

**А. И. Семенченко, В. М. Дука, И. В. Хвостенко,  
Г. П. Борисов, А. Г. Вернидуб**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## **НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ЛИТЬЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

*Выполнен анализ влияния температуры заливки на кинетику затвердевания, формирование структуры и свойств отливок из алюминиевых сплавов. Показана возможность увеличения скорости затвердевания отливок, изменения морфологии и повышения уровня дисперсности и однородности литой структуры при одновременной экономии до 30 % энергоресурсов в условиях литья низкоперегретых и частично закристаллизованных сплавов.*

**Ключевые слова:** алюминий, затвердевание, температура заливки, структура, морфология, ресурсосбережение.

*Виконано аналіз впливу температури заливання на кінетику тверднення, формування структури та властивостей виливків із алюмінієвих сплавів. Показана можливість збільшення швидкості тверднення виливків, зміни морфології та підвищення рівня дисперсності та однорідності литої структури під час збереження енергоресурсів до 30 % в умовах лиття низькоперегрітих та частково закристалізованих сплавів.*

**Ключові слова:** алюміній, тверднення, температура заливання, структура, морфологія, ресурсозбереження.

*There was carried out analysis of influence of pouring temperature on the kinetics of hardening, structure formation and properties of castings made of aluminium alloys. It is shown a possibility of increasing of the solidification rate, changing the morphology and increasing of the dispersion level and homogeneity of the cast structure in condition of simultaneous saving of 30 % of the electric power resources while casting of the low superheated and partially crystallized alloys.*

**Keywords:** aluminium, hardening, pouring temperature, structure, morphology, resource conservation.

Относительно низкая температура плавления по сравнению со сплавами на основе железа, титана и меди значительно повышает технологичность алюминиевых сплавов на этапах их выплавки и литья, увеличивает стойкость плавильного и литейного оборудования и снижает его стоимость. Резко уменьшает уровень теплового загрязнения окружающей среды.

В то же время алюминиевые сплавы являются очень энергоемким материалом. Удельные теплоемкость и теплота плавления алюминия примерно в 1,5 раза выше, по сравнению с железом [1]. И, несмотря на то, что температура плавления алюминия более чем вдвое ниже, энергетические затраты на выплавку 1 т расплава для производства отливок, например, из наиболее популярных литейных алюминиево-кремниевых сплавов примерно равняются аналогичным затратам при изготовлении отливок из сплавов на основе железа. А расходы энергии на производство первичного алюминия и его сплавов из рудных материалов еще в 20-30 раз выше, чем затраты на их повторный литейный переплав. Поэтому задачи снижения расхода жидкого металла и экономии энергетических ресурсов при производстве алюминиевого литья стоят очень остро.

Как известно, основную ответственность за формирование структуры, физико-механических и служебных свойств металла литых изделий несет процесс затвердевания расплава, характер которого определяется интенсивностью отвода теплоты от расплава в литейную форму и окружающую среду.

Среди различных характеристик теплового состояния системы отливка-форма, определяющих начальные условия системы, температура заливки занимает особое

положение. Она является не только характеристикой тепловых условий литья, но и параметром физического состояния расплава в момент заливки, влияющим в значительной мере на формирование кристаллической структуры металла на макро- и микроуровнях, а также на степень его физической однородности.

Влияние температуры заливки расплава на кинетику затвердевания отливок в работе исследовали методами натурального и численного экспериментов. На рис. 1

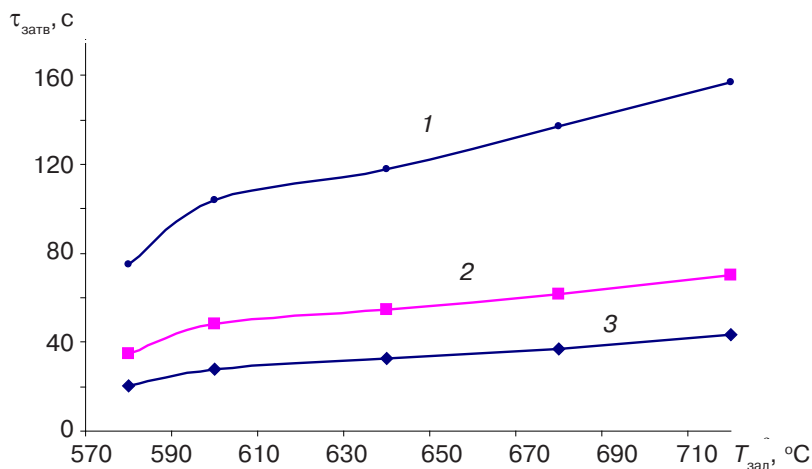


Рис. 1. Влияние температуры заливки и интенсивности теплопередачи на границе отливка-форма ( $\alpha_2$ ) на продолжительность затвердевания плоской отливки толщиной 30 мм из сплава АК9: 1, 2, 3 –  $\alpha_2=1000, 3000, 10000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)

представлены результаты расчета влияния температуры заливки расплава на продолжительность затвердевания плоской отливки толщиной 30 мм из сплава марки АК9 в металлической форме с толщиной стенки 30 мм при различных величинах интенсивности теплоотдачи на границе отливка-форма.

Снижение температуры заливки расплава обеспечивает уменьшение теплосодержания порции жидкого металла, залитой в полость формы. Следовательно, в этом случае снижается количество тепла, которое необходимо отвести с поверхности отливки в процессе снятия перегрева и затвердевания металла. Как известно, на начальном этапе охлаждения отливки наблюдается наиболее плотный контакт расплава с поверхностью формы, что обеспечивает высокую интенсивность отвода тепла от отливки к форме. И в этот период высокой интенсивности теплообмена отливки с формой до момента образования газового зазора на их границе отводится именно теплота перегрева расплава, а процесс затвердевания металла отливки протекает в условиях более низкой интенсивности теплоотдачи.

Уменьшение величины теплосодержания расплава при снижении температуры заливки в интервале температур перегрева определяется произведением теплоемкости жидкого металла на величину уменьшения температуры расплава. В случае же заливки в полость формы частично затвердевшего металла общее теплосодержание расплава уменьшается не только за счет удельной теплоемкости, но и удельной теплоты кристаллизации, вклад которой на порядок выше.

Согласно рис. 1, если при снижении температуры заливки сплава АК9 от 720 до 680, 640 и 600 °C общая продолжительность затвердевания отливки толщиной 30 мм, например, при коэффициенте теплоотдачи на границе отливка-форма ( $\alpha_2$ ), равном 1000 Вт/(м<sup>2</sup>·К), уменьшается примерно в 1,14; 1,33 и 1,5 раза соответственно, то при дальнейшем снижении температуры заливки от 600 до 580 °C продолжительность затвердевания металла сокращается еще примерно в 1,4 раза. Таким образом,

снижение температуры заливки до 580 °С от обычно принятого значения примерно в 720 позволяет сократить продолжительность затвердевания металла отливки более чем вдвое.

Экспериментальные исследования влияния температуры заливки на кинетику затвердевания цилиндрических отливок  $\varnothing$  20 мм в условиях объемного затвердевания металла проводились в интервале температур заливки от перегрева в 120 °С до температуры частично затвердевшего состояния сплава АК7ч с содержанием твердой фазы до 60 %. Для этого металл заливали в графитовую форму с установленной в ней термопарой методом погружения формы в отобранный из плавильной печи расплав в разливочном ковше. Температура металла в ковше в момент погружения формы на 30-40 °С превышала текущее значение температуры заливки. После достижения расплавом в графитовой форме требуемой температуры заливки форму с залитым сплавом удаляли из ковша и помещали в стационарное устройство для охлаждения опытной отливки до 300 °С. Измерение и регистрацию температуры металла в разливочном ковше и графитовой форме производили хромель-алюмелевыми термопарами, подключенными через измерительный преобразователь ADVANTEST R 6452 к компьютеру.

Выполненными экспериментальными исследованиями установили, что в условиях объемного затвердевания отливки диаметром 20 мм из сплава АК7ч в результате снижения температуры перегрева на 120 °С над температурой ликвидуса до температуры начала кристаллизации металла, продолжительность затвердевания опытных отливок сокращается примерно в 1,3 раза. При дальнейшем снижении температуры заливки в интервале температур кристаллизации сплава на 5; 6; 18 и 40 °С (что соответствует содержанию твердой фазы в объеме расплава 16; 30; 40 и 60 %) продолжительность затвердевания опытных отливок по сравнению с исходной температурой заливки сокращается примерно в 1,5; 1,8; 2,1 и 3,0 раза соответственно (рис. 2).

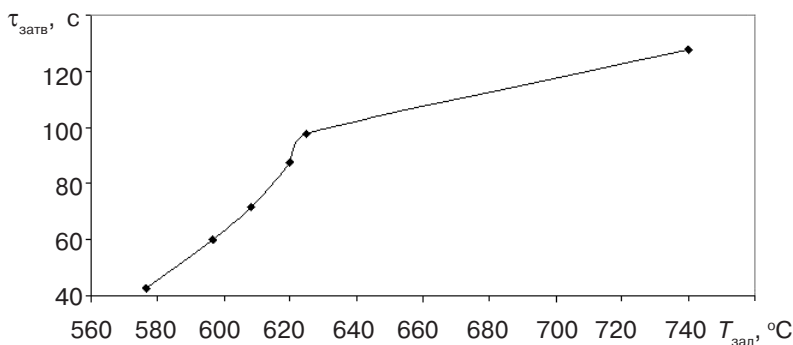


Рис. 2. Влияние температуры заливки на продолжительность объемного затвердевания цилиндрической отливки  $\varnothing$ 20 мм из сплава АК7ч

Наряду с интенсификацией процесса затвердевания и повышением уровня однородности и дисперсности кристаллической структуры металла отливки такое снижение температуры заливки приводит к улучшению условий работы литейной оснастки благодаря снижению температурных перепадов в стенке формы.

Кинетика процесса кристаллизации, как известно, определяется соотношением кристаллизационных параметров – скорости образования зародышей твердой фазы и линейной скорости их роста, которые, в свою очередь, являются функциями величины переохлаждения расплава. При этом в реальных условиях изготовления отливок определяющим кинетику процесса кристаллизации фактором является теплоотвод от фронта затвердевания, а кристаллизационные параметры приспособляются к теплоотводу путем соответствующего изменения переохлаждения [2].

Известно правило литейщиков – «плавь горячо, а лей холодно». На этой основе

разработан технологический прием термовременной обработки металла (ТВО) – перегрева расплава до высоких температур и выдержки его определенное время при этой температуре. А. Г. Спасским [3] на примере алюминиевых сплавов показана необходимость перегрева металла до достаточно высоких температур, обеспечивающих отсутствие в расплаве предкристаллизационных группировок и последующего быстрого охлаждения металла до температуры заливки с целью предотвращения возможности концентрационных и структурных перестроек в расплаве до начала кристаллизации. При этом микроструктура литого металла в ряде случаев и после ТВО была достаточно грубой, а прочностные характеристики сплава и особенно пластические значительно возросли.

Требование «плавить горячо» лишает литейщиков перспективы экономии энергоресурсов при производстве отливок из алюминиевых сплавов даже при заливке в полость формы низкоперегретого или частично затвердевшего сплава.

В этом плане интересными являются данные о влиянии температуры заливки на макроструктуру слитков из алюминиевых сплавов, представленные в работах [4, 5]. На примере сплава марки АМц продемонстрирована классическая закономерность, согласно которой повышение температуры перегрева расплава в момент заливки увеличивает протяженность зоны столбчатых кристаллов и укрупняет размеры равноосных кристаллов. В этом случае при проведении исследования металл перегревали до 947 °С, а затем охлаждали в печи до температуры заливки. Далее приведены результаты аналогичного исследования, но выполненного по измененной методике, в данном случае металл после расплавления не перегревали выше текущей температуры заливки. В результате оказалось, что для сплава того же химического состава, тех же температур заливки и условий охлаждения во время затвердевания отливок классическая закономерность работает только в интервале температур перегрева до 40 °С, а при более высоких температурах заливки протяженность зоны столбчатых кристаллов и размеры равноосных зерен сохраняют свои постоянные значения. При этом очень важен тот факт, что в интервале температур перегрева до 40 °С абсолютные значения этих основных параметров кристаллического строения металла в обоих случаях примерно одинаковые. Из этого следует, что первая половина золотого правила литейщика «плавь горячо» для литья низкоперегретых расплавов и, по всей вероятности, частично затвердевших сплавов не является догмой.

Конечно, при выплавке расплава из низкокачественных шихтовых материалов с «плохой» наследственностью необходим высокий перегрев жидкого металла в процессе его ТВО. Однако и в этом случае проблему энергосбережения можно решить используя избыточную теплоту перегрева для расплавления порции шихты с «хорошей» наследственностью. Другим вариантом может быть исправление структурного кода низкокачественной шихты за счет теплосиловой обработки расплава в предкристаллизационной температурной области или в частично затвердевшем состоянии.

В исследовании [6] влияния температуры заливки на структуру отливок из алюминиевых сплавов наряду с выводом об измельчении размеров равноосных кристаллов в центральной области сечения опытных отливок, получены также данные об огрублении микроструктуры литого металла, что противоречит результатам ряда других исследований [4, 5].

В работе [6] опытные отливки диаметром 30 и высотой 85 мм для исследования макроструктуры изготавливали методом погружения формы в расплав, находящийся в плавильном агрегате. Анализ же микроструктуры литого металла производили в поперечном сечении литников опытных отливок для получения разрывных образцов. Данные литники имели цилиндрическую форму с диаметром 20 и высотой около 120 мм. Затвердевали они в массивной металлической форме, заливку жидкого металла в рабочую полость производили из литейного ковша

заливкой сверху. Таким образом, опытные образцы для исследования влияния температуры заливки на макро- и микроструктуру литого металла изготавливали в различных тепловых условиях затвердевания, а главное [5] – условия заливки расплава в полость формы были принципиально различными.

Поэтому в настоящей работе влияние температуры заливки исследовали, изучая макро- и микроструктуру литого металла на одних и тех же опытных образцах диаметром 20 и высотой 50 мм. Расплав заливали в металлические формы толщиной 2 мм, подогретые до температуры  $250 \pm 2$  °С. Температуру расплава в момент заливки контролировали хромель-алюмелевой термопарой, стационарно установленной в заливочном ковше. Температуру ликвидуса исследуемого сплава определяли методом экспрессного термического анализа [7].

Выплавку базового сплава производили в лабораторной печи сопротивления в окрашенном чугунном тигле емкостью до 5 кг алюминиевого расплава. Температуру и процесс управления плавки металла в печи контролировали с помощью теристорного регулятора переменного тока Р0Т-63-380-50 УХЛА (ТУ 16-88) и регулирующего милливольтметра Щ 4514 (ГОСТ 9736-91).

После расплавления и перегрева жидкого металла до температуры  $750 \pm 5$  °С производили рафинирование расплава препаратом «Дегазер-190» производства фирмы «Foseco» (в количестве 0,2 % от веса шихты). Затем после 20-минутной выдержки с поверхности расплава в плавильном тигле удаляли шлак и проводили экспрессный термический анализ сплава для контроля его химического и фазового составов, а также температурных параметров процесса кристаллизации металла. Далее после достижения расплавом значения температуры заливки отбирали порции жидкого металла, который заливали в рабочую полость стального вытряхного кокиля с установленной в нем термопарой.

Контроль и запись изменения температуры расплава в ковше и рабочей полости формы осуществляли с помощью хромель-алюмелевых термопар, подключенных к компьютеру через аналогово-цифровой преобразователь модели NI 9162 производства фирмы «National Instruments» (США).

После порезки образцов на темплеты и подготовки шлифов определяли параметры макро- и микроструктуры металла в поперечном сечении образца.

Представленные на рис. 3 структуры опытных отливок, изготовленных с заливкой в интервале температур от 630 до 950 °С, подтверждают результаты исследований [4, 5]. При высокотемпературной заливке в интервале температур 850-950 °С зона столбчатых кристаллов занимает более 80 % площади шлифа, а при температуре заливки 750 °С – только около 40 % и, начиная с температуры заливки в 660 °С, всю плоскость макрошлифа занимает зона равноосных кристаллов. При этом ширина столбчатых кристаллов непрерывно уменьшается по мере снижения температуры заливки по линейному закону, а протяженность уменьшается в 1,5; 1,25; 3,25 и 6,5 раза при снижении температуры заливки от 950 до 850, 750, 650 и 630 °С соответственно (рис. 4). Компактность равноосных кристаллов при этом возрастает в 1,25; 1,8; 2,15 и 2,25 раза соответственно (рис. 5).

При анализе структуры опытных отливок было выявлено, что микроструктура первичной фазы под воздействием условий заливки также существенно изменяется. При литье расплава с высоким перегревом в объеме металла формируется дендритная кристаллическая структура разветвленной морфологии (рис. 6). По мере снижения температуры заливки происходит измельчение кристаллов первичной фазы, а при уменьшении перегрева расплава до 660 °С начинается вырождение дендритной формы первичных кристаллов  $\alpha$ -твердого раствора алюминия, и уже при температуре заливки 630 °С кристаллы первичной фазы розеточной морфологии преобладают в поле зрения шлифа.

Таким образом, в результате снижения температуры заливки в интервале температур 950-630 °С наблюдается непрерывное изменение морфологии кристаллической

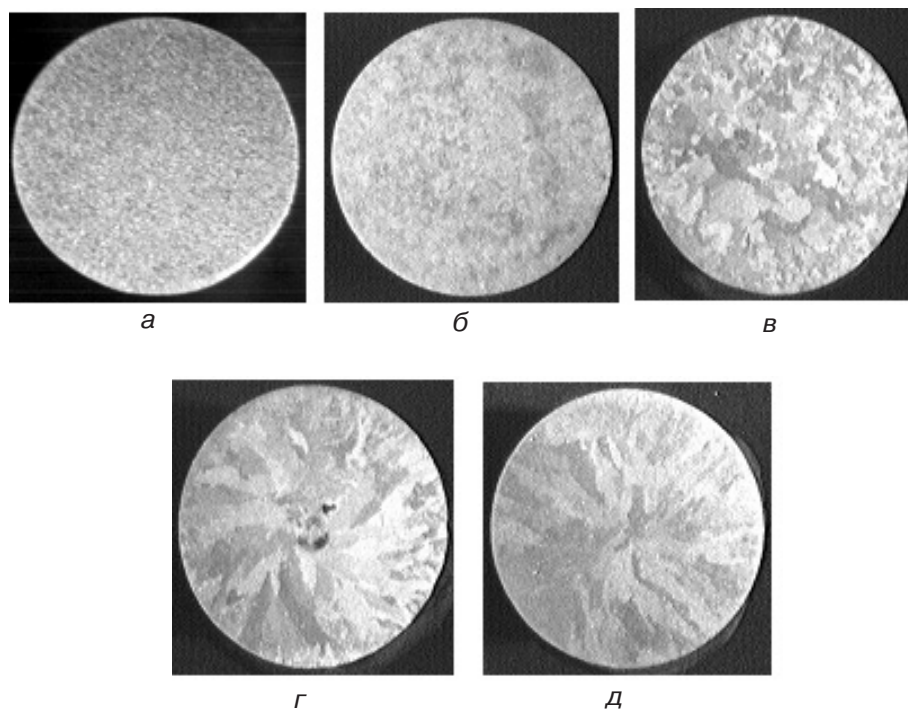


Рис. 3. Макроструктура сплава АК7ч при различной температуре заливки, °С: а – 630; б – 660; в – 750; г – 850; д – 950,  $\times 2,5$

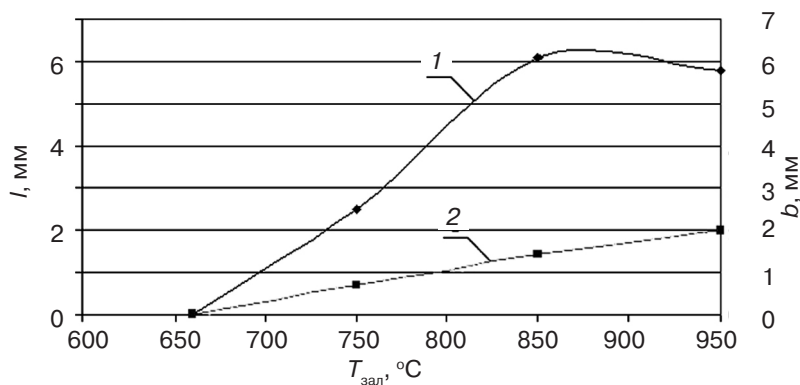


Рис. 4. Влияние температуры заливки на протяженность и ширину столбчатых кристаллов в плоскости макрошлифа опытных отливок из сплава АК7ч: 1, 2 – протяженность и ширина столбчатых кристаллов соответственно

структуры  $\alpha$ -твердого раствора алюминия и повышения уровня ее дисперсности и однородности.

На рис. 7 представлены результаты исследования влияния температуры заливки расплава на механические свойства сплава марки АК7ч в литом состоянии. Образцы для механических испытаний с диаметром рабочей части 10 мм отливали при температурах заливки 750, 685, 655 и 630 °С в массивном металлическом кокиле, прогревом до 250 °С. Приготовление расплава и его заливку в рабочую полость кокиля осуществляли согласно вышеприведенной методике исследования влияния температуры заливки на структуру литого металла.

Как известно, свойства литых изделий определяются морфологией, дисперсностью и однородностью кристаллической структуры металла, а также степенью

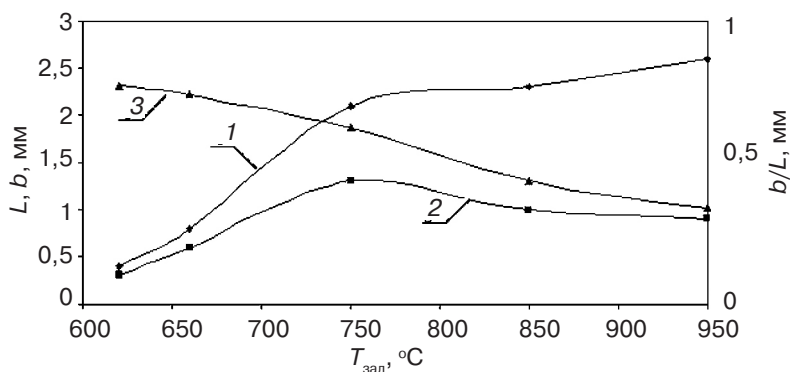


Рис. 5. Влияние температуры заливки на дисперсность равноосных кристаллов в плоскости макрошлифа опытных отливок из сплава АК7ч: 1, 2, 3 – длина, ширина и компактность равноосных кристаллов соответственно

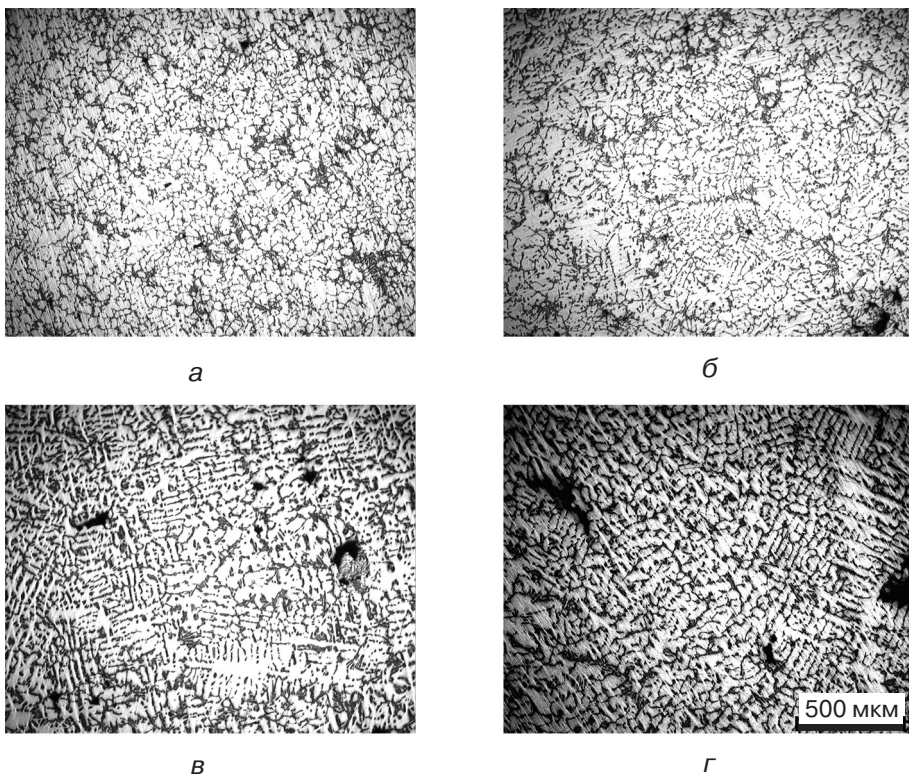


Рис. 6. Микроструктура сплава АК7ч для различной температуры заливки, °С: а – 630; б – 660; в – 750; г – 905, х 40

развития физической неоднородности в объеме отливки. Повышение скорости затвердевания металла при снижении температуры заливки, как было показано выше, обеспечивает повышение дисперсности и однородности кристаллической структуры литого металла. На устранение газовых дефектов в отливках из алюминиевых сплавов благоприятно влияет повышение интенсивности затвердевания металла. Вместе с тем влияние интенсификации процесса затвердевания на формирование усадочных дефектов литой структуры неоднозначно. Повышение скорости затвердевания на этапе фильтрационного питания вызывает потребность соответствующего

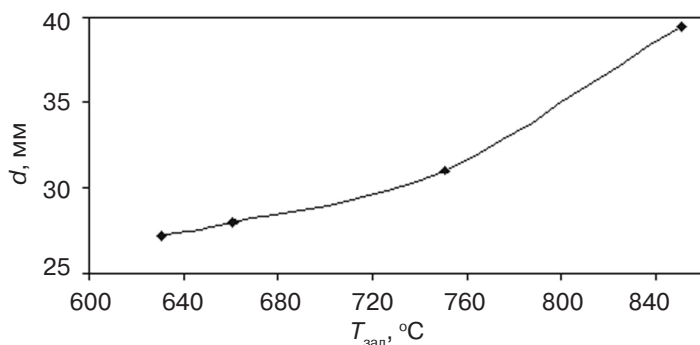


Рис. 7. Влияние температуры заливки расплава в полость литейной формы на размер дендритного параметра кристаллов  $\alpha$ -твердого раствора в структуре металла опытных отливок диаметром 20 мм из сплава АК7ч

увеличения интенсивности расхода фильтрата на компенсацию скачка объема при кристаллизации металла.

Снижение предела прочности и относительного удлинения металла литых образцов на начальном этапе снижения температуры заливки расплава (рис. 7) можно объяснить формированием междендритной усадочной пористости. При низкотемпературной заливке (630 °C) дендритная морфология первичной фазы, как показано выше, переходит в розеточную, что должно изменить условия фильтрационного питания затвердевающей отливки. В результате, при изменении значений предела прочности сплава АК7ч на разрыв и относительного удлинения наблюдаются восходящие ветви кривых.

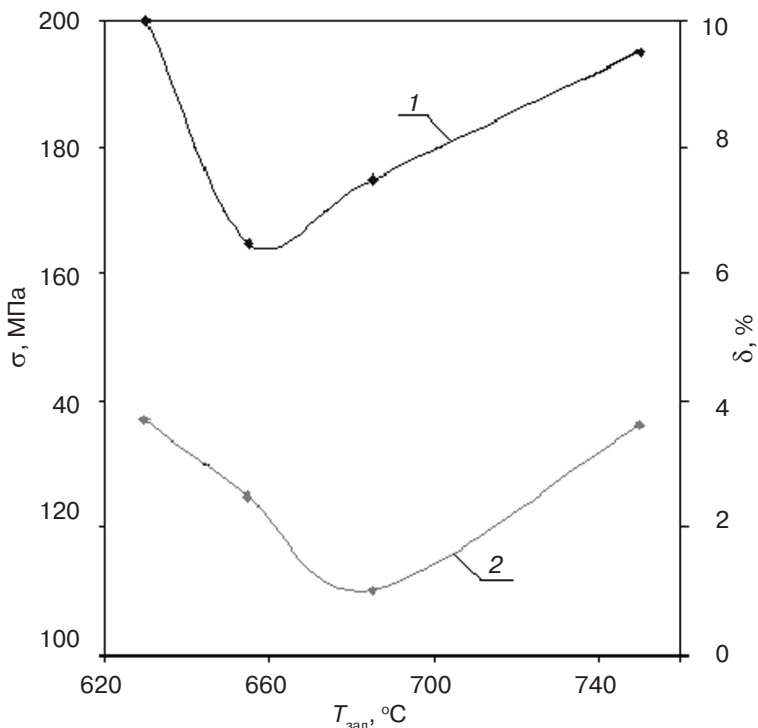


Рис. 7. Влияние температуры заливки расплава в полость литейной формы на механические свойства сплава АК7ч: 1 – предел прочности на разрыв; 2 – относительное удлинение



Необходимо отметить, что отливки разрывных образцов в данном исследовании изготавливали методом литья в кокиль. Поэтому при литье с кристаллизацией металла под давлением, что обеспечит достаточные условия питания затвердевающей отливки, следует ожидать непрерывное повышение уровня механических свойств литого металла по мере снижения температуры заливки расплава.

Таким образом, низкотемпературное литье алюминиевых сплавов является эффективным фактором ресурсосбережения и альтернативой экологически вредным операциям их химического модифицирования. Снижение температуры заливки вплоть до литья из частично закристаллизованных сплавов позволяет даже в условиях использования наиболее эффективных ресурсосберегающих литейных технологий с почти полным устранением непродуктивных затрат жидкого металла (РАСПЛИТ-процесс, ЛНД, жидкая штамповка) получить дополнительную экономию до 30-40 % энергозатрат при производстве отливок из алюминиевых сплавов. Целесообразно также повысить требования к производителям чушковых сплавов по организации контроля структурной наследственности изготавливаемых шихтовых материалов. Чушковые алюминиевые сплавы должны поставляться с модифицированной структурой как первичных фаз, так и эвтектических составляющих сплавов. Ценой является резкое сокращение расхода энергоресурсов, алюминиевых сплавов, повышение качества и конкурентоспособности алюминиевого литья, улучшение экологической обстановки и условий труда литейщиков, повышение срока службы литейного оборудования и оснастки.



### Список литературы

1. Пикунов М. В. Плавка металлов. Кристаллизация сплавов, затвердевание отливок.- М.: МИСИС, 2005. – 416 с.
2. Нехендзи Ю. А., Гиршович Н. Г. Об основных закономерностях реальной кристаллизации // Литейные свойства сплавов. – Киев.: Наук. думка. – С. 33-34.
3. Спасский А. Г., Фомин Б. А., Алейников С. А. Термовременная обработка жидких металлов и влияние ее на механические свойства отливок // Изв. вузов. Цвет. металлургия. – 1959. – № 6. – С. 162-165.
4. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки. Формирование макроскопического строения отливки. М.: Машиностроение. – 1974. – Ч. II. – 335 с.
5. Баландин Г. Ф. Формирование кристаллического строения отливки. М.: Машиностроение, 1973. – 288 с.
6. Отчет НИР № 81044576. «Исследовать влияние регулируемого давления на гидродинамические, теплофизические и фильтрационные процессы при формировании отливок из алюминиевых сплавов. – Киев, 1985. – 319 с.
7. Температурные параметры охлаждения и кристаллизации алюминиевых сплавов // Г. П. Борисов, А. А. Смольский, А. И. Семенченко, В. М. Дука / Процессы литья. – 2008. – № 3. – С. 38-42.

Поступила 21.05.2013