиговым нагрузкам, особенно при наличии остаточных напряжений, в меньшей степени – на сопротивление сжимающим и растягивающим нагрузкам (рис. 1).

Диаграммы деформирования, полученные на основе анализа макроскопических напряжений, свидетельствуют о возможности хрупкого разрушения моделируемой структуры и являются характерными для микронеоднородных тел. Их нелинейность при напряжениях близких к разрушающим обусловлена дополнительной деформацией в результате микроповреждений элементов структуры. Анализ полученных кривых деформирования композита при растяжении и сжатии до момента разрушения показывает, что линейная зависимость между напряжением и деформацией сохраняется только на начальных участках кривых до уровня напряжений 50–70% от разрушающего напряжения. Для всех расчетных случаев нагружения при сдвиге диаграмма τ - γ линейна.

Заключение

В результате проведенных исследований установлены закономерности перераспределения напряжений с учетом развивающейся трещины под действием приложенной нагрузки.

Показано, что искусственное создание пористой структуры, позволяет создать условия для диссипации энергии разрушения и увеличить уровень приложенных напряжений, инициирующих образование необратимых дефектов (трещин) и разрушения материала, при этом начальные микроповреждения появляются при напряжениях в 2–3 раза меньше разрушающих, а уровень микроповреждений, соответствующий началу разрушения составляет 0,2–0,5% объема. Установлено, что начальная пористость связующего в пределах 2% объема не оказывает существенного влияния на разрушающую внешнюю нагрузку.

Обозначения

D – матрица упругости; ε – вектор полных деформаций; ε^{th} – вектор термических деформаций; ε^{el} – вектор упругих деформаций; $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ – коэффициенты линейного теплового расширения

в направлении осей X, Y, Z , соответственно; τ – касательное напряжение; γ – угол сдвига.

Литература

1. ANSYS Theory Reference. Ninth Edition. SAS IP Inc. (1997)
2. Сергиенко В. П., Ткачев В. М., Столяров А. И., Жук В. В. Численное моделирование напряженного состояния тормозного диска. Ч.1. Влияние конструкции и технологических режимов изготовления // Трение и износ, 21 (2000), № 3, 285–290
3. Виноградов В. М. Остаточные напряжения в деталях из пластических масс // Пластические массы (1974), № 4, 20–31
4. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / Под ред. А. В. Чичинадзе. М.: Центр «Наука и техника» (1995)
5. Волков С. Д., Ставров В. П. Статистическая механика композитных материалов. Мн.: Изд-во БГУ им. В. И. Ленина. (1978)
6. Гленн К. Граймс, Лоуэлл Ф. Берт. Расчет концентраторов, кромоочных эффектов и соединений. В кн.: Анализ и проектирование конструкций / Под ред. К. Чамиса. М.: Машиностроение (1978), 139–214
7. Вычислительные методы в механике разрушения / Под ред. С. Атлури. М.: Мир (1985)
8. Поль Б. Макроскопические критерии пластического течения и хрупкого разрушения. В кн.: Разрушение / Под ред. Г. Лябовица. М.: Мир (1975), 336–520
9. Чамис К. В кн.: Композиционные материалы. Т. 5. Разрушение и усталость. М.: Мир (1978), 106–166
10. Ленг Ф. Ф. Разрушение композитов с дисперсными частицами в хрупкой матрице. В кн.: Композиционные материалы. Т. 5. Разрушение и усталость. М.: Мир (1978), 11–57

Stolyarov A. I.

Simulation of destruction process of porous frictional composites on polymer matrix base.

Destruction kinetics of composite materials with a polymer matrix has been studied. The stressedly-deformed state of the model structure of composite material is calculated based on a developed algorithm for describing processes of microcrack initiation and propagation. Effect of initial porosity and residual stress on the composite strength is analysed.

Поступила в редакцию 12.01.2001.

© А. И. Столяров, 2001.