
ЗАТВЕРДЕВАНИЕ СПЛАВОВ

УДК 621.746.6: 669.715-41

**В. И. Белик, Ф. М. Котлярский, Г. П. Борисов, В. Ю. Шейгам,
В. М. Дука, А. И. Семенченко**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ВЫБОР ЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Проведен сравнительный анализ ряда литых заготовок для исследования прочностных свойств алюминиевых сплавов. Предлагаемая к использованию заготовка позволяет сократить расход металла по сравнению со стандартной заготовкой при сохранении уровня прочности.

Проведено порівняльний аналіз ряду литих заготовок для дослідження властивостей міцності алюмінієвих сплавів. Заготівка, що пропонується для використання, дозволяє скоротити витрати металу в порівнянні зі стандартною заготівкою при збереженні рівня міцності.

The comparative analysis of some samples for research of strength properties of aluminum alloys is carried out. The sample offered to use allows to reduce the metal consumption in comparison with standard sample at conservation of level of strength.

Ключевые слова: *алюминиевые сплавы, механические испытания, образец, экономия материалов.*

В последнее время в связи с ограниченным финансированием исследований и удорожанием алюминиевых сплавов все больший интерес вызывают методы исследований, позволяющие сократить расходы на материалы, поскольку иногда данные работы можно провести только при использовании таких методов. В частности, это касается такой трудозатратной и материалоемкой области исследований, как определение прочностных характеристик сплавов.

Заготовки, из которых изготавливаются образцы для исследования прочностных свойств, согласно ГОСТу 1497-61, можно вырезать либо из тела отливки, либо отливать отдельно или в виде прилива к отливке. Общеизвестно, что прочностные свойства литого материала определяются как составом сплава, так и особенностями технологии литья. В исследованиях влияния особенностей состава сплава на его прочностные свойства при оценке эффективности методов рафинирования и модифицирования образцы для исследования прочностных свойств предпочтительнее изготавливать из специально отлитых заготовок, поскольку в данном случае проще стабилизировать условия литья, определяющие полноту питания отливки, от которой зависит плотность образца, во многом определяющая его прочностные свойства.

ГОСТом 1583-93 (ДСТУ 2839-94) предусмотрена стандартная литая заготовка (далее – образец А). Высокая стоимость изготовления кокиля для ее литья, трудоемкость и дороговизна последующих операций по изготовлению из отливки образцов для определения прочностных свойств (так называемых разрывных образцов), а также значительная материалоемкость такой заготовки стали причиной использования в ряде исследований образцов, отличающихся от стандартной заготовки и имеющих преимущество перед ней в плане сокращения затрат на проведение экспериментов.

Однако, поскольку эти преимущества не должны достигаться за счет достоверности получаемых результатов, в настоящей работе исследовали возможности использования таких заготовок вместо стандартной.

Затвердевание сплавов

В качестве критерия выбора наилучшей заготовки приняли близость уровня прочности и плотности к показателям стандартной заготовки, отлитой в тех же условиях. Более высокие (по сравнению с другими образцами) уровень свойств и плотность какого-либо образца говорят о меньшем негативном влиянии газоусадочных дефектов, то есть, чем выше прочностные свойства и плотность данного образца, тем более они соответствуют свойствам сплава, определяемым его составом.

Исследованные образцы представлены на рис. 1, в том числе:

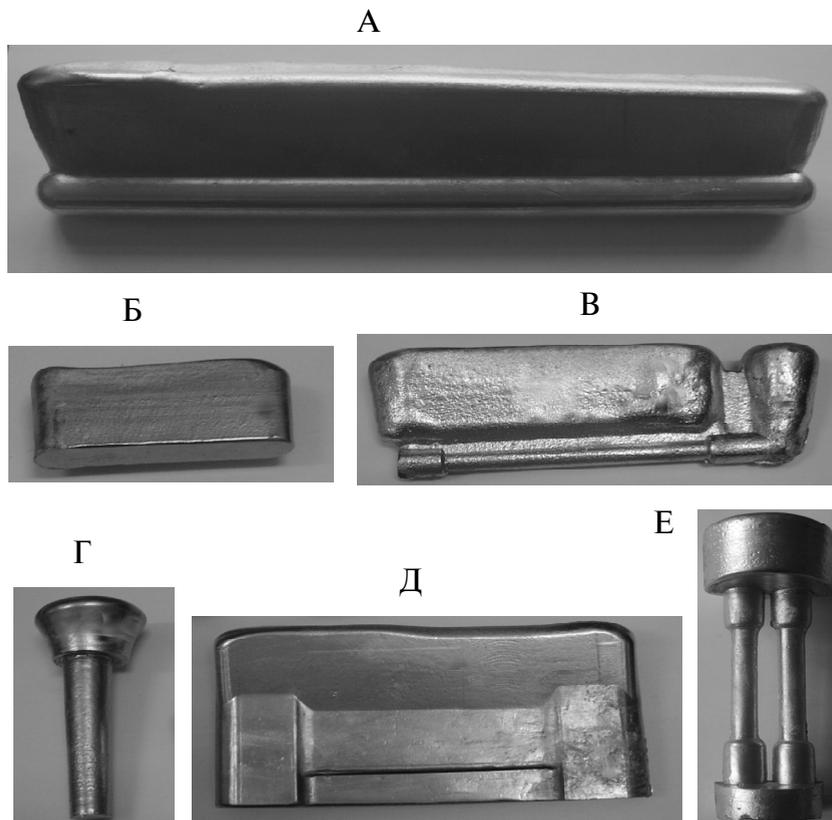


Рис. 1. Виды образцов

- *Стандартная литая заготовка (образец А)*, получаемая в кокиле с вертикальным разъемом. Она представляет собой цилиндр длиной 230 мм и диаметром 20 мм с прибылью, расположенный горизонтально вдоль всей образующей цилиндра. Из отливки изготавливаются два образца № 15К (ГОСТ 1497-61) для испытаний на прочность, диаметр рабочей части – 10 мм или три образца № 16К с диаметром рабочей части 8 мм.

- *Образец (Б) в виде параллелепипеда*, получаемый в вытряхном кокиле, изготовленном из чугуна. Длина образца 83 мм, толщина 15 мм, высота (вместе с прибыльной частью) 34 мм. Нижняя плоскость отливки оформляется отдельной чугунной плитой толщиной 20 мм, толщина стенок кокиля – 15 мм. Для улучшения условий питания отливки в верхнем торце кокиля по периметру прибыли на высоту прибыли (15 мм) выполнено углубление шириной 10 мм, которое заполняют минеральной ватой. Толщина стенки прибыльной части кокиля 2 мм. Из полученной отливки изготавливается образец № 16К для испытаний на прочность с диаметром рабочей части 8 мм.

- *Литой цилиндрический образец В*, получаемый в кокиле с вертикальным разъемом. Диаметр рабочей части образца для испытаний на прочностные свойства 10 мм, длина - 90 мм. Использование заготовки, близкой по форме и условиям заливки к образцу А, но с литыми утолщениями в нерабочей части, вызвано стремлением к снижению затрат расплава на изготовление образца и стоимости механической обработки. В то же время сохранили

Затвердевание сплавов

хорошие условия питания стандартной заготовки, определяемые ее горизонтальным расположением в кокиле и прибылью, питающей образец по всей его длине.

- *Конический образец Г.* Конусность отливки обеспечивала возможность легкого ее извлечения из кокиля и направленность затвердевания отливки. Длина образца - 80 мм, диаметры низа и верха - 15 и 18 мм. Кокиль - цилиндрический диаметром 60 мм, толщина плиты, формирующей нижнюю часть кокиля, - 20 мм.

Для получения конических образцов использовали два типа кокилей: вытряхной кокиль, изготовленный из сплошной чугунной заготовки, в котором получали образец Г-1, и кокиль, изготовленный из набора стальных шайб, соединенных сварными швами вдоль образующей наружной поверхности цилиндра (образец Г-2). Предполагалось, что зазоры между шайбами повысят вентиляционные свойства кокиля и обеспечат возможность плотного контакта между затвердевающей корочкой отливки и стенкой кокиля. Как показали ранее проведенные эксперименты, отсутствие такой вентиляции в сплошном чугунном кокиле в ряде случаев приводило к нестабильности условий заливки, захлесту воздуха струей заливаемого расплава и последующему образованию утяжин на поверхности образца, что более характерно при получении отливок в кокиль, нагретый до температуры около 400 °С. Из отливки, полученной в этих кокилях, изготавливается образец для испытаний на прочность № 16К с диаметром рабочей части 8 мм.

- *Образец Д* в виде плоской заготовки получали в кокиле с вертикальным разъемом. Литой образец состоит из двух ступеней: нижней, толщиной 9 мм и верхней, толщиной 12,5 мм. Уменьшение толщины образца от верха к низу обеспечивает направленность затвердевания отливки. Толщина чугунных пластин, из которых изготовлен кокиль, составляет 30 мм.

Из литого образца фрезерной обработкой изготавливали три плоских образца для проведения испытаний на прочность. Из нижней части отливки сделали плоский образец сечением 9х9 мм (далее по тексту - «Д, нижняя часть»), из верхней - два плоских образца сечением 7,5х12,5 мм («Д, средняя часть» и «Д, верхняя часть»). При использовании такого образца нет необходимости в дорогостоящей токарной обработке при изготовлении разрывных образцов.

- *Улитых образцов Е*, форма которых максимально приближена к форме разрывных образцов, механическая обработка сведена к обрезке прибылей и зачистке рабочей части образцов по стыку кокиля. Для получения этих образцов использовали двухместный кокиль с вертикальным разъемом. На рабочие поверхности кокиля наносили слой литейной краски CILOLIN Al 2812 производства фирмы «SHAFFER». Отливка представляет собой два вертикально расположенных разрывных образца диаметром 10 мм и длиной рабочей части 60 мм. Крепежные части образцов соединены вверху и внизу общими прибылями. Часть кокиля, в которой формируется нижняя прибыль, выполнена из теплоизоляционного материала на основе каолиновой ваты. Кокиль выполнен в виде цилиндра диаметром 60 мм.

На первом этапе экспериментов из образцов Б-Д отобрали лучший образец А для последующего сравнения со стандартной заготовкой. Эксперимент проводили на вторичном сплаве АК5М2. Расплав массой 16 кг был обработан при температуре 730 °С флюсом ARSAL 2125 из расчета 0,5 % от массы расплава. В ходе эксперимента температура расплава поддерживалась в пределах 710-740 °С.

Начальная температура кокилей, при которой была получена первая отливка, составляет 20-30 °С, в ходе дальнейших заливок кокилей она увеличивалась. Это дало возможность оценить условия питания отливки, получаемой в каждом виде кокиля в зависимости от его температуры, и влияние питания отливки на ее прочностные свойства. Совместный анализ данных по плотности и прочности образцов дает более полную информацию о влиянии температуры кокиля на процесс формирования образцов, полученных в кокилях различного типа. При проведении такого анализа следует учитывать возможные отличия плотности литых образцов отливки от плотности изготовленных из них разрывных образцов.

Плотность литых образцов измеряли методом гидростатического взвешивания, которое производили после отделения прибыльной части.

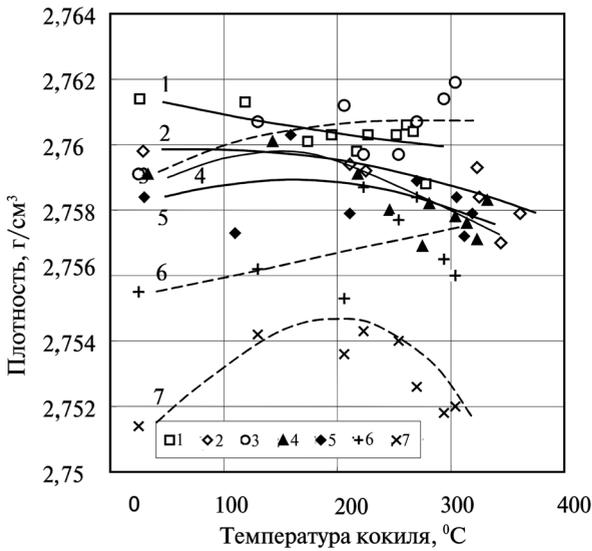


Рис. 2. Влияние температуры кокиля на плотность образцов: 1 - Б; 2 - Г-1; 3 - Д, нижняя часть; 4 - В; 5 - Г-2; 6 - Д, средняя часть; 7 - Д, верхняя часть

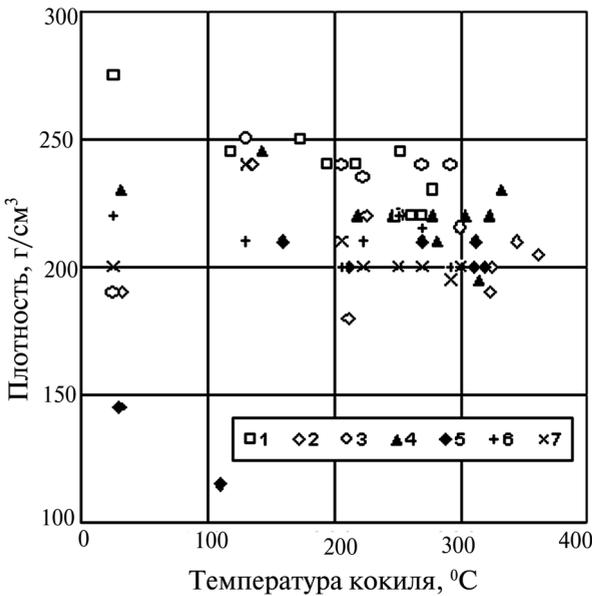


Рис. 3. Влияние температуры кокиля на прочность образцов: 1 - Б; 2 - Г-1; 3 - Д, нижняя часть; 4 - В; 5 - Г-2; 6 - Д, средняя часть; 7 - Д, верхняя часть

Этого стало снижение объема усадочной пористости, вызванное улучшением питания отливок с ростом температуры кокиля а, значит, и уменьшение количества пор играющих роль концентраторов напряжений: известно, что на прочностные свойства отливки оказывает влияние не только общий объем пор (от которого зависит величина плотности), но и форма пор, определяемая условиями питания отливки [4-6].

Снижение прочностных свойств образцов по мере роста температуры формы (рис. 3) вызвано уменьшением их плотности (рис. 2) в результате улучшения условий газовой пористости.

Поскольку значения плотности и прочности металла образца Б во всем исследованном диапазоне температур превышают соответствующие значения остальных образцов, был

Экспериментальные значения плотности и прочности образцов в зависимости от температуры формы представлены на рис. 2 и 3.

Анализ влияния температуры кокиля на плотность литых образцов показал, что, оно было двояким: величина плотности отливки определялась взаимодействием двух противоположно направленных процессов. С одной стороны, уменьшение скорости затвердевания отливки с ростом температуры кокиля улучшает условия питания в двухфазной зоне отливки и сокращает усадочную пористость [1, 2], а с другой - улучшает условия для газовой пористости и увеличивает газовую пористость [3]. По характеру кривых, представленных на рис. 2, наличие или отсутствию восходящей и нисходящей частей можно оценить преобладание влияния улучшения питания или усиления газовой пористости в отливке при данных температурных условиях. Так можно отметить, что, кривая 1 в отличие от всех остальных кривых не имеет восходящей части и величина плотности образца Б, полученного при первой заливке, превышает плотность образцов, полученных при последующих заливках. Это говорит о том, что питание образца Б при температуре кокиля 30 °C уже настолько полное, что уменьшение скорости затвердевания, вызванное ростом температуры кокиля, при последующих заливках больше сказалось на улучшении условий газовой пористости. Питание же всех остальных образцов улучшилось при подогреве формы первой заливкой. Прочность образцов Г, В и Д при этом резко возросла (рис. 3, кривые 2-5 и 7). Причиной

Затвердевание сплавов

отобран кокиль для его получения и проведения дальнейших исследований. Такой кокиль кроме преимуществ по плотности и прочности образцов оказался и наиболее экономичным в плане расхода жидкого расплава (табл. 1).

Таблица 1. Масса образцов с прибылями и без них

Тип образца	Средняя масса образца с прибылью, г	Средняя масса образца без прибыли, г	Количество образцов, получаемых из 1 кг расплава
А *	640	194	4,7
Б	129	51	7,6
В	381	43,4	2,6
Г-1	147	44	6,8
Г-2	134	44	7,4
Д *	437	111	6,9
Е *	300	33	6,7

*При расчете учтено, что из заготовок А и Д изготавливаются по три образца для определения механических свойств, а из заготовки Е – два

На втором этапе экспериментов провели сравнение плотности и прочности образцов А, Б и Е. Эксперименты проводили в производственных условиях при выплавке вторичного сплава АК12М2 в печи сопротивления с графитовым тиглем емкостью 350 кг. Температура расплава перед началом отбора образцов составляет 775 °С.

Перед заливкой кокиля замеряли его температуру. Увеличение температуры кокилей достигалось последовательными заливками расплава. Для изучения плотности образцов Е использовали сами отливки после удаления прибыльной части. Плотность образцов А и Б измеряли после изготовления из них цилиндрических заготовок, предназначенных для последующего изготовления разрывных образцов.

Полученные данные приведены на рис. 4. Как видно, плотность образцов А и Б практически не зависит от температуры формы, тогда как плотность образцов Е с ростом температуры формы увеличивается, особенно при первых заливках. Это говорит, во-первых, о том, что степень полноты питания образцов Е ниже, чем остальных образцов, а во вторых, – что водорода в расплаве меньше, чем в предыдущем эксперименте (рис. 2), поскольку уменьшение скорости затвердевания не стало причиной увеличения объема газовой пористости ни в одном из исследованных образцов.

Наиболее плотными образцами при всех температурах кокиля оказались образцы А, наименее плотные – Е. Значительная разница в плотностях образцов Е, с одной стороны, и образцов А и Б, с другой, вызвана отличиями в условиях питания. Питание образцов Е с торцевой их части менее полное, чем питание по всей длине образцов А и Б. Обращает на себя внимание и больший разброс значений плотности образцов Е по сравнению с другими, что говорит о большем влиянии таких случайных факторов, как особенности заливки или наличие неметаллических включений, которые сильнее влияют в условиях недостаточного питания.

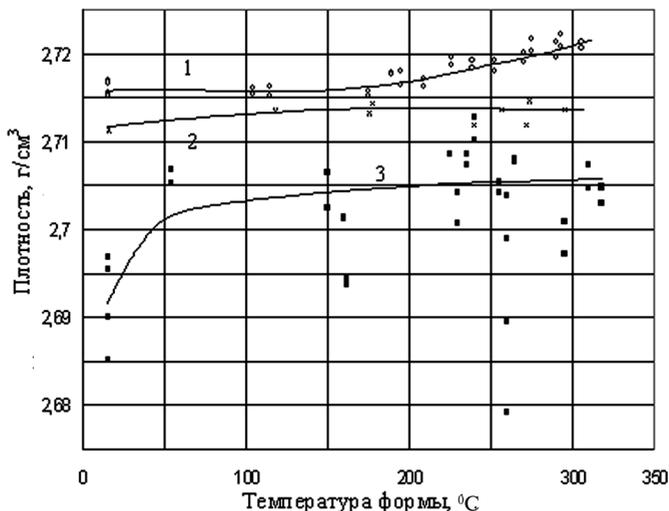


Рис 4. Влияние температуры кокиля на плотность образцов: 1 - образец А; 2 – образец Б; 3 - образец Е

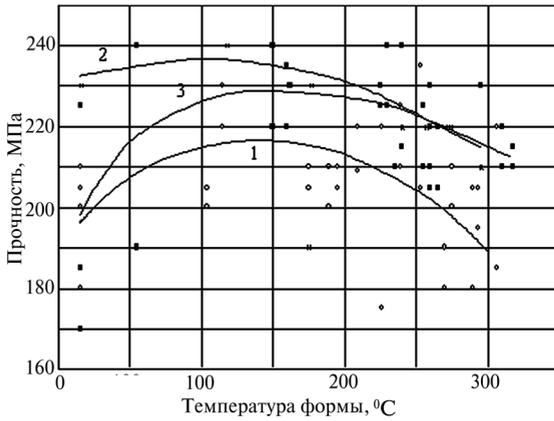


Рис. 5. Влияние температуры кокиля на прочность образцов: 1 - образец А; 2 - образец Б; 3 - образец Е

наличием литейной корочки на образцах Е, которая и придает им высокую прочность, не соответствующую степени пораженности металла газоусадочными дефектами. Большой разброс значений образцов Е (по сравнению с другими образцами) вызван затрудненной усадкой, обусловленной гантелеобразной формой образцов.

Таким образом, судя по результатам данного эксперимента, образцы Б показали себя лучше, чем образцы А и Е: кроме того, что прочность образцов Б выше, чем остальных, меньше и разброс значений прочности. Это можно объяснить меньшим влиянием такого фактора, как случайные отклонения в режиме заливки кокиля на свойства литого металла.

Образцы А и Б использовались в работе [7] при исследовании влияния рафинирования сплавов АК9М2 и АК12М2 на их прочностные характеристики. Полученные данные позволяют сравнить образцы А и Б в плане вопросов, рассматриваемых в данной статье.

В каждом эксперименте в кокиле каждого типа получали последовательно две отливки. Первую - при температуре кокиля 20-30 °С, - «холодный кокиль», вторую - после нагрева кокиля первой отливкой (температура кокиля составляла 100-130 °С), «горячий кокиль». Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания, образцов А - после изготовления цилиндра диаметром 16 мм, Б - после отрезки прибыли. Прочность измеряли на образцах №15к и 16к соответственно.

Сравнивали образцы А и Б, полученные в аналогичных условиях, то есть либо контрольные образцы, полученные из исходного расплава, или же опытные образцы, полученные из расплава, подвергнутого одному и тому же методу рафинирования. Из серии шести образцов, полученных из одного и того же расплава (четыре образца А и два образца Б), фиксировали количество образцов каждого типа, показавшее два наибольших значения плотности и прочности, и количество образцов каждого типа, значения прочности по которым превышало среднее значение прочности - 220 МПа для сплава АК9М2 и 190 МПа - для сплава АК12М2. Полученные данные приведены в табл. 2.

Средние значения плотности и прочности образцов А и Б приведены в табл. 3. При расчете отдельно учитывались образцы, полученные в горячем и холодном кокилях.

Как видно из табл. 3, образцы Б в большинстве случаев более плотные, что, как было показано выше, объясняется наличием плотной корочки наружных слоев, удаленных перед замером плотности с образцов А. Из приведенных данных следует, что величины плотности образцов обоих типов очень близки, что говорит о схожести условий питания: на сплаве АК9М2 при заливке в холодный кокиль плотность средняя, плотность образцов Б выше на 0,078 %, в горячий - на 0,054 %, а на сплаве АК12М2, соответственно, выше на 0,042 % и ниже на 0,004 %. Повышение плотности образцов при увеличении температуры кокиля говорит об улучшении условий питания, более значительном для сплава АК9М2, что вызвано его большим (по сравнению со сплавом АК12М2) интервалом кристаллизации.

То, что образцы А имеют несколько большую плотность, чем образцы Б, предположительно вызвано их геометрическими размерами, в частности, диаметром образца (Б - 11 мм; А - 16 мм), который подвергался гидростатическому взвешиванию. В то же время прочность образца определяется именно наличием дефектов в осевой зоне. Судя по тому, что прочность образцов Б значительно выше прочности образцов А (рис. 5, кривые 1 и 2), плотность металла именно в осевой части образцов выше у образцов Б, что говорит о лучших условиях их питания, а то, что прочность образцов А меньше, чем образцов Е при более высокой плотности образцов А, вызвано наличием литейной корочки на образцах Е, которая и придает им высокую прочность, не соответствующую степени пораженности металла газоусадочными дефектами.

Затвердевание сплавов

Таблица 2. Число наибольших значений плотности и прочности и число значений, превышающих среднее значение прочности образцов А и Б из сплавов АК9М2 и АК12М2

Тип образца	Количество образцов	Число наибольших значений, %		Число значений, превышающих среднее значение прочности, %
		плотность	прочность	
АК9М2				
А	24	12,4	20,8	54,2
Б	12	74	58,3	75
АК12М2				
А	16	25	31	56,3
Б	8	50	37,5	62,5

Таблица 3. Средние значения плотности и прочности образцов А и Б из сплавов АК9М2 и АК12М2

Тип образца	Средние значения			
	плотность, г/см ³		прочность, МПа	
	холодный кокиль	горячий кокиль	холодный кокиль	горячий кокиль
АК9М2				
А	2,7473	2,7489	224,6	225
Б	2,7495	2,7504	240	225
АК12М2				
А	2,7298	2,7304	193,75	206,9
Б	2,7309	2,7303	207,5	213,3

Уменьшение разницы плотностей в образцах обоих типов при увеличении температуры кокиля говорит о приближении к условиям более полного питания.

Образцы Б показали более высокую среднюю прочность на обоих сплавах при заливке в холодный кокиль и на сплаве АК12М2 при заливке в горячий кокиль. Прочность образцов обоих типов из сплава АК9М2 при заливке в горячий кокиль одинаковая.

Таким образом, суммируя предварительно сделанные выводы, можно отметить, что наивысшие значения прочности и плотности среди всех исследуемых образцов показали образцы Б. Поскольку при сравнении образцов этого типа со стандартной заготовкой в большинстве случаев прочность и плотность образцов Б выше, а разброс значений прочности ниже, можно рекомендовать использование образцов Б. Дополнительное преимущество образцов Б – меньшие по сравнению со стандартной заготовкой затраты жидкого металла, что может быть важно в тех случаях, когда объемы исследуемого расплава малы.

Список литературы

1. Вейник А. И. Расчет отливки. - М. : Машиностроение, 1964. - 403 с.
2. Бондарев В. А. Исследование процесса формирования усадочной пористости // Теплофизика в литейном производстве. - Минск: Изд-во АН БССР, 1963. - С. 284-295.
3. Гудченко А. П., Васильева И. Н. Влияние состава сплава и скорости охлаждения на образование газовой пористости в отливках из алюминиевых сплавов // Исследование процессов литья алюминиевых, магниевых и титановых сплавов. - М.: Машиностроение, 1969. - С. 133-137.
4. Добаткин В. И., Габидуллин Р. М., Колачев Б. А., Макаров Г. С. Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах. — М.: Металлургия, 1976. - 263 с.

5. Бочвар А. А. Металловедение. - М.: Металлургиздат, 1956. - 401 с.
6. Новиков И. И. Горячеломкость цветных металлов и сплавов. - М.: Наука, 1966. - 299 с.
7. Котлярский Ф. М., Борисов Г. П., Белик В. И., Дука В. М. Водородное рафинирование алюминиевых сплавов от твердых неметаллических включений // Процессы литья. - 2008. - № 4. - С. 48-55.

Поступила 21.05.2008

УДК 669.18:621.746

Л. А. Соколовская, В. А. Мамишев

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЗАДАЧ С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ В МЕТАЛЛУРГИИ И ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Изложены методические вопросы математического моделирования фазовых переходов (плавление и затвердевание) в условиях внутреннего и внешнего теплообмена при формировании слитков и отливок с введенными в расплав твердыми добавками.

Розглянуто методичні питання математичного моделювання фазових переходів (плавлення і тверднення) в умовах внутрішнього та зовнішнього теплообміну при формуванні зливків та виливків з введенними в розплав твердими добавками.

It is stated the methodical questions of mathematical modeling the phase passages (melting and solidification) in conditions inside and external heat-exchange at form of the ingots and castings with hard additives are ushered into the melt.

Ключевые слова: литая заготовка, затвердевание, микрохолодильники, вычислительный эксперимент.

Развитие металлургии и литейного производства Украины связано с получением металла высокого качества. Для совершенствования существующих и разработки новых технологий литья целесообразно [1, 2] управлять температурным состоянием стальных слитков, отливок и непрерывнолитых заготовок, затвердевающих в изложницах, формах и кристаллизаторах МНЛЗ с введением в расплав твердых добавок (дроби, инокуляторов, лигатур, модификаторов и других частиц-микрохолодильников). Поэтому актуально изучать взаимосвязанные процессы нагрева и плавления твердых добавок в окружающем их расплаве и процессы затвердевания и охлаждения литых заготовок разного назначения (рис. 1). Для расчета нестационарных температурных полей в системах расплав-добавка, слиток-изложница, сляб-кристаллизатор и отливка-форма целесообразно использовать возможности вычислительного эксперимента с применением современных компьютеров.

Для эффективного решения задач внутреннего и внешнего теплообмена следует учитывать наиболее важные факторы процессов плавления и затвердевания и нелинейный характер изменения исходных теплофизических параметров литья. Тепловая постановка задач с фазовыми переходами (плавление и затвердевание) и их математическая формулировка должны быть достаточно полными. Однако решение сложных задач плавления добавок и затвердевания заготовок в полной постановке пока невыполнимо. Поэтому постановку задач внутреннего и внешнего теплообмена в процессах литья целесообразно упрощать с учетом имеющихся представлений о том, какие факторы и параметры наиболее важны для конкретной задачи, а какие – незначительны.

Требуется, чтобы математические модели плавления и затвердевания в системах расплав-микрохолодильник, слиток-изложница, сляб-кристаллизатор и отливка-форма адекватно отражали особенности изучаемых процессов. Эти вопросы учтены (рис. 2) в теплофизической схеме внутреннего и внешнего теплообмена в условиях литья.