

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ЗАРОЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ МИКРОТРЕЩИН ВО ФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИТАХ

В.П. Сергиенко*, В.М. Ткачев**, А.И. Столяров**

Рассматривается модель стохастической структуры композиционного материала, содержащего n -компонент. Приводятся результаты расчетов напряженно-деформированного состояния многокомпонентных фрикционных композитов. Обсуждаются закономерности образования микротрещин, их роста и механизмы разрушения композитов с пористой структурой при воздействии эксплуатационных нагрузок.

Введение

Раскрытие механизма трения и износа по существу сводится к решению задачи о прочности, точнее, о разрушении поверхностных слоев твердых тел. Состав материалов трущихся тел, их структура и свойства играют определяющую роль в развитии процессов изнашивания. Сложность явлений, протекающих на фрикционном контакте, заключается в многообразии внешних и, в первую очередь, механических воздействий на трущиеся объекты, и без учета картины напряженного состояния трущихся тел не позволяют эффективно решать проблему на материаловедческом уровне [1].

Одним из перспективных направлений в конструировании безасбестовых фрикционных композитов с полимерной матрицей, передающих или поглощающих высокие кинетические энергии движущихся машин, является создание капиллярно-пористой структуры материала за счет введения ингредиентов со сходной структурой или путем использования порообразователей. Пористая структура композитов способствует снижению тепловой напряженности узла и позволяет стабилизировать фрикционно-износные характеристики композитов за счет поглощения продуктов деструкции полимерного связующего и образовавшихся в процессе трения абразивных частиц износа [2]. Поэтому представляло интерес исследовать влияние пор на прочность и износостойкость фрикционных материалов.

Постановка задачи и метод решения

Модель стохастической структуры композита представлена в виде квадратной ячейки со стороной a , содержащей n -компонент в виде расположенных на плоскости непересекающихся кругов со случайными радиусами, распределенными по нормальному закону. Число используемых в расчетах кругов - около 200; коэффициент вариации диаметров - 10%; степень заполнения - 50% объема. Микроповреждения задавали как области с нулевыми модулями упругости. Значения постоянных упругости и характеристик прочности компонентов являются известными величинами для данного класса композитов.

Напряженное и деформированное состояние элементов структуры рассчитывали по методу конечных элементов. Общее число элементов - более 35000. Рассматривали исходное ненапряженное состояние элемента структуры (I) и исходное состояние после охлаждения на 100 К с прорелаксировавшими (II) и остаточными напряжениями (III). Для II и III вариантов

* Институт металлополимерных систем им. В.А. Белого Академия наук Беларуси, 246650, г. Гомель, ул. Кирова 32-а

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

расчетов исходную микроповрежденность, определяемую как отношение площади дефектов A_d к площади матрицы A_m , получали в результате действия термических напряжений в компонентах. Исходная микроповрежденность для II, III типа нагружения составляла ~2% объема. Предполагается, что микроповрежденность в композите возникает в результате прогрессирующих случайных разрушений полимерной матрицы при постепенно возрастающей нагрузке. Алгоритм описания процесса возникновения и распространения микротрещин основан на критерии максимальных деформаций. Нагружение задавали как одноосное растяжение, одноосное сжатие и чистый сдвиг. На каждой ступени нагрузки рассчитывали напряжения и деформации в компонентах, а также макроскопические (средние по модельному полю) напряжения и деформации.

Обсуждение результатов

На Рис.1 представлена диаграмма микроповрежденности. 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. Кривые деформирования композита перед разрушением для расчетных лучаев имеют следующий вид:

I - при растяжении и сжатии имеют незначительную нелинейность;

II - растяжение не линейно, сжатие линейно;

III - сжатие обнаруживает нелинейность и сравнительно большую деформацию полимерной матрицы.

Важно отметить, что вид диаграммы σ - ϵ при сжатии существенно зависит от материала матрицы. Показано, что существенное различие жесткости наполнителей материала матрицы влечет за собой развитие высоких локальных концентраций напряжений в матрице. Первоначальное повреждение (т.е. превышение максимальных деформаций ϵ_1 значений предельных $\epsilon_{пр}$) происходит в локальной зоне между близко расположенными частицами наполнителя, причем при значениях приложенных напряжений меньше разрушающих.

Наличие в структуре пор при действии нагрузки приводит к перераспределению напряжений в композите. Рост образовавшихся или возникновение новых пор носит случайный характер и зависит от взаимного расположения частиц, в частности расстояния между близлежащими частицами. Уменьшение этого расстояния в направлении приложенной нагрузки приводит к увеличению локальных концентраций напряжений и, как следствие, к последующему росту объема пор.

Процесс накопления поврежденности до некоторого значения нагрузки идет достаточно медленно (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. Обнаружено, 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). 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.

При наполнении композитов мелкодисперсными частицами практически нельзя избежать образования пор [3]. Это особенно заметно для композитов, содержащих частицы

малого размера с объемным содержанием больше 30%, что является характерным показателем для фрикционных материалов с полимерной матрицей. Матрица и частицы наполнителя имеют различные тепловые расширения, что в процессе охлаждения ниже температуры изготовления композита вызывает возникновение остаточных термических напряжений в окрестностях дисперсных частиц. Теоретически показано, что величина и распределение этих напряжений не зависят от размера частицы, а определяются, в первую очередь, различием в тепловом расширении, упругими свойствами фаз и величиной изменения температуры [4]. 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, вследствие чего способствуют снижению модуля упругости и увеличению податливости материала.

Заключение

Таким образом, введение порообразующих компонентов для достижения локализации остаточных термических напряжений может оказаться полезным в полимерных фрикционных композитах для увеличения уровня приложенных напряжений, приводящих к появлению псевдопор, образующихся вследствие нарушения адгезионного соединения связующего и наполнителей. Это снижает вероятность возникновения слабых граничных слоев, обуславливающих увеличенный износ фрикционных композитов.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов Основы расчетов на трение и износ. Москва, «Машиностроение», (1977)
2. Основы трибологии (трение, износ, смазка) /Под ред. А.В. Чичинадзе. Москва: Центр «Наука и техника», (1995)
3. Cohen L.J., Ishai O., J. Compos. Mater., 1, 390 (1967)
4. Selsing J., J. Amer. Ceram. Soc., 44, 419 (1961)

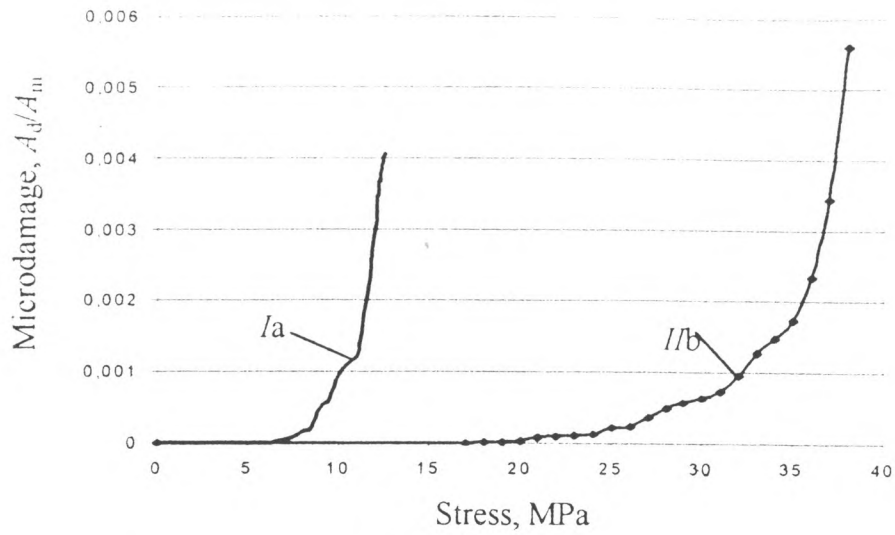
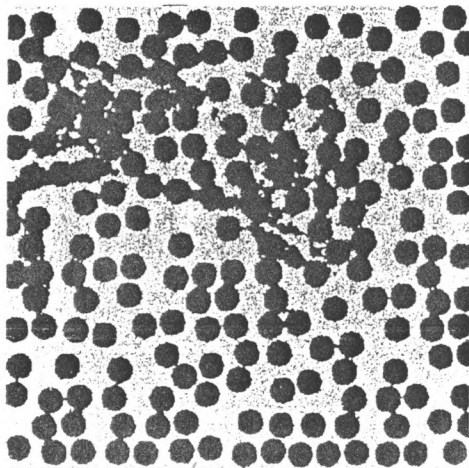
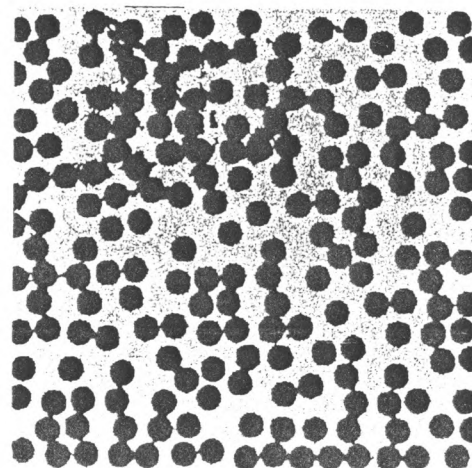


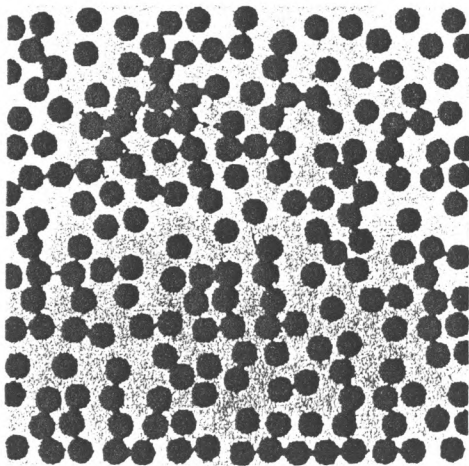
Рис. 1 Зависимость микроповрежденности от растягивающих (а) и сжимающих (б) напряжений
 Fig. 1. Microdamage dependence on tensile (a) and compressive (b) stresses



a



b



c

Рис. 2 Состояние структуры композита на последнем шаге нагружения (сжатие), предшествующем разрушению: а – модель I, б – модель II, с – модель III

Fig. 2 State of composite structure at the last step of loading (compression) preceding failure: a – model I; b – model II; c – model III