

УДК 539.89:537.31:539.424

Белошенко В. А.
Дмитренко В. Ю.
Чишко В. В.

СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ С МЕДНОЙ МАТРИЦЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПАКЕТНОЙ ГИДРОЭКСТРУЗИИ

Создание материалов, обладающих улучшенным или новым комплексом свойств, – одна из главных задач современного материаловедения. В связи со значительно возросшими требованиями к эксплуатационным характеристикам традиционные металлы и сплавы подошли к пределу возможного применения в современных конструкциях и устройствах. Альтернативой является использование композиционных материалов, физико-механические характеристики которых в зависимости от химического состава, структуры, свойств и распределения составляющих их компонентов могут варьироваться в широких пределах [1]. Перспективное направление – разработка наноструктурных композитов с уникально высокими каталитическими, магнитными, триботехническими характеристиками, термо- и химической стойкостью, высокими прочностью и пластичностью [2]. В частности, создание материалов, сочетающих хорошую электропроводность и высокие механические свойства, что открывает принципиально новые возможности для их практического применения, например в импульсных магнитных системах с рекордно высоким уровнем напряженности магнитного поля [3].

При конструировании таких объектов, кроме выбора исходных компонентов и геометрии их расположения, исключительно важен также выбор эффективной и экономичной технологии их изготовления. Одним из перспективных методов является пакетная гидроэкструзия (ГЭ). Данный способ позволяет получать волокнистый композиционный материал в виде проволоки, характеризующейся точными геометрическими размерами, высокой механической и химической чистотой поверхности. Высокое гидростатическое давление обеспечивает надежное сцепление элементов составных заготовок без дополнительного термического воздействия, пропорциональное их истечение в ходе совместной пластической деформации и реализацию сверхвысокой накопленной деформации [4, 5]. При этом в силу условия гидростатичности автоматически осуществляется гексагональная плотная упаковка составных элементов в пакете, что обеспечивает больше угловые границы между ними [4]. Применение метода пакетной ГЭ в настоящее время ограничивается в основном получением волокнистых композитов Cu-Nb и Cu-NbTi. В то же время представляет интерес рассмотреть возможности изготовления данным методом и других металлических многоволоконистых композитов с медной матрицей, в том числе на основе одного металла, и выявить закономерности изменения их физико-механических свойств при переходе от макро- к микро- и нано-размерам волокон.

Цель данной работы – исследовать зависимости предела прочности и относительного удельного электросопротивления волокнистых композитов Cu-Fe и Cu-Cu от диаметра и количества волокон. Установление размерной зависимости наиболее значимых для данного материала свойств позволит выяснить, при каких размерах структурных элементов достигаются максимальные значения требуемых характеристик.

Объектами исследований являлись металлические композиты Cu-Fe и Cu-Cu с количеством волокон: $n_f = 1, 211, 211^2, 211^3, 85 \cdot 211^3$ (Fe) и $n_f = 211, 211^2, 211^3$ (Cu), полученные методом многопереходной пакетной гидроэкструзии с последующим волочением. Конструкции композитов позволили в проволочных образцах получить широкий спектр диаметров d_f и количества n_f волокон с варьированием их объемного содержания K (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Характеристики композитов Cu-Fe

Диаметр образца D , мм	n_f	d_f , мкм	K
3	1	2280	0,58
	211	130	0,39
	211^2	7,4	0,27
	211^3	0,42	0,18
	$85 \cdot 211^3$	0,038	0,13
0,21	1	160	0,58
	211	9	0,39
	211^2	0,52	0,27
	211^3	0,029	0,18
	$85 \cdot 211^3$	0,003	0,13

Таблица 2

Характеристики композитов Cu-Cu

Диаметр образца D , мм	n_f	d_f , мкм	K
0,55	211	30	0,63
	211^2	1,75	0,45
	211^3	0,098	0,3

Исследование физико-механических свойств осуществляли на образцах в деформированном и отожженном состояниях. Термообработку (ТО) деформированных образцов проводили в вакууме 10^{-5} мм рт. ст. в интервале температур 50–550 °С с выдержкой в течение 1 часа.

Испытания на растяжение выполняли на проволочных образцах диаметром 0,21–0,5 мм и длиной 200 мм на разрывной машине ZM-20 при скорости перемещения подвижного захвата $5 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$. Определяли стандартные характеристики: предел прочности σ_B и относительное удлинение δ . Относительная ошибка измерений для σ_B и δ составляла 2,5 %.

Удельное электрическое сопротивление ρ композитов измеряли по стандартной четырехзондовой методике. Расстояние между токовыми контактами существенно превышало расстояние между потенциальными контактами. В этом случае обеспечивалось условие, при котором эквипотенциальные поверхности в области потенциальных контактов были практически плоскими и перпендикулярными осям образцов. Относительная погрешность в определении ρ не превышала 5 %.

Установлено, что при переходе в область наноразмерных волокон в композитах наблюдаются характерные особенности поведения их механических и физических свойств. Зависимости предела прочности σ_B композита Cu-Fe от объемного содержания железа K и размера волокон d_f носят немонотонный характер (рис. 1). С уменьшением величин K и d_f можно выделить три характерных области: $d_f \geq 10$ мкм, в которой величина σ_B значительно падает; $d_f \sim (30 - 520)$ нм, где предел прочности возрастает; $d_f \leq 30$ нм, в которой вновь наблюдается разупрочнение композита.

В области микронных значений d_f полученные зависимости хорошо описываются в соответствии с правилом смесей при условии равных деформаций. С уменьшением d_f (величина $K \leq 0,4$) правило смесей нарушается – предел прочности композитов существенно возрастает. Можно предположить, что наблюдаемое отклонение от правила смесей обусловлено действием механизмов упрочнения композитов, которые описываются уравнением Холла-Петча и связаны с зарождением и движением дислокаций. При достижении некоторого критического размера ($d_f \approx 30$ нм) наблюдается переход от активности процессов, описываемых зависимостью Холла-Петча (размножение и движение дислокаций), к процессам, связанным со слабым скольжением по границам зерен [6]. В результате предел прочности падает. ТО при температуре 550 °С приводит к уменьшению значений σ_B , не изменяя характер зависимости.

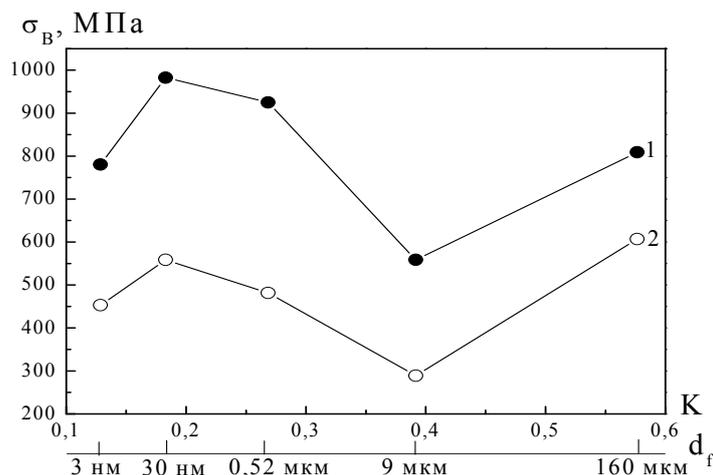


Рис. 1. Зависимости предела прочности деформированных (1) и отожженных (2) Cu-Fe композитов от объемного содержания железа и размера волокон

Предел прочности композита Cu-Cu в микронной области размеров волокон монотонно увеличивается (рис. 2), что отражает влияние границ составных элементов, являющихся эффективными стопорами движению дислокаций. При переходе в область наноразмерных волокон ($d_f \leq 100$ нм) резко возрастает интенсивность деформационного упрочнения и при некотором критическом размере волокон ($d_f = 25$ нм, $D = 0,1$ мм) достигается предельно высокое значение продольной прочности $\sigma_g = 620$ МПа. Расчетная величина предела прочности собственно наноразмерных волокон составляет $\sigma_{gf} = 890$ МПа. С дальнейшим уменьшением диаметра волокон упрочнение сменяется разупрочнением. Аналогичным образом ведет себя и микротвердость. Данная особенность поведения волокнистой наноструктурной меди свидетельствует о смене деформационного механизма от внутризеренного дислокационного скольжения к зернограничному проскальзыванию с определяющей ролью межзеренных границ [7]. Отжиг приводит к снижению предела прочности и увеличению относительного удлинения. Термическая стабильность механических свойств сохраняется до температуры $T_0 = 125$ °С.

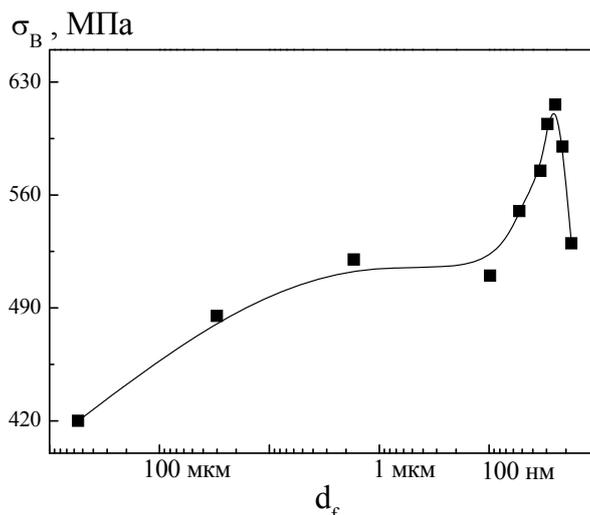


Рис. 2. Зависимость предела прочности композита Cu-Cu от размера волокон

Известно, что в мелкозернистых металлах, в особенности при переходе в область наноразмеров, существенно возрастает роль рассеяния свободных носителей на дефектах решетки и межзеренных границах [8, 9]. Это приводит к повышению удельного электрического сопротивления. На рис. 3 приведена зависимость удельного электросопротивления Cu-Fe

композитов от объемного содержания железа. Результаты эксперимента хорошо согласуются с зависимостью, рассчитанной в соответствии с правилом смесей при параллельном соединении медного и железного компонентов композита.

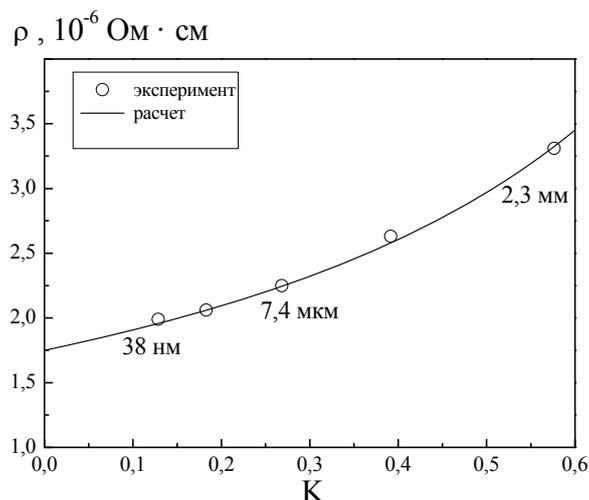


Рис. 3. Зависимость удельного электросопротивления Cu-Fe композитов от объемного содержания железа

При дальнейшем уменьшении величины d_f наблюдается отклонение от правила смесей и удельное электрическое сопротивление композитов возрастает по сравнению с расчетным. Следует отметить, что величина относительного удельного электросопротивления Cu-Fe композитов с нанометровыми волокнами превышает таковую для чистой крупнозернистой меди всего на 13–25 %.

Поведение относительного удельного электросопротивления Cu-Cu композитов также характеризуется экстремальной зависимостью. Оно значительно возрастает с уменьшением размера волокон, достигая максимума при $d_f \approx 20$ нм (рис. 4). В сравнении с удельным электросопротивлением монокристаллической меди ρ_0 эта характеристика для Cu-Cu композита с $n_f = 211^3$ в интервале размеров волокон $d_f = 17–100$ нм выше в 1,5–1,65 раз.

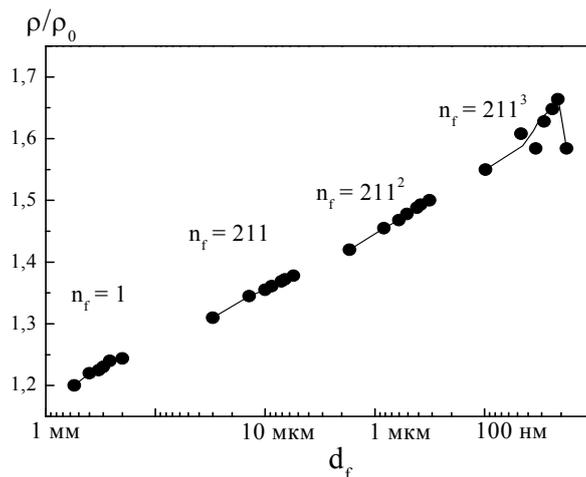


Рис. 4. Зависимость относительного удельного электрического сопротивления меди от размера волокон

При создании наноматериалов одним из наиболее проблемных является вопрос о временной стабильности их свойств [10]. На примере композита Cu-Cu показано, что за время вылеживания при комнатной температуре $\tau \sim 2$ года предел прочности исследуемых образцов снижается примерно на 5 % и стабилизируется на уровне $\sigma_B \approx 490 – 510$ МПа ($d_f = 98$ нм,

$D = 0,55$ мм). Дальнейшая выдержка при комнатной температуре ($\tau \sim 10$ лет) не приводит к существенному изменению предела прочности. Термическая стабильность механических свойств с течением времени не изменяется ($T_0 = 125$ °С). В то же время релаксационные процессы, происходящие в исследуемом материале на протяжении 10 лет, приводят к значительному (15–30 %) снижению удельного электрического сопротивления.

Сочетание высоких прочности и низкого удельного электрического сопротивления (близкого к сопротивлению чистой меди) исследуемых композитов делает перспективным их применение в качестве материала для электротехники, микроэлектроники, микроэлектродвигателей, телекоммуникаций, авиационной и др. отраслей промышленности.

ВЫВОДЫ

Показано, что метод пакетной гидроэкструзии, позволяя варьировать размер волокон в широких пределах, может быть успешно использован для создания в металлических волокнистых композитах наноструктурного состояния, характеризующегося уникальным комплексом функциональных свойств.

Обнаружен экстремальный характер зависимостей физико-механических свойств исследованных волокнистых композитов и установлен критический размер волокон, при котором наблюдается их максимальное значение.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абузин Ю. А. Функциональные металлические композиционные материалы и технологии в машиностроении / Ю. А. Абузин // *Арматуростроение*. – 2010. – № 6 (69). – С. 52–54.
2. Производство металлических слоистых композиционных материалов / [Кобелев А. Г., Лысак В. И., Чернышев В. Н. и др.]. – Москва : Интермет Инжиниринг, 2002. – 496 с.
3. Разработка высокопрочных, высокоэлектропроводных *Cu-Nb* композитов, имеющих наноразмерную микроструктуру компонентов / В. И. Панцырный, А. К. Шиков, А. Е. Воробьёва [и др.] // *Материалы Второй Всероссийской конференции по наноматериалам «НАНО 2007», Новосибирск, 13–16 марта 2007 года*. – С. 339.
4. Закономерности упрочнения волокнистых материалов, полученных пакетной гидроэкструзией / В. Н. Варюхин, А. Б. Дугадко, Н. И. Матросов [и др.] // *Физика и техника высоких давлений*. – 2003. – Т. 13, № 1. – С. 96–105.
5. Сынков С. Г. Пакетная гидроэкструзия микроволокон из хромоникелевых сталей / С. Г. Сынков, В. Г. Сынков, А. Н. Сапронов // *Физика и техника высоких давлений*. – 1996. – Т. 6, № 2. – С. 141–145.
6. Нанокристаллические и нанокompозитные покрытия, структура, свойства / В. М. Береснев, А. Д. Погребняк, Н. А. Азаренков [и др.] // *ФИП*. – 2007. – Т. 5, № 1–2. – С. 4–27.
7. Столяров В. В. Особенности механических свойств наноструктурных сплавов / В. В. Столяров // *Вестник научно-технического развития*. – 2010. – Т. 31, № 3. – С. 54–60.
8. Шевченко С. В. Наноструктурные состояния в металлах, сплавах и интерметаллических соединениях: методы получения, структура, свойства / С. В. Шевченко, Н. Н. Стеценко // *Успехи физики металлов*. – 2004. – Т. 4, № 2 – С. 219–254.
9. Гусев А. И. Эффекты нанокристаллического состояния в компактных металлах и соединениях / А. И. Гусев // *Успехи физических наук*. – 1998. – Т. 168, № 1. – С. 55–83.
10. Наноматериалы, нанопокpытия, нанотехнологии: учеб. пособие / [Азаренков Н. А., Береснев В. М., Погребняк А. Д. и др.]. – Харьков : Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, 2009. – 209 с.

Белошенко В. А. – д-р техн. наук, проф., зам. директора по науч. работе ДонФТИ НАН Украины;

Дмитренко В. Ю. – мл. науч. сотрудник ДонФТИ НАН Украины;

Чишко В. В. – канд. техн. наук, мл. науч. сотрудник ДонФТИ НАН Украины.

ДонФТИ НАН Украины – Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина Национальной академии наук Украины, г. Донецк.

E-mail: dmitrenko_v@ukr.net

Статья поступила в редакцию 27.01.2012 г.