

А.С. ПЕТРОСЯН

АРМИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Дается сравнительный анализ композиционных материалов на металлической основе, армированных дисперсными частицами и высокомодульными волокнами. Обосновывается целесообразность компактирования армированных материалов горячей экструзией, при которой деформация волокон (удлинение) положительно влияет на их структуру и свойства. При объемной доле волокон 20....25% достигается максимальная прочность, тогда как при обычных методах компактирования порошково-волокнистых композиций объемное содержание волокон составляет 35....45%.

Ключевые слова: композиционные материалы, дисперсные частицы, металлические волокна, экструзия, удлинение волокон.

Развитие современной техники непосредственно связано с созданием новых материалов, обладающих высокими физико-механическими свойствами [1], в частности, прочностью и пластичностью. Решение этой проблемы можно осуществить двумя принципиально различными путями.

Первый путь - создание структурных барьеров, препятствующих движению дислокаций (наклеп, легирование, термическая и термо-механическая обработка), что достигается посредством введения в металлическую матрицу дисперсных частиц. Однако в этом случае интервал между реальной и теоретической прочностью остается все же большим [2].

Второй путь - упрочнение материалов высокомодульными волокнами, т.е. армирование.

Рассмотрим некоторые особенности структуры и свойств этих материалов.

1. Композиции, упрочненные дисперсными частицами. В композициях, армированных дисперсными частицами, нагрузка распределяется между матрицей и частицами. Объемная доля частиц превышает 20...25%, а их размеры должны быть менее одного микрометра. Упрочнение оценивается отношением расстояния между частицами к их диаметру (L/d_f), а также отношением пределов текучести армированного материала, т.е. композиции, и матричного металла, т.е. $F = \sigma_{yc} / \sigma_{ym}$ (рис. 1). Коэффициент F зависит от концентрации частиц V_p , равномерности их распределения, а также от размера d_p и расстояния между ними λ_p . Чем меньше размеры частиц и расстояние между ними, тем эффективнее они препятствуют движению дислокаций, а

следовательно, упрочняют материал. Это иллюстрируется в левой части рис. 1, где значения коэффициента F показаны в зависимости от d_p .

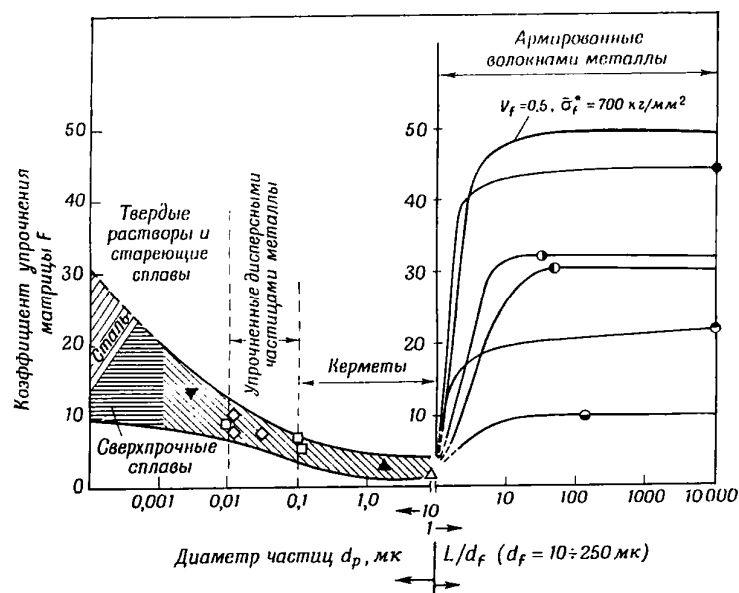


Рис 1. Влияние частиц и волокон на коэффициент упрочнения металлов F при комнатной температуре (сплошные линии – теоретические значения, вычисленные для волокнистых композиций в предположении, что нагрузка приложена вдоль волокон)

На рис. 1 представлены значения F для некоторых дисперсных систем (с интервалом изменения d_p в пределах $0,01 \dots 0,1$ мкм). Хотя размеры частиц и их концентрация для каждого случая различны, тем не менее все соответствующие значения коэффициента F для таких материалов находятся в пределах от 3 до 30. При укрупнении частиц значения F непрерывно уменьшаются, приближаясь к нижнему пределу, лежащему между $F=1$ и $F=3$. Для частиц с размерами d_p от 0,1 до 10,0 мкм величина коэффициента F остается практически неизменной.

Если же частицы приобретают форму волокон, то значения коэффициента F существенно возрастают. Это демонстрирует правая часть рис.1. Анализ показывает, что F зависит от отношения длины волокна к его диаметру L/d_f , а также от прочности волокон $\bar{\sigma}_f$ и объемного их содержания V_f .

Таким образом, металлы, упрочненные дисперсными частицами, во многом отличаются от металлов, армированных волокнами. Некоторые отличия представлены в таблице, из которой следует, что механизм упрочнения материалов дисперсными частицами несколько иной, чем материалов, армированных волокнами [3].

Таблица
Сравнительные показатели материалов, армированных нитевидными волокнами
и дисперсными частицами

Но- мер	Система	V_f , %	$\bar{\sigma}_f$, МПа
<i>Упрочнение волокнами</i>			
1	Al – SiO ₂	50,0	3100
2	Al – Al ₂ O ₃	35,0	3200
3	Ag – Al ₂ O ₃	24,0	6600
4	Cu – W	50,0	2500
5	Al – <i>нерж. сталь</i>	20,0	1500
<i>Упрочнение частицами</i>			
6	Ni – Al ₂ O ₃	10,0	
7	Al – Al ₂ O ₃	13,0	
8	Ag – Al ₂ O ₃	0,8	
9	Ni – ThO ₂	9,0	
10	Ni – Cr ₂ O ₃	8,0	
11	Ni – ThO ₂	2,0	
12	Ni – SiO ₂	21,0	
13	Ni – TiC	70,0	
14	Al – Al ₂ O ₃	8,0	

2. Композиции, армированные нитевидными волокнами. При создании армированных композиций необходимо иметь в виду, что матрица способна передавать полностью нагрузку на волокна только в том случае, если длина волокна (ℓ) больше некоторой критической длины ℓ_c . При $\ell < \ell_c$ разрушение матрицы происходит раньше, чем волокна. Возможно при этом и вырывание волокна. Предел прочности композиций с однонаправленной дискретной структурой определяется следующими выражениями:

$$\begin{aligned}\sigma_b^c &= \sigma_b^m(1 - V_f) + K\beta V_f \sigma_b^f \quad (0 \leq V_f \leq V_c); \\ \sigma_b^c &= \sigma_b^f V_f [1 - K(1 - \beta)] + \sigma_f^m(1 - V_f) \quad (1 \geq V_f \geq V_c); \\ V_c &= \frac{\sigma_b^m - \sigma_f^m}{\sigma_b^m - \sigma_f^m + \sigma_b^f(1 - K)},\end{aligned}$$

где V_f - объемная или массовая доля волокна в композиции; $K = \ell_c / \ell$ - коэффициент передачи нагрузки; β - постоянная, равная 0,5; V_c - критическая объемная доля волокна.

При $V_f < V_c$ разрушение волокон сопровождается деформацией матрицы, при $V_f > V_c$ разрушение композиции происходит практически одновременно с разрушением волокон.

В зависимости от соотношения $K = \ell_c / \ell$ могут быть получены различные диаграммы прочности композиции:

- 1) при $K = 0$ это соответствует композиции с непрерывными волокнами;
- 2) при $K = \sigma_b^m / \beta \sigma_b^f = K_f$ и до значений $V_f = V_c$ предел прочности композиции не зависит от V_f и равен пределу прочности матрицы. Прочность композиции при $V_f > V_c$ увеличивается;
- 3) при $K = 1$, т.е. $\ell_c = \ell$, прочность композиции возрастает во всем интервале значений $0 \dots 1$ с одинаковой интенсивностью.

Зная механические свойства волокна и матрицы, а также задаваясь значениями V_f и K , можно рассчитать прочность композиции.

Прочность композиций с непрерывными волокнами при прочих равных условиях выше прочности композиций с дискретными волокнами (произвольной ориентации). Это объясняется так называемым *концевым эффектом*, т.е. повышенной концентрацией напряжений на торцах волокон. Тем не менее, с точки зрения получения требуемого комплекса физико-механических свойств, композиционные материалы, армированные дискретными волокнами, в ряде случаев более предпочтительны, чем с непрерывными волокнами, например, композиции с нитевидными волокнами (рис. 2 и 3).

Экспериментально установлены закономерности экструзии порошково-волокнистых композиций на модельных образцах в зависимости от соотношения ℓ_0 / d_0 и степени обжатия λ . Режимы экструзии: для медных образцов $t_{\text{ж}} = 850^\circ \text{C}$, для железных $t_{\text{ж}} = 1100^\circ \text{C}$; продолжительность нагрева $\tau_{\text{ж}} \sim 15 \dots 20$ мин. Анализ кривых 1-7 показывает, что с увеличением безразмерного параметра ℓ_0 / d_0 имеет место удлинение волокон в процессе экструзии, т.е. значения ℓ / d возрастают. Примечательно, что для всех значений $\ell_0 / d_0 = 20 \dots 100$ и $\alpha_u = 0 \rightarrow 150^\circ$ наименьшему соотношению $\ell_0 / d_0 = 20$ соответствует $\ell / d \cong 100$. Это дает основание утверждать, что за исходное соотношение ℓ_0 / d_0 можно принять $\ell_0 / d_0 \approx 20$, так как после экструзии оно возрастает и достигает $\ell / d \approx 80 \dots 100$. При таких значениях прочностные свойства максимальные и близки к композиционным материалам с непрерывными волокнами. Вполне очевидно, что чем меньше ℓ_0 / d_0 , тем легче решается вопрос приготовления шихты *порошок-волокно*, так как размеры частиц порошка и длина волокна “соизмеримы”.

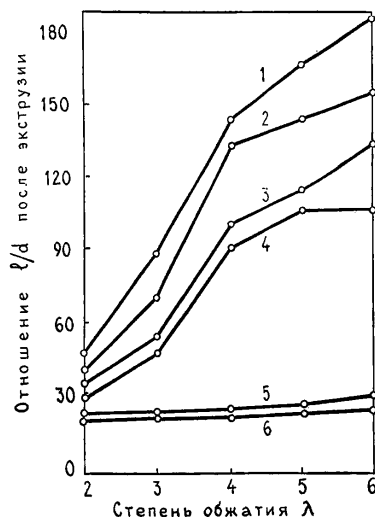


Рис. 2. Удлинение волокон после экструзии при различных степенях обжатия: композиция $\text{Cu} - \text{Fe}^*$, $\ell_0/d_0=20$, $\beta = 60^\circ$, $\alpha_u = 0(1), 30(2), 60(3), 150(4), 120(5)$ и $90(6)$

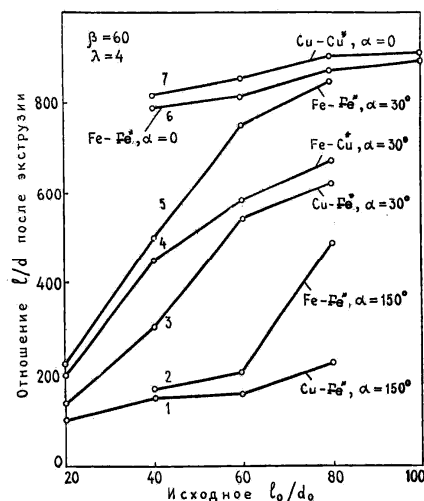


Рис. 3. Модельные композиции после экструзии:

2, 5, 6 - $\text{Fe} - \text{Fe}^*$;
1, 3 - $\text{Cu} - \text{Fe}^*$; 7 - $\text{Cu} - \text{Cu}^*$;
4 - $\text{Fe} - \text{Cu}^*$; $\alpha_u = 0(6,7), 30(3-5), 150(1,2)$; $\beta = 60$, $\lambda = 4$

И еще одна существенная особенность: чем меньше ℓ_0/d_0 , тем легче осуществляется ориентация волокна в направлении экструзии. Это значит, что прочностные свойства композиционного материала возрастут (рис. 4). Наконец, удлинение волокон в процессе экструзии значительно уменьшает диаметр волокон. Это, с одной стороны, увеличивает его прочность, с другой - позволяет использовать проволоки (или нитевидные "усы") больших диаметров, что дешевле, и легче осуществить их мерную резку [4].

Композиционный материал, армированный молибденовой проволокой длиной 2,5...6,5 и диаметром 0,25 мм (матрица - титановый сплав, содержащий 6% Al и 4% V), получали прессованием и спеканием при 980°C в течение 0,5 ч. Заготовки помещали в оболочку из малоуглеродистой стали и при температуре 1150°C экструдировали в прутки диаметром 16...38 мм, которые подвергали горячей прокатке до диаметра 4,8 мм. Затем следовал двухчасовой отжиг при температуре 730°C . В результате такой обработки проволоки вытягивались вдоль оси прутка, причем их диаметр уменьшался от 0,25 до 0,05 мм.

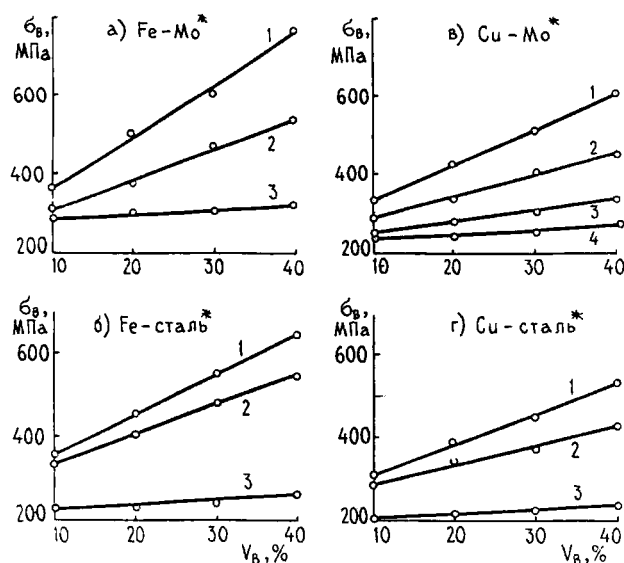


Рис. 4. Зависимость прочности при растяжении композиционных материалов, упрочненных волокнами молибдена и стали 55, от объемного содержания волокон на основе медных и железных порошков марок ПМС-1 и ПЖ2М2:

- а - $\langle \text{Fe} - \text{Mo}^* \rangle$, 1. - 20°C , 2. - 300°C , 3. - 600°C ;
- б - $\langle \text{Fe} - \text{сталь}^* \rangle$, 1. - 20°C , 2. - 200°C , 3. - 300°C ;
- в - $\langle \text{Cu} - \text{Mo}^* \rangle$, 1. - 20°C , 2. - 300°C , 3. - 500°C ; 4. - 600°C ;
- г - $\langle \text{Cu} - \text{сталь}^* \rangle$, 1. - 20°C , 2. - 200°C , 3. - 300°C

Выбор молибдена в качестве волокнистой фазы объясняется тем, что он практически не растворим в титане, и поэтому исключено возникновение хрупких соединений в переходном слое *волокно-матрица*. Предел прочности сплава, содержащего 20 об.% молибденовой проволоки, при 760°C составляет $\approx 300 \text{ МПа}$, тогда как у неармированного сплава - всего лишь 90 МПа (из графика).

Зависимость модуля упругости от объемной доли волокон близка к линейной. Увеличение волокон до 40 об.% повышает почти в 2,0 раза модуль Юнга при комнатной температуре и более чем в 2,5 раза при 540°C по сравнению с неупрочненным сплавом (рис. 5). Установлено также значительное возрастание продолжительности по времени до разрушения технически чистого титана, армированного 10% молибденовым волокном, при испытаниях на длительную прочность. При температуре 540°C и напряжении 140 МПа разрушение этой композиции происходило через $\sim 100 \text{ ч}$, тогда как неармированный титан разрушался через 0,1 ч.

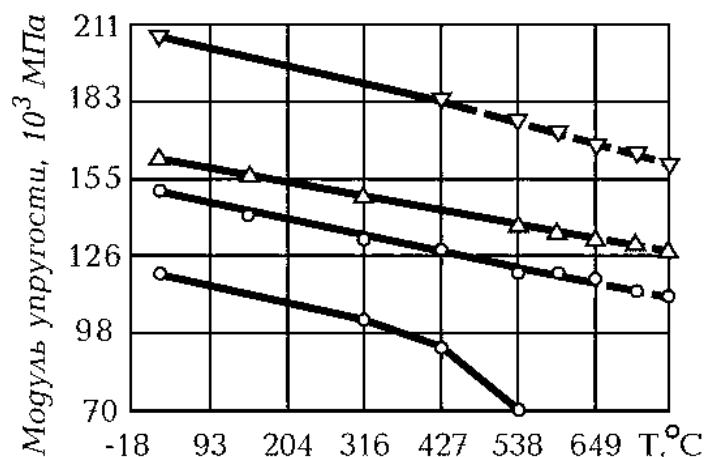


Рис. 5. Температурная зависимость модуля упругости исходного сплава $\langle \text{Ti} - 6\text{Al} - 4\text{V} \rangle$ (1) и сплава, армированного молибденовыми волокнами 20 (2), 30 (3) и 40 (4) об.%

Таким образом, экструзия является наиболее эффективным методом компактирования армированных материалов, при котором деформация волокна (как правило, удлинение) положительно влияет на прочность композиции. В этой связи при объемной доле волокон 20...25% уже достигается максимальная прочность, тогда как при других методах компактирования порошково-волокнистых композиций объемное содержание волокон колеблется в пределах 35...45%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванова И.С.** Волокнистые материалы. Проблемы создания материалов с высоким сопротивлением распространению трещины // Физика и химия обработки материалов. – М., 1967. – №1. – С. 75-88.
2. **Карпинос Д.М., Тучинский Л.И.** Металлы, армированные волокнами (МАН) // Порошковая металлургия. – 1968. – № 7. – С. 37-48.
3. Волокнистые композиционные материалы / Под ред. **С.З. Бокштейна**. – М.: Мир, 1967. – 283 с.
4. **Манукян Н.В., Петросян А.С.** Закономерности экструзии армированных композиционных материалов. 1. Исследование процессов экструзии // Порошковая металлургия. – Киев, 1985. – № 12. – С. 66-70.
5. Металловедение и металлообработка: Экспресс-информация. – 1965. – 14.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 8.06.2001.

Հ.Ս. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

ԿՈՆՍՏՐՈՒԿՑԻՈՆ ՆՇԱՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ԱՄՐԱՆԱՎՈՐՎԱԾ ԿՈՄՊՈԶԻՑԻՈՆ
ՆՅՈՒԹԵՐ

Տրվում է դիսպերս մասնիկներով և բարձրամոդուլ մետաղական թելերով ամրանավորված մետաղական հիմքով կոնստրուկցիոն նյութերի համեմատական վերլուծություն: Հիմնավորված է կոմպոզիցիոն նյութերի տաք արտամղմամբ ամրացման նպատակահարմարությունը, որի ժամանակ մետաղաթելի դեֆորմացիան (երկարում) դրական է ազդում նրանց կառուցվածքի և հատկությունների վրա: Այսպես, մետաղաթելի 20...25 ծավալային %-ի դեպքում ստացվում է առավելագույն ամրություն այն դեպքում, երբ փոշեմետաղական կոմպոզիցիոն նյութերի՝ սովորական մեթոդներով ամրացման համար պահանջվում է ամրացնող մետաղաթելի 35...45 ծավալային %:

H.S. PETROSSYAN

REINFORCED MATERIALS WITH STRUCTURAL DESIGNATION

A comparative analysis of composite materials on the metallic fundamentals, reinforced by dispersed fragments and high-modular fibers is given. The expediency of compacting the reinforced materials by hot extrusion is substantiated, the deformation of fibers influencing positively their frame and properties. The maximum strength is reached at volume position of fibers 20-25%, whereas with conventional methods of compacting powder-fiber composites the volumetric contents of fiber are 35-40%.