

А.С. ПЕТРОСЯН

**МИКРОМЕХАНИКА И ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Даны основные принципы механизма упрочнения и хрупкого разрушения композиционных материалов на металлической основе, армированных:  $a$  – дисперсными частицами,  $b$  – хрупкими и пластическими проволоками. Выявлены виды разрушения и параметры, влияющие на предел прочности при растяжении и теории прочности в соответствии с наблюдаемым видом разрушения. В качестве эффективного способа получения металлических композиционных материалов приведены технологии горячего выдавливания (экструзии), обеспечивающие равномерную пластическую деформацию армирующей фазы и, следовательно, 100%-ю реализацию ее прочностных свойств с целью повышения механических свойств композиционного материала.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, упрочнение, механизм разрушения, экструзия, пластическая деформация.

Проведен микромеханический анализ и изучен характер разрушения материалов в зависимости от нагрузок и деформаций, зарождения трещин, приводящих к частичному или полному разделению частей материала или конструкции. Разрушение композиций определяется либо разрушением отдельных ее компонентов, либо расслаиванием по поверхностям раздела между арматурой и матрицей [1].

Полагая, что расслоения по поверхности раздела и разрушения частиц не происходит, максимально возможное упрочнение при введении частиц, блокирующих скольжение в матрице, будет тесно связано с величиной  $\tau_0 = G\epsilon / D_p$ , где  $\tau_0$  – касательные напряжения, действующие между матрицей и частицами;  $G$  – модуль сдвига матрицы;  $\epsilon$  – вектор Бюргерса, а  $D_p$  – расстояние между частицами. Если частицы оказывают сопротивление движению дислокаций, превышающих напряжение  $\tau_0$ , то дислокационные линии выгибаются между частицами, полностью окружая каждую частицу и вновь соединяясь по другую ее сторону. При этом они оставляют вокруг частицы дислокационное кольцо, а поле напряжений этого кольца препятствует прохождению последующих дислокаций (рис. 1).

Высокая скорость деформационного упрочнения является следствием кольцевого замыкания дислокаций вокруг частиц, которое можно рассматривать как повышение эффективного объемного содержания частиц (частица с дислокационным кольцом становится “крупнее”) и сопутствующее ему уменьшение эффективного расстояния между частицами  $D_p$  [1].

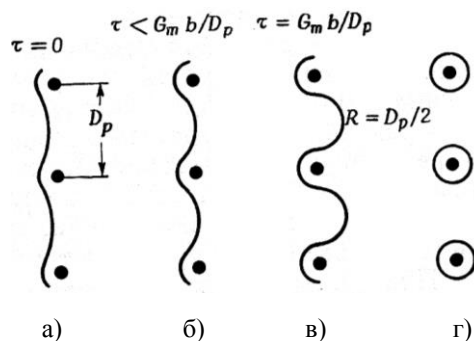


Рис. 1. Последовательность стадий (а-г) прохождения дислокации через сетку дисперсных частиц [1]

Оптимальное поведение композиции зависит от “структурного единства” ее компонентов. Единое в структурном отношении поведение предполагает хорошее сцепление всех элементов упрочнителя и матрицы с соседним элементом, обеспечивающее равномерную передачу усилий от компонента к компоненту и, тем самым, их деформацию как единого структурного целого. Анализ деформации, а также предела прочности предполагает такое структурное единство. Подобные композиции должны рассматриваться как идеальные или модельные (рис. 2).

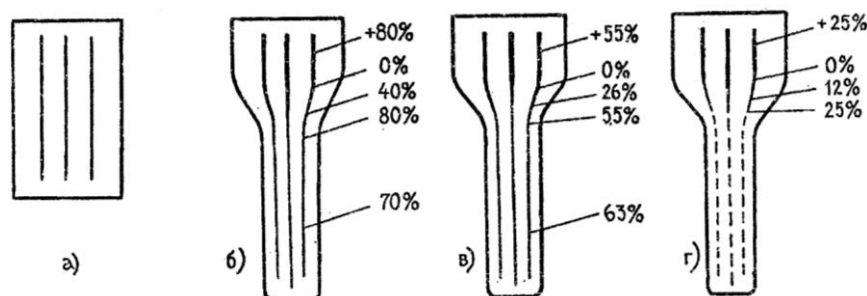


Рис. 2. Схемы заготовок и экструдированных образцов с расположением волокон: а – исходная заготовка; б – г – образцы после экструзии с волокнами меди, стали 55 и молибдена соответственно

В данной работе рассматриваются композиции с армированными параллельными волокнами, которые растягиваются вдоль волокон. Нас интересуют виды разрушения, параметры, влияющие на предел прочности при растяжении, и теории прочности, соответствующие наблюдаемым видам разрушения. Композиции, составленные из прочных пластичных волокон и пластичной матрицы, хорошо сцепляющихся между собой, обычно разрушаются из-за неустойчивости пластического течения. Прочность композиции зависит от сочетания пределов прочности при растяжении волокон и матрицы и предела прочности матрицы при

сдвиге [2]. Определенный интерес представляют нижеследующие модельные исследования, проведенные по нашим технологическим режимам горячего выдавливания (экструзии). Исследованы модельные образцы, армированные волокнами, расположенные параллельно оси экструзии [2, 3]. В качестве исходных материалов были использованы медный порошок ПМС-1 и волокна из медной ( $d=210 \text{ мкм}$ ), стальной ( $d=280 \text{ мкм}$ ) и молибденовой ( $d=160 \text{ мкм}$ ) проволоки с  $\ell=20 \text{ мм}$ . Медные цилиндрические образцы ( $D=25$ ,  $H=40 \text{ мм}$ ,  $\theta=20\%$ ) изготавливали из двух половинок двусторонним прессованием, между которыми располагали волокна параллельно оси экструзии, т.е. с углом исходной ориентации волокна  $\alpha_H = 0^\circ$  (рис. 2). Образцы нагревали в среде водорода до  $800\ldots 820^\circ\text{C}$  и экструдировали с обжатием  $\lambda=4$ ; угол конусной части матрицы  $\alpha_M = 110^\circ$ .

Экструдированные половинки отделяли (чтобы исключить припекание, поверхности окрашивали мелом), после чего изучали характер деформирования волокон. В начале процесса наблюдалось осаждение заготовки до беспористого состояния. Следовательно, осаживаются (утолщаются) также волокна: медные  $\psi = +80$ , стальные  $\psi = +50$ , молибденовые  $\psi = +25\%$  (рис. 2 б-г). Волокна из меди (рис. 2 б) в процессе экструзии удлинялись более чем в два раза:  $\delta = 240$ ,  $\psi = 70\%$ . Стальные волокна (рис. 2 в) также удлинялись ( $\delta = 200$ ,  $\psi = 63\%$ ). При этом по всей длине волокна наблюдалось периодическое уменьшение диаметра. В этих участках образовывались шейки и происходили разрывы стального волокна. Молибденовые волокна (рис. 2 г), деформируясь, разрывались равномерно с элементами длиной  $0,8\ldots 1,2 \text{ мм}$  и расстоянием между ними  $\ell = 1\ldots 2 \text{ мм}$ . Как и предполагалось, удлинение волокон начинается у входа в конусную зону матрицы и заканчивается у выхода из нее. Прочность волокон и матрицы количественно воспроизводится и определяется пластическими свойствами обоих материалов. Прочность такой модельной композиции можно выразить через средние прочности волокон и матрицы и объемное содержание компонентов композиции.

Рассмотрим поведение композиций при растяжении, а также прочность и разрушение модельных композиций, армированных волокнами с одинаковой прочностью (рис. 3 а,б). Экстраполяция прямых (рис. 3 а,б) до значения  $V_a = 100\%$  дает условную прочность волокон в композиции. Так, условная прочность стальных волокон в композиции Fe-сталь\*, полученной экструзией, составляет  $1000 \text{ МПа}$ .

Сравнивая эти данные с исходной прочностью волокон, следует отметить, что в экструдированных композиционных материалах (КМ) 100% реализуется первоначальная прочность стальных ( $1060 \text{ МПа}$ ) волокон.

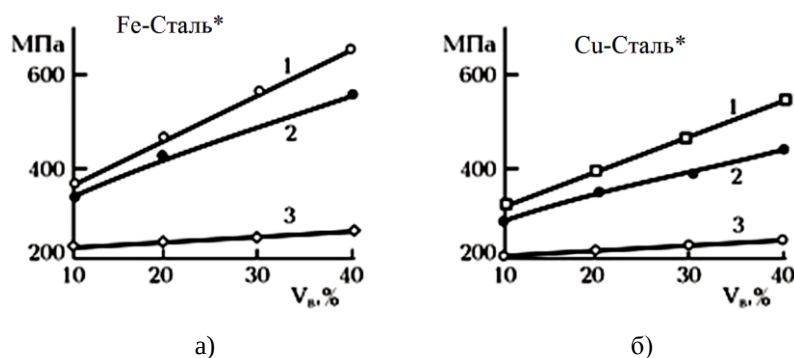


Рис. 3. Зависимость прочности при растяжении КМ, упрочненных волокнами из стали 55, от объемного содержания волокон: а – Fe-сталь\*; б – Cu-сталь\*:  
1 – 20 °С, 2 – 200 °С, 3 – 300 °С

Предполагается, что осевая деформация композиции  $\varepsilon_c$  равна деформациям волокон и матрицы. Растягивающие напряжения в волокнах и матрице в некотором поперечном сечении, перпендикулярном осевой растягивающей нагрузке, показаны на рис. 4.

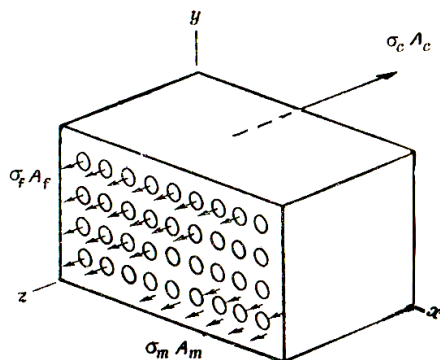


Рис. 4. Напряжения в волокнах и матрице при растяжении вдоль оси  $z$  [1]

Из условий равновесия связи между напряжением и деформацией для непрерывных волокон ( $\sigma_f = E_f \varepsilon$ ) и матрицы ( $\sigma_m = E_m \varepsilon$ ) получаем

$$\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m, \quad (1)$$

где площадь поперечного сечения композиции  $A_c$  равна сумме площадей поперечных сечений волокон  $A_f$  и матрицы  $A_m$ . Объемная доля волокон  $V_f$  определяется как  $V_f = A_f / A_c$ . Таким образом,  $A_m / A_c = 1 - V_f$ . Напряжение  $\sigma_c$  в композиции можно записать в виде

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f). \quad (2)$$

Данные экспериментов хорошо описываются уравнением (2). Напряжение  $\sigma_m$ , входящее в это уравнение, является напряжением течения материала матрицы в момент разрушения композиционного материала.

Типичные диаграммы "напряжение-деформация" для трех состояний КМ приведены на рис. 5.

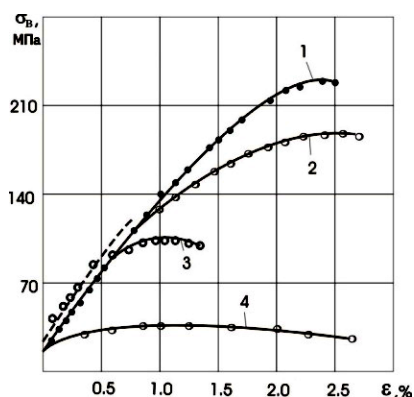


Рис. 5. Кривые растяжения "напряжение-деформация" для КМ "Al – нержавеющая сталь" ( $V_B=6,5\%$ ): 1 – после прессования; 2 – отжиг при  $550^\circ\text{C}$  в течение 24 ч; 3 – отжиг при  $625^\circ\text{C}$  в течение 24 ч; 4 – матрица

В таблице представлены прочности при растяжении КМ для всех исследуемых состояний [2].

Таблица

Свойства КМ "Al – нержавеющая сталь"

| $V_B, \%$ | Состояние КМ               | Прочность извлеченных из КМ волокон |                        | Предел прочности КМ, $\sigma_B$ , МПа | Расчетные значения предела прочности, $\sigma_B$ , МПа |
|-----------|----------------------------|-------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------|
|           |                            | $\sigma_B$ , МПа                    | Стандартное отклонение |                                       |                                                        |
| -         | После поставки             | 3400                                | 5,6                    | -                                     | -                                                      |
| 6,5       | После прессования          | 3600                                | 5,7                    | 252                                   | 268                                                    |
| 9,4       | $550^\circ\text{C}$ , 24 ч | 1840                                | 2,2                    | 224                                   | 201                                                    |
| 11,5      | $625^\circ\text{C}$ , 24 ч | 608                                 | 15,2                   | 116                                   | 98                                                     |
| 19,6      | После прессования          | 3576                                | 7,1                    | 704                                   | 726                                                    |
| 25,5      | $550^\circ\text{C}$ , 24 ч | 1820                                | 4,9                    | 552                                   | 496                                                    |
| 30,2      | $625^\circ\text{C}$ , 24 ч | 718                                 | 7,0                    | 272                                   | 223                                                    |

Снижение  $\sigma_B$  особенно заметно после выдержки при 625°С (рис. 5).

Определенный интерес представляют КМ на основе меди и ее сплавов.

На рис. 6 показана зависимость предела прочности от объемного содержания меди, армированной вольфрамовыми волокнами. Армированная медь (12,5 об.%W) не разрушается при 400°С под нагрузкой 160 МПа в течение 1700 ч. Предел усталости композиции Cu-W\* в условиях  $10^7$  циклов повторного растяжения возрастает с увеличением объемной доли волокон.

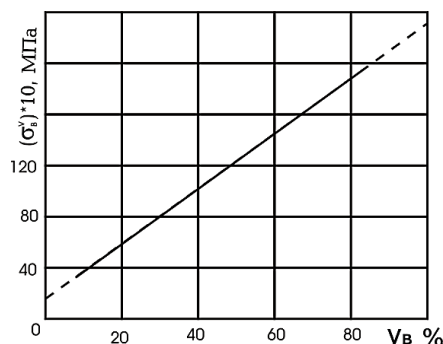


Рис. 6. Зависимость предела прочности на растяжение меди, армированной вольфрамовыми волокнами  $\varnothing 0,5$  мм, от объемной доли волокон

На рис. 7а показана кривая "напряжение-деформация", полученная Келли [4] при 250 °С (пластичная проволока) для  $V_f = 0,53$ , на рис. 7б - диаграмма "нагрузка-прогиб" при комнатной температуре (хрупкая проволока) для  $V_f = 0,63$ .

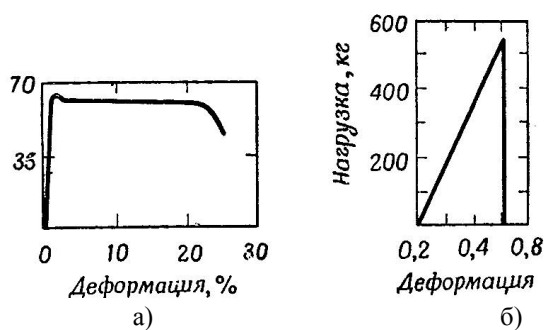


Рис. 7. Кривые "напряжение – деформация" для меди, армированной непрерывной пластичной (а) и хрупкой (б) вольфрамовой проволокой

В этом случае разрыв одной или нескольких проволок приводит к полному разрушению композиции.

При очень малом объемном содержании проволоки существует область, в которой уравнение (2) требуется несколько видоизменить [4,5]. Если деформационного упрочнения матрицы (чему содействуют разорвавшиеся проволоки) вполне достаточно, чтобы противостоять потере несущей способности, обусловленной разрывом проволок, то прочность композиции  $\sigma_c$  определяется свойствами матрицы. Предположим, что все проволоки разрушились; тогда  $\sigma_f = 0$ , и уравнение (2) преобразуется к виду

$$\sigma_c = \sigma_m(1 - V_f), \quad (3)$$

где  $\sigma_m$  - предел прочности при растяжении матрицы.

Если напряжение  $\sigma_c$ , выражаемое уравнением (3), превышает  $\sigma_c$ , даваемое уравнением (2), то уравнение (3) характеризует предел прочности при растяжении композиции, как показано на рис.8. Пересечение линий, отвечающих уравнениям (2) и (3) на рис.8 при  $V_{\min}$ , свидетельствует о том, что прочность композиции определяется дальше не прочностью матрицы, а прочностью проволок. Минимальное объемное содержание проволок  $V_{\min}$  находится путем приравнивания напряжений  $\sigma_c$  из уравнений (2) и (3). Это дает  $V_{\min} = \frac{1}{1 + \sigma_f [\sigma_m - (\sigma_m)_{\varepsilon_f}]}$ ,

где напряжение матрицы  $(\sigma_m)_{\varepsilon_f}$  соответствует деформации матрицы, равной деформации проволок  $\varepsilon_f = n$  ( $\varepsilon_f$  - нижний предел деформации проволоки или волокна очень большой длины с малым диаметром), без стеснения, которые разрушаются вследствие неустойчивости пластического течения.

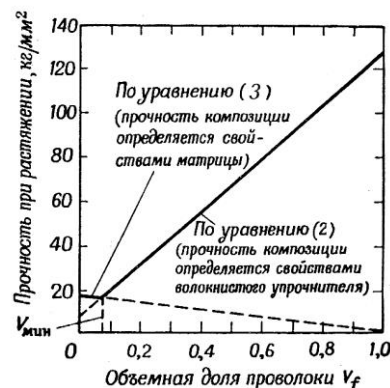


Рис. 8. Экспериментальные и теоретические данные об изменении прочности меди, армированной непрерывной вольфрамовой проволокой, в зависимости от ее объемного содержания

Для результатов, отраженных на рис. 7 а и б, величина  $V_{\min} < 8,5\%$ .

Следовательно, характер разрушения композиции определяется в основном поведением волокон в условиях напряженно-деформированного состояния. Высокие механические свойства армированных КМ, полученных экструзией (рис. 9), объясняются тем, что ориентированность и высокая прочность сцепления волокон с матрицей препятствуют образованию и развитию шеек на волокнах, что создает благоприятные условия для равномерной пластической деформации по всей длине волокна, а следовательно, 100%-й реализации его прочностных свойств.

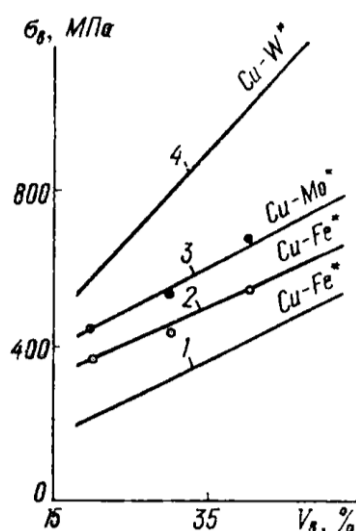


Рис. 9. Зависимость предела прочности КМ при растяжении от объемной доли волокон: 1, 4 – расчетные значения для материалов на основе меди, армированной волокнами стали ( $\sigma'_B = 1000$  МПа) и вольфрама ( $\sigma'_B = 2200$  МПа); 2, 3 – экспериментальные значения для экструдированных композиций Cu-Fe\*, Cu-Mo\*

## Выводы

1. Результаты анализа внутренней механики композиционных материалов могут служить основой при выборе компонентов композиций с улучшенными свойствами, что дает возможность разработки технологии для получения новых материалов.

2. При экструзии модельных образцов, армированных волокнами, расположенных параллельно оси экструзии, выявлена сверхвысокая пластичность металлических волокон, которая не наблюдается при других видах формования (статического, динамического, импульсного). Это позволяет получить композиционный материал при значительно меньших отношениях  $l/d$  (менее 80 ... 100).



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные композиционные материалы / Под ред. Л. Браутмана и Р. Крока. – М.: Мир, 1970. – 672 с.
2. Петросян А.С. Порошковая металлургия и технология композиционных материалов. - Ереван, 2007. – 240 с.
3. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. – М.: Издательский центр “Академия”, 2005.- 192 с.
4. Келли А. Механические свойства новых материалов. – М.: Мир, 1966. – С. 111-136.
5. Герман Р.М. Порошковая металлургия от А до Я. – М.: Интеллект, 2009. – 336 с.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 11.03.2015.

### Հ.Ս. ՊԵՏՏՐՈՍՅԱՆ

#### ՄԵՏԱՂԱԿԱՆ ԿՈՄՊՈԶԻՏՈՒՄՆԵՐԻ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՔԱՅՔԱՅՄԱՆ ԲՆՈՒՅԹԸ ԵՎ ՄԻԿՐՈՄԵԽԱՆԻԿԱՆ

Ներկայացված են դիսպերս մասնիկներով և պլաստիկ լարերով ամրանալորված մետաղական կոմպոզիտների ամրացման փոխադրային մեխանիզմը և նրա առանձնահատկությունները: Բացահայտված են ձգման ամրության վրա ազդող պարամետրերը, որոնք համապատասխանում են քայքայման տեսանելի եղանակներին: Որպես մետաղական կոմպոզիցիոն նյութերի ստացման արդյունավետ եղանակ ներկայացված է տաք արտամղումը (էքստրուզիա), որն ապահովում է ամրանալորող ֆազի հավասարաչափ պլաստիկ դեֆորմացիա և հետևաբար՝ նրա ամրային հատկությունների մոտ 100% իրացում՝ ի նպաստ կոմպոզիցիոն նյութի մեխանիկական հատկությունների բարձրացման:

**Առանցքային բառեր.** կոմպոզիցիոն նյութեր, ամրացում, քայքայման մեխանիզմ, արտամղում, պլաստիկ դեֆորմացիա:

### A.S. PETROSYAN

#### MICROMECHANICS AND CHARACTER OF DESTRUCTION OF METALLIC COMPOSITE MATERIALS

The basic principles of the strengthening mechanism and brittle failure of metal - based composite materials reinforced by a) dispersed particles, b) brittle and plastic wires are introduced. The failure types and parameters affecting the ultimate strength at tension, and the theory of strength according to the observed type of destruction are revealed. As an effective method for producing metal composite materials, the technologies of hot extrusion providing a uniform plastic deformation of the reinforcing phase, and therefore, 100% implementation of its strength properties for enhancing the mechanical properties of the composite material are introduced.

**Keywords:** composite materials, hardening, failure mechanism, extrusion, plastic deformation.