

СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И РАСЧЕТНЫХ ОЦЕНОК ПРОЧНОСТНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ Cu/Mg-КОМПОЗИТОВ С РАЗНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КОМПОНЕНТОВ

© 2018

А.Ю. Волков, доктор технических наук, заведующий лабораторией прочности
А.А. Калонов, аспирант, инженер-исследователь лаборатории прочности
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)

Ключевые слова: металлические композиты; сплавы медь-магний; прочностные свойства композитов; резистометрия; Cu/Mg-композит.

Аннотация: Существующие модельные представления позволяют с той или иной точностью оценить физико-механические свойства материалов еще на стадии их обсуждения, без длительных процедур получения и проведения испытаний. К примеру, при оценке свойств композитов в настоящее время все шире используется «правило смесей», позволяющее вычислить прочностные свойства и электросопротивление композитных материалов на основе вкладов, которые определяются объемными долями компонентов. Очевидно, что «правило смесей», как и все модельные подходы, имеет свои ограничения, которые хотелось бы оценить на одном композите с разными объемными долями компонентов.

Методом гидроэкструзии получены три Cu/Mg-композитных прутка, в медной матрице которых содержится 1, 7 и 49 тонких магниевых волокон. Выполнены оценочные расчеты прочностных свойств и электросопротивления деформированных композитов с использованием «правила смесей». Проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными результатами. Показано, что наиболее полное соответствие результатов расчета и экспериментальных данных наблюдается в композитах с 7 и 49 магниевыми волокнами. В свою очередь, расчетные прочностные свойства сильно отклоняются от эксперимента в случае практически одинаковых объемов компонентов в однофазном композите. Это вызвано различием механизмов деформации медной матрицы с ГЦК-решеткой и ГПУ-волокна из магния. Результаты, полученные для композита с 49 магниевыми волокнами, наводят на мысль о начальных стадиях формирования новых фаз на Cu/Mg-интерфейсе вследствие процессов механосплавления при ИПД.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведется активный поиск и создание металлических композитов, в медной матрице которых содержится большое количество наноразмерных частиц или тонких волокон упрочняющей фазы. Такие проводниковые материалы часто демонстрируют уникальные механические и физические свойства и поэтому представляют большой интерес с практической точки зрения [1]. В качестве примера можно привести высокопрочные проводники на основе Cu-Nb [2], Cu-V [3] или Cu-Ag-композитов [4]. Перечисленные выше композиты имеют интерфейсы с практически несмешивающимися слоями, поскольку их компоненты или практически не имеют взаимной растворимости (Cu-Nb и Cu-V), или имеют весьма ограниченную растворимость (Cu-Ag). Очевидно, что прочностные свойства композитов с несмешивающимися компонентами в основном зависят от объемной доли более прочной фазы, а их проводящие свойства определяются медной матрицей. В то же время вклад как в прочностные свойства, так и в электросопротивление многоволоконных композитов вносят многочисленные поверхности раздела компонентов, поскольку они тормозят движение дислокаций и выступают как препятствия для носителей заряда [5]. Однако работ по рассмотрению влияния объемной доли интерфейса на физико-механические свойства композитов с медной матрицей явно недостаточно.

В качестве модельного материала в данной работе были взяты образцы Cu/Mg-композитов с разным количеством магниевых волокон в медной матрице. Такие композиты ранее практически не исследовались. Вероятно, основной причиной, которая останавливает ис-

следователей от работ в этом направлении, является неочевидность достижения высоких прочностных свойств в таком композите. Действительно, трудно надеяться на упрочнение меди за счет введения в нее значительно менее прочных магниевых волокон. В настоящее время основной подход при создании композитов состоит в упрочнении мягкой матрицы введением в нее волокон из более прочного материала. К примеру, медь упрочняют углеродными нанотрубками [6], ниобиевыми волокнами [2], наноразмерными частицами хрома [7] или железа [8]. Как правило, высокотемпературные отжиги таких композитов не планируются, поскольку приводят к коагуляции волокон и, как следствие, к деградации свойств [2].

Однако упрочнить Cu/Mg-композит вполне возможно с помощью термообработок, в ходе которых на границе раздела будут формироваться новые фазы на основе интерметаллидов Cu_2Mg и CuMg_2 . Аналогичный подход уже используется, к примеру, для упрочнения Ti/Al-композитов за счет формирования различных алюминидов титана на интерфейсе разнородных слоев [9].

Цель работы – изучение прочностных свойств и электросопротивления сильно деформированных образцов Cu/Mg-композитов, а также сопоставление результатов экспериментов с теоретической оценкой на основе известных представлений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе были получены и исследовались образцы трех композитов. В первом композите магниевая сердцевина была окружена медной оболочкой; в медной матрице другого композита находилось 7 магниевых

волокон. Третий композит содержал 49 магниевых волокон. Далее для упрощения записи, количество магниевых волокон в исследуемых композитах будет указываться в обозначении, к примеру: Cu/49Mg-композит.

Схематическое изображение процесса получения композитов представлено на рис. 1. Пруток из магния диаметром 12 мм плотно вставлялся в медный стакан с наружным диаметром 18 мм, который вытачивали на токарном станке из меди марки М0. Эта сборка помещалась в рабочий контейнер установки высокого давления. Гидроэкструзия осуществлялась при комнатной температуре: сначала – через матрицу диаметром 10 мм, затем – последовательно через матрицы 6 мм и 3 мм. Таким образом был получен Cu/1Mg-композит (левая часть рис. 1).

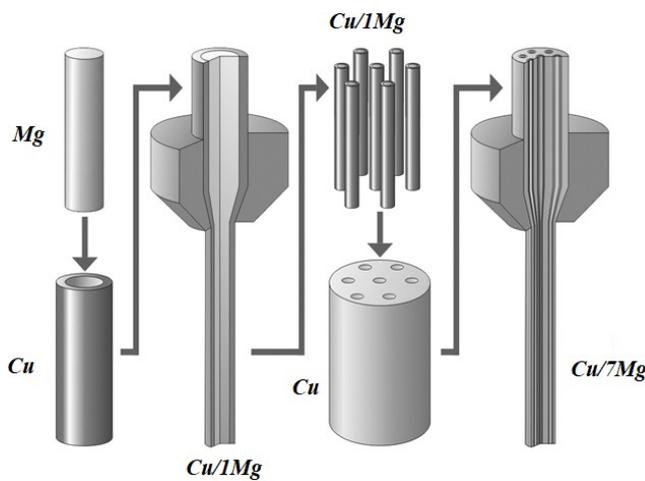


Рис. 1. Схематическое изображение процесса получения исследуемых композитов с 1 и 7 магниевыми волокнами в медной матрице

Для изготовления Cu/7Mg-композита вновь был взят медный пруток с наружным диаметром 18 мм. В торце медной заготовки по окружности радиусом 5,5 мм было просверлено 6 отверстий диаметром 3 мм на равных расстояниях друг от друга. Еще одно такое же отверстие было сделано в центре этой заготовки. В каждое из 7 отверстий помещались отрезки прутка диаметром 3 мм из Cu/1Mg-композита. Затем эта медно-магниевая сборка также подвергалась гидроэкструзии, последовательно через матрицы 10 мм, 6 мм и 3 мм. Таким образом был получен Cu/7Mg-композит (правая часть рис. 1). Для получения Cu/49Mg-композита в медную заготовку с 7 отверстиями вставлялись прутки Cu/7Mg-композита и операция гидроэкструзии повторялась. Соотношение

компонентов в полученных композитах приведено в таблице 1.

Этапы гидроэкструзии прутков до Ø3 мм и их дальнейшего волочения для получения проволоки были одинаковыми. Для исследования свойств в работе использовались образцы двух диаметров: Ø1,5 мм – для механических испытаний и Ø0,25 мм – для резистометрии. Истинная деформация образцов (e) определялась как

$$e = \ln \left(\frac{S_0}{S_{обр}} \right), \quad (1)$$

где S_0 – площадь исходной заготовки Ø18 мм; $S_{обр}$ – площадь соответствующего образца.

В начале каждого этапа медная матрица и магниевые вставки (или заготовки из Cu/Mg-композитов) отжигались при температуре 200 °С в течение 1 часа. Как было показано нами ранее [10], такой обработки достаточно для прохождения в меди процессов рекристаллизации. Структура и текстура деформированного магния изучалась нами в работах [11; 12]. Обнаружено, что термообработка магния в интервале 150–200 °С приводит к аномалии: после отжига деформированных образцов их прочностные свойства даже несколько возрастают, пластичность при этом сохраняется. Это объясняется перестройкой дислокационной структуры и термоактивированной блокировкой определенных дислокаций [12]. Более того, установлено [13], что медленное формирование интерметаллидной фазы $CuMg_2$ на Cu/Mg-интерфэйсе начинается только при температурах выше 215 °С. На основе вышеизложенного мы пришли к выводу, что термообработка при 200 °С позволяет отжечь Cu/Mg-композит без формирования на поверхности раздела его компонентов каких-либо новых фаз. Таким образом, истинная деформация образцов всех композитов была одинакова и, в соответствии с расчетом по формуле (1), составляла: для механических испытаний $e \approx 5,0$; для резистометрии $e \approx 8,6$.

Электрические свойства композитов изучались с использованием стандартного четырехконтактного метода при постоянном токе 20 мА. Погрешность измерения величины удельного электросопротивления составляет $\pm 0,04 \times 10^{-8}$ Ом·м [14]. Механические испытания на растяжение проводились на машине Instron 5982 при скорости растяжения 3 мм/мин. На каждую точку испытывалось не менее 5 образцов, длина рабочей части которых составляла 30 мм.

Для изучения микроструктуры композитов использовался сканирующий электронный микроскоп QUANTA 200.

Таблица 1. Содержание компонентов в исследованных Cu/Mg-композитах

Композит	Количество волокон Mg в композите	Среднее содержание компонентов					
		Объемная доля, %		Массовые %		Атомные %	
		Cu	Mg	Cu	Mg	Cu	Mg
Cu/1Mg	1	55,5	44,5	86,4	13,6	70,9	29,1
Cu/7Mg	7	91,4	8,6	98,2	1,8	95,3	4,7
Cu/49Mg	49	96,2	3,8	99,2	0,8	98,1	1,9

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Микроструктуры композитов. Фотография двух образцов разного диаметра одножильного композита Cu/1Mg-композита представлена на рис. 2.

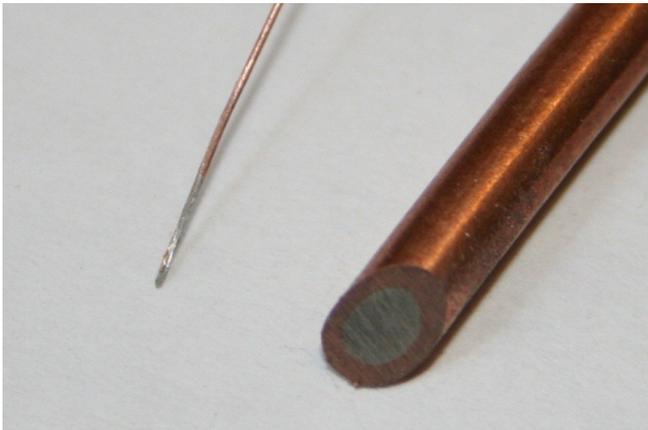


Рис. 2. Внешний вид образцов Cu/1Mg-композита: тонкая проволока Ø0,25 мм после гидроэкструзии и волочения (слева); пруток Ø3 мм после гидроэкструзии (справа)

На снимке (рис. 2) хорошо видно, что магниевая вставка занимает практически половину объема Cu/1Mg-композита. Это согласуется с результатами расчета объемной доли компонентов в этом композите (см. таблицу 1). В левой части рис. 2 находится тонкая композитная проволока Ø0,25 мм. Ее наружная медная оболочка снята специально, чтобы показать блестящую магниевую сердцевину. Резистометрические исследования в нашей работе проводились с использованием таких тонких проволок.

Микроструктуры Cu/7Mg-композита и Cu/49Mg-композита приведены на рис. 3. На снимках хорошо видна практически округлая форма магниевых волокон.

Подобный результат возможен только с использованием гидроэкструзии: в процессе такого воздействия образец находится в условиях всестороннего сжатия. Использование волочения или прокатки резко искажает форму наружных волокон: они становятся овальными ввиду сильного тангенциального течения материала при этих способах деформации.

Сравнение внешнего вида композитов на рис. 3 подтверждает результаты расчетов в таблице 1: объемная доля магния в образцах резко снижается при увеличении количества волокон с 7 до 49. Однако, как было указано выше, в формировании физико-механических свойств композитных материалов большую роль играет не только соотношение объемных долей компонентов. В нашем случае, когда мы планируем упрочнять композит за счет выделения интерметаллидных фаз на границе раздела, основную роль играет площадь интерфейса, точнее, его объемная доля в образце. Она вычисляется как отношение площади поверхности раздела к объему образца. В нашем случае решение можно упростить: объемная доля интерфейса вычислялась как отношение суммы периметров всех магниевых волокон к площади поперечного сечения образца. Полученные результаты сведены в таблицу 2.

Из таблицы 2 можно сделать неожиданный вывод: несмотря на скачкообразное, резкое снижение объемной доли магния при увеличении в композите количества магниевых волокон, объемная доля Cu/Mg-интерфейса при этом растет. Еще более сильная зависимость наблюдается при уменьшении диаметра образца: при переходе от исходной заготовки Ø18 мм к проволочному образцу для резистометрии Ø0,25 мм во столько же раз (т. е. практически на два порядка) возрастает объемная доля интерфейса.

Методы оценки прочностных свойств и электропроводности композитов. В настоящее время существуют подходы, которые призваны оценить физико-механические свойства биметаллических композитов. К примеру, в работе [15] обсуждается «правило смесей» (the rule of mixtures), с использованием которого можно

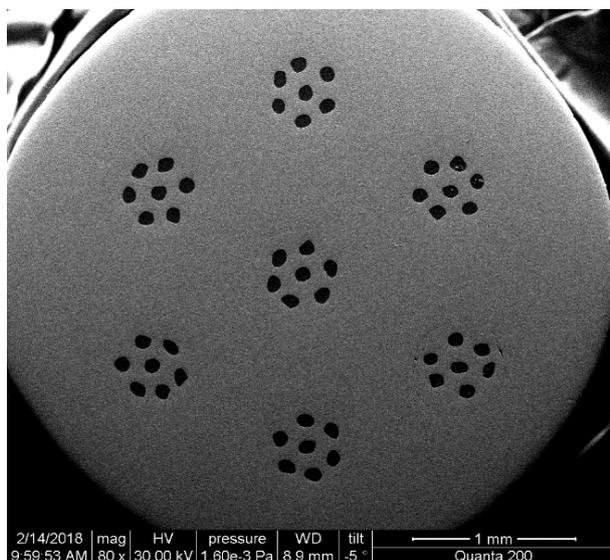
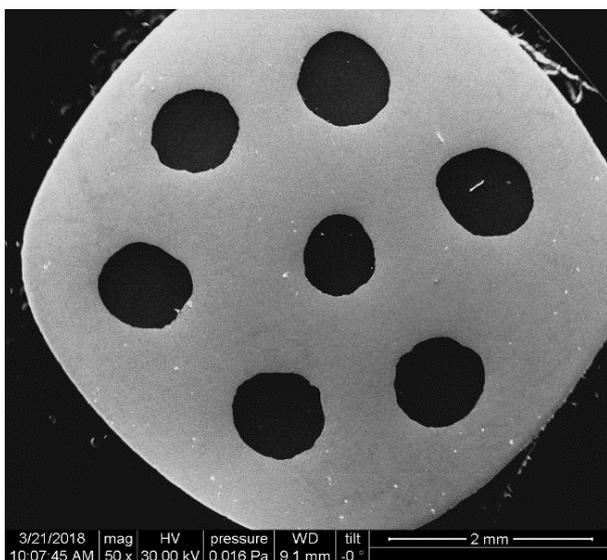


Рис.3. Микроструктуры Cu/7Mg-композита (а) и Cu/49Mg-композита (б) после гидроэкструзии при комнатной температуре

Таблица 2. Диаметр магниевых волокон и объемная доля Cu/Mg-интерфейса в образцах исследованных композитов

Композит	Исходное состояние, Ø18 мм		Образцы для механических испытаний, Ø1,5 мм		Проволока для резистометрии, Ø0,25 мм	
	Диаметр магниевое волокна, мм	Объемная доля Cu/Mg-интерфейса, мм ⁻¹	Диаметр магниевое волокна, мм	Объемная доля Cu/Mg-интерфейса, мм ⁻¹	Диаметр магниевое волокна, мм	Объемная доля Cu/Mg-интерфейса, мм ⁻¹
Cu/1Mg	12,00	0,15	1,000	1,78	0,170	10,87
Cu/7Mg	2,00	0,17	0,170	2,11	0,028	12,53
Cu/49Mg	0,33	0,20	0,028	2,44	0,005	15,67

рассчитать прочностные свойства композитов. У этого подхода есть свои ограничения: «правило» не работает при наноразмерных толщинах композитов, и, кроме того, на интерфейсе компонентов не должно формироваться каких-либо новых фаз.

Полученные в данной работе Cu/Mg-композиты удовлетворяют перечисленным выше требованиям. Как следует из таблицы 2, магниевое волокно имеет минимальный размер в Cu/49Mg-композите: в образцах для механических испытаний Ø1,5 мм его диаметр составляет ~28 мкм, а в тонких проволоках Ø0,25 мм для резистометрии ~Ø5 мкм. Поэтому мы пришли к выводу о возможности использования «правила смесей» для оценки пределов текучести деформированных композитов.

С учетом изложенных в работе [15] представлений, предел текучести Cu/Mg-композита ($\sigma_{0,2}^{Cu/Mg}$) можно рассчитать по формуле

$$\sigma_{0,2}^{Cu/Mg} = V_{Cu} \times \sigma_{0,2}^{Cu} + V_{Mg} \times \sigma_{0,2}^{Mg}, \quad (2)$$

где V_{Cu} и V_{Mg} – объемные доли меди и магния (при этом $V_{Cu} + V_{Mg} = 1$);

$\sigma_{0,2}^{Cu}$ и $\sigma_{0,2}^{Mg}$ – соответствующие пределы текучести.

Аналогичный подход позволяет оценить удельное электросопротивление, что ранее было показано на примере слоистых Cu/V-композитов [3]. Электросопротивление в данном случае можно вычислить, исходя из известной формулы для параллельно соединенных проводников. В данном случае проводниками являются компоненты композита, при этом необходимо учитывать объемную долю каждого из них. Естественно, что такой подход применим только в том случае, если на интерфейсе компонентов композита не имеется каких-либо дополнительных фаз.

Расчет величины удельного электросопротивления деформированных Cu/Mg-композитов ($\rho^{Cu/Mg}$) прово-

дился в соответствии с методикой из работы [3] с использованием формулы

$$1/\rho^{Cu/Mg} = V_{Cu}/\rho^{Cu} + V_{Mg}/\rho^{Mg}, \quad (3)$$

где V_{Cu} и V_{Mg} – объемные доли меди и магния; ρ^{Cu} и ρ^{Mg} – удельное электросопротивление меди и магния в сильно деформированном состоянии.

Очевидно, что для проведения расчетов необходимо знать объемные доли компонентов. Они были рассчитаны для каждого исследованного композита, исходя из соотношения диаметра медной заготовки и диаметров магниевых вставок (таблица 1). На основе этих расчетов была проведена теоретическая оценка плотности каждого из образцов. Полученные величины плотностей композитов были проверены экспериментально, путем измерения массы и объема образцов; все результаты сведены в таблицу 3. В целом сопоставление экспериментальной и расчетной плотностей композитов показывает приблизительно одинаковую точность наших оценок объемных долей меди и магния в каждом из образцов.

Подбор экспериментальных данных для проведения расчетов. Очевидно, что для проведения расчетов необходимо знать физико-механические свойства компонентов исследуемого композита. В работе [15] особо подчеркивается, что адекватная оценка по «правилу смесей» может быть достигнута только в том случае, если известны свойства компонентов после точно таких же деформационных воздействий, с применением которых был получен сам композит.

Ранее нами проводились эксперименты по определению механических свойств образцов сильно деформированной меди [16]. Предел текучести меди после волочения ($\epsilon \approx 2,3$) составлял $\sigma_{0,2}^{Cu} \approx 350$ МПа. Механические свойства магния после гидроэкструзии и волочения с суммарной деформацией $\epsilon \approx 3,2$ определялись

Таблица 3. Физико-механические свойства деформированных композитов

Композит	Плотность, г/см ³		Удельное электросопротивление, ρ , 10 ⁻⁸ Ом м ($\epsilon \approx 8,6$)		Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа ($\epsilon \approx 5,0$)	
	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
Cu/1Mg	5,5	5,7	2,35	2,52	290	250
Cu/7Mg	7,7	7,5	2,07	2,08	322	307
Cu/49Mg	8,8	8,6	1,88	1,87	359	341

в работе [17]. Предел текучести таких сильно деформированных магниевых прутков составлял $\sigma_{0,2}^{Mg} \approx 125$ МПа.

Именно эти данные были использованы для оценки предела текучести образцов исследованных композитов по формуле (2). Результаты расчетов сведены в таблицу 3. В этой же таблице приведены экспериментальные данные по результатам механических испытаний на растяжение образцов исследованных композитов.

При оценке удельного электросопротивления Cu/Mg-композитов значение электросопротивления меди после ИПД ($e \approx 6,0$) было взято из работы [16]: оно составляет $\rho = 1,83 \times 10^{-8}$ Ом·м. Эти данные были получены нами ранее, при исследовании структуры и свойств сплавов на медной основе. Удельное электросопротивление магния после ИПД удалось найти в работе [18] для прокатанных образцов: $\rho = 4,77 \times 10^{-8}$ Ом·м. Значений электросопротивления магния после ИПД методом гидрокстрезии найти в литературе не удалось. Мы считаем, что в данном случае это не играет большой роли: как известно, при параллельном соединении проводников определяющий вклад вносит проводник с наименьшим электросопротивлением.

Результаты расчетов по формуле (3) удельного электросопротивления исследуемых композитов и соответствующие экспериментальные результаты также представлены в таблице 3.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе сопоставления полученных данных можно сделать вывод, что использование предварительных расчетов позволяет с приемлемой точностью оценить физико-механические свойства композита. Как хорошо видно из таблицы 3, наибольшее соответствие между результатами расчетов и экспериментальными данными наблюдается для образцов Cu/7Mg- и Cu/49Mg-композитов. К примеру, в соответствии с формулой (2) предел текучести Cu/1Mg-композита был оценен как $\sigma_{0,2}^{Cu/Mg} \approx 250$ МПа. Механические испытания выявили достаточно большое отличие экспериментального результата от расчетных значений для одножильного композита (таблица 3). Экспериментальный предел текучести образцов Cu/1Mg-композита составляет $\sigma_{0,2} = 290$ МПа, т.е. в действительности он оказался прочнее практически на 14 %. Можно предположить, что такой результат вызван различиями деформационного течения меди с ГЦК кристаллической решеткой и магния с ГПУ-решеткой. Кстати, к такому же выводу пришли авторы работы [15]: результаты их расчетов для композитов из двух алюминиевых сплавов практически совпадали с экспериментом, но сильно расходились при работе с Al/Mg-композитом. В свою очередь, экспериментальный ($\sigma_{0,2} = 322$ МПа) и теоретический ($\sigma_{0,2} \approx 330$ МПа) пределы текучести Cu/7Mg-композита оказались близки. Вероятно, в данном случае прочностные свойства образцов в основном определяются медной матрицей, а вклад магния незначителен ввиду малости его объема. По этой же причине достаточно близки экспериментальные данные и результаты расчетов для Cu/49Mg-композита.

Вычисленное на основе формулы (3) удельное электросопротивление деформированного Cu/1Mg-композита составляет: $\rho^{Cu/1Mg} \approx 2,52 \times 10^{-8}$ Ом·м; при увеличении

содержания меди в Cu/7Mg-композите оно закономерно падает до $\rho^{Cu/7Mg} \approx 1,93 \times 10^{-8}$ Ом·м. Экспериментальная проверка проведенных расчетов показала, что после ИПД по использованной нами схеме ($e \approx 8,6$) удельное электросопротивление Cu/1Mg-композита составляет $\rho^{Cu/1Mg} = 2,35 \times 10^{-8}$ Ом·м. Сравнение результатов выявило неплохое соответствие удельного электросопротивления образцов Cu/1Mg-композита с расчетными данными (расхождение составляет ~ 7 %). Теоретическое значение удельного электросопротивления деформированных Cu/7Mg- и Cu/49Mg-композитов практически не отличается от экспериментальных результатов.

В конце обсуждения хотелось бы несколько подробнее остановиться на результатах, полученных для Cu/49Mg-композита. Казалось бы, с увеличением содержания меди точность модельных оценок должна возрастать, поскольку вклад от магния становится минимальным. Однако экспериментальный предел текучести Cu/49Mg-композита ($\sigma_{0,2} = 359$ МПа) даже превысил значения для чистой меди, которые мы брали для своих расчетов ($\sigma_{0,2} = 350$ МПа). Экспериментальное удельное электросопротивление этого композита несколько превышает расчетное, чем сильно отличается от двух других исследованных композитов. Мы полагаем, что в Cu/49Mg-композите с малым размером магниевых волокон и значительной объемной долей Cu/Mg-интерфейса, все большую роль начинают играть процессы, влиянием которых в двух других композитах можно пренебречь. В данном случае речь идет о вызванном ИПД механосплавлении на границе раздела: тонкие приповерхностные слои каждого из компонентов начинают обогащаться атомами друг друга. Такие эффекты наблюдались ранее неоднократно (КПВД) разнородных порошков [19]. Используемые нами деформационные воздействия ($e \approx 8,6$) сопоставимы с деформацией КПВД. Размер магниевых волокон (~ 5 мкм) также близок к использованным в работе [19] порошкам. Если предположить, что толщина образовавшегося при ИПД приповерхностного слоя новой фазы на медно-магниевой основе составляет один-два микрометра, этого будет достаточно для изменения физико-механических свойств Cu/49Mg-композита. Эту гипотезу достаточно легко проверить путем увеличения количества магниевых волокон при одновременном уменьшении их размера. Мы уже движемся в этом направлении: нами получен Cu/Mg-композит, который содержит около одного миллиона тонких магниевых волокон. Обнаруженное явление и предложенное объяснение представляют несомненный интерес с точки зрения формирования структуры на поверхности раздела композитов.

Следует отметить, что в последнее время стали появляться работы по изучению Cu/Mg-композитов с точки зрения их использования в водородной энергетике [20]. Таким образом, полученные в данной работе результаты представляют интерес для различных практических применений.

ВЫВОДЫ

1. Использование расчетов физико-механических свойств металлических композитов по «правилу смесей» позволяет получить результаты, близкие

к экспериментальным лишь при большой разнице объемных долей компонентов.

2. Оценка физико-механических свойств металлических композитов по «правилу смесей» имеет существенно больше ограничений, чем считалось ранее.

3. Полученные в данной работе результаты можно использовать при разработке новых подходов к созданию высокопрочных композитных проводников.

Изучение структуры образцов проводилось в ОЭМ ЦКП УрО РАН, механические испытания выполнялись в ОМИ ЦКП УрО РАН.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Давление», № АААА-А18-118020190104-3) и при частичной поддержке УрО РАН (проект № 18-10-2-24).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Осинцев О.Е., Федоров В.Н. Медь и медные сплавы. М.: Машиностроение, 2004. 336 с.
- Дерягина И.Л., Попова Е.Н., Валова-Захаревская Е.Г., Патраков Е.И. Структура и термическая стабильность высокопрочного нанокompозита Cu-18Nb в зависимости от степени деформации // Физика металлов и металловедение. 2018. Т. 119. № 1. С. 99–108.
- Wang P.P., Wang X.J., Du J.L., Ren F., Zhang Y., Zhan X., Fu E.G. The temperature and size effect on the electrical resistivity of Cu/V multilayer films // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 126. P. 294–301.
- Ko Y.G., Namgung S., Lee B.U., Shin D.H. Mechanical and electrical responses of nanostructured Cu-3 wt %Ag alloy fabricated by ECAP and cold rolling // *Journal of Alloys and Compounds*. 2010. Vol. 504. № Suppl. 1. P. S448–S451.
- Kim G., Chai X., Yu L., Cheng X., Gianola D.S. Interplay between grain boundary segregation and electrical resistivity in dilute nanocrystalline Cu alloys // *Scripta Materialia*. 2016. Vol. 123. P. 113–117.
- Zhao S., Zheng Z., Huang Z., Dong S., Luo P., Zhang Z., Wang Y. Cu matrix composites reinforced with aligned carbon nanotubes: Mechanical, electrical and thermal properties // *Materials Science and Engineering A*. 2016. Vol. 675. P. 82–91.
- Исламгалиев Р.К., Нестеров К.М., Валиев Р.З. Структура, прочность и электропроводность медно-го сплава системы Cu-Cr, подвергнутого интенсивной пластической деформации // Физика металлов и металловедение. 2015. Т. 116. № 2. С. 219–228.
- Wang F., Wakoh K., Li Y., Ito S., Yamanaka K., Koizumi Y., Chiba A.. Study of microstructure evolution and properties of Cu-Fe microcomposites produced by a pre-alloyed powder method // *Materials and Design*. 2017. Vol. 126. P. 64–72.
- Lyu S., Sun Y., Ren L., Xiao W., Ma C. Simultaneously achieving high tensile strength and fracture toughness of Ti/Ti-Al multilayered composites // *Intermetallics*. 2017. Vol. 90. P. 16–22.
- Костина А.Е., Волков А.Ю. Влияние длительных отжигов на структуру и свойства деформированного сплава Cu-8at.%Pd // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2017. № 3. С. 76–83.
- Комкова Д.А., Волков А.Ю. Структура и текстура магния после низкотемпературной мегапластической деформации // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2017. № 3. С. 70–75.
- Комкова Д.А., Волков А.Ю. Температурная аномалия прочностных свойств в деформированной магниевой фольге // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2017. № 12. С. 11–17.
- Nonaka K., Sakazawa T., Nakajima H. Reaction Diffusion in Mg-Cu System // *Materials Transactions, JIM*. 1995. Vol. 36. № 12. P. 1463–1466.
- Volkov A.Yu., Novikova O.S., Antonov B.D. The kinetics of ordering in an equiatomic CuPd alloy: A resistometric study // *Journal Alloys and Compounds*. 2013. Vol. 581. P. 625–631.
- Feng B., Xin Y., Sun Z., Yu H., Wang J., Liu Q. On the rule of mixtures for bimetal composites // *Materials Science and Engineering A*. 2017. Vol. 704. P. 173–180.
- Волков А.Ю., Новикова О.С., Костина А.Е., Антонов Б.Д. Изменение электрических и механических свойств меди при легировании палладием // *Физика металлов и металловедение*. 2016. Т. 117. № 9. С. 977–986.
- Volkov A.Yu., Kliukin I.V. Improving the mechanical properties of pure magnesium through cold hydrostatic extrusion and low-temperature annealing // *Materials Science and Engineering A*. 2015. Vol. 627. P. 56–60.
- Эйдензон М.А. Магний. М.: Металлургия, 1969. 352 с.
- Толмачев Т.П., Пилюгин В.П., Анчаров А.И., Чернышев Е.Г., Пацелов А.М. Образование, структура и свойства сплавов системы Au-Co, полученных интенсивной пластической деформацией под давлением // *Физика металлов и металловедение*. 2016. Т. 117. № 2. С. 155–162.
- Tanaka K., Nishino D., Hayashi K., Ikeuchi S., Kondo R., Takeshita H.T. Formation of Mg₂Cu at low temperature in Mg/Cu super-laminate composites during initial hydrogenation // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42. № 35. P. 22502–22510.

REFERENCES

- Osintsev O.E., Fedorov V.N. *Med' i mednye splavy* [Copper and copper alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 336 p.
- Deryagina I.L., Popova E.N., Valova-Zaharevskaya E.G., Patrakov E.I. Structure and thermal stability of high-strength Cu-18Nb composite depending on the degree of deformation. *Physics of metals and metallography*, 2018, vol. 119, no. 1, pp. 99–108.
- Wang P.P., Wang X.J., Du J.L., Ren F., Zhang Y., Zhan X., Fu E.G. The temperature and size effect on the electrical resistivity of Cu/V multilayer films. *Acta Materialia*, 2017, vol. 126, pp. 294–301.
- Ko Y.G., Namgung S., Lee B.U., Shin D.H. Mechanical and electrical responses of nanostructured Cu-3 wt%Ag alloy fabricated by ECAP and cold rolling. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, vol. 504, no. Suppl. 1, pp. S448–S451.
- Kim G., Chai X., Yu L., Cheng X., Gianola D.S. Interplay between grain boundary segregation and electrical resistivity in dilute nanocrystalline Cu alloys. *Scripta Materialia*, 2016, vol. 123, pp. 113–117.
- Zhao S., Zheng Z., Huang Z., Dong S., Luo P., Zhang Z., Wang Y. Cu matrix composites reinforced with aligned

- carbon nanotubes: Mechanical, electrical and thermal properties. *Materials Science and Engineering A*, 2016, vol. 675, pp. 82–91.
7. Islamgaliev R.K., Nesterov K.M., Valiev R.Z. Structure, strength, and electric conductivity of a Cu-Cr copper-based alloy subjected to severe plastic deformation. *Physics of metals and metallography*, 2015, vol. 116, no. 2, pp. 209–218.
 8. Wang F., Wakoh K., Li Y., Ito S., Yamanaka K., Koizumi Y., Chiba A.. Study of microstructure evolution and properties of Cu-Fe microcomposites produced by a pre-alloyed powder method. *Materials and Design*, 2017, vol. 126, pp. 64–72.
 9. Lyu S., Sun Y., Ren L., Xiao W., Ma C. Simultaneously achieving high tensile strength and fracture toughness of Ti/Ti-Al multilayered composites. *Intermetallics*, 2017, vol. 90, pp. 16–22.
 10. Kostina A.E., Volkov A.Yu. The influence of prolonged annealing on the structure and properties of the deformed Cu-8at.%Pd alloy. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, no. 3, pp. 76–83.
 11. Komkova D.A., Volkov A.Yu. Magnesium structure and texture after the low-temperature megaplastic deformation. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, no. 3, pp. 70–75.
 12. Komkova D.A., Volkov A.Yu. Temperature anomaly of strength properties in deformed magnesium foil. *Metal science and heat treatment*, 2017, vol. 59, no. 11-12, pp. 755–760.
 13. Nonaka K., Sakazawa T., Nakajima H. Reaction Diffusion in Mg-Cu System. *Materials Transactions, JIM*, 1995, vol. 36, no. 12, pp. 1463–1466.
 14. Volkov A.Yu., Novikova O.S., Antonov B.D. The kinetics of ordering in an equiatomic CuPd alloy: A resistometric study. *Journal Alloys and Compounds*, 2013, vol. 581, pp. 625–631.
 15. Feng B., Xin Y., Sun Z., Yu H., Wang J., Liu Q. On the rule of mixtures for bimetal composites. *Materials Science and Engineering A*, 2017, vol. 704, pp. 173–180.
 16. Volkov A.Yu., Novikova O.S., Kostina A.E., Antonov B.D. Effect of alloying with palladium on the electrical and mechanical properties of copper. *Physics of metals and metallography*, 2016, vol. 117, no. 9, pp. 945–954.
 17. Volkov A.Yu., Kliukin I.V. Improving the mechanical properties of pure magnesium through cold hydrostatic extrusion and low-temperature annealing. *Materials Science and Engineering A*, 2015, vol. 627, pp. 56–60.
 18. Eydenzon M.A. *Magniy* [Magnesium]. Moscow, Metallugriya Publ., 1969. 352 p.
 19. Tolmachev T.P., Pilyugin V.P., Ancharov A.I., Chernyshov E.G., Patselov A.M. The formation, structure, and properties of the Au-Co alloys produced by severe plastic deformation under pressure. *Physics of metals and metallography*, 2016, vol. 117, no. 2, pp. 135–142.
 20. Tanaka K., Nishino D., Hayashi K., Ikeuchi S., Kondo R., Takeshita H.T.. Formation of Mg₂Cu at low temperature in Mg/Cu super-laminate composites during initial hydrogenation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, no. 35, pp. 22502–22510.

THE COMPARISON OF THE EXPERIMENTAL DATA AND THE EDUCATED ESTIMATES OF STRENGTH AND ELECTRICAL PROPERTIES OF Cu/Mg COMPOSITES WITH VARIOUS PROPORTIONS OF THE COMPONENTS

© 2018

A.Yu. Volkov, Doctor of Sciences (Engineering), Head of Strength Laboratory

A.A. Kalonov, postgraduate student, research engineer of Strength Laboratory

M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg (Russia)

Keywords: metal composites; cuprum-magnesium alloys; strength properties of composites; resistometry; Cu/Mg composites.

Abstract: The existing modeling views allow with particular accuracy to estimate physical and mechanical properties of materials even at the stage of their discussion without long-term procedures of producing and carrying out tests. For example, when estimating composites' properties, currently, "mixture rule" is widely used that allows calculating strength properties and electrical resistance of composites based on the compositions, which are determined by the components' volume ratio. It is evident that the "mixture rule", as all modeling approaches, has its limitations, which the authors would like to estimate using one composite with various volume ratios of the components.

Using the fluid extrusion method, three Cu/Mg composite bars were produced, the copper matrix of which contained 1, 7 and 49 thin magnesium fibers. The educated estimates of strength properties and electrical resistance of the deformed composites were carried out using the "mixture rule". The authors compared the estimated data and the experimental results. It is shown that the fullest conformity of the calculation results with the experimental data can be observed in the composites with 7 and 49 magnesium fibers. In their turn, the estimated strength properties deviate widely from the experiment in the case of practically the same volumes of components in a single-core composite. It is caused by the difference in the mechanisms of deformation of a copper matrix with the FCC lattice and the magnesium HCP-fiber. The results obtained for a composite with the 49 magnesium fibers give the idea of the initial stages of formation of new phases on the Cu/Mg interface in response to the mechanical fusion processes during the severe plastic deformation.