
ПОЛУЧЕНИЕ И ОБРАБОТКА РАСПЛАВОВ

УДК 621.746.58 669-154

В. И. Белик, Л. К. Шеневидько, В. М. Дука, Т. Г. Цир

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВА КАК ФАКТОРА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПЕРВИЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ α -ФАЗЫ

Установлено, что повышение интенсивности и длительности механического перемешивания при затвердевании отливки из сплава АК7ч приводит к измельчению первичных кристаллов α -фазы при скоростях охлаждения в двухфазной области в диапазоне 0,3-6,5 °С/с в 3-13 раз, тогда как перемешивание в ходе изотермической выдержки или скорости охлаждения порядка 0,006 °С/с измельчения зерна не вызывает, что объясняется недостаточной концентрацией примеси на границе фаз в условиях затвердевания, близких к равновесным.

Ключевые слова: метод NRC, α -фаза, дендритная кристаллизация, SSR-технология, процесс, структура.

Встановлено, що підвищення інтенсивності і тривалості механічного перемішування при твердінні виливки сплаву АК7ч призводить до подрібнення первинних кристалів α -фази при швидкостях охолодження в двохфазній області у діапазоні 0,3-6,5 °С/с у 3-13 разів, тоді як перемішування в процесі ізотермічної витримки або швидкості охолодження порядку 0,006 °С/с подрібнення зерна не викликає, що пояснюється недостатньою концентрацією домішки на границі фаз в умовах твердіння, близьких до рівноважних.

Ключові слова: метод NRC, α -фаза, дендритна кристалізація, SSR-технологія, процес, структура.

It is established that increase in intensity and duration of mechanical mixing during solidification of a casting alloy АК7ч leads to grinding primary crystals α -phase with speeds of cooling in the mushy region in the range of 0,3 to 6,5 °С/s to 3-13 times while stirring during isothermal shutter speed or rate of cooling of the order of 0,006 °С/s with grinding grain does not cause that to a lack of concentration of impurities on the phase boundary in the conditions of solidification, close to equilibrium.

Keyword: method NRC, α -phase, dendrite crystallization, SSR- technology, process, structure.

В настоящее время в промышленно развитых странах получил развитие процесс реолитья (в частности – алюминиево-кремниевых сплавов), имеющий ряд преимуществ перед традиционным способом литья под давлением (ЛПД), которые достигаются за счет использования тиксотропных свойств металлических суспензий, реализующихся при глобульной форме первичных кристаллов α -фазы. Украинские производители литья не могут воспользоваться современными технологиями по причине высокой стоимости пакетов технологической документации при закупке ее за рубежом и отсутствия отечественных разработок. Разработка же нового процесса невозможна без понимания механизма формирования глобульной структуры. К настоящему времени по данному вопросу существуют установившиеся представления [1], согласно которым осуществлять затвердевание расплава необходимо таким образом, чтобы в процессе кристаллизации было задействовано настолько большое число зародышей, что в процессе их последующего роста размер кристалла не достигал бы критического радиуса потери устойчивости. Благодаря этому сохраняется округлая форма отдельного кристалла в ходе роста общего объема твердой фазы до заданного технологическими требованиями предела.

Существуют несколько технологических схем подготовки расплава для реолитья. В таких, например, как SSR-технология [1], «реокаст»-процесс [2], установки непрерывного действия со шнековым механизмом перемешивания и транспортировки металла [3, 4], ключевым технологическим моментом, обеспечивающим получение глобулярной структуры частично затвердевшего сплава является перемешивание расплава в процессе его охлаждения и частичного затвердевания. В других, например, метод NRC – «новое реолитье» и H-NCM «Хонг-нанометод» [1] – нужная структура формируется без принудительного перемешивания, а лишь за счет тепловых условий затвердевания.

Разрабатывая новые технологические схемы получения металлических суспензий, следует отдавать предпочтение более простым и дешевым при условии равного качества продукта. Поскольку мелкое зерно является предпосылкой получения глобулярной структуры, а наряду с процессами, включающими активное механическое или электромагнитное перемешивание расплава, существуют технологические схемы, в которых эффект измельчения достигается без активного перемешивания с целью исключения избыточных технологических факторов, в данной работе исследована роль перемешивания как фактора измельчения зерна при формировании первичных кристаллов α -фазы.

Эксперименты проводили на сплаве АК7ч. Расплав выдерживали в графито-шамотном тигле при температуре 720-740 °С. Затвердевание расплава проводили в стандартной пробнице, предназначенной для проведения термического анализа [5], выполненной из графита либо титана, в последнем случае пробница была окрашена литейной краской. Пробница представляет собой тонкостенный (толщина примерно 1,5 мм) тигелек со сферическим дном высотой 55 мм и наружным диаметром 23 мм. Масса заливаемого в пробницу металла составляла 30 ± 10 г. На высоте 35 мм от дна на боковой поверхности выполнено отверстие диаметром 10 мм, через которое осуществляли заливку пробницы расплавом в тех случаях, когда для ее заполнения использовали прием погружения под зеркало металла в плавильном тигле.

Пробницы заполняли методом погружения под зеркало металла в тигель (предварительно нагревая ее в том же тигле до температуры расплава) либо заливая из ковша. Охлаждение производили на воздухе или в воде. В последнем случае пробницу опускали в воду на такой уровень, при котором вода охлаждала ее только снаружи.

В пробницы перед заполнением опускали термометр для контроля и записи

температуры. Использовали термопару марки ХА и двухканальную соломку $\varnothing 3$ мм. Этой же термопарой производили перемешивание расплава путем движения по окружности тигля со скоростью 1-2 оборота в секунду, продолжая контроль и запись температуры расплава. Полученные данные обрабатывали с помощью графических редакторов MS Excel, Advanced Grapher и специального программного обеспечения «Анализатор сплавов ТермЭкс» на основе методики, представленной в работе [6].

В случае охлаждения на воздухе перемешивание начинали при температуре 625 °С либо при температуре реклесценции, а при охлаждении в воде – сразу же после погружения в воду. Максимальная длительность перемешивания достигалась при перемешивании до того момента, когда диаметр зоны перемешивания, уменьшающийся по ходу затвердевания расплава от краев тигля, приближался к диаметру соломки, которой производили перемешивание. В этом случае перемешивание завершалось при температуре, близкой к эвтектической, и проходило до конца затвердевания (то есть до момента, близкого к полному выделению кристаллов α -фазы).

Расчет скорости охлаждения выполняли по температурной кривой затвердевания образца. Скорость охлаждения расплава рассчитывали на двух этапах: в процессе охлаждения расплава от начала охлаждения до температуры максимального переохлаждения (этап А) и от момента, соответствующего началу подъема температуры, до момента завершения роста первичных кристаллов α -фазы (этап Б).

Средние значения скоростей охлаждения расплава в зависимости от материала пробницы и условий охлаждения представлены в табл. 1.

Таблица 1. Средние значения скоростей охлаждения до температуры ликвидуса (А) и в двухфазной зоне (Б) в зависимости от материала пробницы и условий охлаждения

Материал пробницы	Условия охлаждения	Скорость охлаждения, °С/с	
		А	Б
Графит	воздух	2,91	0,64
	вода	42,73	6,96
Титан	воздух	1,62	0,32
	вода	24,38	6,54

Из приведенных данных видно, что величина теплопроводности материала пробницы (графит и титан) влияет на скорость охлаждения на обоих этапах при охлаждении на воздухе, скорости же затвердевания отливок на этапе Б в воде для обоих типов пробниц практически одинаковые; изменение среды охлаждения с воды на воздух значительно (в 10-20 раз) увеличивает скорость охлаждения.

В табл. 2 представлены данные по влиянию перемешивания на величину зерна в центральной зоне отливки.

Средний размер зерна при перемешивании уменьшился от 3,4 до 0,78 мм, то есть в 4,4 раза. Макроструктура представляет собой крупные равноосные зерна, а микроструктура состоит из дендритов, при визуальной оценке дендриты пробы, затвердевшей в титановой пробнице, выглядят более грубыми, что может быть вызвано меньшей (примерно в 2 раза, табл. 1) скоростью затвердевания в титановой пробнице на воздухе.

Перемешивание расплава в графитовой пробнице при затвердевании с низкой скоростью привело к измельчению макрозерна от 3,0 до 1,4-0,4 мм, огру-

Таблица 2. Влияние перемешивания с максимальной длительностью на размер макрозерна в центральной зоне отливки в зависимости от материала пробницы при охлаждении на воздухе

Наличие перемешивания	Материал пробницы	Номер образца	Размер макрозерна, мм	Дендритный параметр, мкм
Нет	графит	0	3,0	--
	графит	1	3,2	64
	титан	2	4,0	–
	графит	1	3,2	44
		среднее	3,4	–
Есть	графит	1	1,4	50
	графит	2	0,4	57
	титан	3	0,6	52
	графит	10	0,7	46
		среднее	0,78	–

блению и округлению микрозерна, формированию розеточной формы зерна. Повышение скорости охлаждения (табл. 1) при затвердевании в сочетании с перемешиванием стало причиной измельчения микроструктуры – дендритный параметр уменьшился примерно в 2 раза (до 17-22 мкм), тогда как величина макрозерна составила 0,5 мм, то есть близка к условиям затвердевания на воздухе.

Скорость охлаждения оказывает более существенное влияние на величину дендритного параметра (рис. 1), чем перемешивание, но именно перемешивание

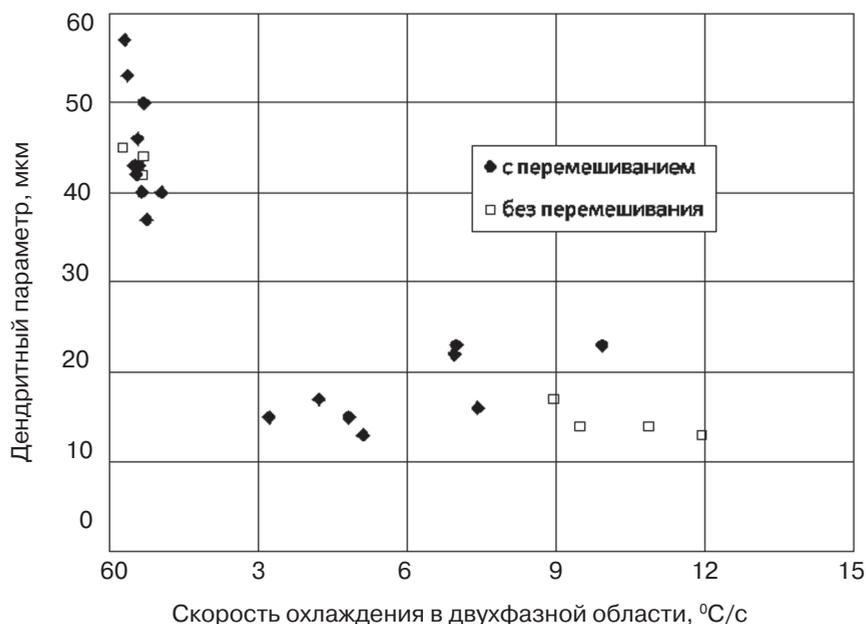


Рис. 1. Зависимость дендритного параметра от скорости охлаждения в двухфазной зоне при наличии и отсутствии перемешивания

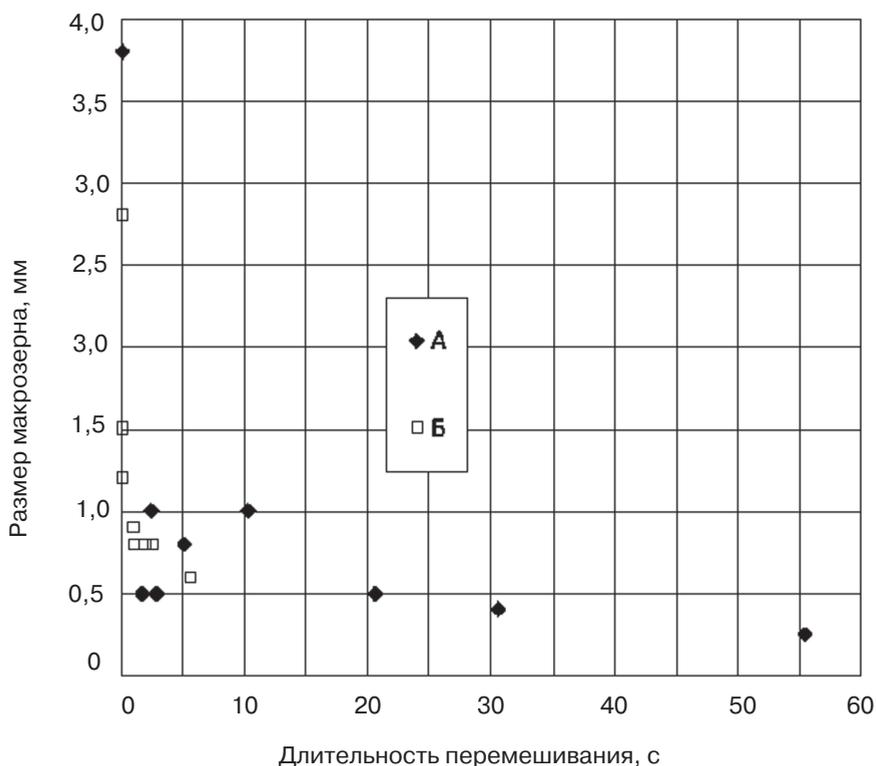


Рис. 2. Зависимость размера макрозерна от длительности перемешивания; материал пробницы: А – графит, Б – титан; условия охлаждения: А – воздух, Б – вода

приводит к измельчению макрозерна от 3,8 до 0,2 мм (рис. 2), причем эффект перемешивания усиливается с увеличением длительности перемешивания. Влияние же скорости охлаждения на дендритный параметр на этапе Б (рис. 1) очень существенное в диапазоне скоростей от 0,3 до 3 °С/с (дендритный параметр уменьшается с ростом скорости охлаждения от 58 до 18 мкм). При дальнейшем повышении скорости (до 12 °С/с) дендритный параметр практически не меняется.

Можно отметить, что уже минимальная длительность перемешивания при застывании отливки в графитовой пробнице на воздухе вызывает нарушение дендритной кристаллизации с появлением форм, близких к розеточным, а увеличение длительности перемешивания сопровождается последовательным округлением ветвей дендритов, появлением более округлых и разобщенных форм кристаллов, недендритных, розеткоподобных структур, причем дендритный параметр остается практически неизменным, тогда как макрозерно измельчается.

При увеличении скорости охлаждения (охлаждение в воде) характер влияния перемешивания сохраняется, но степень его влияния на морфологию первичных кристаллов менее выражена: как и в предыдущем случае наблюдается измельчение макрозерна (рис. 2), но дендритная кристаллизация нарушена в меньшей степени; не выявлены ни розеточные структуры, ни округлые и разобщенные формы. Интересно, что нарушение дендритной кристаллизации и визуально различимое огрубление микроструктуры отмечается как при малых скоростях охлаждения, уже при минимальной длительности перемешивания. Для выяснения причины изменения микроструктуры под воздействием перемешивания на рис. 3 приведены значения дендритного параметра, соответствующие величине макрозерна, зафиксированного для данного образца. Зависимость между дендритным параметром и величиной макрозерна для образцов, полученных при охлаждении в воде, имеет

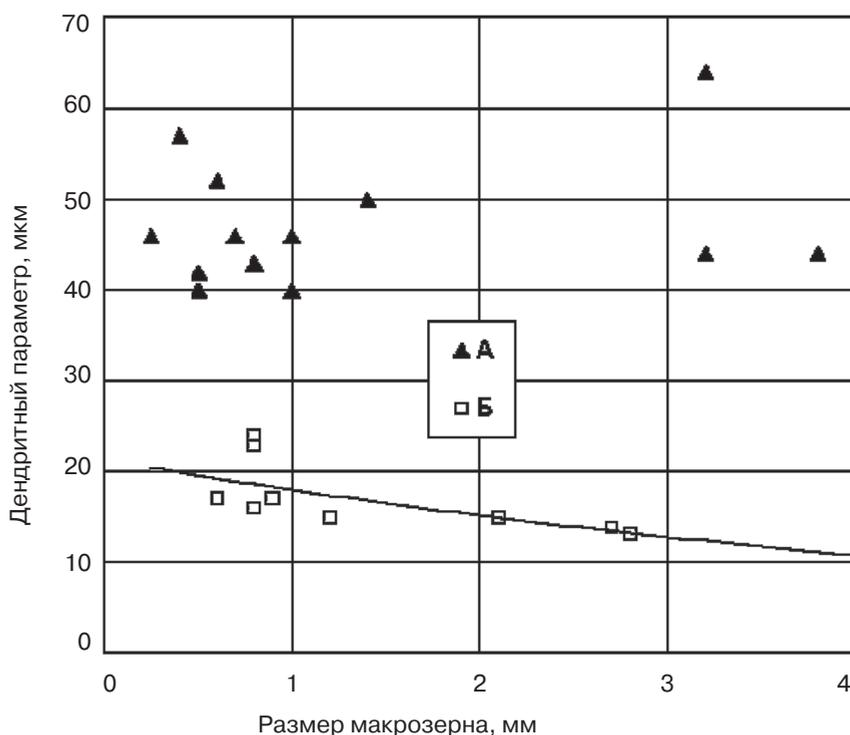


Рис. 3. Зависимость дендритного параметра от величины зерна и условий охлаждения; условия охлаждения: А – охлаждение на воздухе; Б – охлаждение в воде

экспоненциальный характер со степенью достоверности аппроксимации $R^2 = 0,499$ (построено с помощью программы EXCEL), тогда как разброс данных для условий охлаждения на воздухе настолько высок, что установить зависимость невозможно.

Судя по характеру кривой (рис. 3), причиной увеличения дендритного параметра в результате перемешивания при больших скоростях охлаждения является измельчение зерна. Действительно, поскольку число зерен при этом увеличилось, то скорость роста каждого зерна уменьшилась, что и приводит к уменьшению дендритного параметра. Кроме того, выравнивание градиента температур от поверхности к центру образца вследствие перемешивания способствует объемному затвердеванию, что также уменьшает скорость роста отдельного зерна.

При малых же скоростях охлаждения (охлаждение на воздухе) отливки дендритный параметр больше более чем в 2 раза. Вероятно, скорость роста отдельного зерна при этом настолько мала, что ее уменьшение за счет измельчения зерна на величине дендритного параметра сказывается незначительно. То же касается и влияния перемешивания на характер затвердевания – при малых скоростях охлаждения характер затвердевания и без перемешивания объемный, о чем говорит полное отсутствие столбчатых кристаллов, характерных для условий затвердевания в воде.

Таким образом, при высоких скоростях охлаждения наблюдается более дендритный характер первичных кристаллов, малые же скорости охлаждения при условии перемешивания способствуют огрублению первичных кристаллов и появлению розеточных структур.

Оценить влияние параметров перемешивания, в частности, его интенсивности и длительности на макроструктуру при затвердевании в воде, можно по данным, представленным в табл. 3.

Таблица 3. Размер макрозерна в центральной зоне отливки в зависимости от условий перемешивания при охлаждении пробницы в воде

Условия перемешивания	Материал пробницы	Номер образца	Размер макрозерна, мм
Только конвекция	титан	4	2,7
		6	3,7
		8	2,1
	среднее		2,8
Струя расплава	титан	12	1,2
		121	1,5
		55	0,9
	среднее		1,2
Перемешивание соломкой	титан	5	0,2
		7	1,0
		10	0,7
	графит	3	0,5
		4	0,5
	среднее		0,58

Минимальная интенсивность и длительность перемешивания в условиях эксперимента достигались в том случае, когда пробницу заполняли расплавом методом погружения и опускали в воду после охлаждения расплава до заданной температуры на воздухе. В этом случае в ходе охлаждения и затвердевания расплава происходило его перемешивание конвективными потоками, создающимися в объеме расплава в процессе его охлаждения за счет разницы температур между слоем, прилегающим к стенке пробницы, и центральной зоной. Максимальная интенсивность и длительность перемешивания соответствовали случаю перемешивания соломкой, которое производили после опускания пробницы с расплавом, достигшим заданной температуры при охлаждении на воздухе, в воду. Средние параметры перемешивания были получены при заливке пробницы, установленной в воду, расплавом заданной температуры из ковша.

Интенсивность перемешивания от верхних разделов таблицы к нижним возрастает, а величина зерна в том же порядке уменьшается.

Оценку полученных результатов следует провести с учетом механизма воздействия перемешивания на измельчение зерна. Современные представления по этому вопросу можно свести к следующим: зародышами кристаллов могут стать либо отплавившиеся части ветвей дендритов, [7], либо активные примеси [8], дезактивированные высоким перегревом в ходе плавки, но восстановившие свою активность в результате того, что оказались захваченными растущими дендрита-

ми и прошли цикл затвердевания вместе с ними, а после расплавления обломков ветвей дендритов сыграли роль центров кристаллизации. Известно [8], что зарождение кристаллов возможно только на этапе переохлаждения расплава при температуре переохлаждения ниже, чем интервал метастабильности. Отсюда следует, что описанный в работе [8] механизм активирования активных примесей вносит вклад в измельчение структуры только в тот период затвердевания отливки, пока существует переохлаждение соответствующей величины (то есть в условиях экспериментов – порядка половины секунды и 4-5 с, соответственно, для случаев охлаждения пробницы в воде и на воздухе), тогда как увеличение длительности перемешивания, соответственно, до 6 и 55 с (рис. 2) вызывает последовательное измельчение структуры. Более того, в условиях охлаждения на воздухе (см. рис. 2), перемешивание начинали лишь после достижения температуры рекоалесценции. Ведущим механизмом измельчения зерна в условиях эксперимента с учетом кратковременности действия механизма активизации активных примесей следует признать рост первичных кристаллов из отплавившихся ветвей дендритов. Этот же механизм, названный «размножением зерен», рассмотрен в работе [9], где утверждается, что в случае, когда радиус конца одной из ветвей меньше, чем остальных, происходит оплавление дендритной ветви, поскольку и температура плавления для него ниже, чем у остальных. То же самое происходит в местах присоединения ветвей к стволу – если в этой зоне толщина меньше, части ветви отплавляются и отделяются. Именно формированием шейки кристалла в зоне его контакта со свободной поверхностью расплава или стенкой формы и последующим отделением кристалла от места зарождения объясняется [10] измельчающее воздействие потоков расплава.

Во всех перечисленных работах обращают внимание на роль перемещения расплава относительно фронта кристаллизации (вызванного тепловой конвекцией, седиментацией, турбулентными потоками в пристеночном слое, возникающими в процессе заполнения формы) в повышении количества эффективных зародышей кристаллизации в массе отливки и даются рекомендации по усилению этой роли путем принудительного перемешивания, ультразвукового, вибрационного и электромагнитного воздействий. С другой стороны, эффект, однако, оказывает даже самое небольшое перемещение жидкости: согласно [8] еще Д. К. Чернов отмечал, что «при прохождении газового пузыря в затвердевающем стальном слитке кристаллы частью размываются сталью, частью разрушаются и искривляются».

Необходимой предпосылкой отплавления ветви дендрита является [7] возникающее в процессе кристаллизации повышение концентрации примеси около поверхности раздела фаз: «При этом происходит не только временная остановка процесса кристаллизации, но и вторичное расплавление части закристаллизованной твердой фазы. Причиной изменения в распределении температур могут быть потоки жидкого металла, вызванные перемешиванием. При условии выравнивания температур около поверхностей дендритов не обязательно будет выравниваться и концентрация примесей, особенно у основания дендритных ветвей. Поэтому произойдет расплавление ветвей в местах наименьшего сечения».

Отсюда понятно, что роль перемешивания в измельчении состоит в создании потоков расплава, вызывающих перераспределение температур, что необходимо для реализации явления отплавления. Понятно, что и перемешивание для измельчения само по себе не является необходимым – требуемых температурных изменений можно достичь и без перемешивания путем изменения тепловых условий. С другой стороны, наличие потоков расплава в условиях недостаточной концентрации примеси около поверхности раздела фаз даже при большой интенсивности таких потоков не станет причиной измельчения зерна. Действительно, как показали специально проведенные эксперименты, в условиях кристаллизации, близких к равновесным

Получение и обработка расплавов

(что имеет место при низких скоростях затвердевания отливки), перемешивание расплава даже при высокой его интенсивности и большой длительности не приводит к измельчению зерна.

Как было показано выше (табл. 1), минимальная скорость охлаждения в двухфазной области в описанных экспериментах составляла $0,64\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Исследования эффективности измельчающего действия перемешивания в условиях низких скоростей охлаждения и высокой интенсивности перемешивания в интервале кристаллизации сплава были проведены при охлаждении расплава в термостате со скоростью $0,006\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Если для характеристики интенсивности перемешивания воспользоваться линейной скоростью перемещения перемешивающего устройства (соломки или кончика пропеллера, которым производили перемешивание в данных экспериментах), то скорость при этом возрастает в 5 раз (перемешивание пропеллером $\varnothing 40\text{ мм}$ со скоростью $300\text{ об}/\text{мин}$) и в 16 раз (скорость вращения пропеллера $1000\text{ об}/\text{мин}$).

Отбор проб производили вакуумным всасыванием в чугунный кокиль. В двух экспериментах расплав АК7ч (температура ликвидус сплава $614,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) массой $2,7\text{--}3,0\text{ кг}$ перемешивали в чугунном тигле термостата лопастной мешалкой со скоростью $300\text{ об}/\text{мин}$ при его охлаждении до $590\text{ }^{\circ}\text{C}$. В первом эксперименте длительность перемешивания в интервале затвердевания составила 8 мин. Отбрали 4 образца: первый – при температуре $614,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; во втором первый образец взяли при температуре $612\text{ }^{\circ}\text{C}$, а перемешивание осуществляли циклами по 3 мин общей длительностью 21 мин, получили 7 образцов; в третьем эксперименте перемешивали в течение 13 мин со скоростью $300\text{ об}/\text{мин}$ (отбрали 4 образца), а затем – 18 мин со скоростью $1000\text{ об}/\text{мин}$ (отбрали 2 образца), расплав выдерживали при температуре $597,3 \pm 1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ни в одном из экспериментов не было зафиксировано измельчение структуры.

Отсюда можно сделать вывод, что обязательным условием измельчающего действия перемешивания является достаточная скорость охлаждения отливок, при которой повышается концентрация примеси около поверхности раздела фаз, а роль перемешивания в измельчении состоит в создании потоков расплава, вызывающих перераспределение температур и перемещение отплавленной части ветви в зону, где она может стать центром кристаллизации. Только в условиях повышения концентрации примеси около поверхности раздела фаз, формирующегося в процессе затвердевания отливки, повышение интенсивности перемешивания приведет к усилению его измельчающего действия. Именно с этих позиций и следует оценивать результаты, приведенные в табл. 3.

В случае чисто конвективного перемешивания конвективные потоки, развиваясь еще в ходе охлаждения заполненной расплавом пробницы на воздухе, усиливаются с увеличением интенсивности теплоотвода при погружении пробницы в воду. Они затухают в ходе снижения температуры внутренней поверхности пробницы (а затем и фронта кристаллизации) и прекращаются после образования сплошного кристаллического каркаса. Можно предположить, что их основной вклад в измельчение структуры имеет место на этапе роста переохлаждения расплава: в этот период в пристеночной области [11] и на стенках пробницы происходит массовое зарождение кристаллов, а конвективные потоки обновляют поверхность зарождения, распространяя кристаллы из периферийной области по всему объему отливки.

В этот же период и по тому же механизму проявляется действие струи заливаемого расплава, но интенсивность потоков при этом выше, и по объему отливки распределяется большая часть зародышей, что и приводит к формированию более мелких зерен. Следует отметить, что хотя в таблице приведены средние размеры зерна для каждого случая перемешивания, сопоставление данных будет более корректным, если учесть величину перегрева расплава. Так, для двух последних случаев

перемешивания струей использовали расплав с температурой, близкой к 700 °С. При конвективном же перемешивании образец № 6, величина зерна которого составляет 3,7 мм, был получен при температуре 705 °С, остальные – с меньшим перегревом: образец 4 получен при температуре 665 °С, а образец 8 – 626 °С. Снижение величины перегрева, как известно, приводит к измельчению зерна и стало причиной снижения среднего показателя для случая конвективного перемешивания в данной таблице. Разница влияния конвективного перемешивания и струей расплава еще более существенная, чем это видно из средних показателей.

Можно предположить, что и воздействие кратковременного перемешивания соломкой длительностью порядка 1 с проявляется согласно этому же механизму. Даже если перемешивание настолько кратковременно, что к моменту его окончания перегрев еще не снят, в случае, когда движение масс металла, инициированное перемешиванием, продолжается до момента образования зародышей у стенки формы, будет иметь место эффект измельчения зерна. А чем выше температура заливаемого расплава и ниже теплоотводящая способность формы, тем выше вероятность того, что к моменту создания нужной для начала зародышеобразования величины переохлаждения, вызванное заливкой либо кратковременным перемешиванием, движение потоков расплава в форме замедлится либо прекратится, сохранится лишь конвективное перемещение расплава.

И, наконец, максимальный эффект в плане измельчения зерна достигается при длительном перемешивании затвердевающего расплава соломкой. Поскольку перемешивание начиналось сразу после погружения пробницы в воду, то на первом этапе, до образования прилегающего к стенке формы слоя жидкотвердого металла, влияние на зародышеобразование происходило по уже описанному механизму. В дальнейшем, по мере роста кристаллов, перемешивание способствовало описанному выше отплавлению частей вторичных ветвей кристаллов и распределению их в объеме отливки, где они становились зародышами кристаллов.

Только этим и можно объяснить тот установленный в ходе исследований факт, что степень измельчения зерна возрастает с увеличением длительности перемешивания (см. рис. 2).

На рис. 4 представлены макро- и микроструктуры, полученные при различных видах перемешивания. Столбчатые кристаллы, характерные для конвективного перемешивания, превращаются в равноосные, макрозерно уменьшается по мере увеличения интенсивности перемешивания, а дендритная форма микрозерна сохраняется.

Полученные результаты соответствуют традиционным представлениям о влиянии скорости охлаждения и перемешивания на форму и дендритный параметр первичных кристаллов: повышение скорости охлаждения уменьшает дендритный параметр, а перемешивание способствует повышению однородности расплава, переносу зародившихся у стенок пробницы частиц в объем отливки и интенсифицирует процесс фрагментации дендритов за счет отплавления ветвей. Перемешивание снижает температурный и концентрационный градиенты вокруг растущего кристалла, повышает критический радиус начала дендритной кристаллизации [1], что создает предпосылки для формирования недендритных структур.

Учитывая решающее влияние условия повышения концентрации примесей у основания ветвей дендритов на эффективность перемешивания в плане измельчения зерна, можно предположить, что с уменьшением дендритного параметра (то есть с увеличением скорости охлаждения) эффективность перемешивания будет возрастать (меньшее расстояние между ветвями способствует повышению концентрации примеси, а меньшая их толщина ускоряет процесс отплавления).

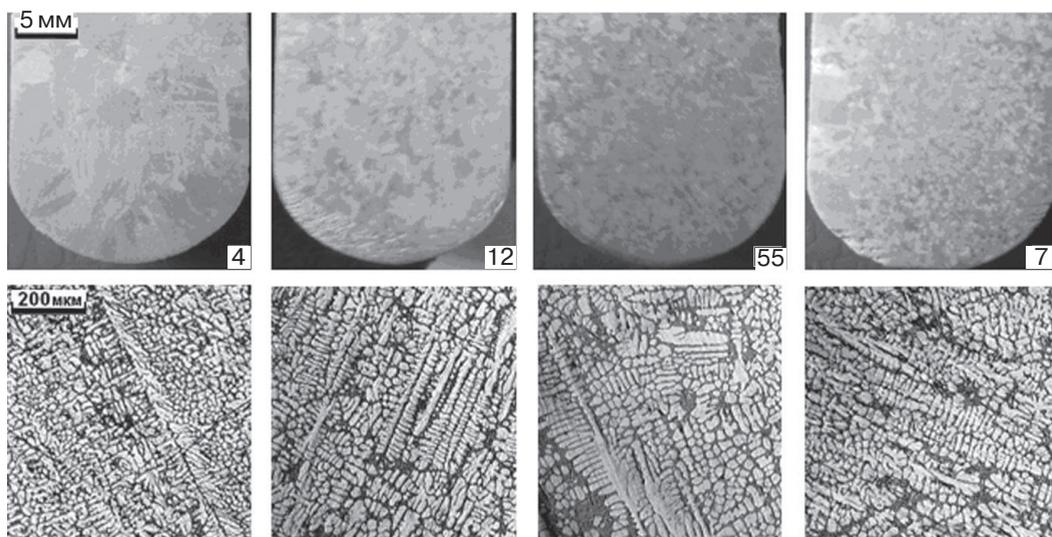


Рис. 4. Влияние различных видов перемешивания на структуру образца, затвердевшего в титановой пробнице при охлаждении в воде; вид перемешивания: 4 – конвективное перемешивание (пробница заполнена методом погружения в расплав и затем погружена в воду); 12; 55 – перемешивание струей расплава (пустая пробница установлена в воду и залита расплавом из ковша); 7 – перемешивание расплава соломкой (предварительно заполненная расплавом пробница погружена в воду при перемешивании)

Выводы

- При подготовке частично затвердевшего сплава для процессов тиксо- и реолитья перемешивание расплава играет ведущую роль в измельчении структуры. В случае реолитья целесообразно повышать интенсивность перемешивания на стадии зародышеобразования (то есть в процессе заливки расплава), способствуя при этом перемещению и распространению зародышей, образовавшихся в пристеночной области, по всему объему отливки. На растущие глобульные кристаллы перемешивание не окажет измельчающего эффекта. Положительное влияние перемешивания на этапе роста объема твердой фазы состоит в возможном снижении градиента концентраций вокруг растущего глобуля, что повышает критический радиус начала дендритной кристаллизации.

- Перемещение расплава относительно фронта затвердевания практически всегда имеет место в условиях реального литья и способствует измельчению зерна за счет увеличения числа зародышей кристаллизации путем переноса кристаллов, образующихся на поверхности охлаждения в центральные слои отливки, и явления отплавления ветвей дендритов с образованием затравок, зародышей кристаллизации. В условиях эксперимента повышение интенсивности и длительности перемешивания усиливает эффект измельчения зерна. Перемешивание же в изотермических условиях (либо при охлаждении с малой скоростью – в условиях эксперимента $0,006\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$) не вызывает измельчения зерна, поскольку условия затвердевания близки к равновесным, и накопления примеси на границе фаз недостаточно для эффекта отплавления ветви кристаллов тепловыми потоками.

- Различие в скорости охлаждения отливок в 10-20 раз (охлаждение на воздухе и в воде) не влияет на величину макрозерна, тогда как перемешивание в тех же условиях приводит к его уменьшению в 3-13 раз.

- Увеличение скорости охлаждения от $0,3$ до $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ существенно (с 58 до 18 мкм)

уменьшает величину дендритного параметра, который при дальнейшем повышении скорости (до 12 °С/с) практически не меняется.

- Перемешивание расплава в графитовой пробнице при затвердевании с низкой скоростью привело к измельчению макрозерна, огрублению и округлению микрозерна, формированию розеточных форм, причем уже при минимальной длительности перемешивания (1,7 с). При увеличении скорости охлаждения (охлаждение пробницы водой) характер влияния перемешивания сохраняется, но влияние на форму первичных кристаллов менее выражено – присходит измельчение макрозерна, но степень нарушения дендритной кристаллизации ниже, розеточные структуры не выявлены. Таким образом, при высоких скоростях охлаждения наблюдается более дендритный характер первичных кристаллов, малые же скорости охлаждения при условии перемешивания способствуют огрублению первичных кристаллов и появлению розеточных структур.

- Увеличение длительности перемешивания сопровождается последовательным округлением ветвей дендритов, появлением более округлых и разобщенных форм кристаллов и последовательным измельчением макрозерна.

- Отмечены огрубление микрозерна и увеличение дендритного параметра при перемешивании в случае охлаждения пробницы водой, что объясняется уменьшением скорости роста отдельного кристалла.



Список литературы

1. Семенов Б. И., Куштаров К. М. Производство изделий из металла в твердожидком состоянии // Новые промышленные технологии: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 223 с.
2. Пикунов М. В. Плавка металлов, кристаллизация сплавов, затвердевание отливок: Учеб. пособие. – М.: МИСиС, 2005. – 256 с.
3. Kang C. G., Seo P. K., Lee J. S. Continuous Fabrication of Rheology Material by Rotational Barrel Type with Induction Heating System // Proc. of the 8-th Int., 2004.
4. Fan Z., Ji S., Fang X. Rheo-Diecasting of Aluminium Alloys and Components // Ibit., 2004.
5. Бялик О. М., Смутьский А. А., Иванчук Д. Ф. Контроль качества металла методом термического анализа // Литейн. пр-во. – 1982. – № 5. – С. 8-9.
6. Смутьский А. А., Семенченко А. И., Елов С. М. Термический анализ алюминиевых сплавов // Процессы литья. – 2002. – № 1. – С. 10-16.
7. Хворинов Н. И. Кристаллизация и неоднородность стали. – М.: Гос. научно-техническое изд-во машиностроительной лит-ры, 1958. – 392 с.
8. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки. – М.: Машиностроение, 1979. – 335 с.
9. Флемингс М. Процессы затвердевания. – М.: Мир, 1977. – 423 с.
10. Оно А. Затвердевание металлов. – М.: Metallurgia, - 198. – 150 с.
11. Чалмерс Б. Теория затвердевания. – М.: Metallurgia, 1968. – 288 с.

Поступила 04.07.2013