

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ВОЛОКОН АЛЮМИНИЕВОГО КОМПОЗИТА

Кочкина Г.В.,

научный руководитель д-р техн. наук, проф. Крушенко Г.Г.

Сибирский государственный аэрокосмический университет

Материал, полученный с помощью запатентованной технологии, представляет собой композит, полученный прессованием композиции, состоящей из частиц алюминия или алюминиевых деформируемых сплавов и нанопорошков (НП) высокопрочных химических соединений. Данный материал имеет структуру в виде протяженного профиля разного сечения с волокнистой структурой и повышенными механическими свойствами (рис. 1). Прутки, полученные таким способом, имеют тонкостенную оболочку и внутреннее волокнистое строение. Механические свойства композита выше, чем у материалов полученных таким же образом, но без использования нанопорошков.

Но в отличие от существующих волокнистых композитов рассматриваемый материал не имеет матрицы. Ее роль выполняет взаимодействие волокон по боковым поверхностям. Нагрузка перераспределяется за счет сил трения от разрушенного волокна на соседние волокна. И если рассматривать данный композит как состоящий только из одних волокон, то его прочность должна превышать прочность пучка не взаимодействующих по боковым поверхностям волокон.

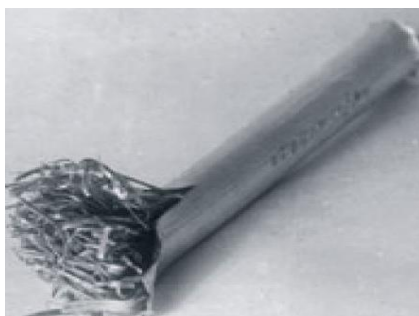


Рис. 1. Композит, отпрессованный из гранул сплава АД и нанопорошка карбонитрида титана TiCN

Частицы НП обладают значительно более высокой твердостью, чем алюминиевый сплав. Поэтому в процессе деформирования они внедряются в поверхность алюминиевых волокон, в результате чего образуется механическое соединение соседствующих волокон по граничащим поверхностям.

Структура композита была исследована с помощью оптического микроскопа на прутке 9,5 мм, отпрессованном из гранул деформируемого сплава АД и НП карбонитрида титана TiCN (до 1,0%). Пруток содержит тысячи волокон, длина которых достигает нескольких сантиметров. Волокна композита в осевом направлении имеют форму сильно вытянутого эллипса. В поперечном сечении волокна имеют сложную геометрию, поэтому наиболее близкой аппроксимацией по форме является прямоугольник (рис. 2).

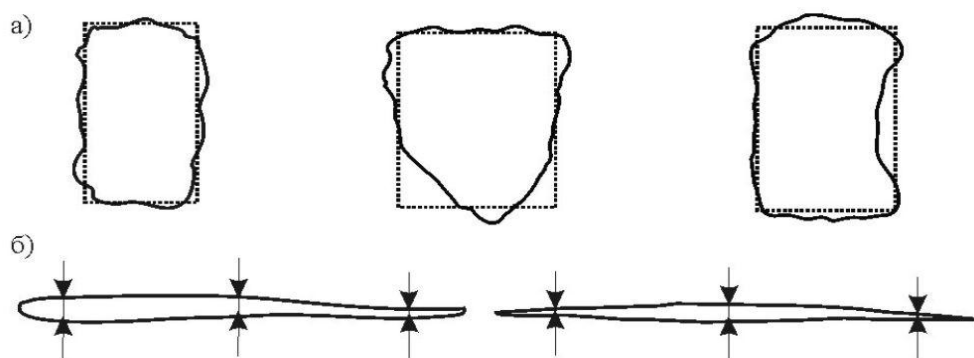


Рис. 2. Типичная форма алюминиевых волокон металлокомпозита

Прочностные характеристики волокон в пучках имеют существенный статистический разброс, влияющий на свойства композитов, получаемых на их основе. Это приводит к необходимости оценивать параметры распределений прочности волокон по результатам их массового испытания. Кроме того, испытания, связанные с извлечением отдельных волокон, не позволяют оценить те влияющие на поведение композита свойства, которые присущи пучку в целом. К таким свойствам относятся неодновременность вступления в работу волокон (разнодлинность), а также статистически значимое различие параметров распределения прочностных характеристик волокон при переходе от одного пучка к другому. Разнодлинность волокон объясняется вариацией размеров гранул исходного материала и неоднородным деформированием при экструзии.

Для оценки прочности волокнистого композита в работе применяли модель глобального распределения нагрузки (ГРН), модель локального распределения нагрузки (ЛРН) использовали для оценки влияния распределения нагрузки только на соседние волокна, а также для предсказания разрушения однонаправленных волокнистых композитов применяли модель накопления локальных повреждений (НЛП). Для сравнения результатов расчета использовали модель разрушения, рассматривающую материал, как пучок несвязанных волокон (ПНВ). Расчеты по модели ГРН дали верхнюю оценку прочности композита, а по модели ПНВ – нижнюю. Модели ГРН, ЛРН и НЛП демонстрируют зависимость прочности от степени сцепления волокон. В результате было установлено, что:

- увеличение длины образца ведет к снижению прочности композита, однако, это в большей степени относится к прочности волокна и объясняется эффектом резервирования прочности, определяемым разбросом свойств тонких волокон и возможностью структуры композита распределять напряжения от «слабых» мест на более прочные объемы материала;
- прочность образцов композита больших размеров в основном определяется средним значением прочности волокон;
- степень взаимодействия боковых поверхностей волокон оказывает существенное влияние на прочность композита, при этом при ее возрастании относительное увеличение прочности не зависит от размера образца (числа структурных элементов).

В данной работе предлагается оценить материал на прочность с точки зрения пористой структуры. Механические свойства пористых металлокомпозитов тесно связаны с пористостью и размером пор, их формой и распределением. Зависимость механических свойств от пористости выражена эмпирически в уравнениях Гибсона-Эшби:

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{n_1} \quad (1)$$

$$\frac{\sigma^*}{\sigma_s} = C_2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{n_2} \quad (2)$$

где E , σ и ρ обозначают модуль упругости, прочности и плотности, соответственно. Индекс «*» обозначает пористый материал, и индекс «s» обозначает плотный материал. C_1 и C_2 – постоянные, связанные с материальными и экспериментальными условиями. n_1 и n_2 – экспоненты, связанные с пористой структурой. Из (1) и (2) следует, что прочность и модуль упругости пористых материалов уменьшается с увеличением пористости. Противоречие заключается в том, что низкий модуль упругости соответствует низкой прочности.

Пористость может быть получена непосредственно по формуле:

$$P = \left(1 - \frac{M}{V\rho_s} \right) \times 100\% \quad (3)$$

где M – масса образца, V – объем образца; ρ_s – плотность волокна, г/см³. Для того, чтобы определить размер пор количественно, эквивалентный диаметр пор определяется как промежуток между волокнами. Измерения могут быть выполнены под оптическим микроскопом с помощью программного обеспечения Image Pro Discovery. Таким образом, распределение размеров пор определяется с помощью математической статистики измерений.

Макроскопическое изображение волокон композита показано на рис. 3.

Волокна металлокомпозита являются своего рода пористыми металлами, их механические свойства сильно зависят от пористости. Из (1-2) следует:

$$\frac{E^*}{E_s} \approx \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (4)$$

$$\frac{\sigma^*}{\sigma_s} = 0,3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

Уравнения Гибсона-Эшби были получены из простого соотношения напряжений с учетом открытой клеточной структуры под давлением, как показано на рис. 4 (а). Эти соотношения также применимы для линейной упругой стадии для большинства пористых материалов при растяжении. Для нелинейной упругой стадии установлено изменение соотношений с учетом значения деформаций и оси вращения для одноосного растяжения, как показано на рис. 4 (б):

$$\frac{\sigma^*}{E_s} = 1,1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \varepsilon + 3,74 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \varepsilon^2 + 0,0343 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \varepsilon^3 \quad (6)$$

Для волокон металлокомпозита структура пор может быть упрощена до 2D клетки, которая состоит из отрезков волокна вдоль различных направлений и точек пересечения, как показано на рис. 4 (в). Сегменты волокна, как правило, изогнутые и точки пересечения могут быть свободными или фиксированными в зависимости от спекания. При низких напряжениях упругая деформация может вызывать отклонения сегментов волокна, если все точки зафиксированы. В этом случае материал будет иметь относительно высокую жесткость и высокую текучесть. Если все точки пересечения свободны (незафиксированы), структура будет очень гибкой, поскольку трение может быть вызвано при очень низких напряжениях. В таком случае материал будет обладать

очень низкой жесткостью и низким пределом текучести. Хотя сложно посчитать процентное отношение зафиксированных и незафиксированных точек пересечений, можно утверждать, что зафиксированные точки являются доминирующими при низкой пористости и незафиксированные точки будут преобладать при высокой пористости.

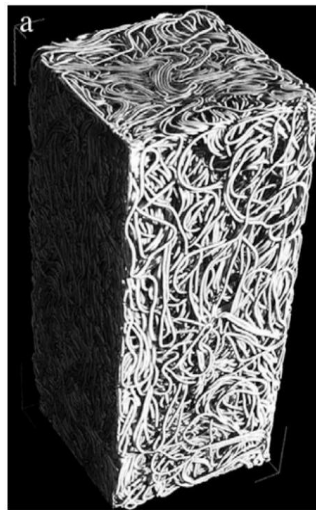


Рис. 3. Томографическое изображение волокон металлокомпозита

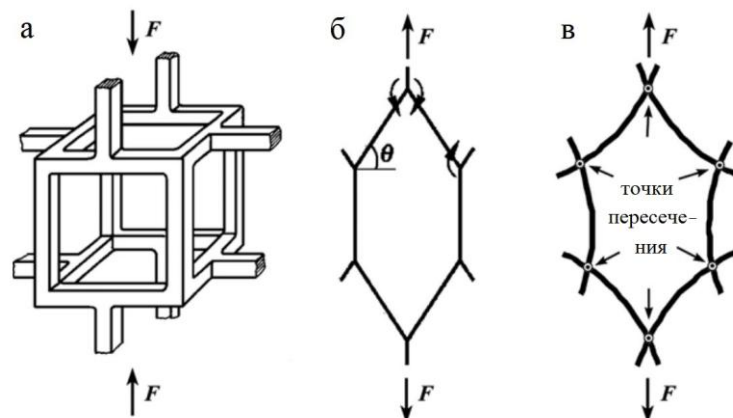


Рис. 4. Упрощенная структурная модель пористого материала: модель линейной упругой структуры (а) [3], модель нелинейной упругой структуры при растяжении (б), модель трения-скольжения волокон материала при растяжении (в)

Это несложно установить, потому что волокна в точках пересечения компактных материалов имеют более высокие локальные напряжения, которые возникают в процессе спекания. И, наоборот, в материалах с высокой пористостью формирование соединений в процессе спекания затруднено из-за небольших локальных напряжений в поперечном направлении. Учитывая 2D-структуру, волокна будут вести себя как с открытыми порами, если все точки пересечения идеально зафиксированы и эта фиксация достаточна крепкая, не будут разрушаться до разрушения материала. Учитывая 3D-структуру, такие сильные зафиксированные точки пересечения могут вести себя подобно фермам, и материал будет иметь гораздо более высокую прочность и жесткость, чем пенометаллы.