

Покрyтия из оксидов алюминия и циркония, нанесенные из жидкой фазы, также показали наличие защитных свойств. Кроме того, следует отметить, что по сравнению с напылением покрyтий в вакууме нанесение их из жидкой фазы является более технологичным процессом. Двумя основными недостатками этого процесса на данном этапе являются снижение прочности волокон (влияние эффекта Ребиндера) и нарушение сплошности покрyтия при слипании волокон и механическом манипулировании с ними. Первый недостаток в большей степени зависит от наличия дефектов на поверхности волокна, а второй – от технологии нанесения покрyтий.

Необходимо отметить, что наилучшие результаты получены при пропитке металлом с относительно небольшой температурой и при медленном остывании (700°С, охлаждение на воздухе).

Дальнейшие исследования планируется проводить в направлении усовершенствования технологии нанесения покрyтий и уменьшения дефектов волокон.

*Б.В. Щетанов, Т.М. Щеглова,  
Е.В. Тинякова, В.Г. Максимов*

## **ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ЖЕСТКОГО ВОЛОКНИСТОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО КАРКАСА**

Целью данной работы является изучение характера разрушения при сжатии жесткого волокнистого пространственного каркаса (ЖВПК) из дискретных волокон, в частности алюмосиликатных, скрепленных в местах контакта связующим. Дискретные алюмосиликатные волокна имеют диаметр 1–5 мкм при длине 100 мкм и более. Количество вводимого связующего для ЖВПК с низкой плотностью предельно мало, в ЖВПК с плотностью выше 0,8 г/см<sup>3</sup> связующее присутствует в значительном количестве и, кроме основной функции, играет роль наполнителя.

Изучение механических характеристик ЖВПК различной плотности из дискретных алюмосиликатных волокон проводили на установке для механических испытаний Instron 1195 при скорости движения захвата 2 мм/мин. В этих испытаниях образцы представляют собой куб со стороной ~20 мм (размеры проверяют штангенциркулем с точностью 0,01 мм) и с фиксированным направлением вектора силы тяжести при формовании. За значение нагрузки разрушения принимали величину, соответствующую перегибу на кривой деформация–нагрузка. При дальнейшем увеличении нагрузки начинаются хрупкое разрушение индивидуальных дискретных волокон каркаса и стадия неупругой деформации каркаса в целом.

Следует отметить, что материалы ЖВПК из алюмосиликатных волокон в диапазоне плотностей 0,15–0,8 г/см<sup>3</sup> (при отношении длины волокна к его диаметру  $l/d \approx 100 \div 50$ ) обладают сильно выраженной анизотропией свойств, обусловленной наличием преимущественной ориентации укладки волокон в процессе вакуумного формования. При этом различают «сильное» и «слабое» направления, соответственно перпендикулярное и параллельное вектору силы тяжести в процессе формования.

Для материалов из дискретных волокон Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> с плотностью 0,9 г/см<sup>3</sup> и выше (низкое значение  $l/d < 30$ ) анизотропия свойств выражена не столь явно.

С учетом вышесказанного, все испытания проводили на образцах, ориентированных как в «сильном», так и в «слабом» направлении, причем следует отметить, что полученные значения различались в 2–3 раза.

Прочность ЖВПК при сжатии  $\sigma_{сж}$  определяли как отношение  $P/S$ , где  $P$  – нагрузка, соответствующая перегибу на диаграмме разрушения (рис. 1),  $S$  – площадь поперечного сечения образца. Отметим, что для ЖВПК существенная доля площади приходится на поры между волокнами.

Известно, что каждому значению плотности соответствует определенная доля объемного содержания волокон  $V$ . В случае алюмосиликатных волокон, их объемная доля равна  $0,3125\rho$ , где  $\rho$  – плотность каркаса. Исходя из объемной доли волокон можно оценить долю содержания волокон в сечении образца:  $\zeta_{\text{плоскость}}=V^{2/3}$ . Для последующих рассуждений удобно ввести понятие приведенной прочности:  $\sigma_{\text{пр}}=\sigma_{\text{сж}}/\zeta_{\text{плоскость}}=P/S_{\Sigma}$  ( $S_{\Sigma}$  – суммарная площадь волокон в поперечном сечении образца ЖВПК. Отметим, что значение  $\sigma_{\text{сж}}$  берется в «сильном» направлении).

Авторами проведены испытания прочности при сжатии нескольких образцов волокнистого каркаса с различной плотностью, изготовленных из дискретных алюмосиликатных волокон одной партии при использовании одного связующего (волокна  $\text{SiO}_2+\text{B}$ ), термообработанных при  $1400^\circ\text{C}$  в течение 1 ч. Результаты экспериментов и расчетные значения приведенной прочности приведены в таблице и на графиках (рис. 2).

### Зависимость приведенной прочности от плотности ЖВПК

$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_{\text{сж}}$ , МПа	$V$	$\zeta_{\text{плоскость}}$	$\sigma_{\text{пр}}$ , МПа
0,3	0,77	0,0937	0,2063	3,73
0,34	1,18	0,1062	0,2243	5,26
0,52	2,02	0,1625	0,2978	6,78
0,8	3,72	0,2500	0,3969	9,37
0,78*	4,89	0,2437	0,3901	12,54
0,95**	5,04	0,2968	0,4449	11,33

\* Термообработка при  $T=1600^\circ\text{C}$ .

\*\* Связующее выполняет роль наполнителя.

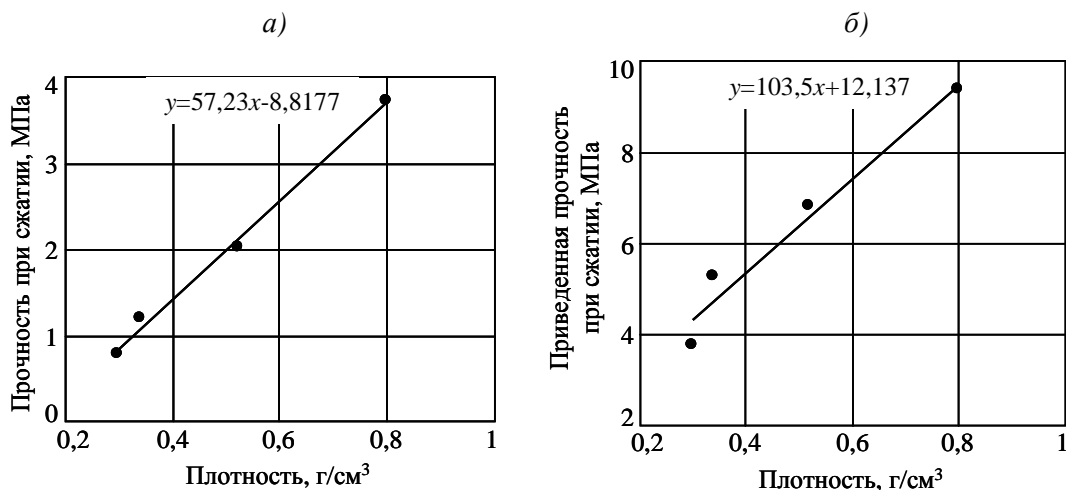


Рис. 2. Влияние плотности ЖВПК на его прочность при сжатии (а) и приведенную прочность при сжатии (б)

Значения прочности образцов, отмеченных в таблице звездочками, существенно превышают ожидаемые значения (см. рис. 2). Для образца, термообработанного при  $1600^\circ\text{C}$  ( $\rho=0,78$  г/см<sup>3</sup>) прочность ЖВПК равна 4,89 МПа, приведенная прочность 12,54 МПа, для образца с плотностью 0,95 г/см<sup>3</sup> эти значения равны соответственно 5,04 и 11,33 МПа –

правда, данный материал нельзя уже в полной мере отнести к разряду волокнистых, поскольку, как уже отмечалось, связующее частично играет в нем роль наполнителя.

Отмеченный рост приведенной прочности при испытании на сжатие как при повышении температуры спекания материала (хотя при этом, вероятно, происходит одновременное снижение прочности самих волокон из-за роста зерна), так и с увеличением плотности материала (что сопровождается увеличением числа контактов между волокнами и, соответственно, уменьшением протяженности волокна между контактами), свидетельствует об особенностях деформации волокнистого каркаса. Рассмотрим эти особенности на приближенной модели разрушения – сжатие каркаса из жестких стержней\*.

При сжатии каркаса из жестких стержней разрушение будет происходить вследствие изгиба стержня и потери его устойчивости.

Для стержней, испытывающих нагрузку изгиба, при повышении жесткости заделки концов увеличивается их несущая способность (в пределе – до 2 раз). Соответственно этому, в экспериментах авторов отмечено существенное увеличение значения приведенной прочности при улучшении спекания в узлах каркаса благодаря отжигу при более высокой температуре. Для образцов практически одинаковой плотности при повышении температуры термообработки с 1400 до 1600°C приведенная прочность увеличилась более чем на 30%. Таким образом, можно сделать вывод, что основную роль в повышении прочности при сжатии жесткого волокнистого каркаса (при данной плотности) играет прочность связи волокон в местах контакта.

Устойчивость сжатого стержня прямо пропорциональна его модулю упругости  $E$  и обратно пропорциональна квадрату длины  $L$ :  $P = \pi^2 EJ/L^2$ , где  $J$  – минимальный момент инерции сечения стержня (определяется геометрией его сечения). Подобная зависимость также согласуется с результатами данной работы – рост приведенной прочности при увеличении плотности волокнистого каркаса (т. е. при уменьшении протяженности длины волокон ( $L$ ) между контактами). При увеличении плотности ЖВПК от 0,3 до 0,8 г/см<sup>3</sup> приведенная прочность возрастает в 2,5 раза.

Из приведенных рассуждений следует, что нагрузка разрушения при сжатии жесткого волокнистого каркаса определяется сопротивлением дискретных волокон изгибу и потере устойчивости.

*А.А. Шавнев, Ю.А. Абузин, В.Н. Кочетов*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ БОРАЛЮМИНИЕВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА И ЕГО ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ С ТИТАНОМ**

Современный путь создания конкурентоспособных экономичных двигателей предусматривает разработку, создание и эксплуатацию двигателей с большой степенью двухконтурности, с диаметром вентилятора, превышающим два метра. При таких размерах вентилятора, лопасти, изготовленные из высокопрочных титановых сплавов, под действием центробежных сил «раскручиваются» и теряют свои аэродинамические характеристики. Это обстоятельство существенно ограничивает возможности их широкого использования.

Для обеспечения жесткости и «отстройки» от опасных частот, лопасти из полимерных композиционных материалов более перспективны. Уже в настоящее время при

---

\* Беляев Н.М. Сопротивление материалов.– М.: Изд-во физ.-математ. лит., 1962, с. 619–626.