

**К. А. Батышев**, д-р техн. наук, проф., e-mail: konstbat@rambler.ru

**А. И. Батышев\***, д-р техн. наук, проф.

**М. Г. Георгиевский\*\***, канд. техн. наук, e-mail: geomiros@gmail.com

**Г. Л. Зеркалов\*\*\***, науч. сотр., e-mail: geomiros@gmail.com

**Ю. А. Свинооров\*\*\*\***, канд. техн. наук, доцент, e-mail: desna.us@yandex.ru

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва

\*Национальный исследовательский технический университет «МИСиС», Москва

\*\*ОАО «Гидравлика», Москва

\*\*\*Стенфордский университет, Пало-Альто, США

\*\*\*\*Южно-Российский государственный политехнический университет им. М. И. Платова, Новочеркасск

## ЛИТЬЕ С КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ ПОД ДАВЛЕНИЕМ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*Использование специальных видов литья в машиностроении позволяет получать заготовки высокого качества с повышенными механическими свойствами. Одним из таких способов является литье с кристаллизацией под давлением, позволяющее получать плотные отливки из всех групп литейных алюминиевых сплавов.*

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, прессование, литье с кристаллизацией под давлением, прочность, микроструктура, перепад температур, фронт затвердевания, физико-механические свойства.

*Використання спеціальних видів лиття в машинобудуванні дозволяє отримувати заготовки високої якості з підвищеними механічними властивостями. Одним з таких способів є лиття з кристалізацією під тиском, що дозволяє отримувати щільні виливки з усіх груп ливарних алюмінієвих сплавів.*

**Ключові слова:** алюмінієві сплави, пресування, лиття з кристалізацією під тиском, міцність, микроструктура, перепад температур, фронт твердіння, фізико-механічні властивості.

*The use of special types of casting in mechanical engineering allows to obtain high-quality blanks with enhanced mechanical properties. One of these methods is injection molding, which allows to obtain dense castings from all groups of casting aluminum alloys.*

**Keywords:** aluminium alloys, extrusion, casting with crystallization under pressure, strength, microstructure, temperature differential, front of solidification, physico-mechanical properties.

**Л**итье с кристаллизацией под давлением (ЛКД) позволяет изготавливать плотные отливки, которые можно и даже необходимо подвергать термической обработке для повышения механических свойств. Основные схемы ЛКД, используемые в России, приведены на рис. 1 [1].

Исследованы тепловые и силовые процессы, протекающие в отливках и пресс-формах при трех первых схем прессования (рис. 1, а–в). Больше внимание уделено экспериментальному исследованию тепловых процессов при поршневом прессовании, при этом опыты проводили на цилиндрических отливках (слитках) диаметром 50 и высотой 100–105 мм, которые изготавливали из алюминиевых сплавов в пресс-форме, состоящей из матрицы с толщиной стенки 85 мм, основания толщиной 30 мм и пуансона (все указанные детали были изготовлены из стали 5ХНМ). Получены многочисленные кривые охлаждения отливки и нагрева матрицы, изменение

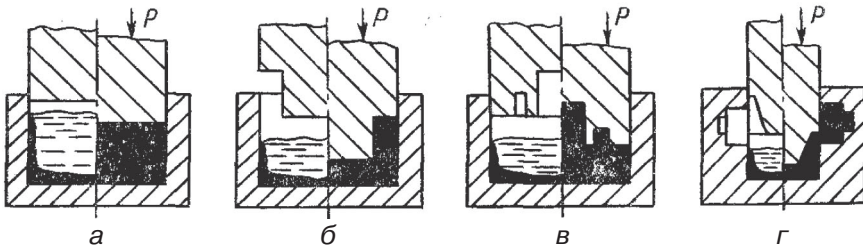


Рис. 1. Схемы прессования при ЛКД: а – поршневое; б – пуансонное; в – пуансонно-поршневое; г – через литники-питатели

давления прессования и перемещения прессующего пуансона, а, следовательно, и верхнего торца формирующейся заготовки.

Обобщенные зависимости изменения некоторых исследованных параметров от номинального давления прессования приведены на рис. 2.

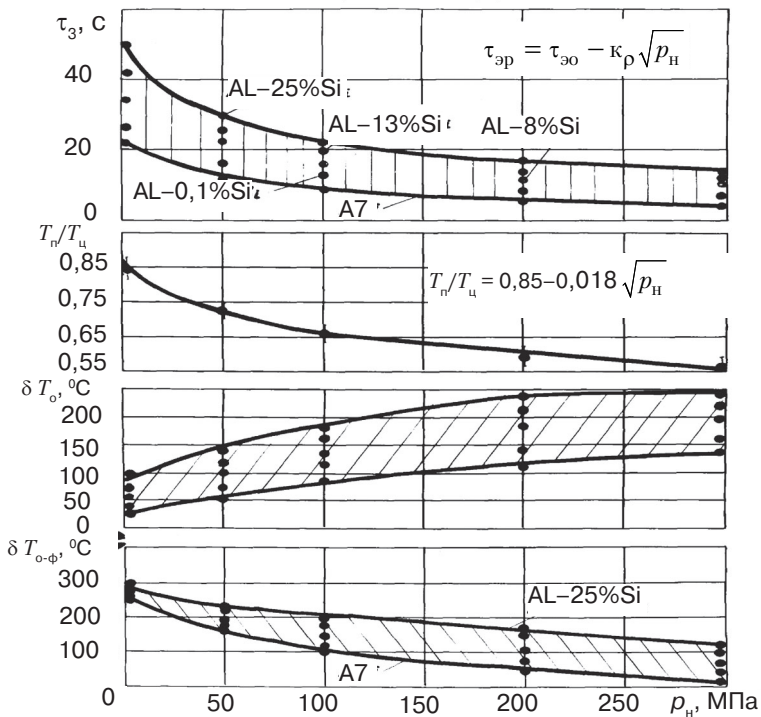


Рис. 2. Зависимости от номинального давления времени затвердевания отливки  $\tau_3$ , относительной температуры ее поверхности  $T_n/T_u$ , перепада температур по ее сечению  $\delta T_o$  и на границе «отливка-форма»  $\delta T_{o-ф}$  (двойные сплавы системы Al–Si)

На основе их анализа можно сделать выводы о том, что с увеличением номинального давления  $p_n$  уменьшаются время затвердевания отливки, относительная температура ее поверхности и величина перепада температур на границе раздела «отливка-форма», а увеличивается перепад температур по сечению отливки. Все зависимости представлены в виде областей, так как внутри них находятся данные для сплавов системы Al–Si (до 25 % Si). Следует отметить, что характер зависимостей справедлив для двойных сплавов систем Al–Cu и Al–Mg и промышленных сплавов.

Таким образом, механическое давление, воздействующее при ЛКД, способствует устранению зазора между формирующейся отливкой и пресс-формой, в результате чего в 4–5 раз интенсифицируется процесс теплообмена на границе раздела

«отливка–форма». Это приводит к уменьшению в 3–4 раза времени затвердевания отливок из алюминиевых сплавов всех систем и перепада температур на границе раздела между отливкой и формой, к увеличению перепада температур по поперечному сечению и высоте формирующейся заготовки.

С использованием теории контактного теплообмена и метода графического интегрирования рассчитаны значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_1$  между формирующейся отливкой и пресс-формой. К моменту окончания заливки расплава в матрицу  $\alpha_1 = 30000\text{--}32000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . Если формирование отливки в дальнейшем происходит в условиях атмосферного давления, то коэффициент  $\alpha_1$  непрерывно снижается, чему способствует образование зазора между отливкой и формой (матрицей пресс-формы), в результате чего к моменту окончания затвердевания отливки величина  $\alpha_1$  достигает  $7500\text{--}7700 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . В момент приложения давления снижение  $\alpha_1$  прекращается и затем (пропорционально росту давления) повышается до определенной величины, характерной для каждого номинального давления  $p_n$ , после чего практически остается без изменения на достигнутом уровне до окончания затвердевания отливки. Изменение величины коэффициента  $\alpha_1$  для отливок ( $p_n = 200 \text{ МПа}$ ) из алюминия А7, сплавов АК7ч, АК12 и АК18Н во время затвердевания приведено на рис. 3, где по оси абсцисс отложено относительное время затвердевания  $\tau/\tau_3$ . Видно, что отливки из сплавов АК18Н (кривая 1) и АК12 (кривая 2) более длительное время затвердевают в условиях повышенной интенсивности охлаждения, чем из алюминия А7 (кривая 4) и сплава АК7ч (кривая 3), так как они имеют разные теплофизические характеристики. Величина критерия Био для отливок из указанных сплавов находится в пределах  $Bi = 1,7\text{--}9$  при заливке с перегревом над температурой кристаллизации (ликвидус)  $80\text{--}100 \text{ }^\circ\text{C}$  и повышении давления от атмосферного до  $300 \text{ МПа}$ .

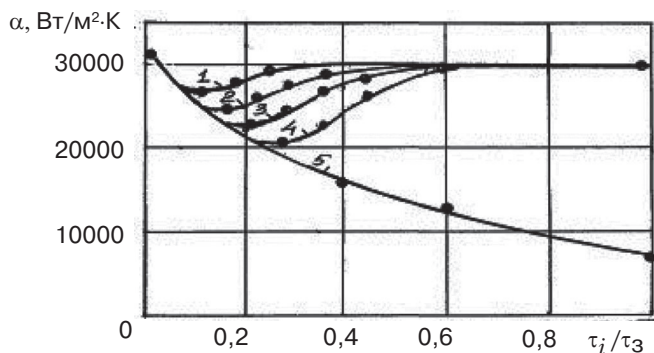


Рис. 3. Изменение коэффициента теплоотдачи во время затвердевания отливок: 1, 2, 3, 4 – сплавы АК18Н, АК12, АК7ч и алюминий А7, соответственно ( $p_n = 200 \text{ МПа}$ ); 5 – все сплавы (атмосферное давление)

Продвижение фронта затвердевания в отливках во времени выражается параболическими зависимостями, показатель степени которых изменяется от 0,5 до 2 и зависит от конфигурации поверхности контакта на границе раздел «отливка-форма» и давления прессования. Схема прессования при ЛКД не оказывает заметного влияния на характер указанных параболических зависимостей. Коэффициент затвердевания отливки при различных схемах прессования зависит от состава сплава и его теплофизических свойств, размеров (масштабного фактора) отливки и величины воздействующего давления. Его величина уменьшается при увеличении количества легирующих элементов в сплаве (степени легирования), увеличении толщины стенки (или приведенного размера отливки) и снижении давления прессования. Давление способствует формированию в отливке плоского фронта затвердевания и переходу характера затвердевания от объемного к объемно-последовательному при использовании сплавов с широким интервалом кристаллизации. При этом сокращается время существования и ширина двухфазной зоны в отливке.

Уплотнение формирующейся под механическим давлением отливки зависит от характера затвердевания, прочностных характеристик образовавшейся корки и усадки сплава в соответствующие периоды – в жидком состоянии, при затвердевании и в твердом состоянии. При прочих равных условиях, чем больше давление, тем на большую величину перемещается верхний торец отливки и тем лучше уплотняется сама затвердевающая отливка.

На эффективность уплотнения затвердевающей отливки при ЛКД влияют потери давления на внешнее трение, которые тем больше, чем меньше давление прессования, чем больше габаритные размеры отливки и предел текучести сплава при высоких температурах. При варьировании отношения высоты к диаметру отливки изменяется роль касательных напряжений на вертикальных и горизонтальных поверхностях в возникновении сил трения и относительных потерь давления прессования на их преодолении. Чем больше указанное отношение, тем больше роль касательных напряжений на вертикальных поверхностях отливки в снижении эффективности действия давления на затвердевающую отливку (рис. 4).

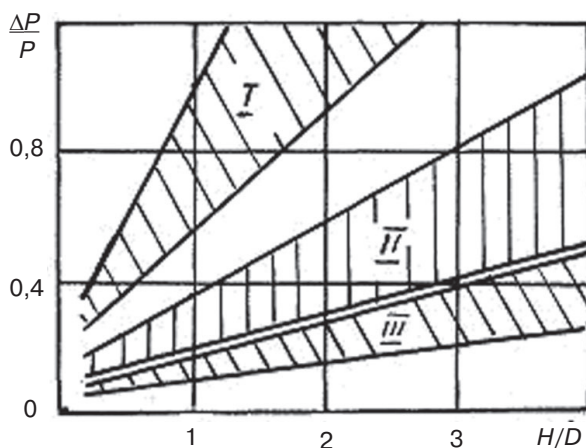


Рис. 4. Зависимость относительных потерь давления на внешнее трение от отношения высоты к диаметру отливки: I, II, III – номинальное давление 50, 100 и 200 МПа (нижняя граница каждой области при  $\sigma_s = 5$  МПа, верхняя – при 10 МПа)

Наибольшее перемещение слоев затвердевающей отливки под давлением имеет место на расстоянии до 1/3 высоты от верхнего торца – места приложения давления. Его величина зависит от свойств сплава при высоких температурах и скорости затвердевания отливки. Неравномерность уплотнения формирующейся отливки по высоте при воздействии механического давления приводит к ее неоднородному строению, что отражается на структуре и физико-механических свойствах.

Давление свыше 100 МПа, воздействующее на кристаллизующийся сплав, приводит к измельчению структуры отливок. В доэвтектических силуминах измельчаются первичные кристаллы  $\alpha$ -твердого раствора в 2,0–2,5 раза, а в заэвтектических – кристаллы первичные кремния в 3–4 раза, а также составляющие эвтектики. Оно способствует увеличению количества  $\alpha$ -твердого раствора в структуре сплавов до- и эвтектического составов и, следовательно, приводит к сдвигу эвтектической точки в сторону кремния. При кристаллизации под давлением форма первичных кристаллов кремния в заэвтектических силуминах не изменяется.

В отливках из заэвтектического силумина (25 % Si) с повышением давления при кристаллизации кристаллы первичного кремния (КПК) также измельчаются (дробятся); если при литье в кокиль их размеры находились в пределах 70–75 мкм, то при  $p_n = 320$  МПа – 20–23 мкм; конфигурация (форма) КПК при этом не изменяется (рис. 5).

Изучение микроструктуры силуминов с 13–25 % Si показало, что КПК имеют разное строение и располагаются на фоне  $\alpha$ -твердого раствора, но это не отражается кардинально на изменении механических свойств; главное здесь – не строение КПК, а их размеры, изменяющиеся под воздействием давления на затвердевающую отливку. Давление приводит к измельчению КПК, но не оказывает существенного влияния на их конфигурацию (рис. 6).

Измельчение структуры и устранение усадочной пористости способствует повышению механических свойств отливок, изготовленных ЛКД из исследованных сплавов. При этом между прочностными и пластическими показателями свойств

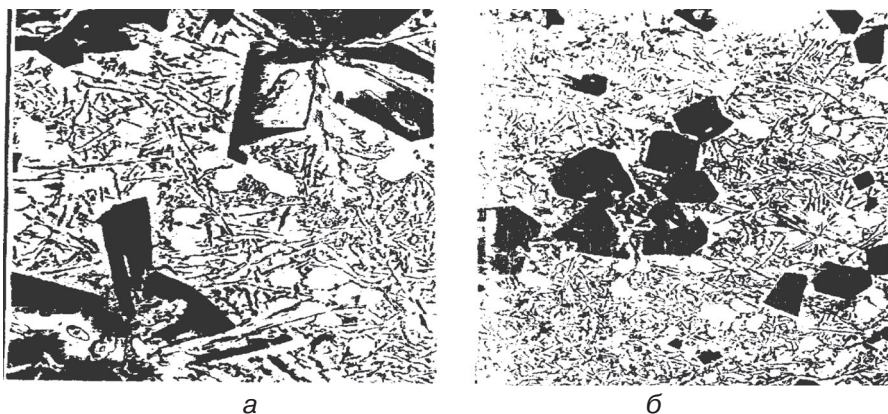


Рис. 5. Микроструктура отливок из сплава Al–25%Si, затвердевших под атмосферным давлением (а) и 320 МПа (б)

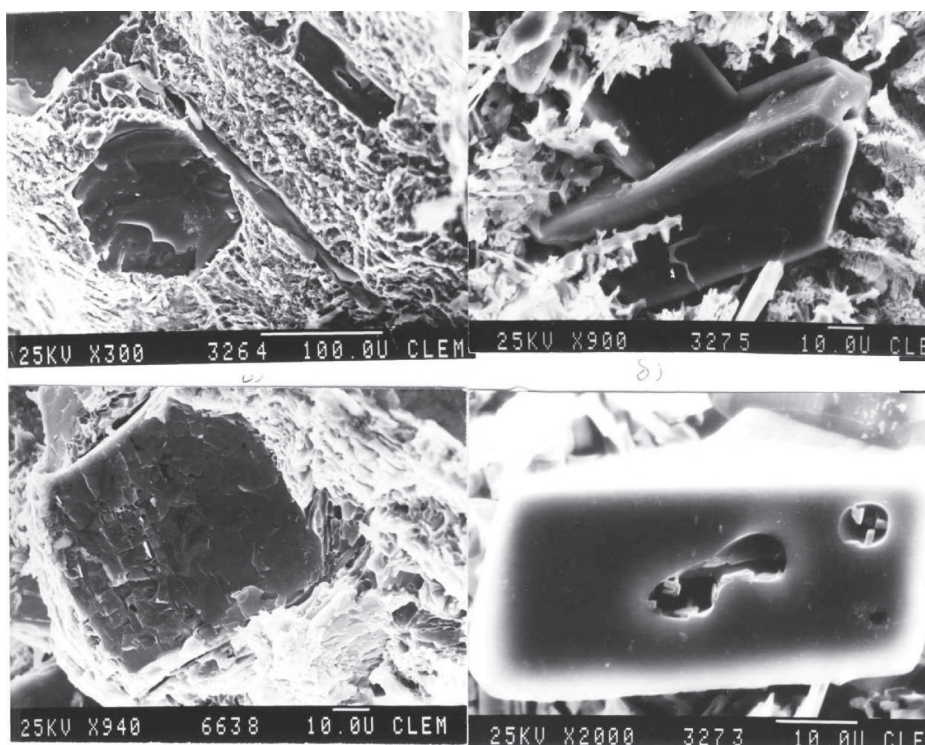


Рис. 6. Форма кристаллов первичного кремния в отливках из сплава Al–17%Si, затвердевших под давлением 160–320 МПа

наблюдается прямо пропорциональная линейная зависимость: с увеличением прочности повышается и пластичность сплавов. Получены отливки из экономнолегированных высокопрочных алюминиевых сплавов системы Al–Zn–Mg–Ni (никалинов) с  $\sigma_{0,2} > 500$  МПа и  $\sigma_b > 550$  МПа.

Установлена возможность получения в отливках комбинированной структуры за счет создания зон с направленным затвердеванием и последующим воздействием механического давления на кристаллизующийся сплав, что предопределяет различные значения механических свойств в отдельных зонах литой заготовки. Установлены технологические пути регулирования такой структуры при ЛКД за счет изменения ширины зоны контакта, толщины теплоизоляционного покрытия матрицы прессформы и давления прессования.

При использовании схемы пуансонно-поршневого прессования необходимо учитывать условия удаления газов из рабочей полости пуансона, смятия вертикальной корки, образовавшейся до приложения давления, и величину давления, определяющие получение качественных отливок.

Последовательные циклы «переплав – кристаллизация под давлением» практически не отражаются на структуре и механических свойствах алюминиевых сплавов в отливках, изготовленных способом ЛКД. Поэтому в шихте при плавке можно использовать в широких пределах отходы собственного производства, а также отслужившие детали, отливки для которых были изготовлены способом ЛКД или литьем под давлением.

Внедрение процесса ЛКД в определенной степени зависит от используемого прессового оборудования – гидравлических прессов. Создание специализированных гидравлических прессов или литейных машин в настоящее время весьма проблематично. Поэтому для ЛКД рекомендуется использовать серийно выпускаемые гидравлические прессы, имеющие скорость холостого хода ползуна вниз в пределах 80–100 мм/с.

При мелкосерийном производстве в качестве технологической оснастки желательно использовать групповые пресс-формы (штампы), заменяя в них для конкретных отливок только те детали, которые соприкасаются с расплавом при заливке и с отливкой во время ее затвердевания и охлаждения.



### Список литературы

1. Батышев А. И. Кристаллизация металлов и сплавов под давлением. – 2-ое издание. – М.: Металлургия, 1990. – 144 с.
2. Батышев К. А. Литье с кристаллизацией под давлением. – М.: МГОУ, 2009. – 167 с.



### References

1. Batyshev, A. I. (1990) *Kristallizatsiya metallov i spлавov pod davleniem [Crystallization of metals and alloys under pressure]*. 2oe izdanie. Moscow: Metallurgiya, 144 p. [in Russian].
2. Batyshev, K. A. (2009) *Lite s kristallizatsiey pod davleniem [Casting with crystallization under pressure]*. Moscow: MGOU, 167 p. [in Russian].

Поступила 01.04.2018