

Г. П. Борисов, А. Г. Борисов, В. Н. Цуркин*,
А. В. Синчук*, А. В. Иванов*, Р. А. Тарасенко*

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

ТРАНСФОРМАЦИЯ ИСХОДНОЙ ДЕНДРИТНОЙ СТРУКТУРЫ СПЛАВА АК7 ПРИ ЭЛЕКТРОТОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ В ТЕМПЕРАТУРНОМ ИНТЕРВАЛЕ ТВЕРДОЖИДКОГО СОСТОЯНИЯ

Исследован процесс плавления дендритов в сплаве АК7 в температурном интервале твердожидкого состояния при нагревании образцов с исходной дендритной структурой различными способами. Установлено, что нагревание прямым пропусканием постоянного электрического тока по сравнению с нагреванием в муфельной печи интенсифицирует фрагментацию дендритного каркаса, «таяние» и округление фрагментов, а дополнительное изотермическое наложение импульсов тока способствует образованию твердожидких суспензий с мелкодисперсными глобулярными включениями остаточной α -фазы. Очерчены возможные сферы применения электротокowego воздействия на расплавы в современных технологиях рео- и тиксолития.

Ключевые слова: дендриты, частичная переплавка, твердожидкая суспензия, остаточные фрагменты, постоянный ток, импульсный ток.

Досліджено процес плавлення дендритів в сплаві АК7 в температурному інтервалі твердорідкого стану під час нагрівання зразків з вихідною дендритною структурою різними способами. Встановлено, що нагрівання прямим пропусканням постійного електричного струму в порівнянні з нагріванням в муфельній печі інтенсифікує фрагментацію дендритного каркасу, «танення» і заокруглення фрагментів, а додаткова ізотермічна дія імпульсів струму сприяє утворенню твердорідких суспензій з дисперсними глобулярними включеннями залишкової α -фази. Окреслено можливі сфери застосування електрострумowego впливу на розплави в сучасних технологіях рео- і тиксоліття.

Ключові слова: дендрити, частковий перепплав, твердорідка суспензія, залишкові фрагменти, постійний струм, імпульсний струм.

Process of dendrite fusion of AK7 alloy in the temperature interval of semisolid state during heating the samples with initial dendrite structure in the various ways is investigated. It is established, that heating by direct electric current in comparison with heating in muffle furnace intensifies fragmentation of dendrite frame, «thawing dendrite» and their rounding off, and additional isothermal imposing of pulse current assists formation of semisolid suspensions with dispersed globular inclusions of a residual α -phase. Possible areas of application electrical current influences on melt at modern Rheometal process and at thixotropic forming are outlined.

Keywords: dendrites, partial remelting, solid-liquid suspension, residual fragmentes, direct current; pulse current.

Введение

Процесс дендритного роста в литейных сплавах при охлаждении изучен достаточно хорошо. Обратный процесс дендритного «таяния», который наблюдается при нагревании выше температуры солидуса, менее изучен (например, [1-2]), хотя может иметь серьезное практическое применение, обусловленное развитием технологий литья из зоны двухфазного состояния. Для успешной реализации этих технологий важно иметь исходную металлическую суспензию, специально подго-

товленную, однородную, содержащую, как правило, от 40 до 60 % твердой фазы в виде максимально сфероидизированных кристаллов, которые не связаны друг с другом в конгломераты. Причем требуемое соотношение фаз и требуемые характеристики твердой составляющей – это та совокупность условий, выполнение которой обеспечивает твердожидкой суспензии минимальную вязкость. Чем шире интервал кристаллизации и меньше скорость затвердевания сплава, тем легче получить требуемое соотношение фаз в суспензии. Сложнее обстоит дело с получением недендритной формы мелкодисперсных (<100 мкм) кристаллов, равномерно распределенных в объеме металлической жидкости. Исследования показывают, что изотермическая выдержка суспензии в твердожидкой области улучшает фактор формы зерен, но способствует их росту [3]. Компактную твердую фазу в суспензии без увеличения размеров кристаллов можно получать, например, путем электромагнитного перемешивания [4] или ультразвуковой обработки [5]. Таким образом, наряду с изучением процессов кристаллообразования и роста кристаллов в двухфазной области имеет место поиск эффективных способов управления этими процессами с целью формирования суспензии с заданными фазовым составом и свойствами.

Как известно [6], суспензию с тиксотропной структурой в технологиях реолитья приготавливают одностадийно путем полного расплавления шихты, перемешивания расплава в процессе охлаждения до твердожидкого состояния с последующей запрессовкой в литейную форму. При тиксолитье реализуется двухстадийный процесс: сначала из подготовленной металлической суспензии получают мерные заготовки с недендритной структурой, которые затем опять подвергают частичной переплавке для образования суспензии, пригодной к тиксоформированию. В связи с этим возникает ряд вопросов: можно ли получить такую суспензию, используя не специально подготовленные тиксозаготовки, а обычные чушковые сплавы с исходной дендритной структурой, что существенно упростило бы технологии приготовления и литья сплавов в двухфазном состоянии; какова последовательность трансформации дендритов при нагревании сплава выше точки эвтектического превращения; существуют ли способы, позволяющие завершать этот процесс формированием мелкодисперсных дендритных остатков глобулярной формы.

Цель данной работы – определить закономерности трансформации исходной дендритной структуры в ходе частичной переплавки промышленного алюминиевого сплава АК7, аналога американского сплава А357, который используется в тиксо-технологиях. Представляет также интерес исследование влияния способа, которым производится нагрев, на динамику изменения морфологии исходных дендритов. Этот процесс начинается с плавления более легкоплавкой эвтектики и образования жидкой фазы в междендритных пространствах. Что же касается процесса плавления самих дендритов, то он не может быть в точности обратимым по отношению к дендритному росту, поскольку осуществляется в условиях теплоподвода, которые отличаются от условий теплоотвода, существовавших во время кристаллизации.

Методика экспериментальных исследований

Процесс частичной переплавки образцов сплава АК7 с исходной дендритной структурой реализовывали тремя способами:

- нагреванием и изотермической выдержкой в твердожидком состоянии в муфельной печи;
- нагреванием и изотермической выдержкой в твердожидком состоянии путем пропускания через образец постоянного тока;
- нагреванием и изотермической выдержкой в твердожидком состоянии путем пропускания через образец постоянного тока с дополнительным изотермическим наложением импульсного тока малой мощности.

Использовали цилиндрические образцы диаметром 16 мм и высотой 44 мм, отлитые из чушкового сплава с номинальным химическим составом (%): 7,0 Si; 0,23 Mg; 0,22 Mn; 1,45 Cu; 0,34 Zn; 0,04 Ni; 0,68 Fe. Предварительно регистрировали кривую

Получение и обработка расплавов

охлаждения сплава и на ее основе выбрали рабочие температуры. Экспериментально определенная температура ликвидуса составила 614 °С, а температура эвтектического превращения – 574 °С. Температуры нагрева и изотермической выдержки, составлявшей для всех образцов 2 мин, варьировали в диапазоне 580–620 °С, который охватывает область от начала плавления дендритного каркаса до полностью жидкого состояния. В образце высверливали отверстие глубиной 10 мм, куда вводили ХА-термопару, и при помощи высокочастотного измерительного комплекса непрерывно измеряли температуру сплава в течение нагревания и выдержки.

Трансформацию дендритной структуры сплава изучали, закаляя нагретые до заданной температуры образцы в воде. Исследовали поперечный шлиф, в плоскости которого размещали конец термопары, то есть участок нагреваемого образца, с которого непосредственно снимали температурные показания.

Чтобы характеризовать относительное расположение частиц α -фазы в структуре сплава, использовали коэффициент смежности C_k , который экспериментально определяли методом случайных секущих и подсчитывали по формуле

$$C_k = 2m_{\alpha\alpha} / (m_{\alpha\alpha} + 2 m_{\alpha\beta}),$$

где $m_{\alpha\alpha}$ – число пересечений секущих с граничными линиями раздела частиц α -фазы между собой; $m_{\alpha\beta}$ – число пересечений секущих с граничными линиями раздела частиц α -фазы и эвтектики.

В случае полной связности частиц друг с другом, например, когда зерна связаны в единый дендритный каркас; $C_k = 1$ и $C_k = 0$ – в случае полной изоляции частиц α -фазы друг от друга.

Постоянный и импульсный ток пропускали через образец по схеме, приведенной на рис. 1.

При нагревании постоянным током образец помещали в графитовый кожух (рис. 1, б), что позволило удерживать образующуюся металлическую суспензию и, кроме того, существенно увеличить электрическое сопротивление образца, что в свою очередь дало возможность ускорить его разогрев до высоких температур. Для дополнительной теплоэлектроизоляции использовали шамотный утеплитель. В качестве источника постоянного тока применяли сварочный трансформатор с выпрямителем. Выпрямленное напряжение $U = 40$ В, максимальный выпрямленный ток $I_{\max} = 240$ А. Поскольку это предельный кратковременный ток диодов выпрямителя, то для безопасной работы источника и регулирования тока, протекающего через образец во время нагревания и изотермической выдержки, использовали набор

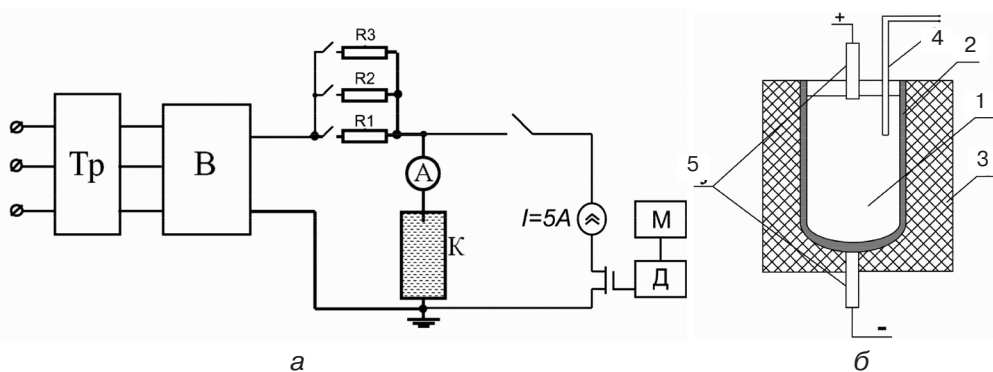


Рис. 1. Схема пропускания электрического тока через образец: а – электрическая цепь, б – нагреваемый образец; Тр – трансформатор, В – выпрямитель, К – графитовый кожух с образцом, А – амперметр, М – микропроцессор, Д – драйвер, R1–R3 – дополнительные сопротивления; 1 – образец, 2 – графитовый кожух, 3 – теплоэлектроизоляционный кожух, 4 – термопара, 5 – электроды

дополнительных сопротивлений (R1–R3). Материал электродов – медь. Типичная кривая нагрева этим способом представлена на рис. 2, а.

Наложение импульсов тока на образец осуществляли в течение его изотермической выдержки, подключая к электрической цепи источник питания с напряжением холостого хода 24 В, либо источник питания с напряжением холостого хода 5 В. Первый из них позволил пропускать через образец прямоугольные импульсы тока силой $I = 5$ А, второй – прямоугольные импульсы тока силой $I = 20$ А с постоянным коэффициентом заполнения 80 % (отношение длительности импульса к периоду следования) и разной частотой следования. При этом варьирование частоты в силу возникающего скин-эффекта

обеспечивало пропускание тока сквозь все сечение образца (25 Гц), сквозь поверхностный слой толщиной, равной 1/2 радиуса (200 Гц), поверхностный слой толщиной, равной 1/4 радиуса (800 Гц), а также поверхностный слой толщиной 1 мм (100 000 Гц).

При нагревании в муфельной печи СНОЛ 30/1100 выводы от помещенной в образец термопары подсоединяли к регистрирующему прибору через смотровое отверстие, что позволяло осуществлять двойной контроль температуры: по показаниям термопары, встроенной в печь, и термопары, размещенной непосредственно в приповерхностном углублении в образце (рис.1, б). Типичная кривая нагрева в муфельной печи представлена на рис. 2, б.

Результаты эксперимента

Нагревание в печи. На рис. 3 приведены микроструктуры закаленных образцов, сформированных в результате нагрева и изотермической выдержки в печи при различных температурах. Как видно, при относительно медленном нагреве в печи (рис. 2, б) путем передачи тепла от периферии к центру образца (рис. 6, б) до температуры 580 °С трансформация исходных дендритов практически отсутствует (рис. 3, а) и они, как и в исходном образце до повторного нагрева (рис. 3, ж), формируют непрерывный каркас (в обоих образцах $C_k = 1$). С ростом температуры нагрева до 585 °С (рис. 3, б) в связанном состоянии в расплаве еще остается более половины дендритов ($C_k = 0,55$). В интервале температур 590–600 °С наблюдается разрушение дендритного каркаса на отдельные фрагменты, а количество окружающей жидкости увеличивается с повышением температуры на этом участке. Фрагменты дендритов уменьшаются в размерах и частично становятся компактнее, хотя удлиненные, вытянутые зерна (остатки первичных дендритных стволов с соотношением длины к диаметру ≥ 2) в структуре являются доминирующей морфологической разновидностью остаточной твердой фазы. Результаты подсчета C_k в образцах, где α -фаза фрагментирована на отдельные частицы, показывают, что с повышением температуры частичной переплавки связность частиц также уменьшается (рис. 3, в-д), а при температуре нагрева 610 °С частицы α -фазы полностью разобщены ($C_k = 0$).

Следует отметить, что возрастающая с увеличением температуры переплава

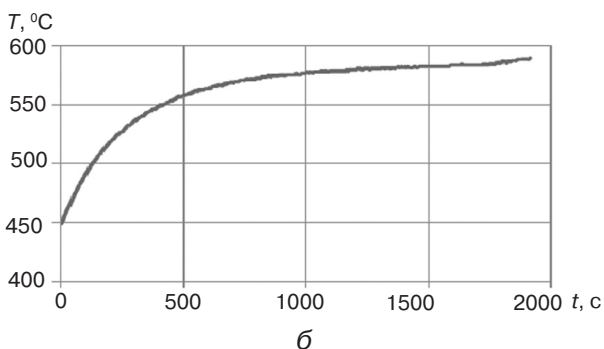
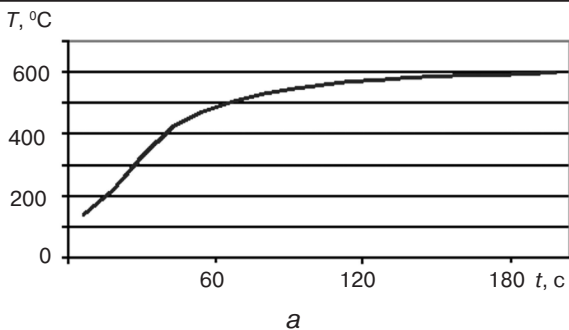
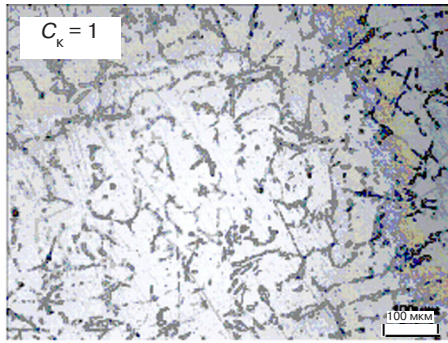
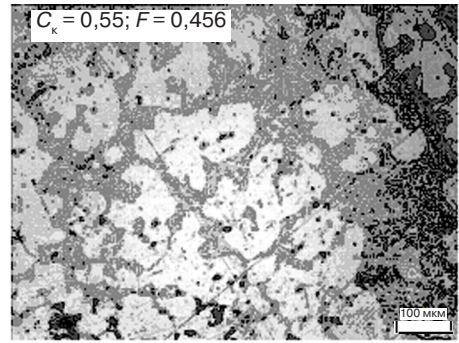


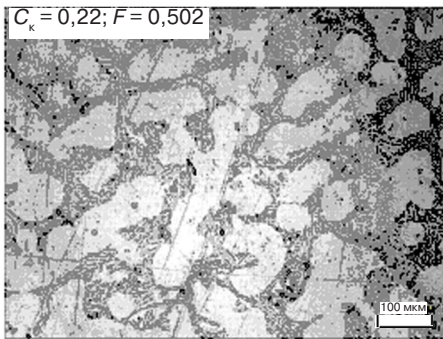
Рис. 2. Кривые нагрева: а – постоянным током, б – в муфельной печи



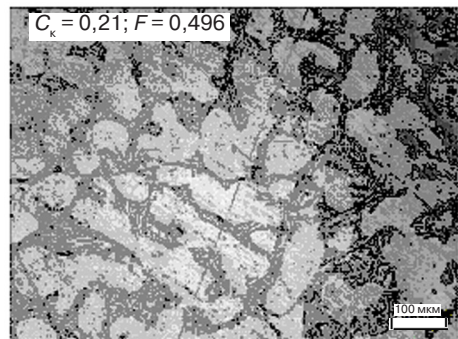
а



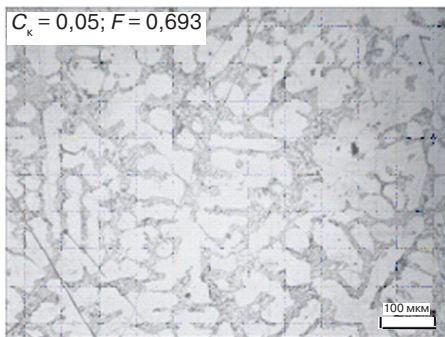
б



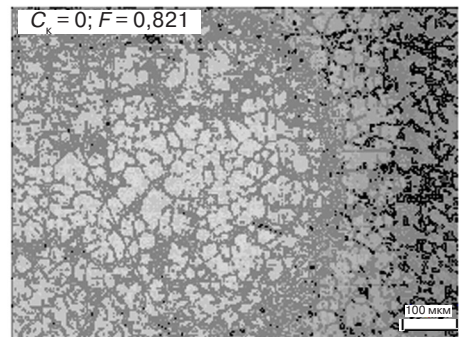
в



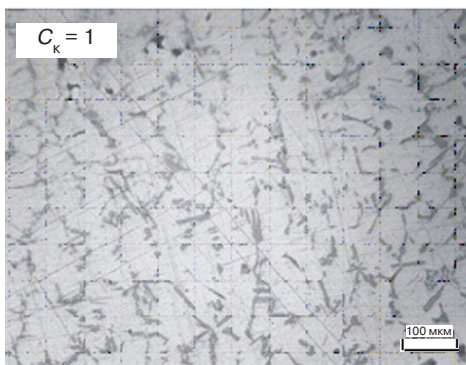
г



д



е



ж

Рис. 3. Микроструктура закаленных образцов после нагревания в печи (F – фактор формы кристаллов); T , °С: а – 580; б – 585; в – 590; г – 595; д – 600; е – 610; ж – исходная структура

Получение и обработка расплавов

трансформация исходных дендритов сопровождается существенным улучшением фактора формы кристаллов F (рис. 3, б-е), но получить полностью глобулярную морфологию бывших дендритов при нагревании в печи даже до температур, близких к ликвидусу, не удалось.

Нагревание постоянным током. Микроструктуры образцов, закаленных после нагревания постоянным током, приведены на рис. 4. Видно, что процесс подплавления дендритов, несмотря на скоростное нагревание, которое реализуется при пропускании через образец постоянного тока, начинает интенсивно проходить уже при 580 °С, то есть на 10 градусов ниже, чем при нагревании в печи. С повышением температуры усиливается фрагментация, происходят уменьшение размеров и округление фрагментов, а при 595 °С получено наиболее удачное подплавление, которое обеспечило округление зерен без развития процессов коагуляции и Оствайдовского созревания. При 600 °С закалкой фиксируются два типа зерен: небольшое количество остаточных первичных и новые мелкие дендритные зерна, образованные из

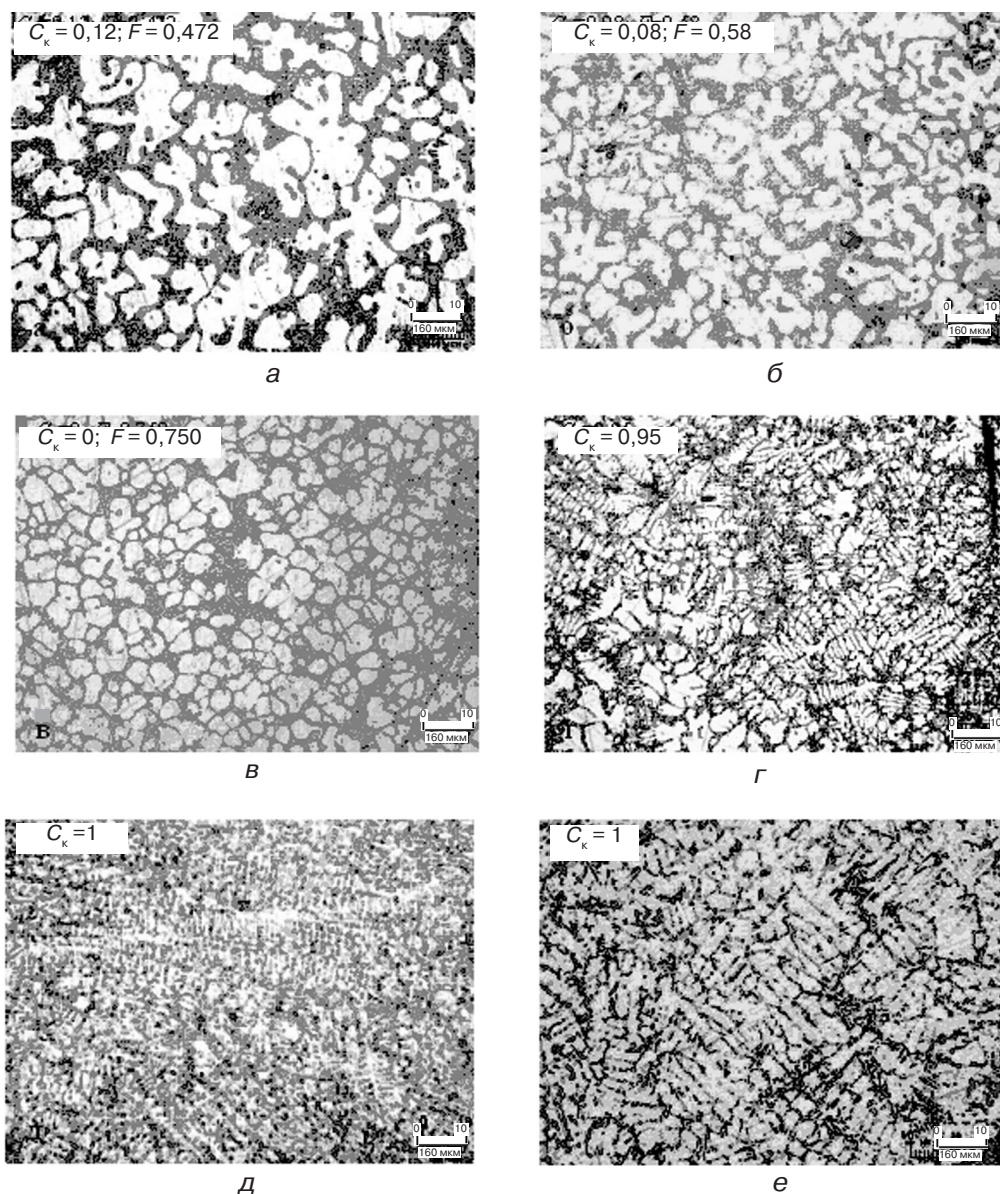


Рис. 4. Микроструктура образцов после нагревания постоянным током, °С: а – 580; б – 590; в – 595; г – 600; д – 610; е – исходная структура

жидкости, а выдержка вблизи ликвидуса (610 °С) приводит практически к полной перекристаллизации жидкости с образованием дисперсной дендритной структуры, уровень связности которой (рис. 4, д) достигает такого в исходных образцах (рис. 4, е). Следует также обратить внимание на существенно меньшие размеры остаточных кристаллов, которые обеспечивают нагревание постоянным током по сравнению с образцами, переплавленными в печи.

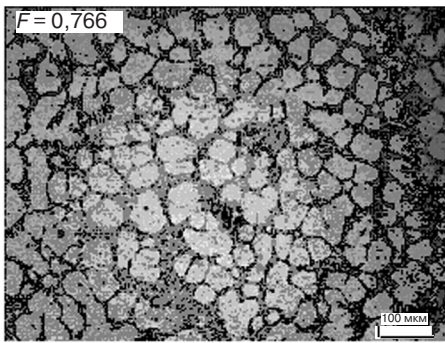
Наложение импульсов тока. Обработку нагреваемого образца импульсами тока осуществляли с целью дополнительного силового воздействия на сплав в двухфазном состоянии, так как результаты многих исследований (например, [7-9]) свидетельствуют о положительных проявлениях такого влияния на структуру литейных сплавов, импульсы тока пропускали во время изотермической выдержки образцов при температуре 595 °С, при которой получены наиболее компактные зерна в переплавляемом сплаве. Микроструктуры образцов, обработанных импульсами тока, представлены на рис. 5. Во всех образцах содержание компактных зерен остаточной α -фазы составляет приблизительно 60 %, зерна отделены друг от друга полностью ($C_k = 0$) участками эвтектики с мелкими (20-30 мкм) включениями эвтектического кремния. По мере снижения частоты следования импульсов уменьшаются размеры и несколько улучшается фактор формы включений α -фазы. В случае, когда импульсный ток пропускали сквозь все сечение образца (25 Гц), наблюдаются розеточная и частично сфероидальная формы кристаллов. Увеличение амплитуды импульсного тока с 5 до 20 А способствует образованию почти сфероидальных фрагментов α -фазы. Кроме того, по сравнению с нагреванием в печи или постоянным током во всех образцах наблюдается более узкий разброс по размерам зерен.

Обсуждение результатов

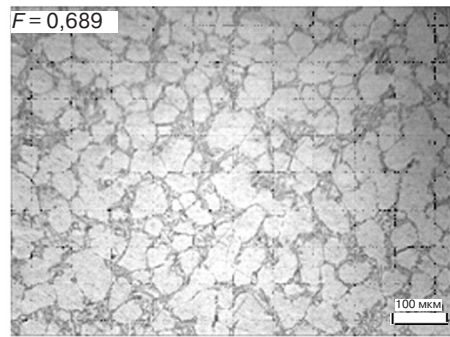
Как видно, нагрев постоянным током, то есть внутренний разогрев металлического проводника, позволяет более эффективно осуществлять процесс переплавки образцов. Для тиксоштамповки нагревать заготовку необходимо быстро, однородно и точно, поскольку для некоторых сплавов незначительные температурные колебания могут приводить к заметным различиям в соотношении жидкой и твердой фаз и, соответственно, к различию реологических свойств. Например, как следует из работы [10], для сплава АК7 перепад температур в заготовке (5 °С) соответствует изменению доли твердой фазы от 45 до 50 % и изменению вязкости суспензии более чем в 10 раз.

Практически нагрев чаще всего осуществляют в индукторе с установкой болванки вертикально на теплоизолирующей подставке, но для этих целей подходит и печь сопротивления. При нагревании в печи сопротивления или индукционной печи тепло передается кондуктивным путем от периферии образца к сердцевине (рис. 6), если нет дополнительного перемешивания, то состояние нагреваемого объема будет неоднородным как по температуре, так и составу. Кроме того, речь идет об узком температурном интервале, в котором формируется необходимое двухфазное состояние образца, значит, устранение градиента притока тепла при нагревании металла имеет важное практическое значение. Именно такой не направленный теплоподвод реализуется за счет прохождения постоянного тока через проводник, в котором одновременно по всему объему выделяется Джоулева теплота.

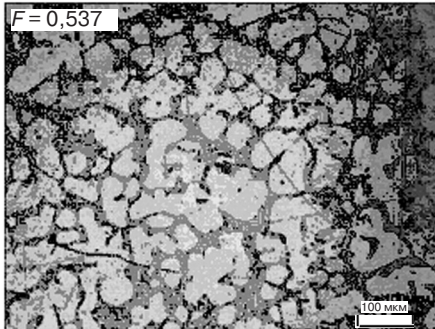
Не претендуя в данной работе на описание фундаментальных закономерностей плавления дендритов, все же стоит отметить, что внутренний разогрев постоянным током может обуславливать свои специфические механизмы трансформации морфологии дендритов. Специфика исходного дендритного зерна такова, что основания его вторичных, третичных и ветвей более высоких порядков, то есть места крепления к материнской оси, более тонкие. И именно они как участки контактного сопротивления границы «жидкость-твердое включение» при протекании тока должны плавиться, в первую очередь, обеспечивая избирательное плавление



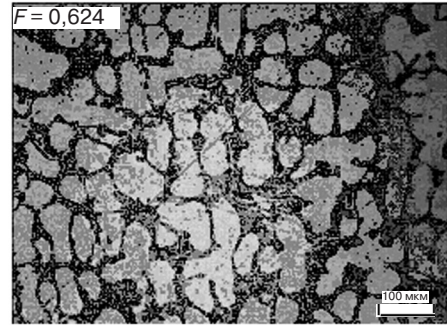
a



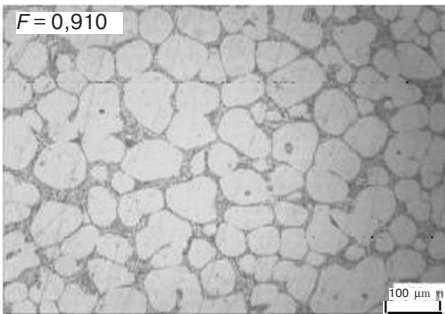
б



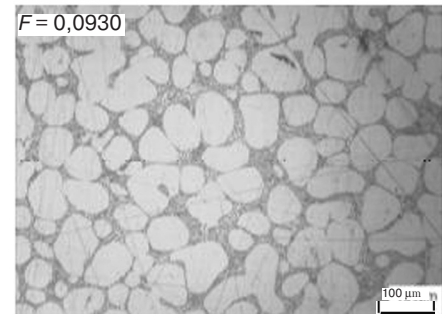
в



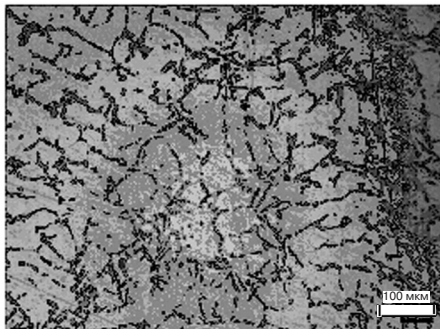
г



д



е



ж

Рис. 5. Микроструктура образцов после обработки импульсным током с различной частотой, Гц: *a* – 25; *б* – 200; *в* – 800; *г* – 100 000; *д* – 25; *е* – 200; *ж* – исходная структура; *a* – *г* – 5 А; *д*, *е* – 20 А

ветвей, отделение ветвей друг от друга, и уже затем последует уменьшение размеров отдельных фрагментов вплоть до образования глобулярных остатков. Если такая последовательность имеет место, дополняя традиционное плавление дендрита как целого, то получить твердожидкую суспензию с глобулярной морфологией кристаллов при нагревании постоянным током проще, чем при нагревании в печи, что и наблюдается экспериментально.

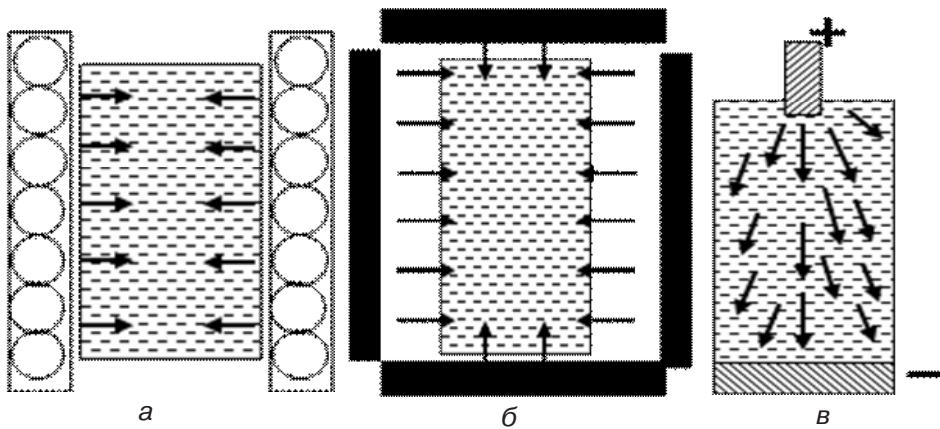


Рис. 6. Схема нагрева образца (стрелками указан фронт плавления): а – индукционное; б – в печи сопротивления; в – электрическим током

Необходимо учитывать и другие физические явления, возникающие в металле при прохождении постоянного электрического тока, которые наряду с тепловым воздействием могут оказывать положительное влияние на процесс плавления. Прежде всего, это взаимодействие электронов проводимости и ионов примесей, вследствие которого возникают электродиффузия и электроперенос химических элементов, а, значит, изменяется концентрация жидкости, окружающей дендрит [11]. Кроме того, микроструктурно плавящийся твердожидкий проводник неоднороден и, значит, электрический ток проходит через среды с различными электропроводностями – через жидкость эвтектического состава и остаточные кристаллы, причем граница между ними не является плоской. А это, как следует из магнитной гидродинамики, может являться причиной возникновения движения сред по границе скачка электропроводности, в данном случае – интенсификации обмывания твердых кристаллических фрагментов жидкостью.

В свою очередь, как показано в работе [9], пропускание импульсного тока через жидкометаллический проводник приводит к возникновению электродинамических сил, действием которых в объеме образца реализуются процессы сжатия и перемешивания.

Реализация совокупности этих механизмов в экспериментальных образцах, обрабатываемых током, очевидно, и является причиной того, что подплавление дендритов начинается при более низких температурах, чем при нагревании в печи, а процесс плавления сопровождается более интенсивной фрагментацией дендритного каркаса и округлением фрагментов. Очевидны и некоторые технологические преимущества электротокowego нагрева: регулирование силы пропускаемого через металл тока позволяет осуществлять скоростной нагрев до высоких температур в течение всего нескольких минут и поддерживать температуру изотермической выдержки с точностью ± 1 °C (для сравнения: при индукционном нагреве – это $\pm 3-5$ °C), а, значит, стабилизировать заданные параметры двухфазной суспензии без укрупнения зерен.

Безусловно, оптимизация процесса электротокowego нагрева и импульсной обработки образующейся суспензии требует дальнейших исследований, так как достигаемый результат округления дендритных остатков очень сильно зависит от многих технологических и структурных факторов, включая разветвленность исходной дендритной структуры. Тем не менее, полученные результаты свидетельствуют о положительном влиянии такого процесса на плавление и глобуляризацию дендритов в зоне двухфазного состояния сплава.

Выводы

Способ внутреннего разогрева постоянным током сплава АК7 с исходной дендритной структурой обеспечивает скоростное и более эффективное плавление легкоплавкой эвтектики и интенсивную трансформацию дендритов при более низких температурах изотермической выдержки сплавов в двухфазном состоянии, чем нагревание в печи. Разделение дендритного каркаса на отдельные фрагменты, их округление и стабилизация размеров происходят более отчетливо при дополнительном изотермическом воздействии на плавящийся объем сплава маломощных импульсов тока. Это открывает возможности использования электротока для нагрева и импульсной токовой обработки в существующих технологиях приготовления твердожидких суспензий, а также пути для разработки новых технологий получения таких суспензий частичной переплавкой исходных чушковых сплавов.



Список литературы

1. *Chen Ti-jun, Hao Yuan, Sun Jun.* Microstructural Evolution and Phase Transformations of Mechanically Stirred Non-dendritic ZA27 Alloy During Partial Remelting // *Journal of Wuhan University of Technology.* – 2004. – Vol. 19, № 4. – P. 56-61.
2. *Jarfors, A. E. W.* Melting and Coarsening of A356 During Preheating for Semisolid Forming // *International Journal of Cast Metals Research.* – 2004. – Vol. 17, № 4. – P. 229-237.
3. *Недужий А. М.* Исследование влияния изотермической выдержки алюминиевого сплава АК7пч в жидкотвердом состоянии на морфологические изменения первичной твердой фазы // *Металлофизика и новейшие технологии.* – 2010. – Т. 32, № 6. – С. 851-858.
4. *Szajar J., Stavarz M., Wrobel T., Senzda W.* Influence of Electromagnetic Field on Pure Metals and Alloys Structure // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering.* – 2009. – V. 34, № 1. – P. 95-102.
5. *Eskin G. I., Semenov B. I., Serebryany V. N.* Influence of Ultrasonic Melt Processing on Self-Organizing Processes of Non-dendritic Solidification of Billets from Al-Si Alloys for Semi-Solid Deformation of Shapes // *Proceeding of the 7th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites.* – Tsukuba, Japan, 2002. – P. 397-402.
6. *Семенов Б. И., Куштаров К. М.* Производство заготовок с тиксоструктурой – главное условие успеха промышленного освоения новых технологий // *Заготовительные производства в машиностроении.* – 2004. – № 4. – С. 3-15.
7. Структурные и фазовые превращения в силуминах под воздействием жидкофазной обработки электрическим током / С. С. Петров, С. В. Пригунов, А. Г. Пригунова и др. // *Металлофизика и новейшие технологии.* – 2008. – Т. 30, № 8. – С. 1129-1137.
8. Influence of Pulse Electric Current on Solidification Structure of Al-Si Alloy / *Chunyan Ban, Yi Han, Qixian Ba, Jianzhong Cui* // *Electromagnetic Processing of Material.* – 2007. – № 1. – P. 34-37.
9. О высоковольтной электроимпульсной обработке расплава / Г. П. Борисов, В. Н. Цуркин, А. В. Синчук и др. // *Металлургия машиностроения.* – 2010. – № 5. – С. 33-40.
10. *Kazakov A. A.* Alloy Compositions for Semisolid Forming // *Advanced Materials Processes.* – 2000. – V. 157, № 3. – P. 31-34.
11. *Коржовська І. В., Корнієнко С. В.* Вплив електроміграції на реакційну дифузію в бінарній системі // *Металлофизика и новейшие технологии.* – 2009. – Т. 31, № 8. – С. 1143-1153.

Поступила 25.01.2012