

## **Плавильная технология получения, структура и некоторые свойства сплава Cu—30% (мас.) Cr для электрических контактов в дугогасительных камерах вакуумных выключателей**

В. П. Коржов

Институт физики твёрдого тела РАН, [korzhov@issp.ac.ru](mailto:korzhov@issp.ac.ru)

*Слитки сплава Cu—30% Cr массой 2,6—8,7 кг выплавляли дуговой плавкой с расходуемым электродом. Электроды собирали из спечённых прутков состава 70% Cu—30% Cr и из слитков сплава Cu—30% Cr индукционной плавки. Приведены данные о структуре, плотности, механических и электрических свойствах сплава по высоте слитков и концентрации газовых и других примесей.*

**Ключевые слова:** *индукционная плавка, слитки, электроды, сплав, структура, свойства.*

### **Введение**

Сплавы Cu—Cr широко применяются в электротехнической промышленности в качестве материала для электрических контактов. Сплавы меди с 25—50% Cr (здесь и далее составы сплавов приведены в процентах массовых) в настоящее время являются единственными, которые используются для контактов в дугогасительных камерах вакуумных выключателей высокой мощности.

Система Cu—Cr характеризуется очень малой взаимной растворимостью компонентов в равновесных условиях [1], вследствие чего получать из них сплавы обычными плавильными способами оказывается сложной задачей. Для изготовления компактных изделий до последнего времени широко используется метод порошковой металлургии. В работах [2—5] сплавы Cu—Cr, содержащие 50% и более хрома, получали механическим сплавлением (МС). Одним из преимуществ МС является возможность получения очень неравновесных фаз и пересыщенных твёрдых растворов.

Однако требования, предъявляемые к контактными сплавам, таковы, что они, в первую очередь, должны обладать высокими тепло- и электропроводностью и хорошей пластичностью. Для этого, в отличие от МС, технология их получения, напротив, должна не допускать взаимного растворения компонентов. Для электротехнических нужд перемешивание порошков меди и хрома происходит в ёмкостях барабанного типа без использования шаров.

Полученные спечённые сплавы не являются сплавами в обычном смысле — это композиционные материалы. Структура изделий из них после спекания представляет собой матрицу из твёрдого раствора на основе меди с небольшим содержанием хрома и более или менее однородно расположенными в ней зёрнами хрома [6, 7]. Применяются обычно порошки хрома с размерами зерен 30—150 мкм, чтобы не вносить в сплав большого количества кислорода в виде оксидной плёнки на поверхности частиц хрома. Важным обстоятельством, от чего зависит скорость электрической эрозии и что, к сожалению, неполностью удается обеспечить при простом перемешивании порошков, является прочное сцепление частиц хрома с матрицей [8].

В работе [9] предпринята попытка достичь прочное сцепление частиц хрома с матрицей за счет активирования поверхности частиц порошка в результате перемешивания порошковой смеси с применением металлических шаров. Но перемешивание было не настолько интенсивным, чтобы происходило МС компонентов. Это достигалось за счет скорости окружного вращения контейнеров, соотношения масс шаров и порошковой смеси и использования мокрой среды перемешивания. По данным рентгеноспектрального анализа сделан вывод, что при выбранных режимах перемешивания порошковой смеси Cu<sub>70</sub>Cr<sub>30</sub> механического сплавления компонентов не происходит. Разветвленность частиц хрома и интеркристаллитный характер поверхностей разрушения при испытаниях образцов на растяжение свидетельствовали о прочном сцеплении частиц хрома с матрицей.

Оказалось, что псевдосплавы Cu—Cr, наряду с порошковой металлургией, можно получать высокоскоростным электронно-лучевым испарением-конденсацией [10]. Медь и хром испаряются из отдельных водоохлаждаемых источников, а конденсируются — на стальной или медной подложке. Несомненным преимуществом этого метода является возможность отдельным

компонентам смешиваться на атомном и молекулярном уровнях паровых потоков. Это будет наблюдаться даже в том случае, если компоненты обладают ограниченной растворимостью друг в друге или не обладают ею вообще. Кроме того, метод позволяет создавать комбинированные контакты с рабочим CuCr-слоем, полученным одновременным осаждением меди и хрома, и слоем из чистой меди, обеспечивающей теплоотвод от рабочего слоя.

При всех достоинствах методов порошковой металлургии и высокоскоростного электронно-лучевого испарения-конденсации в настоящее время сложилось устойчивое мнение, что плавильные способы получения сплавов Cu—Cr имеют хорошую перспективу [11—13]. Это обусловлено тем, что литая структура способна обеспечить более высокие эксплуатационные характеристики сплавов и изделий из них по сравнению с таковыми изделий, спеченных по любому из методов порошковой металлургии. Преимущество методов плавления в том, что они позволяют получить более однородную структуру с равномерно распределенными дисперсными дендритными включениями хрома, выделившимися естественным образом и поэтому прочно связанными с матрицей.

Методами, способными конкурировать и заменить технологию порошковой металлургии для получения высококачественного сплава, могут быть индукционная и электродуговая плавки.

На начальном этапе, чтобы выработать условия формирования литой структуры сплава Cu—30Cr с равномерным распределением дисперсных выделений хрома, нами опробованы маломасштабные способы плавления металлов. В качестве таких способов использовали бестигельную плавку во взвешенном состоянии и плавку с высокочастотным нагревом [14].

В экспериментах по бестигельной плавке было показано, что для получения однородной структуры с дендритными выделениями хрома необходимо, чтобы весь хром, находящийся в навеске спеченного псевдосплава, мог раствориться в расплаве. Для этого расплав нагревали выше точки ликвидуса ( $>1600$  °C) и выдерживали в течение времени, достаточного для растворения всего хрома. Время выдержки устанавливали опытным путём.

В случае плавки с нагревом ТВЧ использовали закалку уже затвердевшего слитка в воде и разливку расплава в массивные медные изложницы. Плотность и дисперсность дендритных выделений хрома сильно зависела от скорости охлаждения. Слитки, полученные разливкой расплава в медные изложницы, по сравнению со слитками, закаленными в воде, имели более высокую скорость охлаждения и поэтому их микроструктура отличалась значительно большей плотностью и меньшим размером дендритных выделений хрома.

Из описанных экспериментов можно сделать вывод, что при соблюдении известных условий перегрева и выдержки расплава плотность и размер выделившихся дендритов хрома будут контролироваться скоростью охлаждения расплава.

Полученные результаты в полной мере использованы при разработке метода индукционной выплавки слитков сплава Cu—30Cr. Индукционная плавка не требует специальной подготовки металлов. Для плавления можно применять как массивные материалы, так и материалы в виде порошков, чешуек, отходов. Сплавляемые компоненты можно вводить в плавильную зону как по отдельности, так и в предварительно перемешанном или каким-то другим образом зашихтованном виде. В работе [15] осуществлен выбор исходной шихты, тигля, конструкции и материала изложницы, определены оптимальные приемы и режимы плавления с целью получения слитков с литой структурой, характеризующейся однородным распределением дендритных выделений хрома. Использование для разливки расплава горизонтальной водоохлаждаемой медной изложницы позволило получить плоские слитки массой  $\sim 5$  кг с удовлетворительной микроструктурой по всему объему.

Цель настоящей работы — исследование возможности дуговой выплавки слитков сплава Cu—30Cr и их макро- и микроструктуры, плотности, механических свойств и удельной электропроводности.

### **Электродуговая плавка слитков**

Принципиальная схема конструкции электродуговой печи, в которой выплавлялись слитки сплава Cu—30Cr, представлена на рис. 1.

Расходуемый электрод 3 из выплавляемого сплава закрепляли в штоке 1, способном вертикально перемещаться в пространстве вакуумной камеры 2 печи. Плавка происходила в водоохлаждаемом кристаллизаторе 5 диаметром 73 мм и высотой 330 мм, который через фланец 4 соединялся с вакуумной камерой. Кристаллизатор заключен в соленоид 7, электромагнитное поле которого способствовало перемешиванию жидкого слоя слитка 6. Толщина этого слоя составляла примерно

8—10 мм. Полярность соленоида могла меняться, что вызывало раскручивание расплава то в одну, то в другую сторону. Плавка велась в атмосфере аргона. По мере расходования электрода шток опускался вниз. По окончании плавления и остывания слитка кристаллизатор отсоединялся от вакуумной камеры и готовый слиток вынимался.

Некоторые параметры плавки: исходный вакуум —  $\sim 6,7 \cdot 10^{-2}$  Па, давление Ar в камере — от 35,5 до 121,6 Па, напряжение дуги — 15—40 В, ток дуги — 1—3 кА, давление воды в охлаждающей системе кристаллизатора — 507 Па, средняя продолжительность одного акта плавки — 13 мин. Напряжение и ток дуги изменяли от слитка к слитку.

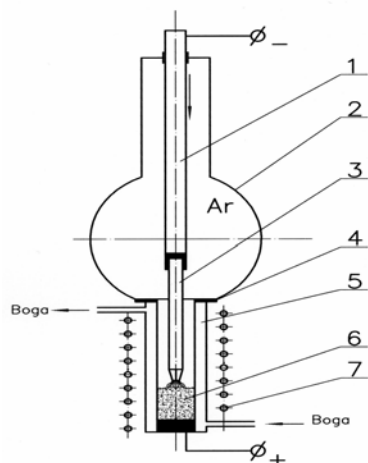


Рис. 1. Принципиальная схема конструкции электродуговой печи.

*Расходуемый электрод.* В настоящих экспериментах использовали преимущественно спеченные и экструдированные электроды диаметром 30 мм из сплава меди с 30% хрома, полученные методом порошковой металлургии фирмой “Полема” (г. Тула). Кроме того, экспериментальные расходуемые электроды были двух типов.

1. Электрод из штабиков сплава Cu—30Cr изготавливали методом порошковой металлургии (рис. 2, а). Порошки меди и хрома в соотношении 70 : 30 перемешивали в смесителе барабанного типа в течение 8 ч. Масса одной порции — 8 кг. После перемешивания смесь порошков компактировали на гидравлическом прессе в штабики размером  $500 \times 20 \times 12$  мм с использованием разбирающейся пресс-формы. Усилие прессования —  $\sim 1,47 \cdot 10^6$  Н, что соответствовало давлению 250 МПа. Штабики спекали в вакууме при  $950^\circ\text{C}$  в течение 1 ч.



Рис. 2. Экспериментальные расходуемые электроды, собранные из спеченных штабиков (а) и слитков индукционной плавки (б).

Для сборки одного расходуемого электрода требовалось 6 штабиков. Электрод собирали с помощью шпилек и гаек, изготовленных из этих штабиков. Длина электрода составляла около 0,5 м, размеры поперечного сечения —  $\sim 40 \times 40$  мм, длина диагонали —  $\sim 56$  мм. К одному из торцов электрода крепили ложный стальной стержень, с помощью которого электрод пристыковывался к штоку 1 (рис. 1).

2. Другой расходуемый электрод (рис. 2, б) собирали из слитков индукционной плавки посредством резьбового соединения. Исходные заготовки размером  $200 \times 65 \times 35$  мм и массой  $\sim 1$  кг для выплавки слитков прессовали на гидравлическом прессе. Усилие прессования —  $\sim 3,53 \cdot 10^6$  Н, что соответствовало давлению 200 МПа. Для одного слитка требовалось три заготовки. Индукционную плавку слитков проводили в атмосфере аргона при давлении 20,3 кПа. Предварительный вакуум —  $\sim 1,33$  Па. Расплав разливался в Cu-изложницу высотой 250 мм и

наружным диаметром 150 мм со сквозной конусообразной полостью, больший диаметр которой составлял 50 мм. Изложница располагалась на массивной медной подставке, служащей ей дном.

Для одного расходуемого электрода выплавляли 6 слитков-полуфабрикатов. Они содержали скрытые раковины [15], но это не мешало использовать их для изготовления электродов.

*Получение сплава Cu—30Cr.* Выплавлено 8 слитков диаметром ~70 мм различной массы (табл. 1). На рис. 3 показан слиток Д3 непосредственно после извлечения из кристаллизатора, еще не отделенный от медной затравки. Слитки имели небольшие усадочные раковины.

Для изготовления расходуемых электродов можно использовать порошковые заготовки и производственные отходы. Тогда основные этапы получения слитков сплава Cu—30Cr можно представить следующим образом (рис. 4): компактирование порошковых заготовок и составление шихты из отходов, индукционная выплавка слитков-полуфабрикатов и спекание штабиков, сборка расходуемых электродов, дуговая плавка.

**Т а б л и ц а 1. Масса и технические условия выплавки слитков**

Номер слитка	Масса слитка*, кг	Расходуемый электрод	Соленоид	Мощность дуги, кВт
Д3	8,7	Спеченный	Включен	40 (32 В; 1,25 кА)
Д4	7,2	Спеченный	Включен	Переменный режим 35—40 В; 1,0—1,5 кА
Д5	2,6	Спеченный	Включен	
Д6	3,1	Спеченный	Выключен	Тот же
Д7	5,8	Из штабиков	Выключен	62,9 (37 В; 1,7 кА)
Д8	3,4	Слитки ИП**	Выключен	22,5 (15 В; 1,5 кА)
Д9	6,0	Из штабиков	Выключен	30 (30 В; 1,0 кА)
Д10	6,8	Спеченный	Выключен	30—35 В; 1,0—3,0 кА

\*Масса слитков без медной затравки. \*\*Из слитков индукционной плавки.



Рис. 3. Слиток Д3 непосредственно после дуговой плавки.



Рис. 4. Технологическая схема получения слитков сплава Cu—30Cr.

### Макро- и микроструктура слитков

После выплавки от слитка отрезали Cu-затравку и верхнюю его часть с усадочной раковиной. Затем от его нижнего и верхнего торцов отрезали по одному или два диска толщиной 5—6 мм. Большие слитки разрезали пополам, и еще один диск вырезали из его середины.

Диски использовали сначала для установления макроструктуры, измерения твердости по сечению слитков и электрической проводимости. Затем электроискровым способом из них вырезали образцы с двумя головками для механических испытаний на растяжение, масс-спектрометрического и

нейтронно-активационного анализов. Эти же образцы служили для определения плотности и микроструктурных исследований.

Исследование микроструктуры выполняли на электронном сканирующем микроскопе CamScan MV2300, оснащённом детекторами вторичных и отраженных электронов и рентгеновским микроанализатором.

В макроструктуре верхней, средней и нижней частей слитка Д4 обнаружены темные пятна размером от нескольких десятков микрон до ~1,5 мм. Они располагались поясом по окружности со средним радиусом, примерно равным половине радиуса слитка. Микроструктура обнаруженных дефектов установлена при исследовании структуры слитков. Если структура большей площади сечения слитка представляла собой литую структуру, состоящую из матрицы на основе меди и густой сети дендритных выделений хрома (рис. 5, а), то темные пятна — это та же матрица, но почти не содержащая дендритов (рис. 5, б). (На фото темные макродефекты, напротив, обозначаются светлыми, поскольку состоят из меди, которая тяжелее хрома). На рис. 5, в показан фрагмент одной из микроструктур с меньшим увеличением, представляющий один из бездендритных дефектов размером ~100 мкм. Его структура складывалась из светлых участков размером 10—15 мкм, почти свободных от каких-либо фаз и окруженных областями с дисперсным хромом. По данным локального рентгеноспектрального анализа, в точках 1 и 3, приходящихся на светлые области, содержалось  $0,8 \pm 0,2\%$  (мас.) Cr, что соответствовало твердому раствору хрома в меди. В точках, подобных точке 2, находящейся в области, где присутствовала дисперсная фаза, хрома содержалось в два раза больше —  $1,6 \pm 0,2\%$  (мас.).

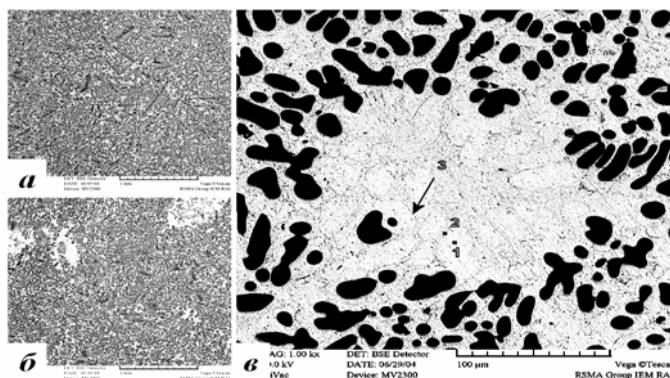


Рис. 5. Микроструктура нижней (а) и верхней (б) частей слитка Д4 и фрагмент микроструктуры верхней части слитка Д3 (в): 1, 2 и 3 — точки проведения микроанализа.

Анализ не локально в точках, а при сканировании электронным лучом площади  $72 \times 72$  мкм<sup>2</sup>, проведенный в пределах областей, не содержащих дендритных выделений хрома, показал наличие  $(1,7—2,0) \pm 0,2\%$  (мас.) Cr.

Сравнив результаты рентгеноспектрального анализа с диаграммой состояний системы Cu—Cr [1], можно сделать вывод, что микроструктура сплава меди с 30% хрома представляла собой матрицу твердого раствора хрома в меди с большим количеством дисперсного хрома и его дендритными выделениями. Макродефекты являются той же матрицей (светлые области с точками 1 и 3, рис. 5, в), содержащей ещё и дисперсный хром (растворимость меди в хrome даже при 1150 °С ничтожно мала). Согласно диаграмме состояний, эвтектика (двухфазная смесь из твердого раствора хрома в меди и мелких включений хрома) содержит 1,28% (мас.) Cr, а твердый раствор хрома в меди при эвтектической температуре, равной 1075 °С, — 0,63% (мас.) Cr.

Из изложенного можно заключить, что матрица представляет собой эвтектику, которая является одной из двух структурных составляющих сплава. Другая структурная составляющая — дендритные выделения хрома. Завышенное по отношению к эвтектической концентрации содержание хрома при сканировании луча по площади с дисперсным хромом обусловлено тем, что при охлаждении в области ниже эвтектической температуры в матрице происходило выделение некоторого количества дисперсных частиц вторичного хрома.

Появление участков, не содержащих дендритов хрома, не зависело от режимов горения дуги. Отмечено также, что каждый раз такие дефекты располагались по окружности с радиусом немногим больше радиуса расходуемого электрода. Можно предположить, что возникновение таких дефектов в

какой-то мере обусловлено расходуемым электродом. Тогда при увеличении его диаметра дефекты могли бы быть оттеснены на периферию слитка или совсем исчезнуть. На практике такое предположение не проверялось из-за отсутствия соответствующего расходуемого электрода.

Если считать, что образование бездендритных полей вызвано локальным обеднением расплава хромом, каким-то образом возникшим в данном месте, то причиной этого могло быть электромагнитное поле соленоида, которое перемешивало расплавленный слой слитка в процессе плавки. Для чистоты эксперимента проводили две экспериментальные плавки с использованием одного и того же расходуемого электрода при включенном и выключенном соленоиде.

Оказалось, что в макроструктуре сечения слитка Д5, выплавленного с включенным соленоидом, как и в предыдущих случаях, присутствовали участки, свободные от дендритов хрома. В макроструктуре слитка Д6 (см. табл. 1), выплавленного с использованием того же расходуемого электрода, но с выключенным соленоидом, эти дефекты отсутствовали.

Все следующие слитки выплавляли с отключенным соленоидом, как и те, для которых применяли экспериментальные расходуемые электроды. Описанные дефекты не обнаружены. Для перемешивания расплавленного слоя на поверхности формирующегося и уже затвердевшего слитка было достаточно самой электрической дуги.

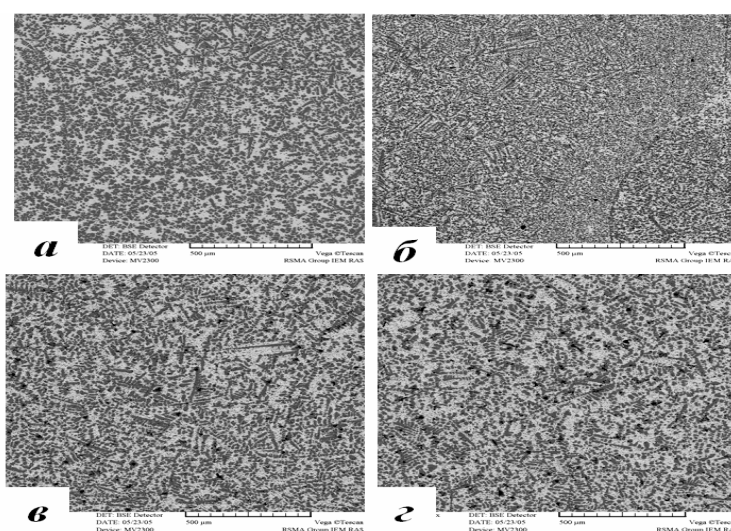


Рис. 6. Микроструктура образцов, вырезанных из дисков нижней части слитка Д9 (*а, б*) и верхней части слитка Д10 (*в, з*): *а, в* — после плавки; *б, з* — после плавки и отжига при 850 °С в течение 5 ч.

Отметим, что назначение соленоида — способствовать перемешиванию расплавленного слоя слитка при плавке — не было единственным. Второе его назначение заключалось в поддержании стабильного горения дуги в течение всего времени плавки. Без включенного соленоида стабильность горения дуги нарушалась. Это проявлялось в кратковременных действиях паразитных дуговых разрядов между электродом и стенками кристаллизатора. Причем частота таких разрядов возрастала с течением времени, возможно, из-за постепенного накопления паров меди и хрома в камере печи. Поэтому выключение соленоида нельзя считать оптимальным приемом для получения бездефектной макроструктуры слитков.

Для микроструктуры двух последних слитков сплава Cu—30Cr (рис. 6) характерно равномерное распределение дендритных выделений хрома. Но в слитке Д10, из верхней части которого вырезан образец, наблюдалось заметное количество темных включений, оказавшихся частицами оксида хрома. В микроструктуре слитка Д9 (образец вырезали из его нижней части) частицы оксида хрома отсутствовали. Это можно объяснить тем, что при плавлении частицы оксида, как более легкая фракция, всплывали и перемещались вместе с жидкой зоной, накапливаясь сверху слитка.

В работе изучали также, как изменится структура при нагреве сплава до температур, не превышающих эвтектическую. Оказалось, что отжиг при 850 °С 5 ч не вызвал видимых изменений микроструктуры (рис. 6, *б, з*). Структуры поверхностей излома образцов после испытаний на растяжение имели интеркристаллитный характер разрушения.

## Плотность сплава

Плотность определяли гидростатическим взвешиванием. Образцами были целые диски, но чаще использовали образцы для механических испытаний. Процедуру взвешивания проводили со всеми образцами. Поэтому их количество, по которому выводилось среднее значение плотности для каждой части слитка, составляло 5—8.

Т а б л и ц а 2. Плотность слитков Д3 и Д4

Номер слитка	Плотность слитка, г/см <sup>2</sup>		
	низ	середина	верх
Д3	8,31 ± 0,02		8,31 ± 0,02
	8,32 ± 0,02		8,31 ± 0,02
Д4	8,36 ± 0,01	8,32 ± 0,04	8,32 ± 0,01
	8,33 ± 0,02		

Плотность слитка Д3 (табл. 2) не изменялась по высоте и составляла 8,31—8,32 г/см<sup>3</sup> или 98,6—98,7% от расчетной плотности сплава Cu—30Cr, которая составляла 8,43 г/см<sup>3</sup>. В слитке Д4 плотность образцов из нижней части равнялась 8,33—8,36 г/см<sup>3</sup> (98,8—99,2%), в середине и сверху слитка — 8,32 г/см<sup>3</sup>.

Несколько заниженная плотность сплава по отношению к расчетной объяснялась высокой концентрацией хрома в обоих слитках. По данным масс-спектрометрического анализа, в слитке Д3 содержалось 35—39% хрома, в слитке Д4 — 32—37%. Это могло быть следствием высокого содержания хрома в спеченных электродах.

## Удельная электропроводность

Удельную электрическую проводимость  $\sigma$  слитков Д6—Д9 измеряли на макрошлифах поперечных сечений нижней и верхней частей слитков неразрушающим методом с помощью прибора “Вихрь-АМ” (ООО “Диаконт”, г. Екатеринбург) после плавки и после вакуумного отжига при 850 °С в течение 5 ч. В каждом из сечений делалось по 5—6 замеров в центральной области слитка, в середине радиуса и в периферийной области слитка.

Результаты измерений показали, что, во-первых, для всех слитков  $\sigma$  практически не изменялась по сечению слитка. Например, непосредственно после плавки в центре сечения верхней части слитка Д6  $\sigma = 25,2$  МСм/м, а на краю сечения —  $25,9 \pm 0,6$  МСм/м. Более высокие значения  $\sigma$  были в нижней части слитка Д9:  $29,4 \pm 0,6$  МСм/м — в середине радиуса слитка и  $27,9 \pm 0,4$  МСм/м — на периферии. Во-вторых, для всех образцов  $\sigma$  внизу слитка была больше, чем в его верхней части. Например, в сечении нижней части слитка Д8  $\sigma = 25,5—26,6$  МСм/м, в сечении верхней части —  $20,1—20,4$  МСм/м.

После отжига  $\sigma$  повышалась и выравнивалась по высоте слитков: например, в сечениях нижней и верхней частей слитка Д6  $\sigma = 29,0—30,0$  и  $27,7—29,3$  МСм/м соответственно. Это составляло 47—52% по отношению к удельной электропроводности меди.

## Механические свойства сплава

Измеряли твердость по Роквеллу HRB (шариковый наконечник  $\varnothing 1,588$  мм, нагрузка 980 Н) с последующим переводом ее в твердость по Бринеллю HB ( $\varnothing 10$  мм, нагрузка 29412 Н). Твердость измеряли на дисках, которые предназначались для исследования макроструктуры, и на образцах для механических и других испытаний. В первом случае замеры твердости делались на разных расстояниях от края слитка с целью определения характера изменения твердости по сечению слитка. На примере слитков Д3 и Д4 показано, что твердость имела максимум примерно в середине радиуса слитка, в центре и по краям слитка твердость заметно падала. Для слитка Д4 максимальная твердость составляла 90—93 HB, на краю слитка — 70—83 HB и в центральной части — 84—87 HB. Твердость для одного слитка в максимуме была почти одинаковой независимо от того, из какой части слитка был вырезан диск. Такой характер изменения твердости наблюдался для всех слитков.

**Т а б л и ц а 3. Прочностные характеристики слитков Д3 и Д4**

Слиток	$\sigma_{\text{пц}}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	
Д3: низ	$246 \pm 10$	$263 \pm 8$	$319 \pm 3$	$10,6 \pm 0,1$	$31,5 \pm 2,8$	
	$238 \pm 8$	$250 \pm 8$	$310 \pm 6$	$11,0 \pm 0,7$	$34,0 \pm 1,8$	
	верх	$196 \pm 5$	$214 \pm 4$	$305 \pm 6$	$11,4 \pm 1,4$	$43,3 \pm 3,2$
		$233 \pm 1$	$246 \pm 3$	$316 \pm 7$	$12,3 \pm 0,7$	$41,9 \pm 0,8$
Д4: низ	$242 \pm 2$	$281 \pm 2$	$412 \pm 4$	$11,9 \pm 0,7$	$33,8 \pm 3,2$	
	$237 \pm 12$	$277 \pm 4$	$408 \pm 3$	$12,6 \pm 0,4$	$40,9 \pm 3,8$	
	середина	$188 \pm 25$	$229 \pm 8$	$326 \pm 1$	$10,7 \pm 1,0$	$43,7 \pm 2,0$
		верх	$199 \pm 17$	$242 \pm 1$	$360 \pm 6$	$12,2 \pm 0,3$

Прочностные свойства определяли по кривым перемещение—нагрузка при испытании на растяжение трёх образцов с двумя головками, вырезанных электроискровым способом из каждого диска. Испытания проводили при комнатной температуре на машине “Instron”. Определяли средние значения предела пропорциональности  $\sigma_{\text{пц}}$ , условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$ , предела прочности  $\sigma_{\text{в}}$ , относительного удлинения  $\delta$  и относительного сужения  $\psi$  (табл. 3).

Сплав в нижней части слитков имел более высокие значения  $\sigma_{\text{пц}}$ ,  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_{\text{в}}$  и более низкие  $\psi$ . Предел прочности в нижней части слитка Д4 превышал 400 МПа, в верхней части  $\sigma_{\text{в}} = 360 \pm 6$  МПа. Относительное удлинение изменялось в пределах 10,6—12,6% независимо от места, где вырезались образцы, и слитка.

#### Результаты масс-спектрометрического анализа

Масс-спектрометрический анализ проводили для слитков Д3 и Д4 по шести образцам, вырезанным из дисков нижней и верхней частей слитков. Независимо от того, откуда был вырезан образец, концентрация хрома в слитке Д3 изменялась в диапазоне от  $35 \pm 2$  до  $39 \pm 2\%$  (мас.), а средняя концентрация хрома в слитке составляла  $36,5 \pm 2,5\%$ . Аналогичные данные для слитка Д4: от  $32 \pm 2$  до  $37 \pm 1\%$  и средняя концентрация —  $35 \pm 2\%$ . Содержание хрома в обоих слитках значительно превышало его номинальное в сплаве.

Усредненные концентрации газовых примесей кислорода и азота составляли соответственно  $0,040 \pm 0,010$  и  $0,0087 \pm 0,0014\%$  (Д3);  $0,046 \pm 0,014$  и  $0,0055 \pm 0,0010\%$  (Д4). Неметаллические примеси: углерод —  $0,034 \pm 0,009$  и  $0,042 \pm 0,011\%$ , сера —  $0,0061 \pm 0,0015$  и  $0,0061 \pm 0,0014\%$ , фосфор —  $0,0031 \pm 0,0005$  и  $0,0036 \pm 0,0006\%$  для слитков Д3 и Д4 соответственно.

Средние концентрации каждого из таких металлов, как Fe, Ni, Co, Mo, Zn, Sn и Pb, составляли от  $0,0023 \pm 0,0004$  до  $0,0091 \pm 0,0013\%$ , а таких, как W, Re, Ta, Bi и Au, — от  $0,00014 \pm 0,00002$  до  $0,00055 \pm 0,00008\%$ . Содержание кислорода определяли также с помощью нейтронно-активационного анализа. Средние концентрации  $O_2$  равны  $0,048$  и  $0,058 \pm 0,006\%$  соответственно в слитках Д3 и Д4.

#### Выводы

Методом дуговой плавки с расходуемым электродом получены слитки сплава Cu—30Cr массой 2,6—8,7 кг. В качестве расходуемого электрода использовали спеченные и затем экструдированные электроды и экспериментальные электроды двух типов, собранные из спеченных штабиков состава 70Cu—30Cr и слитков сплава Cu—30Cr индукционной плавки.

В структуре первых слитков обнаружены макродефекты размером до 1—1,5 мм, которые, в отличие от эвтектической (твердый раствор Cr в Cu + дисперсный хром) матрицы с дендритными выделениями хрома, представляли собой участки той же матрицы, но без дендритов хрома. Эти дефекты располагались по окружности, радиус которой был немногим более радиуса расходуемого электрода. Экспериментально установлено, что описанные дефекты присутствовали только при включенном соленоиде, в который был помещен кристаллизатор и электромагнитное поле которого должно было способствовать стабильности горения дуги и перемешиванию жидкого металлического слоя на поверхности формирующегося слитка при плавке. Более половины слитков выплавляли при выключенном соленоиде, они имели литую микроструктуру



равномерно распределенных дендритных выделений хрома в матрице, содержащей еще и большое количество дисперсных частиц эвтектического и вторичного хрома.

Измерены плотность (8,31—8,36 г/см<sup>3</sup>), предел прочности (305—412 МПа) и удельная электропроводность (47—52% по отношению к чистой меди). Твердость для всех слитков была максимальной (90—93 НВ) примерно в середине радиуса слитка. Для одного слитка твердость в максимуме была одинаковой для всех независимо от того, из какой части слитка был вырезан диск. Содержание кислорода в сплаве, по данным масс-спектрометрического анализа, составляло 0,040—0,046% (мас.).

1. Дриц М. Е., Бочвар Н. Р., Гузей Л. С. и др. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди. — М.: Наука, 1979. — 248 с.
2. Чердынцев В. В., Калошкин С. Д., Сердюков В. Н. и др. Кинетика механического сплавления в несмешивающейся системе Cu<sub>50</sub>Cr<sub>50</sub> // Физика металлов и металловедение. — 2004. — **97**, № 4. — С. 71—78.
3. Ogino Y., Yamasaki T., Murajama S., Sakai R. Non-equilibrium phases formed by mechanical alloying of Cr—Cu alloys // J. Non-Crystalline Solids. — 1990. — **117/118**, Part 2. — P. 737—740.
4. Ogino Y., Murajama S., Yamasaki T. Influence of milling atmosphere on amorphisation of chromium and Cr—Cu powders by ball milling // J. Less-Common Metals. — 1991. — **168**, No. 2. — P. 221—235.
5. Gerasimov K. V., Mytnichenko S. V., Pavlov S. V. et al. Structural study of mechanically alloyed Cu<sub>30</sub>Cr<sub>70</sub> by anomalous X-ray diffraction and EXAFS-spectroscopy // J. Alloys and Compounds. — 1997. — **252**, No. 1—2. — P. 179—183.
6. Pat. 4372783 US. Kato, Masaru (Amagasaki, JP). Electrical contact composition for a vacuum type circuit interrupter // Publ. 02.08.1983.
7. Mi-Jin Kim, Jung-Mann Doh, Jong-Ku Park, Jae-Pil Jung. Microstructural evolution in the Cr—Cu electric contact alloys during liquid phase sintering // Proc. of the 15th Internat. Plansee Holding AG, Reute. — 2001. — **1**. — P. 29—43.
8. Baihe Miao, Yan Zhang, Guoxun Liu. The influence of mechanical properties of contact materials on the contact performance // Proc. of XXIIth Internat. symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV, 25—29 Sept. 2006. — **2**. — P. 516—519.
9. Коржов В. П., Карнов М. И., Малаховский С. И., Фролов П. А. Структура сплава Cu—30% Cr, спеченного из смеси порошков меди и хрома после продолжительного перемешивания с использованием металлических шаров // Материаловедение. — 2010. — № 9. — С. 15—21.
10. Бухановский В. В., Рудницкий Н. П., Мамузич И. и др. Влияние состава и технологических факторов на структуру, механические свойства и характер разрушения композиционного материала системы медь—хром // Металловедение и терм. обраб. металлов. — 2009. — № 8. — С. 26—31.
11. Xian Ai-ping. CuCr contact materials for high power vacuum interrupters // The Chinese J. of Nonferrous Metals. — 2001. — **11**, No. 5. — P. 731—740.
12. Müller R. Arc-melted CuCr alloy as contact materials for vacuum interrupters // Siemens Forsch. Entwicklungsber. — 1988. — **17**, No. 3. — P. 105—111.
13. Boettinger W. J., Coriell S. R., Greer A. L. et al. Solidification microstructures: recent developments, future directions // Acta Mater. — 2000. — **48**, No. 1. — P. 43—70.
14. Коржов В. П., Карнов М. И. Опробование плавильных методов получения сплава Cu—30% Cr // Материаловедение. — 2010. — № 1. — С. 46—52.
15. Коржов В. П., Карнов М. И. Технология получения сплава Cu—30% Cr // Технология металлов. — 2009. — № 6. — С. 21—30.