

тем не менее в отношении показателя развития d_i – находятся на низком уровне (численные значения показателей больше нуля).

В соответствии с вышесказанным стало очевидным, что оцениваемый гидрораспределитель находится на высоком уровне по отношению к качеству.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов Е.С. Таксономический анализ. М.: МГУ, 1969. 211 с.
2. Бапта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. Гидравлика: гидравлические машины и гидравлические приводы. М.: Машиностроение, 1970. 505 с.
3. Андрианов Ю.М., Субетто А.И. Квалиметрия в приборостроении и машиностроении. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1990. 216 с.
4. Федюкин В.К. Основы квалиметрии. Управление качеством продукции: учеб. пособие для студентов. М.: Филинь, 2004. 295 с.
5. Солод Г.И. Основы квалиметрии: учеб. пособие. М.: Изд-во МГИ, 1991. 84 с.

УДК 628.517.2:669

Исследования кристаллизации алюминиевого чугуна

Э.Б. ТЕН, НИТУ (МИСиС, г. Москва),

Е.Б. УТЕПОВ, Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева (г. Алматы),

А.С. ДРОКИН, НИТУ (МИСиС, г. Москва),

С.Т. КАЛДЫБАЕВА, Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева (г. Алматы)

Ключевые слова: кристаллизация, алюминиевый чугун, жаростойкий сплав, фазовые превращения, свойства чугуна, теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность.

В качестве жаростойких материалов широко применяются в основном высоколегированные сплавы, в которых легирующими элементами являются дорогостоящие хром и никель. Общее содержание их в жаростойких сплавах достигает 30 % и более. Тем не менее, срок жизни рабочих деталей из жаростойких сплавов ограничен. Причем чем выше рабочие температуры, тем он короче. Это обуславливает повышенные затраты на поддержание агрегатов в рабочем состоянии. Примерами таких деталей являются колосники агломерационных машин, детали котельных установок, обжиговых, нагревательных и стекловаренных печей, формы для литья, выхлопные коллекторы форсированных автомобильных двигателей и др.

Выполненные ранее исследования [1-4] позволили оптимизировать состав высоколегированного алюминиевого чугуна ЧЮ22Ш, изучить его структуру, литейные и эксплуатационные свойства, разработать технологические режимы плавки, литья и термической обработки отливок, провести их промышленное испытание и определить перспективные направления применения. Однако в настоящее время потенциал алюминиевого чугуна ЧЮ22Ш используется недостаточно. Одним из сдерживающих факторов является недостаточная изученность закономерностей его кристаллизации, а также отсутствие сведений о теплофизических свойствах, что не позволяет корректно использовать современные методы моделирования литейных процессов для совершенствования технологии изготовления отливок. Исследованию этих вопросов посвящена настоящая работа.

Кристаллизацию чугуна ЧЮ22Ш изучали по фазовым превращениям, протекающим при его затверде-

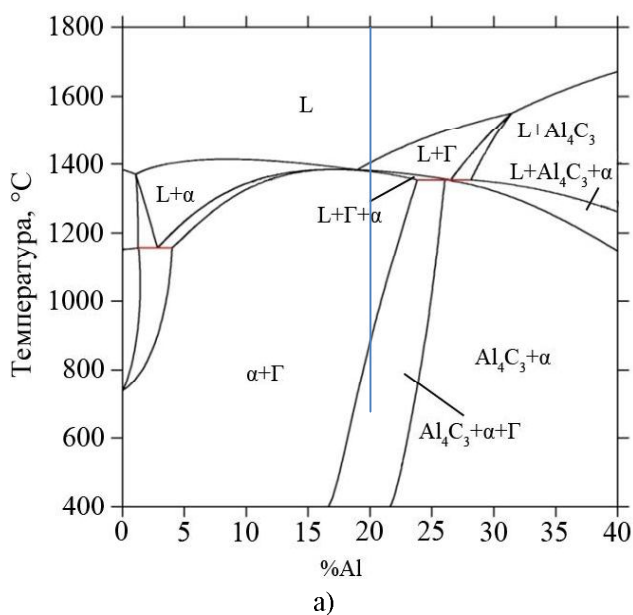
вании и остывании. В связи с отсутствием диаграммы состояния Fe – C – Al и Fe – C – Si – Al с помощью компьютерной программы Thermo-Calc построили политермические разрезы для тройных и четверных систем Fe – C – Al и Fe – C – Si – Al. При этом варьировали содержанием углерода в пределах 1,5-2,5 %, кремния – 1-2 % и алюминия – 15-35 %.

Полученные результаты показывают, что кристаллизация чугуна, по составу эквивалентного ЧЮ22 и содержащего ~2 % C, ~1 % Si и ~22,5 % Al, начинается (рисунок 1) с выделения из жидкого чугуна первичных кристаллов графита. Затем происходит кристаллизация двойной эвтектики, состоящей из твердого раствора на основе легированного алюминием феррита (α – фазы) и графита. Затем из остатка жидкой фазы выделяется более легированный алюминием феррит. При последующем охлаждении чугуна вследствие снижения растворимости алюминия в α -фазе из него выделяется карбид Al_4C_3 .

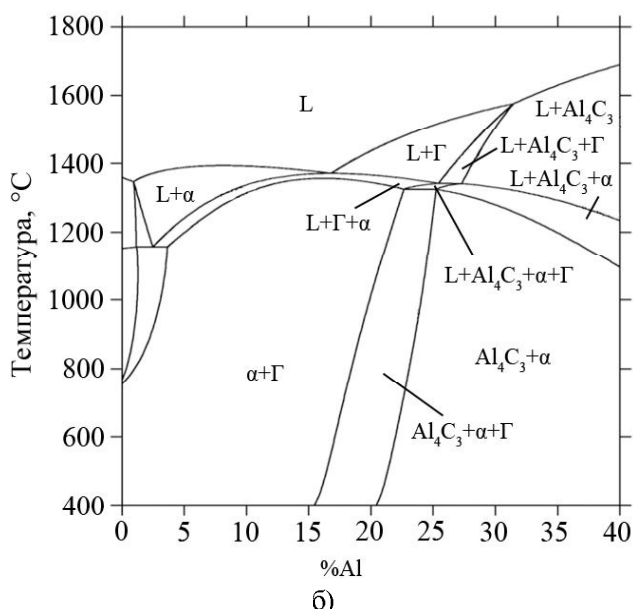
Эти данные согласуются с результатами термографических исследований. На рисунке 2 приведена экспериментально полученная кривая охлаждения чугуна ЧЮ22Ш.

Кривая охлаждения, прежде всего, свидетельствует о том, что чугун, в основном, кристаллизуется при постоянной температуре, но претерпевает незначительную предэвтектическую и послеэвтектическую кристаллизацию. На температурно-временной кривой можно выделить участки остывания жидкого чугуна 1, предэвтектической кристаллизации первичного графита 2, эвтектической кристаллизации 3, послеэвтектической кристаллизации феррита (α -фазы) 4, остывания твердого чугуна 5 и выделения из пересыщенного

твёрдого раствора (α -фазы) алюминийсодержащей карбидной фазы ϵ .



а)



б)

а) Fe – (2 % C) – Al; б) Fe – (2 % C) – (1 % Si) – Al
Рисунок 1 – Политермические разрезы фазовых диаграмм состояния систем

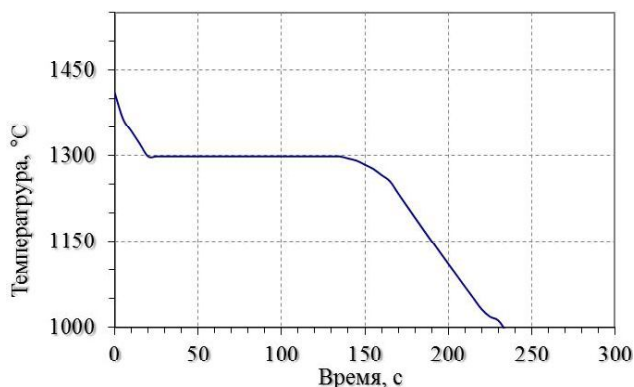


Рисунок 2 – Кривые охлаждения чугунов ЧЮ22Ш

Наличие эвтектической кристаллизации было известно и раньше, причем, по данным [1], у чугуна ЧЮ22 она протекает при температурах 1230-1280 °С. Новизна полученных результатов в том, что эвтектическая кристаллизация может протекать и при более (на 15-60 °С) высокой температуре. Кроме того, установлено наличие предэвтектической и послевтектической кристаллизации, а также фазового превращения в твердом состоянии с выделением из твёрдого раствора алюминия в железе (α -фазы) железоалюминиевого карбида типа Fe_3AlC_x (ϵ -фазы).

Полученные результаты также внесли ясность в то, какие фазы, в какой последовательности, в каких сочетаниях и при каких температурах выделяются при переходе высоколегированного алюминиевого чугуна из жидкого состояния в твёрдое.

Большая протяженность горизонтального участка на кривой охлаждения (рисунок 2) свидетельствует о развитости эвтектической кристаллизации и формировании в отливках соответствующей структуры. Согласно кривым охлаждения и политермическим разрезам, в чугуне ЧЮ22 должны присутствовать три структурные составляющие: включения первичного графита (I), графитно-ферритная эвтектика (II) и вторичный карбид Al_4C_3 (III), выделившийся после эвтектической кристаллизации. Однако реальная структура отличается от изложенной.

Составы фаз дополнительно изучали на электронном микроскопе с микроанализатором. Полученные результаты (рисунок 3) подтверждают, что матрица а – феррит, легированный алюминием до 23 % (α -фаза), а темные включения округлой формы б – графит. Данные по строчечным включениям в свидетельствуют о том, что они содержат железо, алюминий и углерод, и потому могут рассматриваться как железоалюминиевые карбиды. Однако атомные доли железа в них, согласно многократным определениям, лишь в 1,3-1,6 раз превышают атомную долю алюминия. Поэтому они, скорее всего, являются железоалюминиевыми карбидами переменного состава типа $Fe_{1,5}AlC_x$.

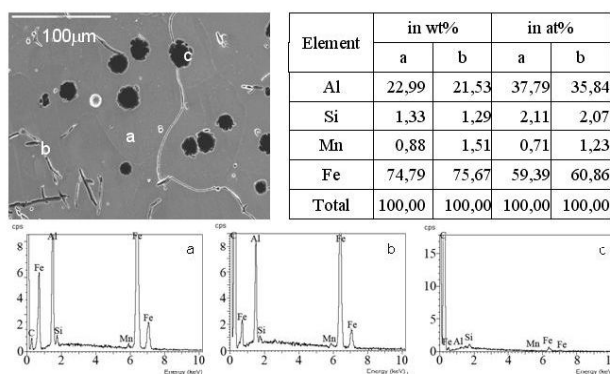


Рисунок 3 – Результаты микрорентгеноспектрального анализа фаз в чугуне ЧЮ22Ш

Фактическая структура чугуна отличается от предполагаемой по нескольким признакам. Прежде всего, не удастся однозначно выявить выделения первичного графита. Кроме того, в чугуне, вместо ожидаемого карбида Al_4C_3 , образуется железоалюминие-

вый карбид $Fe_{1,5}AlC_x$. Возможно, в условиях высокого переохлаждения термодинамически выгоднее образовать вместо двойного карбида Al_4C_3 тройной карбид, причём даже не Fe_3AlC_x (ϵ -фазу), а $Fe_{1,5}AlC_x$.

Теплофизические свойства чугуна необходимы для компьютерного моделирования процессов заполнения расплавом полости литейных форм, затвердевания и остывания в них отливок с целью выбора наилучшего варианта технологии получения их без литейных дефектов. Однако такие сведения по чугуну ЧЮ22Ш отсутствуют.

В работе определяли теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность чугуна ЧЮ22Ш в интервале температур 500-1000 °С. Эксперименты проводили в лаборатории Корейского института материаловедения (KIMS) на приборе NETZSCH LFA 457 Micro-Flash®. Испытания проводили на образцах, выточенных из литых проб. Размеры образцов составили: диаметр – 12,700 мм, толщина – 3,1580 мм. Плотность чугуна равнялась 5909 кг/м³.

Полученные результаты представлены в таблице как средние значения пяти измерений. При этом удельная теплоёмкость измерена с одинаковой точностью во всем температурном интервале - $\pm 0,001$ Дж/(кг·К). А теплопроводность и температуропроводность измерены с переменной точностью: при пониженных температурах - $\pm 0,028$ Вт/(м·К) и $\pm 0,009 \cdot 10^{-6}$ м²/с; при повышенных температурах - $\pm 0,157$ Вт/(м·К) и $\pm 0,047 \cdot 10^{-6}$ м²/с соответственно.

Согласно данным таблицы, удельная теплоемкость чугуна ЧЮ22Ш с повышением температуры от 500 до 1000 °С возрастает с 536 до 585 Дж/(кг·К). У нелегированного чугуна с шаровидным графитом в интервале 20-1000 °С удельная теплоемкость составляет 586-628 Дж/(кг·К) [2]. То есть эти чугуны сопоставимы по удельной теплоемкости.

Теплопроводность чугуна с повышением температуры более существенна, чем теплоемкость – с 12,64 при 500 °С до 15,53 Вт/(м·К) при 1000 °С. Полученные значения заметно меньше приводимых в литературе значений: 16,28 Вт/(м·К) при 200 °С и 26,75

Вт/(м·К) при 500 °С. При одинаковой температуре значения отличаются более чем в 2 раза. Представляется, что полученные в работе данные более надежные, поскольку получены на более современной аппаратуре, каждое значение измерено пятикратно и выполнено в широком интервале температур. Исходя из этого можно считать, что алюминиевый чугун ЧЮ22Ш имеет теплопроводность примерно в 3 раза ниже, чем нелегированный чугун с ферритной металлической матрицей, который при 400 °С имеет коэффициент теплопроводности 38 Вт/(м·К) [2]. Поскольку теплопроводность у нелегированного чугуна уменьшается с повышением температуры, а у чугуна ЧЮ22Ш, наоборот, возрастает, то в области рабочих температур 1000 – 1100 °С это различие должно сильно сократиться.

Коэффициент температуропроводности у чугуна ЧЮ22Ш монотонно возрастает с $4 \cdot 10^{-6}$ м²/с до $4,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с при увеличении температуры с 500 до 1000 °С. Отсутствие литературных данных не позволяет сравнить полученные значения. У нелегированного чугуна с шаровидным графитом (ЧШГ) этот показатель равен $(5,5-6,5) \cdot 10^{-6}$ м²/с при 600 °С и $(5,0-5,6) \cdot 10^{-6}$ м²/с при 800 °С [2]. Сопоставление данных показывает, что чугун ЧЮ22Ш при температурах 600 и 800 °С имеет температуропроводность на 33 и 20 % ниже соответственно, но при более высоких температурах температуропроводность чугунов ЧЮ22Ш и ЧШГ будет мало различаться.

Выполненные исследования существенно дополняют наши знания о последовательности, характере и температурах фазовых превращений, протекающих при кристаллизации чугуна. Показано, что реальная структура чугуна отличается от прогнозируемой, и это, видимо, связано с неравновесными условиями кристаллизации в литейной форме. Впервые определены теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность в интервале температур 500-1000 °С.

Использование результатов исследования позволит более адекватно решать технологические вопросы получения качественного литья из чугуна ЧЮ22Ш.

Теплофизические свойства чугуна ЧЮ22Ш

№	Наименование свойств	Температура, °С					
		500	600	700	800	900	1000
1	Удельная теплоемкость C_p , Дж/(кг·К)	536	549	559	565	573	585
2	Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	12,64	13,11	13,64	14,19	14,93	15,53
3	Температуропроводность a_t , 10^6 м²/с	3,99	4,04	4,13	4,25	4,41	4,49

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Н.Н., Ключнев Н.И. Технология получения и свойства жаростойких чугунов. М.: Машиностроение, 1964. 174 с.
2. Ковалевич Е. В. Алюминиевые чугуны. Чугун: справочник / Под ред. А. Д. Шермана и А. А. Жукова. М.: Metallurgy, 1991. С. 447-479.
3. Бобро Ю. Г. Легированные чугуны. М.: Metallurgy, 1976. 288 с.
4. Косников Г.А., Морозова Л.М. Алюминиевые конструкционные чугуны для облегченных отливок ответственного назначения // Литейное производство. 1997. № 5. С. 19-29.
5. Справочник по чугунному литью / Под ред. Н.Г. Гиршовича. Л.: Машиностроение, 1978. 758 с.
6. Литейное производство / Под ред. И.Б. Куманина. М.: Машиностроение, 1971. 320 с.
7. Испытание материалов: справочник: пер. с нем. / Х. Блюменауэр, Х. Ворх, И. Гарц и др.; Под ред. Х. Блюменауэра; М.: Metallurgy, 1979. 448 с.
8. Общетехнический справочник / Е.А. Скороходов, В.П. Законников, А.Б. Пакнис и др.; Под общ. ред. Е.А. Скорохова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1989. 512 с.