

Васин В.А., Невровский В.А., Сметкин А.А., Сомов О.В. О технологии медно-хромового композита для электродов высоковольтных вакуумных коммутационных приборов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 88–94. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.4.11

Vasin V.A., Nevrovsky V.A., Smetkin A.A., Somov O.V. On technology of copper-chromium composite for electrodes of high-voltage vacuum devices. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2018, vol. 20, no. 4, pp. 88–94. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.4.11

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 20, № 4, 2018**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2018.4.11  
УДК 621.762.4, 621.762.5

**В.А. Васин<sup>1</sup>, В.А. Невровский<sup>2</sup>, А.А. Сметкин<sup>3</sup>, О.В. Сомов<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> НПП «Полигон-МТ», с. Новый Быт Московской обл., Россия

<sup>2</sup> Московский авиационный институт, Москва, Россия

<sup>3</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

<sup>4</sup> Научный центр порошкового материаловедения

Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, Россия

**О ТЕХНОЛОГИИ МЕДНО-ХРОМОВОГО КОМПОЗИТА ДЛЯ ЭЛЕКТРОДОВ**  
**ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВАКУУМНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ ПРИБОРОВ**

Изложен опыт разработки технологии производства медно-хромового композитного материала, который применяется для изготовления электродов высоковольтных вакуумных коммутационных приборов. Трудности создания таких композитов связаны с необходимостью удовлетворить различным и зачастую взаимно противоречивым требованиям, предъявляемым к материалам контактов для коммутации тока в вакууме. Эти материалы должны обладать высокой электропроводностью и теплопроводностью; иметь высокую механическую прочность и твердость как при комнатной температуре, так и при повышенных значениях температуры; иметь минимальную склонность к свариванию и прилипанию в контакте при прохождении сильного электротока; способствовать быстрому восстановлению электрической прочности вакуумного промежутка после разрыва контакта и погасания вакуумной дуги. Приводится сравнение материалов, полученных с помощью разных технологий, в частности спекания в вакууме, в восстанавливающей атмосфере и электродугового плавления. Оценка удельного сопротивления композитов выполнена с использованием модели двухкомпонентной смеси хаотически распределенных зерен компонентов. Методы порошковой металлургии позволяют получать композитные материалы из таких не образующих сплавы металлов, как медь и хром, которые наилучшим образом соответствуют требованиям, предъявляемым к электрическим контактам сильноточной вакуумной аппаратуры. Композиты получают холодным прессованием порошковых смесей электролитической меди и алюмотермического хрома с последующим спеканием в вакууме. Они обладают лучшей электропроводностью в сравнении с материалами, произведенными электродуговым плавлением. Разработанный в Научном центре порошкового материаловедения ПНИПУ медно-хромовый композит Cu65Cr35 находит применение в качестве заготовок для контактов дугогасительных камер серий КДВК, КДВН и др.

**Ключевые слова:** механоактивация, спекание, термомодулиметрический анализ, усадка, энергия активации, механизмы консолидации, фазовые превращения, карбид титана, карбид кремния, карбосилицид титана, промежуточные фазы.

**V.A. Vasin<sup>1</sup>, V.A. Nevrovsky<sup>2</sup>, A.A. Smetkin<sup>3</sup>, O.V. Somov<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> NPP "Polygon-MT", Novyj Byt, Moscow region, Russian Federation

<sup>2</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

<sup>4</sup> Centre of Powder Materials Science, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**ON TECHNOLOGY OF COPPER-CHROMIUM COMPOSITE**  
**FOR ELECTRODES OF HIGH-VOLTAGE VACUUM DEVICES**

This paper presents the experience of developing the production technology of copper-chromium composite material, which is used for the manufacture of electrodes of high-voltage vacuum switching devices. The difficulties in creating such composites are related to the need to meet various and often mutually contradictory requirements for materials of contacts for switching current in vacuum. These materials must have high electrical conductivity and thermal conductivity; have high mechanical strength and hardness, both at room temperature and at elevated temperatures; to have a minimum tendency to welding and sticking in contact during the passage of a strong electric current; to contribute to the rapid recovery of the electrical strength of the vacuum gap after breaking the contact and quenching the vacuum arc. A comparison of the materials obtained by different technologies, in particular those obtained by sintering in a vacuum, in a reducing atmosphere and by electric arc melting, is presented. The specific resistance of composites was evaluated using a model of a two-component mixture of randomly distributed grains of components. Methods of powder metallurgy allow to obtain composite materials from such non-forming alloys of metals as copper and chromium, which best meet the requirements for electrical contacts of high-current vacuum equipment. Composites are produced by cold pressing of powder mixtures of electrolytic copper and aluminothermic chromium followed by sintering in vacuum. It have better electrical conductivity compared to the materials produced by electric arc melting. Developed in the Centre of Powder Material Science (Perm National Research Polytechnic University) copper-chromium composite Cu65Cr35 is used as billets for the contacts arc chambers series KDVK, KDVN etc.

**Keywords:** mechanical activation, sintering, thermomodulometry analysis, shrinkage, activation energy, mechanisms of consolidation, phase transformations, titanium carbide, silicon carbide, titanium silicon carbide, intermediate phases.

## Введение

Медно-хромовые композитные материалы в настоящее время признаны лучшими среди металлических композитов, применяемых в вакуумных сильноточных приборах коммутации тока [1–9]. Производятся они с помощью различных технологий, которые в той или иной мере основаны на методах порошковой металлургии.

Один из ведущих мировых производителей контактных материалов для электровакуумной коммутационной аппаратуры – компания Siemens, предлагая свой медно-хромовый композит, замечает [7], что метод спекания разнородных порошков и метод пропитки тугоплавкой матрицы расплавом второго компонента обладают определенными недостатками. Трудности создания этих композитов связаны с необходимостью удовлетворить различным и зачастую взаимно противоречивым требованиям, предъявляемым к материалам контактов для коммутации тока в вакууме. Эти материалы должны обладать высокой электропроводностью и теплопроводностью; иметь высокую механическую прочность и твердость, как при комнатной температуре, так и при повышенных значениях температуры; иметь минимальную склонность к свариванию и прилипанию в контакте при прохождении сильного электротока; способствовать быстрому восстановлению электрической прочности вакуумного промежутка после разрыва контакта и погасания вакуумной дуги [8].

Последнее требование означает также, что материал контактов должен иметь низкую эмиссионную способность и обеспечивать высокое пробойное напряжение [8]. Для долговременной службы материал контактов должен иметь малый эрозионный износ. Соответственно, с этой точки зрения его температура плавления должна быть высокой. Всем перечисленным выше требованиям удовлетворяют композитные материалы сложного состава на основе меди и отчасти висмута, содержащие в качестве упрочняющего компонента тугоплавкие металлы – вольфрам, молибден, хром и др. [9].

Одной из наиболее важных характеристик контактного материала для коммутации сильных токов является величина его электропроводности, которая должна быть как можно выше. Чтобы иметь материал с минимальным удельным электрическим сопротивлением, необходимо повышать процент содержания меди в композите. В то же время уменьшение доли хрома уменьшает твердость материала и повышает риск свариваемости электродов в месте контакта. Ухудшаются также некоторые другие эксплуатационные свойства. Ис-

ходя из этого длительное время шли поиски оптимального состава композита с учетом того, что для композиций системы Cu–Cr характерен матричный тип структуры при фиксируемой фрагментации частиц тугоплавкой составляющей. Свойства таких материалов зависят от соотношения тугоплавкой и легкоплавкой составляющих, равномерности распределения частиц хрома и прочности связи на их границе раздела. Начав несколько десятилетий назад с применения композита Cu50Cr50, разработчики вакуумной электрокоммутационной аппаратуры пришли к композиту с содержанием хрома 25–30 %, который считается оптимальным контактным материалом [10].

Поиски путей снижения электрического сопротивления CuCr-композита продолжаются. Например, в работе [11] показана возможность радикального снижения содержания хрома (до 4,2 % в композите), но для обеспечения достаточной жесткости контакта в этой работе предлагается проводить операцию старения материала при температуре 500 °С. Однако это интересное предложение еще не оформлено в виде технологии. Для уменьшения свариваемости контактов в работе [12] испытан CuCr-композит с добавкой теллура. Структура композита изменилась, и прочность образцов на разрыв уменьшилась, что предполагает меньшую склонность его к свариваемости. Но эксперименты показали, что отключающие свойства контактов от добавки теллура не только не улучшились, но и ухудшились.

Согласно работе [7], производство композита CuCr методами порошковой металлургии требует тщательной подготовки исходных материалов. При недостаточной подготовке порошков в созданных методом пропитки матрицы композитных материалах наблюдаются дефекты в виде пустот, указывающие на наличие остаточных окислов на поверхности зерен порошкового хрома. Если используются порошки хрома, полученные алюмотермическим способом, то в спеченном материале часто наблюдаются окислы алюминия, что недопустимо. Чтобы избежать таких недостатков, фирма Siemens разработала метод производства медно-хромового композита путем электродугового плавления порошков меди и хрома. В этом методе требование к чистоте исходных материалов, по данным фирмы, существенно ниже, чем в других методах производства медно-хромового композита. Между тем метод прессования и последующего спекания является экономически более выгодным [13], хотя физические процессы не до конца прояснены. Авторы работы [14] обращают внимание на то, что хром обладает геттерными свойствами.

Ввиду этого при спекании он связывает выделяющийся из порошков кислород в виде твердого окисла  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , эффективно уменьшая пористость композита.

### Экспериментальная часть

Особенности технологий разных производителей спеченных медно-хромовых композитов для контактов состоят в методах предварительной очистки исходного сырья и в том, что спекание порошков после прессования производится либо в вакууме, либо в восстанавливающей газовой атмосфере.

Поскольку электрические контакты работают в вакуумной коммутационной аппаратуре при остаточном давлении  $p \approx 10^{-7}$  Па и ниже, к их материалам предъявляются высокие требования по плотности и отсутствию газообразных примесей. Согласно техническим условиям на медно-хромовый композит ТУ 14-001-03847211–2004, относительная плотность контактного материала должна составлять не менее 0,977 при разбросе этого значения 1,2–3,0 %. Представление о содержании газов, которое достигается в медно-хромовом композите методами порошковой металлургии, можно получить из проспектов фирм DODUCO (ФРГ) и Siemens (ФРГ): содержание кислорода 0,03–0,05 мас. %, азота – 0,004 %, водорода – 0,0003 %, твердость 80–90 НВ. Отечественный производитель АО «Полема» (Тула) обеспечивает согласно ТУ 14-22146–2000 содержание 0,07–0,08 % кислорода, 0,005 % азота, 0,002 % водорода, твердость 80 НВ.

В Научном центре порошкового материаловедения Пермского национального исследовательского политехнического университета (НЦ ПМ ПНИПУ) была разработана технология получения медно-хромового композита, включающая подготовку порошковой композиции, прессование и спекание в вакууме. По этой технологии были изготовлены образцы композита  $\text{Cu}_{65}\text{Cr}_{35}$  (с долей меди 65 % и 35 % хрома).

Приготовление шихты заданного состава по хрому и меди проводится в двухконусном смесителе с загрузкой до 50 кг. Для наиболее равномерного распределения компонентов в шихту добавляются мелющие стальные тела Г-образной формы в количестве 10–13 % к общей массе порошковой смеси. Общая продолжительность смешивания составляет 8–10 ч без перерыва.

Исследования различных режимов изготовления композита показали, что для получения качественного материала имеет значение также правильный выбор размера гранул исходных материалов. На рис. 1 представлено СЭМ-изображение медно-хромовой шихты, где отчетливо видны

дендритные частицы электролитической меди и частицы алюмотермического хрома. Были отработаны технологические приемы подготовки шихты и получения смесей нужного гранулометрического состава, которые на опытно-промышленном уровне позволили производить электроконтактные материалы с использованием существующего оборудования.

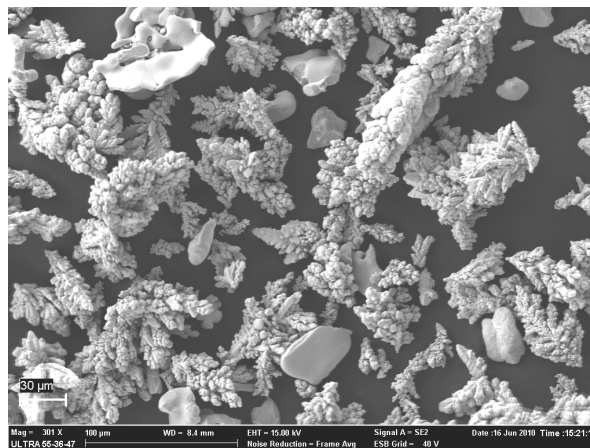


Рис. 1. Морфология частиц медно-хромовой шихты (сканирующая электронная микроскопия,  $\times 300$ )

Прессование только свежей шихты осуществляется в холодном состоянии на полуавтоматическом или ручном гидравлическом прессе в зависимости от размеров деталей при давлении 600–700 МПа. Спекание проводится в вакуумных печах при температуре 1040–1050 °С в течение 4 ч, далее следует охлаждение с печью до комнатной температуры. Указанные параметры обеспечивают формирование псевдосплава композиции  $\text{Cu-Cr}$ , обладающего плотной медной матрицей с включениями частиц хрома (рис. 2).

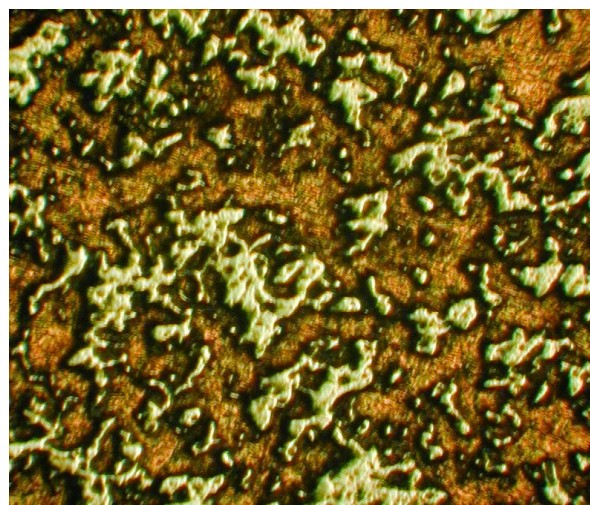


Рис. 2. Микроструктура спеченной композиции  $\text{Cu-Cr}$ . Не травлено (желтое – хром; коричневое – медь)

При этом использовались алюмотермический порошок хрома фирмы Delachaux (Франция) и порошок хрома от ООО «Спецферросплав» (Россия), по химическому составу аналогичный французскому. Медные порошки были взяты от производителя «Уралэлектромедь» – порошок ПМС-1.

При изготовлении композитов проводился анализ газовых примесей в порошках. Это позволило оптимизировать технологический режим восстановительного отжига исходных порошков с целью сведения к минимуму примесей в медно-хромовом композитном материале.

### Результаты исследования и их обсуждение

Для выбора соотношения хрома и меди при изготовлении композита необходимо в первую очередь ориентироваться на величину удельного сопротивления. Оценка удельного сопротивления композитов меди и хрома [15] выполнена с использованием модели двухкомпонентной смеси хаотически распределенных зерен компонентов [16]. Результаты расчета удельного электрического сопротивления медно-хромового композитного материала в зависимости от содержания в нем Cr приведены на рис. 3.

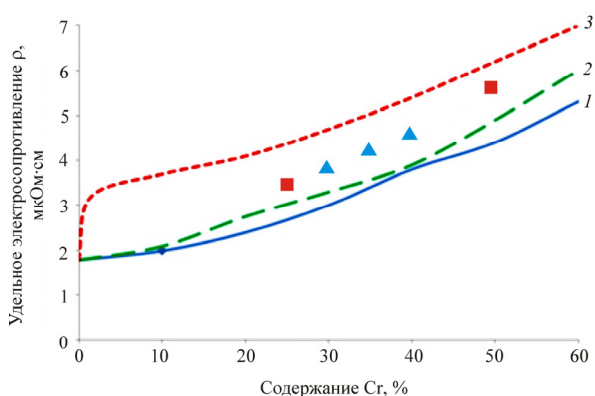


Рис. 3. Зависимость удельного электросопротивления медно-хромового композита от содержания хрома: 1 и 2 – расчетные значения; 3 – материал производства Siemens; квадратики – из работы [17]; треугольники – данная работа

Для расчета брались табличные значения удельного сопротивления меди и хрома. Поскольку данные по удельному сопротивлению хрома в различных таблицах несколько различаются, зависимость удельного сопротивления композита от его состава дается двумя кривыми 1 и 2. Кривая 1 на рис. 3 получена расчетом исходя из табличного значения удельного сопротивления хрома  $\rho_{Cr} = 18,9$  мкОм·см. Кривая 2 получена при  $\rho_{Cr} = 19,2$  мкОм·см. Это значение соответствует измеренному удельному сопротивлению хрома, кото-

рый использовался в НЦ ПМ ПНИПУ при получении медно-хромового композита. Кривая 3 отображает зависимость удельного электросопротивления медно-хромового композита, полученного электродуговым плавлением в фирме Siemens.

Треугольники обозначают удельное электросопротивление композита, произведенного в НЦ ПМ ПНИПУ. Квадратиками показаны значения удельного сопротивления двух типов медно-хромового композита, производимого в Китае [18].

Причина того, что экспериментальные точки лежат выше расчетных кривых 1 и 2, возможно, связана с неидеальным контактом зерен спеченного порошка. Следует помнить, что в спеченном материале присутствует до 1,5–2,0 % пор. Между тем в расчетной модели [15] наличие пор не учитывается. Косвенным подтверждением тому, что расхождения вызваны наличием пор, служит экспериментально установленная связь электропроводности и плотности  $d$  композита с 25 % хрома, приведенная в работе [9] и воспроизведенная на рис. 4. Впрочем, вопрос о влиянии пор до настоящего времени является не до конца выясненным. Например, в работе [18] утверждается, что пористость в матрице невелика и поэтому практически не влияет на величину электропроводности, а играют роль некоторые особенности микроструктуры, связанные с границами фаз.

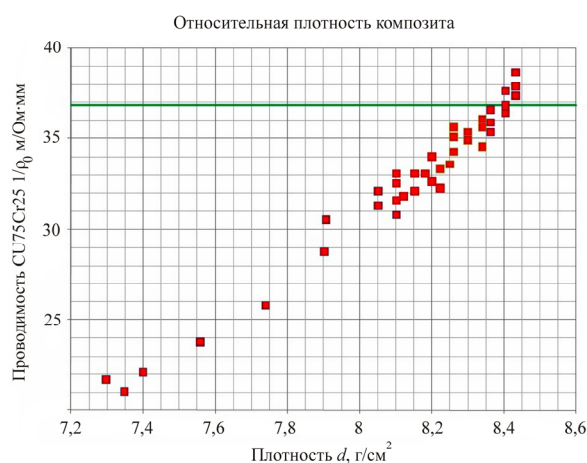


Рис. 4. Зависимость проводимости медно-хромового композита Cu75Cr25 от его плотности (относительной плотности): расчет при 25 % Cr представлен красным

Следует отметить, что при доле пор менее 1 % состав Cu75Cr25 имеет удельное сопротивление [9] 2,7–2,9 мкОм·см при расчетной по методике [15] оценке  $\rho = 2,75$  мкОм·см. Состав с 40 % хрома [9] имеет  $\rho = 3,8$  мкОм·см при расчетном удельном сопротивлении 3,6 мкОм·см. Произведенный по разработанной в НЦ ПМ ПНИПУ технологии композит с долей меди 65 % (35 % хрома)

показал  $\rho = 3,8...3,9$  мКОм·см, что согласуется с расчетами (см. рис. 3).

Композит, произведенный электродуговым плавлением в вакууме [7], имеет заметно большее удельное электросопротивление (см. на рис. 3, кривая 3), чем композит того же состава, произведенный спеканием порошков. По-видимому, причина состоит в том, что после плавления и последующей кристаллизации меди ее зерна содержат неравновесный процент хрома, растворившийся в меди при ее плавлении. Это предположение согласуется с результатом работы [19], в которой было показано, что в оплавленных после однократного разряда медных участках контакта содержится ~2,25 % Cr. Заметим, что при температуре плавления меди растворимость Cr в меди составляет 0,89 ат. %. Очевидно, температура участков контактов, оплавленных сильноточным разрядом, кратковременно была значительно выше температуры плавления. В результате быстрого их охлаждения в этих участках должна оставаться повышенная неравновесная концентрация хрома, соответствующая максимально достигнутой температуре.

Оценка удельного сопротивления двухкомпонентных композитов с различным содержанием хаотично расположенных зерен чистых хрома и меди (см. рис. 3, кривые 1 и 2) оказывается на ~15 % меньше, чем обычно получается при спекании образцов (квадратики и треугольники на рис. 3), по-видимому, потому что всегда медь содержит растворенный в ней в результате спекания хром. При производстве композита методом электродугового плавления в медной матрице должно остаться больше растворенного хрома, чем при спекании. Ввиду этого кривая 3 на рис. 3 лежит выше, чем кривые 1 и 2 и экспериментальные результаты, представленные квадратами и треугольниками.

Результаты химического анализа состава спеченных материалов Cu65Cr35 приведены в таблице.

Состав газовых примесей в CuCr-композите (вес.%)

Среда спекания	Хром	Медь	Кислород	Азот	Водород
Вакуум	35	Остальное	0,06	0,000 35	0,000 35

Из таблицы видно, что при спекании в вакууме содержание газовых примесей минимально и удовлетворяет требованиям технических условий на электроконтактный медно-хромовый материал.

Исследование механических свойств спеченной медно-хромовой композиции с 35 % хрома показало, что увеличение температуры спекания с 980 до 1050 °С повышает твердость материала с  $79,0 \pm 2$  до  $84 \pm 2$  НВ, а предел прочности материала возрастает с  $317 \pm 5$  до  $370 \pm 5$  МПа. При этом механические свойства практически не зависят от среды спекания.

В настоящее время разработанный в НЦ ПМ ПНИПУ медно-хромовый композит Cu65Cr35 находит применение в качестве заготовок для контактов дугогасительных камер серий КДВК, КДВН и других на номинальные напряжения 10–35 кВ, номинальные токи 250–1600 А, номинальные токи отключения 5–35 кА, выпускаемых ООО «Вакуумные технологии» (г. Рязань) (<http://www.vt62.ru>).

### Выводы

Для перспективных высоковольтных коммутирующих приборов повышенное сопротивление материала, полученного электродуговым плавлением, может оказаться существенным недостатком. Например, электрическое сопротивление контактов дугогасительных камер должно быть как можно меньше, и его величина входит в число нормируемых параметров. Ввиду этого контакты, изготовленные целиком из такого материала, уступают по этому параметру спеченному CuCr.

Между тем полезные свойства композитного материала (такие как отсутствие свариваемости контактов, пониженное электрическое сопротивление и др.) фактически проявляются только на контактирующей поверхности. Исходя из чего можно предположить, что из композита Cu65Cr35 целесообразно делать только поверхностный слой электрода, а остальную часть электрода изготавливать, например, из меди высокой чистоты.

Таким образом, необходимо иметь производство электродов, а не заготовок из композита для контактов. Композит должен формироваться в виде наплавленного на медную основу слоя толщиной, несколько большей толщины слоя металла, расплавленного в результате прерывания тока в коммутаторе. Эта зона вообще-то определяется выделением энергии в контакте и, по опыту работы вакуумных приборов коммутации, максимальна на том контакте, который являлся анодом вакуумной дуги, горевшей при коммутации тока. При тех значениях мощности, которые освоены в настоящее время в вакуумной коммутационной технике, толщина расплавленной зоны обычно составляет не более 2–3 мм. Очевидно, что при изготовлении контактов необходимо иметь некоторый запас толщины переплавленного медно-хромового слоя,

Причем этот запас связан не только с горением индивидуальной дуги при коммутации тока, но и с неизбежной эрозией контактов после многократных коммутаций. Возможно, что достаточно будет иметь толщину медно-хромового плавленого композита ~5 мм. Эти предположения были высказаны в работе [20].

#### Список литературы

1. Slade P.G. The vacuum interrupter: theory, design, and application. – CRC Press, 2008. – 528 p.
2. Microstructure and properties of Cu–Cr powder metallurgical alloy induced by high-current pulsed electron beam / S. Dong, C. Zhang, L. Zhang, J. Cai, P. Lv, Y. Jin, Q. Guan // *J. of Alloys and Compounds*. – 2018. – Vol. 755. – P. 251–256.
3. Lahiri I., Bhargava S. Compaction and sintering response of mechanically alloyed Cu–Cr powder // *Powder Technol.* – 2009. – Vol. 189. – P. 433–438.
4. Evolution of surface microstructure of Cu–50Cr alloy treated by high current pulsed electron beam / L.J. Chai, Z.M. Zhou, Z.P. Xiao, J. Tu, Y.P. Wang, W.J. Huang // *Sci. China Technol. Sci.* – 2015. – Vol. 58. – P. 462–469.
5. Laser additive manufacturing of contact materials / S. Szemkus, B. Kempf, S. Jahn, G. Wiehl, F. Heringhaus, M. Rettenmayr // *J. of Mater. Proc. Techn.* – 2018. – Vol. 252. – P. 612–617.
6. Sintering mechanisms of Cu–Cr metallic composites / A. Papillon, J.-M. Missiaen, J.-M. Chaix, S. Roure, H. Schellekens // *Int. J. of Refract. Metals and Hard Mater.* – 2017. – Vol. 65. – P. 9–13.
7. Müller R. Arc-melted CuCr alloys as contact materials for vacuum interrupters // *Siemens Forsch.-u. Entwickl. -Ber.* – 1988. – Bd. 17, № 3. – P. 105–111.
8. Гринвуд А. Применение вакуумной дуги // *Вакуумные дуги*. – М.: Мир, 1982. – С. 385–426.
9. Contact materials for vacuum switch devices / F. Heitzinger [et al.] // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 1993. – Vol. 21, № 5. – P. 447–453.
10. Li W.P., Thomas R.L., Smith R.R. Effect of Cr content on interruption ability of CuCr contact materials / *Proc. 19<sup>th</sup> Int. Symp. Disch. El. Insul. Vacuum, Xi'an.* – 2000. – P. 380–382.
11. Liquid phase separation and the aging effect on mechanical and electrical properties of laser rapidly solidified Cu<sub>100-x</sub>Cr<sub>x</sub> Alloys / Song-Hua Si, Hui Zhang, Yi-Zhu He, Ming-Xi Li [et al.] // *Metals*. – 2015. – Vol. 5(4). – P. 2119–2127.
12. Shi-xin XIU, Ren Yang, Jun Xue, Jin-xing Wang. Properties of vacuum cast CuCr25 and CuCr25Te contact material // *Trans. of Nonferrous Metals Soc. of China*. – 2009. – Vol. 19(2). – P. 444–447.
13. Sintering mechanisms of Cu–Cr metallic composites / A. Papillon, J.-M. Missiaen, J.-M. Chaix, S. Roure, H. Schellekens // *Int. J. of Refract. Metals and Hard Mater.* – 2017. – Vol. 65. – P. 9–13.
14. Investigation on the chemical reactions affecting the sinterability and oxide content of Cu–Cr composites during the solid state sintering process / A. Papillon,

S. Roure, H. Schellekens, Jean-Michel Missiaen [et al.] // *Materials & Design*. – 2017. – Vol. 113. – P. 353–360.

15. Васин В.А., Невровский В.А. Вопросы технологии изготовления медно-хромового контактного материала // *Научные труды МАТИ*. – 2007. – Вып. 13(85). – С. 50–52.
16. Дульнев Г.И., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. – М.: Энергия, 1979. – 264 с.
17. Zhang Tie, He Junjia, Zan Jiyun. Electrical conductivity of CuCr alloys // *Proc. 19<sup>th</sup> Int. Symp. Disch. El. Insul. Vacuum, Xi'an.* – 2000. – P. 738–740.
18. The influence of microstructural features on the electrical conductivity of solid phase sintered CuCr composites / K.V. Klinski-Wetzel, C. Kowanda, M. Heilmaier, F.E.H. Mueller // *J. of Alloys and Comp.* – 2015. – Vol. 631. – P. 237–247.
19. Microstructure formation and resistivity change in CuCr during rapid solidification / U. Hauf, A. Kauffmann, S. Kauffmann-Weiss, A. Feilbach, M. Boening, F.E.H. Mueller, V. Hinrichsen, M. Heilmaier // *Metals*. – 2017. – Vol. 7(11). – P. 478.
20. Медно-хромовый композит для контактов вакуумной электрокоммутационной аппаратуры / В.Н. Андциферов, В.А. Васин, В.А. Невровский, А.А. Сметкин // *Теория и практика технологии производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов: тр. 4-й Междунар. конф.* – М.: Знание, 2006. – С. 708–712.

#### References

1. Slade P.G. The vacuum interrupter: theory, design, and application. CRC Press, 2008, 528 p.
2. Dong S., Zhang C., Zhang L., Cai J., Lv P., Jin Y., Guan Q. Microstructure and properties of Cu–Cr powder metallurgical alloy induced by high-current pulsed electron beam. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 755, pp. 251–256.
3. Lahiri I., Bhargava S. Compaction and sintering response of mechanically alloyed Cu–Cr powder. *Powder Technology*, 2009, vol. 189, pp. 433–438.
4. Chai L.J., Zhou Z.M., Xiao Z.P., Tu J., Wang Y.P., Huang W.J. Evolution of surface microstructure of Cu–50Cr alloy treated by high current pulsed electron beam. *Science China Technological Sciences*, 2015, vol. 58, pp. 462–469.
5. Szemkus S., Kempf B., Jahn S., Wiehl G., Heringhaus F., Rettenmayr M. Laser additive manufacturing of contact materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, vol. 252, pp. 612–617.
6. Papillon A., Missiaen J.-M., Chaix J.-M., Roure S., Schellekens H. Sintering mechanisms of Cu–Cr metallic composites. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2017, vol. 65, pp. 9–13.
7. Müller R. Arc-melted CuCr alloys as contact materials for vacuum interrupters. *Siemens Forsch.u. Entwickl. -Ber.*, 1988, Bd. 17, no3, pp. 105–111.
8. Гринвуд А. Применение вакуумной дуги. *Вакуумные дуги [Vacuum arcs]*. Moscow: Mir, 1982, pp. 385–426.
9. Heitzinger F. Contact materials for vacuum switch devices. *IEEE Transactions on Plasma Sciences focuses*, 1993, vol. 21, no. 5, pp. 447–453.

10. Li W.P., Thomas R.L., Smith R.R. Effect of Cr content on interruption ability of CuCr contact materials. *Proc. 19th Int. Symp. Disch. El. Insul. Vacuum, Xi'an.*, 2000, pp. 380–382.

11. Song-Hua Si, Hui Zhang, Yi-Zhu He, Ming-Xi Li. Liquid phase separation and the aging effect on mechanical and electrical properties of laser rapidly solidified Cu100xCrx Alloys. *Metals*, 2015, vol. 5(4), pp. 2119–2127.

12. Shi-xin XIU, Ren Yang, Jun Xue, Jin-xing Wang. Properties of vacuum cast CuCr25 and CuCr25Te contact material. *Trans. of Nonferrous Metals Soc. of China*, 2009, vol. 19(2), pp. 444–447.

13. Papillon A., Missiaen J.-M., Chaix J.-M., Roure S., Schellekens H. Sintering mechanisms of Cu–Cr metallic composites. *International Journal of Refract. Metals and Hard Mater.*, 2017, vol. 65, pp. 9–13.

14. Papillon A., Roure S., Schellekens H., Jean-Michel Missiaen. Investigation on the chemical reactions affecting the sinterability and oxide content of Cu–Cr composites during the solid state sintering process. *Materials & Design*, 2017, vol. 113, pp. 353–360.

15. Vasin V.A., Nevrovskii V.A. Voprosy tekhnologii izgotovleniia medno-khromovogo kontaktnogo materiala. *Nauchnye trudy MATI*, 2007, iss. 13(85), pp. 50–52.

16. Dul'nev G.I., Zarichniak Iu.P. Teploprovodnost' smesei i kompozitsionnykh materialov [Thermal conductivity of mixtures and composite materials]. Moscow: Energiia, 1979, 264 p.

17. Zhang Tie, He Junjia, Zan Jiyan. Electrical conductivity of CuCr alloys. *Proc. 19th Int. Symp. Disch. El. Insul. Vacuum, Xi'an.*, 2000, pp. 738–740.

18. Klinski-Wetzel K.V., Kowanda C., Heilmaier M., Mueller F.E.H. The influence of microstructural features on the electrical conductivity of solid phase sintered CuCr composites. *Journal of Alloys and Comp.*, 2015, vol. 631, pp. 237–247.

19. Hauf U., Kauffmann A., Kauffmann-Weiss S., Feilbach A., Boening M., Mueller F.E.H., Hinrichsen V., Heilmaier M. Microstructure formation and resistivity change in CuCr during rapid solidification. *Metals*, 2017, vol. 7(11), pp. 478.

20. Antsiferov V.N., Vasin V.A., Nevrovskii V.A., Smetkin A.A. Medno-khromovyi kompozit dlia kontaktov vakuumnoi elektrokommutatsionnoi apparatury [Copper-chrome composite for contacts of vacuum electrocommutation equipment]. *Teoriia i praktika tekhnologii proizvodstva izdelii iz kompozitsionnykh materialov i novykh metal-*

*licheskih splavov: trudy 4-i Mezhdunarodnoi konferentsii.* Moscow: Znanie, 2006, pp. 708–712.

Получено 26.09.18

Опубликовано 20.12.18

#### Об авторах

**Васин Владимир Алексеевич** (с. Новый Быт Московской обл., Россия) – доктор технических наук, генеральный директор НПП «Полигон-МТ»; e-mail: info@polygon-mt.ru.

**Невровский Виктор Александрович** (Москва, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор кафедры технологии испытаний и эксплуатации Московского авиационного института; e-mail: sanches0@mail.ru.

**Сметкин Андрей Алексеевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: solid@pm.pstu.ac.ru.

**Сомов Олег Васильевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научного центра порошкового материаловедения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: ovsomov@mail.ru.

#### About the authors

**Vladimir A. Vasin** (Novyj Byt, Moscow region, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, General Director, NPP “Poligon-MT”; e-mail: info@polygon-mt.ru.

**Viktor A. Nevrovsky** (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Professor, Department of Testing and Operation Technology, Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: sanches0@mail.ru.

**Andrei A. Smetkin** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials, Technologies and Designing of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: solid@pm.pstu.ac.ru.

**Oleg V. Somov** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Centre of Powder Materials Science, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: ovsomov@mail.ru.