

## Анализ прочности и пластичности композитов Cu—35Cr и Cu—65Cr, полученных прессованием в твердой фазе

А. И. Толочин, Е. В. Хоменко, А. В. Лаптев

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича  
НАН Украины, Киев

*Проведен сравнительный анализ физико-механических свойств и структуры композитов Cu—Cr с содержанием хрома 35 и 65% (об.), полученных прессованием в твердой фазе в вакууме при температурах 750, 850, 950 и 1050 °С. Исследованы слоистые образцы из двух слоев, составы которых соответствуют указанным композитам. Слоистые образцы получали при температуре 850 °С совместным кратковременным прессованием пористых заготовок при давлении  $\approx 1200$  МПа. Проведен анализ изменений микроструктуры в зависимости от температуры прессования методами количественной металлографии и изучен характер разрушения композитов после испытаний на сжатие и изгиб. Показано, что прочность данных композитов при образовании хромового каркаса определяется прочностью хрома.*

**Ключевые слова:** физико-механические свойства, композит Cu—Cr, кратковременное прессование при повышенных температурах, излом.

### Введение

Сплавы системы Cu—Cr с наилучшей стороны зарекомендовали себя в качестве материала для электрических контактов в вакуумных выключателях коммутационных аппаратов, работающих в силовых сетях с высоким напряжением [1]. Структурой таких сплавов является медная матрица, содержащая частицы хрома, с большим электрическим сопротивлением. Размер частиц хрома и его распределение в медной матрице зависит от способа изготовления композиционного материала. При получении таких сплавов методом порошковой металлургии указанные характеристики зависят от подготовки порошковых смесей и их консолидации до плотного состояния. Основным способом консолидации композитов системы Cu—Cr является жидкофазное спекание. Однако спекание в присутствии жидкой фазы не обеспечивает теоретической плотности материала при содержании хрома в сплаве больше 35% (об.)\* [2]. Остаточная пористость материала существенно снижает эксплуатационные свойства вакуумных дугогасительных контактов. Вместе с тем установлено, что уменьшение содержания хрома в материале контакта способствует свариванию, прогрессирующей эрозии и резкому снижению коммутационного ресурса контактов [1, 3].

Проблему получения плотных композитов Cu—Cr с высоким содержанием хрома можно решить, применив схему консолидации порошковых смесей, основанную на деформационной обработке при повышенных температурах. В Институте проблем материаловедения НАН Украины разра-

\* Здесь и далее содержание хрома приведено в % (об.).

ботан метод импульсного горячего прессования, который обеспечивает давление порядка 1200 МПа, прикладываемое к материалу в течение  $(4-8) \cdot 10^{-3}$  с. Данный технологический подход позволяет уплотнять двухфазные порошковые композиты в широком интервале температур в условиях вакуума не хуже  $10^{-1}$  Па. Причем уплотнение в твердой фазе позволяет избежать укрупнения структурных составляющих материала, которое отрицательно проявляется на его механических свойствах.

В связи с изложенным важное научное и прикладное значение имеет разработка технологии получения композитов Cu—Cr с большим содержанием хрома (от 35 до 65%) методом деформационной обработки при повышенных температурах (в твердой фазе) и исследование уровня получаемых свойств материала.

### **Методика эксперимента**

В качестве исходных компонентов порошковых смесей Cu—35Cr и Cu—65Cr были выбраны порошки электролитической меди и хрома, восстановленного гидридом кальция. Чистота порошков соответствовала содержанию основного металла 99,6% (мас.). Порошки смешивали и размалывали в шаровой мельнице с твердосплавными шарами в течение 48 ч в среде этилового спирта при соотношениях масс шаров и смеси 8 : 1 и 11 : 1. Из полученной смеси после сушки прессовали цилиндрические заготовки диаметром 30 мм при давлении 150 МПа. Затем заготовки загружали в вакуумную камеру и нагревали до заданной температуры в течение 60 мин. Изотермическая выдержка при заданной температуре составляла 20 мин. После изотермической выдержки заготовку подвергали прессованию за счет кинетической энергии подвижных частей установки, в результате чего давление прессования достигало 1200 МПа. Прессование осуществляли при температурах 750, 850, 950 и 1050 °С. При температуре 750 °С проводили также двукратное прессование заготовок. Для сравнения прессовки, не подвергнутые деформации, спекали при 1150 °С. Кроме того, при температуре 850 °С были спрессованы двухслойные образцы: то есть одна часть образца состояла из сплава Cu—35Cr, а другая — из Cu—65Cr. Цилиндрические заготовки после уплотнения разрезали на прямоугольные штабики для определения плотности, электросопротивления, механических свойств и изучения структуры. Плотность определяли гидростатическим взвешиванием, электросопротивление — методом сравнения с сопротивлением эталона. Для определения механических свойств образцы подвергали испытаниям на сжатие и изгиб, а также измеряли твердость по Виккерсу при нагрузке 50 Н. При испытаниях на трехточечный изгиб двухслойные образцы были разделены на 2 партии. В первой партии растяжению подвергали слой состава Cu—35Cr, тогда как нижний слой состава Cu—65Cr подвергали сжатию, во второй партии — наоборот. При испытании на сжатие определяли уровень пластической деформации по диаграмме нагружения до момента разрушения образца. Структуру и поверхность разрушения образцов изучали на оптическом и сканирующем электронном микроскопах.

### **Результаты эксперимента и их обсуждение**

Анализ уплотняемости порошковых композитов при свободном спекании в области температур 750—1150 °С показывает, что некоторое

уплотнение образцов (на 15%) наблюдается только при температуре 1150 °С (начальная пористость составляла 48 и 43% для сплавов с Cu—35Cr и Cu—65Cr соответственно). Применение операции горячего прессования позволяет получать низкопористые образцы исследуемых сплавов при температуре 750 °С (рис. 1, а). Двукратное уплотнение давлением при этой температуре обеспечивает более существенное уплотнение образцов как с содержанием хрома 35, так и 65%. Однако плотная структура композиционного материала не является достаточным условием улучшения его механических характеристик. При использовании низких температур консолидации возникает вопрос о межчастичном взаимодействии, то есть о качестве контакта между частицами материала. Косвенную оценку этой характеристике может дать удельное электросопротивление, зависимость которого от температуры прессования представлена на рис. 1, б и показывает практически одинаковый уровень сопротивления для каждого из сплавов при всех температурах прессования. Некоторое снижение сопротивления для обоих сплавов наблюдается на образцах после двукратного их уплотнения при температуре 750 °С. Качество контакта на межфазной границе в композитах играет достаточно важную роль, так как от прочности границ может существенно зависеть эрозия материала во время работы. Более качественную оценку прочности межфазных границ можно получить, исходя из данных о механических свойствах исследуемых сплавов. Как видно на рис. 2, а, прочность при изгибе сплавов Cu—Cr увеличивается с повышением температуры уплотнения и наибольшего значения достигает при температуре прессования 1050 °С. Использование двукратного уплотнения хромомедных композитов позволяет существенно повысить прочность при низких температурах консолидации 750 °С. Интересным является тот факт, что прочность практически не зависит от содержания хрома в сплаве при температурах уплотнения 850—1050 °С. Это можно объяснить на основании анализа изменений, которые претерпевает микроструктура, о чем будет изложено далее. Прочность двухслойного композита примерно соответствует прочности каждого сплава в отдельности 770 МПа, спрессованных при температуре 850 °С. И здесь

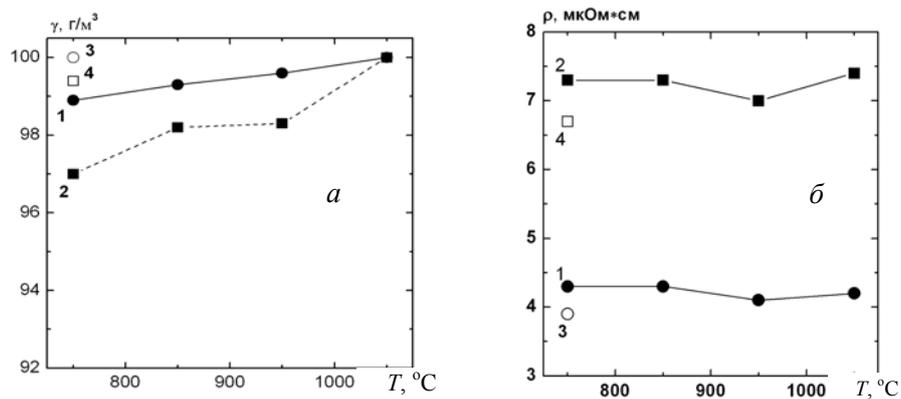


Рис. 1. Зависимость относительной плотности (а) и удельного электросопротивления (б) от температуры уплотнения композитов Cu—35Cr и Cu—65Cr: 1, 2 — горячее прессование сплавов Cu—35Cr и Cu—65Cr соответственно; 3, 4 — двукратное горячее прессование сплавов Cu—35Cr и Cu—65Cr соответственно.

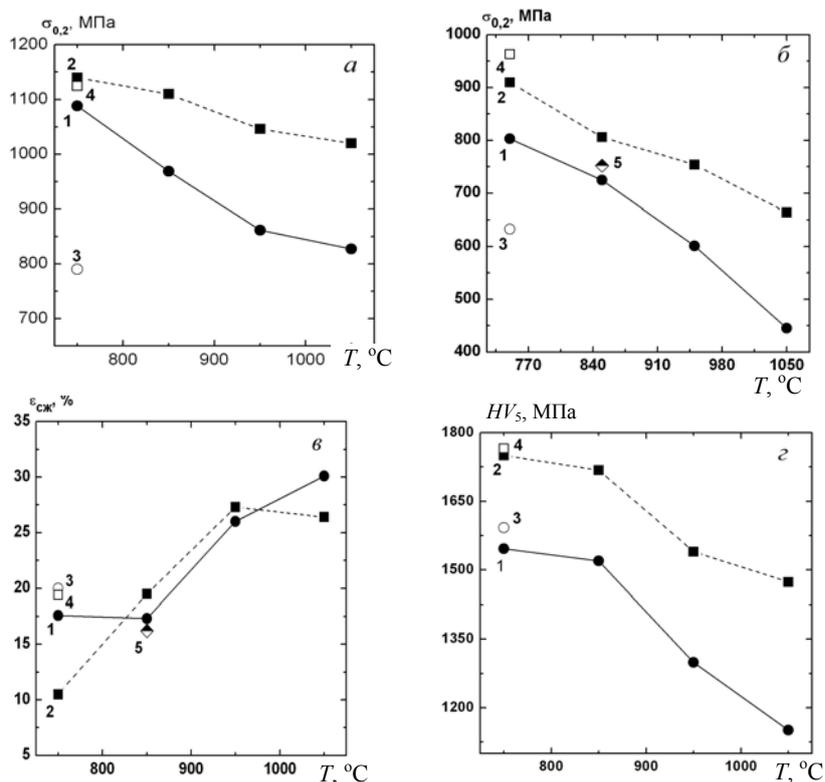


Рис. 2. Зависимость предела прочности при изгибе  $\sigma_{изг}$  (а), предела текучести  $\sigma_{0.2}$  (б), пластической деформации при сжатии  $\epsilon_{сж}$  (в) и твердости  $HV$  (г) от температуры уплотнения композитов Cu—35Cr и Cu—65Cr: 1, 2 — горячее прессование образцов Cu—35Cr и Cu—65Cr соответственно; 3, 4 — двукратное горячее прессование образцов Cu—35Cr и Cu—65Cr соответственно; 5 — горячее прессование двухслойного композита Cu—35Cr/Cu—65Cr.

необходимо отметить, что разрушение двухслойного композита при трехточечном изгибе происходило по телу материала независимо от того, какой из сплавов больше подвергался растягивающим напряжениям, а какой — сжимающим. Иными словами, какая часть сплава (с большим содержанием хрома или меньшим) находилась на опорах, то есть по границе раздела композита Cu—35Cr/Cu—65Cr разрушения не происходило, что подтверждает факт образования качественного контакта между частицами двух сплавов при температуре  $850^{\circ}\text{C}$  во время горячего прессования.

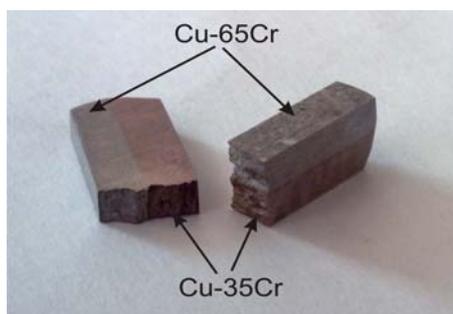
Испытания при сжатии двухслойного композита показали, что его предел текучести находится на уровне предела текучести сплава Cu—35Cr, полученного при температуре  $850^{\circ}\text{C}$  (рис. 2, б), хотя предел текучести сплава с 65% хрома при данной температуре прессования выше всего на 100 МПа. Разрушение двухслойного композита при нагружении сжатием имело место также по телу материала, то есть образовывались плоскости скольжения как в слое состава Cu—35Cr, так и в слое состава Cu—65Cr, тогда как по границе слоя Cu—35Cr/Cu—65Cr разрушения не наблюдалось (рис. 3, б). Поведение каждого из образцов при сжатии показало, что с увеличением температуры прессования предел текучести

материалов снижается, но интенсивность уменьшения предела текучести композита состава Cu—35Cr выше, чем состава Cu—65Cr.

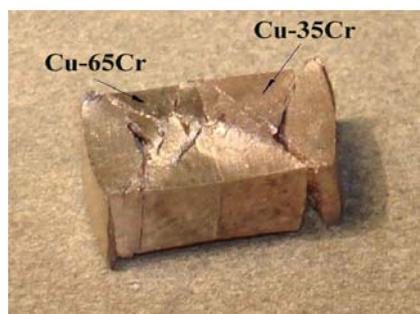
В соответствии с изменением предела текучести хромомедных композитов при изменении температуры их уплотнения наблюдается увеличение пластической деформации этих сплавов с повышением температуры прессования. Причем двукратное уплотнение при температуре 750 °С приводит к возрастанию пластичности на ~20% композитов как состава Cu—35Cr, так и состава Cu—65Cr. На рис. 4 представлены диаграммы нагружения при сжатии хромомедных образцов одного состава и двухслойного композита, по которым можно оценить характер деформации материала. Такое поведение образцов, точнее достаточно близкие механические характеристики при одинаковых режимах уплотнения, можно объяснить образующейся при уплотнении высокой давлением структурой.

Твердость контактных материалов, как считают многие специалисты, влияет на их эрозионную стойкость. При прессовании в интервале температур 750—1050 °С твердость композитов Cu—35Cr и Cu—65Cr уменьшается с увеличением температуры уплотнения (см. рис. 2, з). При температурах уплотнения до 850 °С не наблюдается заметного уменьшения твердости и только после указанной температуры твердость образцов уменьшается до 25% (при 1050 °С). Необходимо отметить достаточно высокий уровень твердости композитов Cu—35Cr и Cu—65Cr ( $HV = 1500—1750$  МПа), что существенно выше, чем в случае получения материала прессованием и твердофазным спеканием ( $HV = 800—1200$  МПа, [5]). Двукратное прессование образцов слабо отражается на их твердости.

Эрозионная стойкость материала зависит от предела его прочности, на который, в свою очередь, оказывает влияние качество контакта между частицами. Исследуя структуры сплавов составов Cu—35Cr и Cu—65Cr, полученных при разных температурах прессования, можно отметить, что в основе их строения лежат большие скопления частиц и агломератов частиц обеих структурных составляющих. Механический размол и смешение порошков хрома и меди в шаровом барабане не приводит ни к существенному измельчению частиц, ни к равномерному их распределению в смеси (рис. 5). Обработка кратковременным давлением образцов при повышенных температурах способствует деформированию как пластичной матрицы — меди, так и тугоплавкой составляющей композита — хрома.



а



б

Рис. 3. Вид двухслойного композита Cu—35Cr/Cu—65Cr после нагружения изгибом (а) и снятием (б).

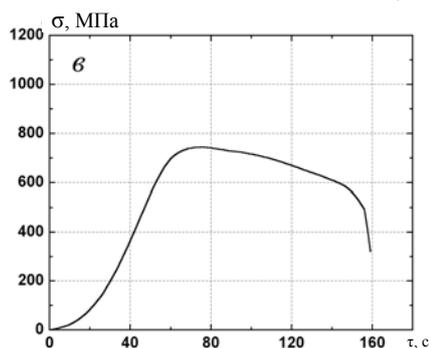
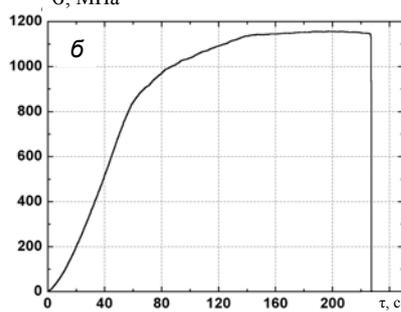
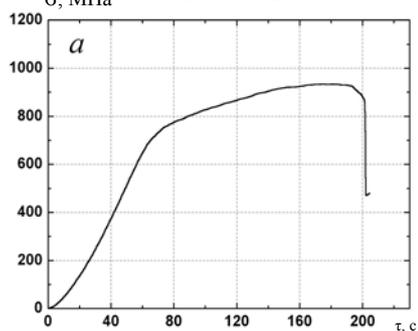


Рис. 4. Кривые нагружения сжатием образцов составов Cu—35Cr (а), Cu—65Cr (б) и двухслойного композита Cu—35Cr/Cu—65Cr (в), полученных горячим прессованием при температуре 850 °С.

Сравнить структуры спрессованных хромомедных композитов при температурах 750—1050 °С и свободно спеченных при температуре 1050 °С можно по фотографиям шлифов на рис. 5. На фотографиях шлифов видно, что структура образцов составов Cu—35Cr и Cu—65Cr состоит из двух каркасов — хромового и медного. При этом стереологический анализ микроструктур показал, что степень контакта хромовых скоплений (доля площади поверхности, занимаемая межчастичными контактами в общей площади поверхности частиц) в сплаве Cu—35Cr составляет  $C = 0,35$ , а в сплаве Cu—65Cr —  $C = 0,60$ . Исходя из этого, можно предположить, что прочность данных композитов при образовании хромового каркаса определяется прочностью хрома, который, соответственно, затрудняет деформацию меди, что объясняет одинаковую прочность сплавов разных составов в широком интервале температур прессования. Также можно предположить, что границы между фазами не являются прочными, однако стабильное электросопротивление при всех температурах и достаточно высокие уровни прочности и текучести указывают на качественный физический контакт на межфазной границе.

Изложенное подтверждается при анализе поверхности изломов, представленных на рис. 6. На фотографиях видно, что для образцов обоих составов характерно наличие трещин на поверхности разрушения, которые проходят в основном по фазе хрома. Также заметно, что медная фаза разрушалась после достаточно большой пластической деформации, а хромовая фаза — сколом.

Изучение на поверхности разрушения границы раздела двухслойного композита Cu—35Cr/Cu—65Cr показывает, что граница эта достаточно

прочная, а трещины в ней появляются вместе с образованием трещин в основном материале одного и другого сплава (рис. 7).

По нашему представлению, можно создать хромомедные композиты с более высокими свойствами, если при этом обеспечить равномерность

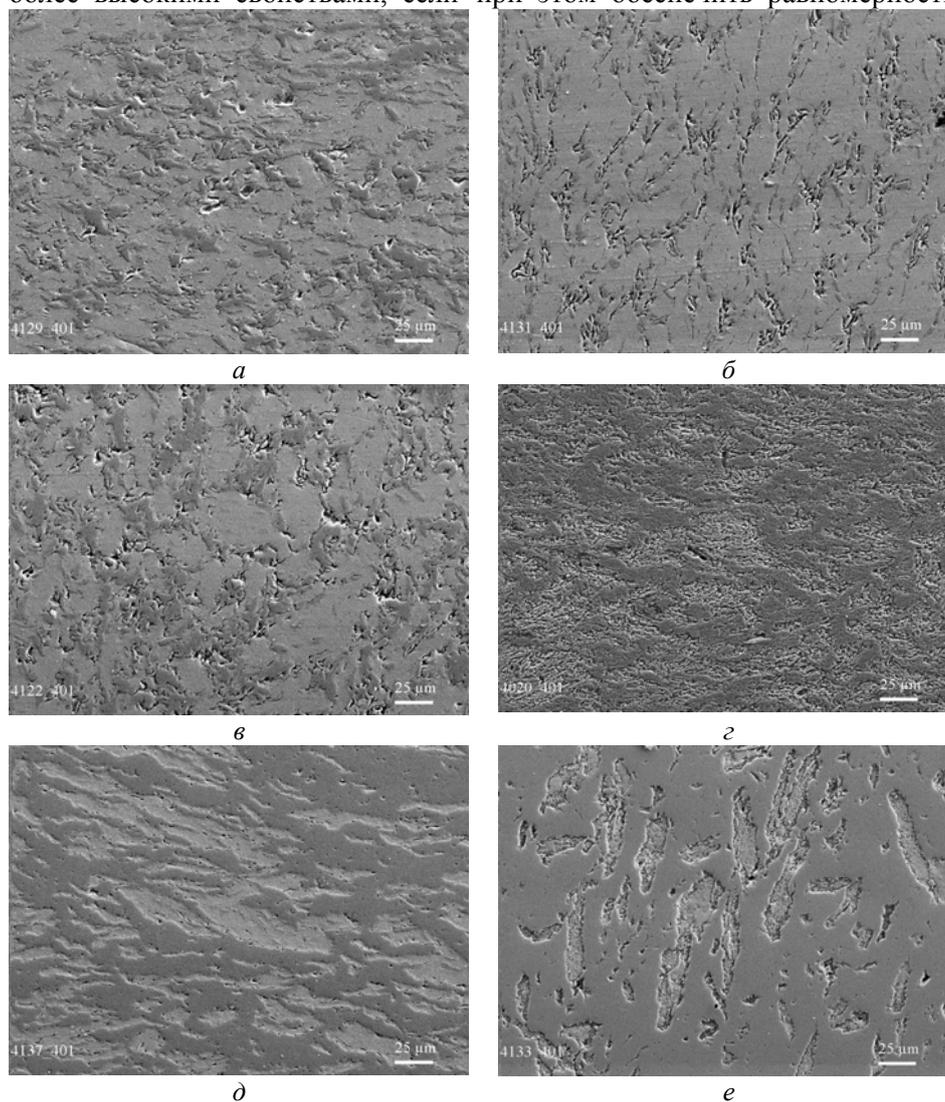


Рис. 5. Структура сплавов Cu—35Cr (*a—б*) и Cu—65Cr (*з—е*) после уплотнения при температурах (°C): 850 (*a*), 1050 (*б*) и 1050 (*в*), свободное спекание; 750 °C (*з*) — двукратное прессование; 850 (*д*) и 1050 (*е*) — свободное спекание.

распределения дисперсной фазы хрома в медной матрице, то есть структуру с минимальной степенью контакта хромовых частиц. С одной стороны, это предположительно снизит уровень электросопротивления композита, так как хром обладает относительно большим электрическим сопротивлением (13 мкОм·см) и образование каркаса, соответственно, может уменьшить электропроводность композита. С другой стороны, такая структура, в соответствии с уравнением Холла—Петча, позволит повысить прочность и твердость материала. Если принять, что предел текучести деформированной меди составляет 300 МПа [6], а хрома —

около 500 МПа [7], то создание матричной структуры на основе меди с упрочняющими мелкими частицами хрома, которая находится в состоянии всестороннего сжатия, может существенно увеличить указанные механические характеристики. Основанием для такого подхода могут служить

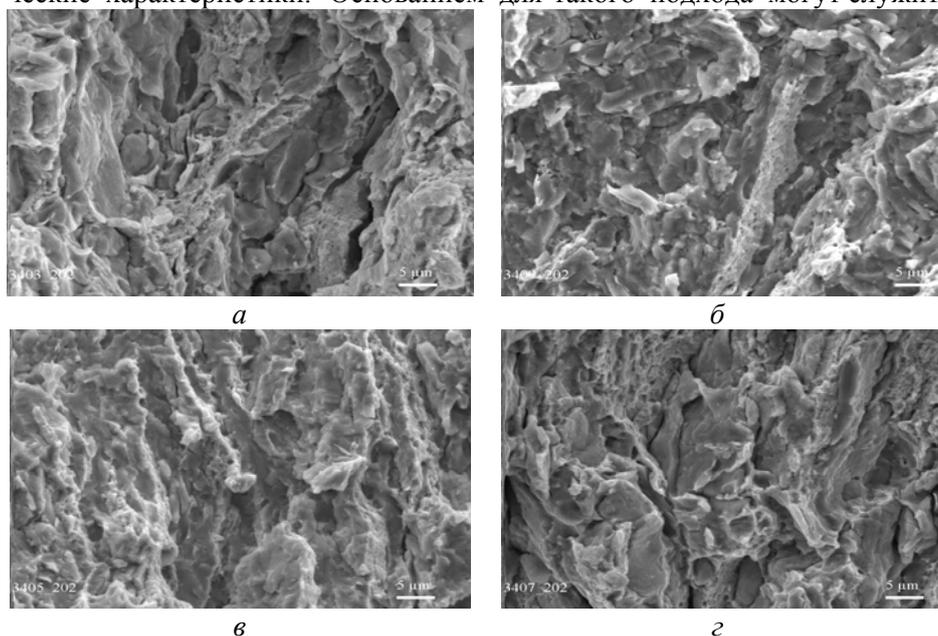


Рис. 6. Поверхность разрушения композитов Cu—35Cr (а, б) и Cu—65Cr (в, г), полученных при температурах (°С): а, в — 750, двукратное прессование; б, г — 850.

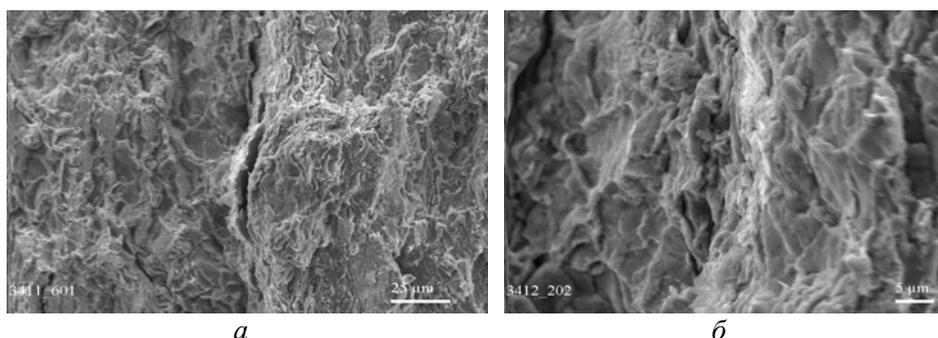


Рис. 7. Поверхность разрушения в зоне контакта двухслойного образца Cu—35Cr/Cu—65Cr, спрессованного при температуре 850 °С.

исследования, показавшие, что нитевидные медные кристаллы могут достигать прочности 4500 МПа [8].

1. Paul G. Slade. Advances in material developmen for high power vacuum interrupter contacts // IEEE Trans. on Comp., Packaging and Manufact. Technol., Part A. — 1994. — **17**, No. 1. — P. 96—106.
2. Дымченко В. А., Попович А. П. Процессы структурообразования порошковых медно-хромовых материалов // Порошковая металлургия. — 1991. — № 11. — С. 18—21.
3. Liu Jinglei, Liu Zuyan, Wang Erde. Deformation processed Cu—15Cr composite synthesized by hot hydrostatic extrusion of mechanical milled powders // J. Mater. Sci. and Technol. (China). — 2003. — **19**, No. 5. — P. 507—508.

4. Yanabu S., Tsutsumi T., Yokokura K., and Kaneko E. Recent technical developments in high-voltage and high-power vacuum circuit breakers // IEEE Trans. Plasma Sci. — 1989. — 17, No. 10. — P. 717—723.
5. Ding B., Wang H. J. Residual carbon in Cu—Cr contact materials // IEEE Trans. Hybrids, Manufact. Technol. — 1991. — 14. — P. 386—391.
6. Физико-химические свойства элементов: (Справ.) / Под ред. Г. В. Самсонова. — К.: Наук. думка, 1965. — 808 с.
7. Трефилов В. И., Ракицкий А. Н., Бродниковский В. П. и др. Исследование процессов динамического деформационного старения в хrome и его сплавах // Конструкционные сплавы хрома. — К.: Наук. думка, 1986. — С. 46—59.
8. Надгорный Э. М. Свойства нитевидных кристаллов // Успехи физ. наук. — 1962. — LXXVII, Вып. 2. — С. 201—227.

### **Аналіз міцності та пластичності композитів Cu—35Cr та Cu—65Cr, що одержані пресуванням у твердій фазі**

О. І. Толочин, О. В. Хоменко, А. В. Лаптев

*Проведено порівняльний аналіз фізико-механічних властивостей та структури композитів Cu—Cr із вмістом хрому 35 та 65% (об.), які отримували пресуванням у твердій фазі в вакуумі при температурах 750, 850, 950 та 1050 °C. Досліджено шаруваті зразки з двох шарів, складу яких відповідають вказаним композитам. Шаруваті зразки отримано при температурі 850 °C сумісним короточасним пресуванням пористих заготовок під тиском  $\approx 1200$  МПа. Проведено аналіз характеру руйнування композитів при випробуваннях на стискання та вигин методом кількісної металографії. Показано, що міцність даних композитів при утворенні хромового каркасу визначається міцністю хрому.*

**Ключові слова:** фізико-механічні властивості, композити Cu—Cr, короточасне пресування при підвищених температурах, поверхня зламу, кількісна металографія.

### **Analysis of strength and plasticity of the composites Cu—35Cr and Cu—65Cr, obtained by extrusion in the solid phase**

O. I. Tolochin, E. V. Khomenko, A. V. Laptev

*The comparative analysis of physico-mechanical properties and structure of the Cu—Cr composites with content of chromium 35 and 65% (vol.) , obtained by pressure in the solid phase in the vacuum at the temperatures 750, 850, 950 and 1050 °C is carried out. Furthermore, the layer specimens which consist of two layers, whose compositions correspond to these indicated composites are investigated. The layer specimens has been obtained on the way joint short-term pressure of porous billets at a temperature 850 °C by the pressure 1200 MPa. The analysis of the fracture surface of composites after the compression and bend tests by the method of quantitative metallography is carried out. It is shown that the strength of these composites under condition of chromium skelet formation is determined by the strength of chromium.*

**Keywords:** physico-mechanical properties, structure, Cu—Cr composites, short-term pressure, quantitative metallography.