

**В. П. Головаченко, В. М. Дука, А. Г. Вернидуб, Н. П. Исайчева**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЛИТНИКОВО-ПИТАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ТОЛСТОСТЕННЫХ ОТЛИВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК7ч. Сообщение 1**

*Приведены результаты исследований влияния низкочастотных высокоамплитудных колебаний алюминиевого расплава АК7ч в литейной U-образной форме на структуру и свойства отливок. Экспериментально подтверждена эффективность такого влияния, проявляющаяся в высокой плотности отливок  $\sim 2,68$  г/см<sup>3</sup>. Увеличение поверхности контакта в системе расплав-форма позволило генерировать дополнительное множество центров кристаллизации и их замешивание в объём расплава. Чередующиеся импульсы давления, возникающего в процессе качания расплава в форме, улучшают процесс питания затвердевающей отливки и тем самым повышают её качество.*

**Ключевые слова:** сплав АК7ч, динамическая литниково-питающая система, качание расплава в форме, плотность.

*Наведено результати досліджень впливу низькочастотних високоамплітудних коливань алюмінієвого сплаву АК7ч в ливарній U-образній формі на структуру і властивості виливків. Експериментально доведено ефективність такого впливу, що виявляється у високій щільності виливків  $\sim 2,68$  г/см<sup>3</sup>. Збільшення поверхні контакту в системі розплав-форма дозволило генерувати додаткові центри кристалізації і замішувати їх в об'єм розплаву. Імпульси тиску, що виникають в процесі коливання розплаву в формі покращують процес живлення виливка, що твердне, і тим самим підвищують його якість.*

**Ключові слова:** сплав АК7ч, динамічна литниково-живильна система, коливання розплаву в формі, щільність.

*The results of studies of the effect of low-frequency high-amplitude vibrations of aluminum alloy AK7ch in cast U-shape mold on the structure and properties of castings were shown. The experiments confirmed effectiveness of such effect, which is manifested in the high-density castings  $\sim 2.68$  g/cm<sup>3</sup>. Increasing the contact surface in the system melt-mold is possible to generate additional solidification centers, and mixing its in melt volume. Pressure pulses occurring during swinging melt in the form improve process feeding of a solidified cast and thereby improve its quality.*

**Keywords:** alloy AK7ch, dynamic gate feeding system, swinging melt in mold, density.

Традиционно для изготовления алюминиевых отливок в условиях гравитационного литья используют постоянные (кокиль) и разовые формы (песчаные, керамические, по выжигаемым моделям). В перечисленных способах литья литниково-питающая система выполнена стационарной, которая не всегда адекватно реагирует на процессы затвердевания отдельных тепловых узлов отливки, что проявляется в дефиците их питания, и приводит к образованию внутренних раковин, поверхностных утяжин, газовой пористости.

Наложение газового давления ( $P = 0,05-1$  МПа) на затвердевающую отливку (литьё под низким давлением, с противодавлением [1, 2]) положительно влияет на формирование качественных отливок за счёт пропитки пустот, вызванных усадочными процессами при затвердевании, жидкоподвижной легкоплавкой фазой, обычно эвтектикой. Реализация этих процессов требует специального оборудования.

Высокочастотная вибрация расплава в постоянных литейных формах оказывает рафинирующее действие на металл и измельчает микроструктуру отливок, однако вследствие действия возникающих значительных, до нескольких десятков  $g$  [3] величин ускорения стальных частиц в процессе кристаллизации, а также неодинаковых условий вибрации отдельных объёмов затвердевающего расплава в форме, возможно развитие структурной неоднородности: полосчатости структуры с разной степенью её измельчения, что приводит к анизотропии свойств отливок, а в отдельных случаях и к нарушению её сплошности. Классическая вибрация не приемлема для изготовления отливок с использованием разовых форм ввиду их механического разрушения.

В ФТИМС НАН Украины при формировании толстостенных отливок из алюминиевого сплава АК7ч использовали «мягкие» низкочастотные высокоамплитудные механические колебания (качания) расплава в литейной форме.

На рис. 1 приведена схема наложения высокоамплитудных механических колебаний ( $A = 40$  мм,  $\nu = 0,5-2$  Гц) на расплав, находящийся в  $U$ -образной форме с толщиной стенки 3 мм и внутренним диаметром 25 мм.

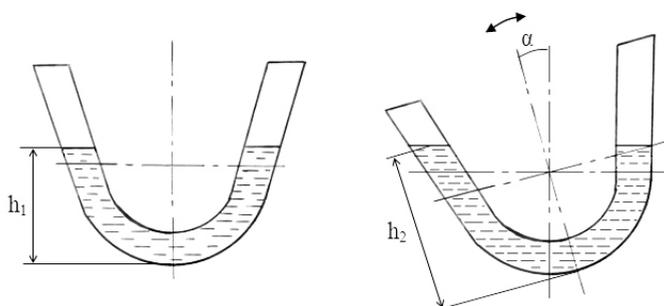


Рис. 1. Схема наложения высокоамплитудных механических колебаний на расплав, находящийся в  $U$ -образной отливке:  $\nu - 0,5-3$  Гц,  $A = h_2 - h_1$ ,  $\alpha$  – угол наклона формы

В результате наложения внешнего воздействия (качания) на расплав, увеличивается площадь его контакта с поверхностью формы. Так длина пути расплава в форме при использовании динамической литниково-питающей системы в процессе одного наклона составляет  $\Delta l = 2(h_1 - h_2)$ . При наклоне формы с расплавом на угол  $\alpha$ , наблюдается увеличение площади зеркала расплава, контактирующего с окружающей атмосферой, что также способствует интенсификации конвективного теплообмена и зарождению центров кристаллизации.

Одномоментная величина давления, действующего на расплав в форме, определяется её наклоном и составляет  $P = \gamma \cdot h_i$ . Как показало гидро-моделирование процесса, в условиях эксперимента, она не превышает исходного давления, то есть  $P = \gamma \cdot h > \gamma \cdot h_i$ .

Важнейшими факторами в процессе формирования отливок в условиях колебания расплава являются скорость и ускорение жидкой фазы, которые регулируются частотой и амплитудой колебаний, а также температурными параметрами литья.

С помощью экспрессного термического анализа [4] определяли температуры ликвидус и солидус сплава, которые составили соответственно 608 и 569 °С, а его температурный интервал затвердевания – 39 °С.

Порцию расплава массой 280 г, нагретого до температур 640-740 °С заливали в окрашенную  $U$ -образную форму, температуру которой поддерживали в диапазоне 300-400 °С, рис. 2.

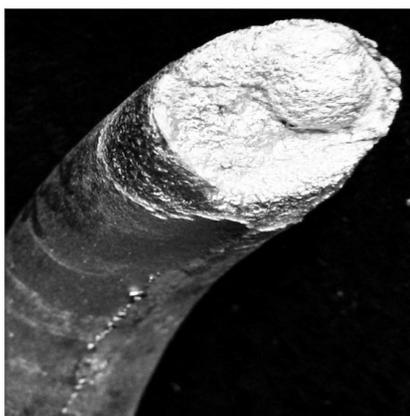
Кривая охлаждения  $U$ -образной алюминиевой отливки в форме приведена на рис. 3, которая имеет три характерные зоны охлаждения: первая – от температуры заливки до стояния ликвидуса со скоростью охлаждения 7 °С/с, вторая – в интервале кристаллизации  $\alpha$ -твёрдого раствора со средней скоростью 0,9 °С/с и третья – эвтектической кристаллизации при постоянной температуре.



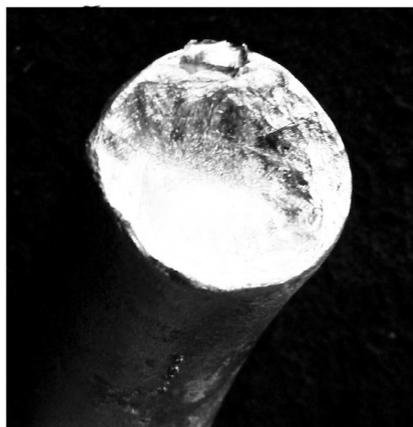
а



б



в



г

Рис. 2. Литейная стальная U-образная полуформа (а), отливка из сплава АК7с (б) и торцевые части отливок, полученных по новой технологии (в) и традиционной (г)

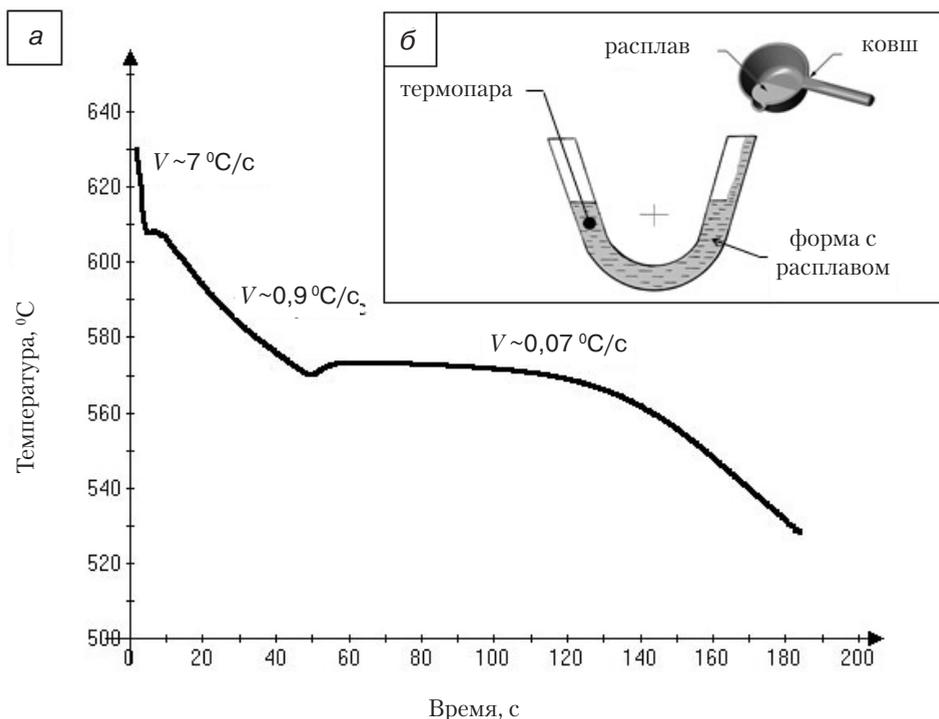


Рис. 3. Кривая охлаждения (а) U-образной отливки из сплава АК7ч в литейной форме (б),  $T_{зал} = 740$ ,  $T_{ф} = 340$  °С

Время нахождения отливки в двухфазном состоянии составило около 100 с, из них 40 с – кристаллизация  $\alpha$ -твёрдого раствора.

Ввиду скоротечности снятия перегрева расплава, физическое воздействие на затвердевающую отливку в основном оказывали в температурном интервале кристаллизации.

На жидкотекучесть расплава в полости формы влияют [5, 6]:

- переменные параметры металла: температура, интервал кристаллизации, вязкость, теплота кристаллизации;
- переменные параметры формы и поверхности раздела металл-форма (тепловое сопротивление поверхности раздела, теплопроводность, плотность и удельная теплоёмкость материала формы);
- параметры формы и литья: диаметр канала, величина металлического напора;
- газосодержание и неметаллические включения в расплаве.

Процесс получения отливок с использованием качания расплава в полости формы состоит из нескольких стадий.

Первая стадия включает заливку литейной формы расплавом и снятия его перегрева. В этом случае расплав находится в жидком состоянии и перемещается вся масса залитого металла в полости формы.

Вторая стадия процесса протекает в условиях кристаллизации  $\alpha$ -твёрдого раствора (расплав находится в жидкотвёрдом состоянии). При наложении колебаний заполненный объём металла также перемещается до тех пор, пока количество твёрдой фазы не достигнет своего предела, ~15-20 %.

Третья стадия характеризуется «залечиванием» межкристаллитных пустот эвтектической составляющей с постепенным её затвердеванием, рис. 3.

Течение жидкой фазы между дендритами в двухфазной области обусловлено

усадкой при кристаллизации, усадкой жидкой и твёрдой фаз при остывании, действием силы тяжести, проницаемостью каркаса.

В соответствии с законом Дарси средняя скорость междендритного течения зависит от градиента давления [9] :

$$V = \frac{K}{\mu g_L} (\Delta P + \rho_L),$$

где  $K$  – коэффициент проницаемости среды,  $P$  – давление,  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\mu$  – динамическая вязкость,  $g_L$  – объёмная доля жидкой фазы,  $\rho_L$  – плотность жидкой фазы.

Если через затвердевающий элемент объёма проходит расплав со скоростью  $V$ , то изменяется его плотность в соответствии с законом сохранения массы вещества [5]:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} = -\Delta P_L g_L V,$$

где  $\bar{\rho}$  – средняя плотность элемента объёма за время  $\partial t$ .

На основании статистических данных экспериментов установлено: качание алюминиевого расплава в форме при низком его перегреве в 20 °С неэффективно, так как процесс кристаллизации отливки скоротечен и не обеспечивает надежного питания затвердевающей отливки.

На рис. 4 приведены значения плотности  $U$ -образных отливок в зависимости от температуры и физического воздействия (качания) на расплав в литейной форме.

При малом перегреве расплава ( $T_{зал} = 640$  °С) и наложении внешнего воздействия получен низкий уровень плотности отливок (2,62 г/см<sup>3</sup>), исходного – 2,59 г/см<sup>3</sup>.

С повышением температуры заливки до 740 °С плотность  $U$ -образных отливок стабильно повысилась до значений 2,68 г/см<sup>3</sup>, рис. 4.

Эффективность процесса качания расплава в  $U$ -образной форме с амплитудой  $A = h_1 - h_2$  и частотой 0,5-2 Гц также подтверждается стремлением  $\alpha$ -твёрдого раствора к его глобуляризации и измельчению, рис. 5. При этом головная часть отливки носит явно выраженный суспензионный характер кристаллизации, рис. 2.

Как известно [7, 8], процесс глобуляризации структуры в исследуемом алюминиевом сплаве АК7ч возможен в случае присутствия в нём множества центров кристаллизации  $\alpha$ -твёрдого раствора.

Процесс качания расплава в форме предусматривает увеличение площади кон-

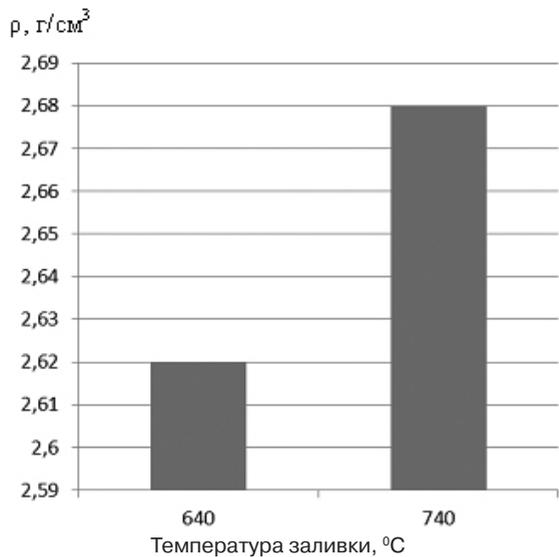


Рис. 4. Плотность металла  $U$ -образных отливок в зависимости от температуры и физического воздействия (качания) на расплав в литейной форме

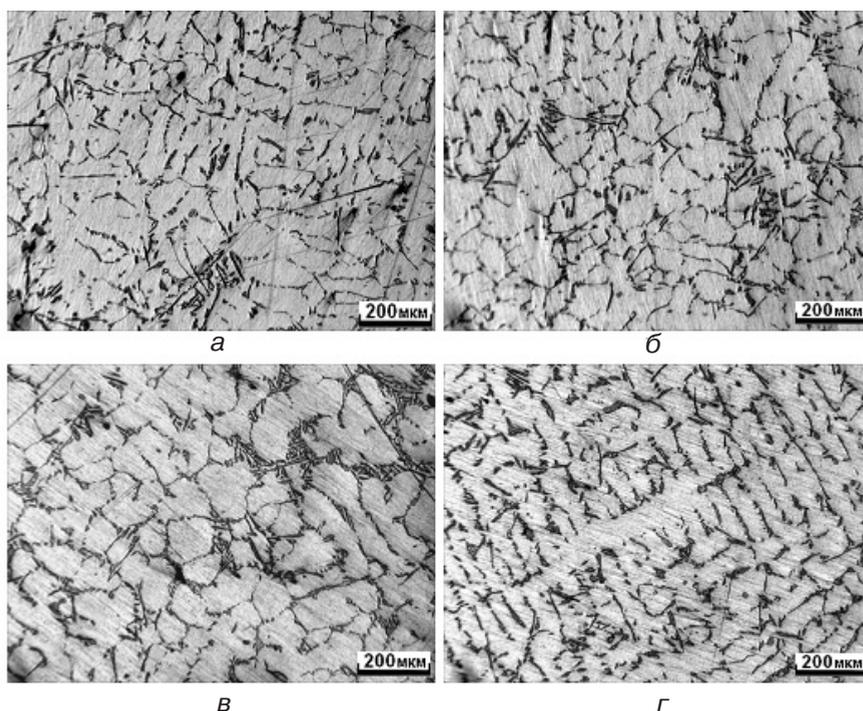


Рис. 5. Микструктура отливок из сплава АК7ч, полученных в U-образной форме: а –  $T_{\text{зал}} = 640$ ,  $T_{\text{ф}} = 310$  °С, исходный; б –  $T_{\text{зал}} = 640$ ,  $T_{\text{ф}} = 310$  °С, качание; в –  $T_{\text{зал}} = 740$ ,  $T_{\text{ф}} = 320$  °С, качание; г –  $T_{\text{зал}} = 740$ ,  $T_{\text{ф}} = 350$  °С, исходный

такта в системе «расплав-форма», переохлаждение контактирующих слоёв генерирует множество центров кристаллизации и их замешивание в объём расплава за счёт трения, вызванного различными скоростями перемещения наружных (более вязких) и внутренних слоев расплава.

Наиболее долгоживущей фазой (60 с) является жидкоподвижная эвтектика, которая благодаря импульсным циклическим колебаниям, воздействующими на затвердевающую отливку, эффективно заполняет образующиеся в процессе усадки межкристаллитные пустоты и тем самым повышает качество (плотность) отливок.

В процессе качания расплава, в проницаемом каркасе, образованном кристаллами, создаются зоны положительного давления.

Дальнейшие результаты исследований по данной тематике будут приведены во второй части статьи.



### Список литературы

1. Новое в литье под низким давлением / Г. П. Борисов и др. – Киев: Наукова думка. – 1971. – 224 с.
2. Новое в литье с противодавлением (бюллетень) – София. – 1975. – 209 с.
3. Специальные способы литья / В. А. Ефимов и др. // Справочник. – М.: Машиностроение, 1991. – 436 с.
4. Смутьский А. А. Термический анализ алюминиевых сплавов / А. А. Смутьский, А. И. Семенченко, С. М. Елов // Процессы литья. – 2002. – № 1. – С. 10-16.
5. Флемингс М. Процессы затвердевания / М. Флемингс. – М.: Мир, 1977. – 423 с.

6. Нехендзи Ю. А. Стальное литьё / Нехендзи Ю. А. – М.: 1948. – 760 с.
7. Обработка легких и жаропрочных сплавов. Закономерности формирования структуры слитков алюминиевых сплавов при непрерывном литье с ультразвуковой обработкой кристаллизующегося расплава / В. И. Добаткин, Г. И. Эскин и др. – М.: Наука, 1976. – С. 151-161.
8. Головаченко В. П. Что даёт роторная обработка алюминиевых расплавов в предкристаллизационной области температур? / В.П. Головаченко, И.В. Хвостенко, А.Г. Вернидуб// Процессы литья. – 2013. – № 3. – С. 8-12.
9. Piwonka T. S., Flemings M. C. Trans. AIME, 236, 1157 (1966)



### References

1. Borisov G. P. et al. (1971). Novoie v lit'ie pod nizkim davleniiem. [Modern in low pressure die casting] Kiev: Naukova dumka, 224 p. [in Russian].
2. Novoie v lit'ie s protivodavleniiem (bull.) [Modern in countergravity casting (newsletter)] – Sofiia, 1975, pp. 209 [in Russian].
3. Yefimov V. A. et al. (1991). Special'nyie sposoby lit'ia. Spravochnik. [Special casting techniques. Handbook] Moscow: Mashinostroenie, 436 p. [in Russian].
4. Smul'skii A. A., Semenchenko A. I., Elov S. M. (2002). Termicheskii analiz aliuminievyh spлавov. [Thermal analysis of aluminium alloys] Protsessy lit'ia, № 1, pp. 10-16 [in Russian].
5. Flemings M. (1977). Protsessy zatverdevaniia. [Processes of solidification] Moscow: Mir, 423 p. [in Russian].
6. Nehendzi Ju. A. (1948). Stal'noe lit'io. [Steel casting] Moscow, 760 p. [in Russian].
7. Dobatkin V. I., leskin G. I. et al. (1976). Obrabotka iegkih i zharoprochnyh spлавov. Zakonomernosti formirovaniia struktury slitkov aliuminievyh spлавov pri nepreryvnom lit'ie s ul'trazvukovoi obrabotkoi kristallizuiushhegosia raspлава. [The laws of formation of aluminum alloy ingot structure during continuous casting with ultrasonic processing of crystallizing melt. Processing of light and heat resistant alloys. ] Moscow: Nauka, pp. 151-161 [in Russian].
8. Golovachenko V. P., Hvostenko I. V., Vernidub A. G. (2013). Chto daet rortornaia obrabotka aliuminievyh raspлавов v predkristallizatsionnoi oblasti temperature. [What gives the rotary processing of aluminum alloys in precrystallization temperatures] Protsessy lit'ia, № 3, pp. 8-12 [in Russian].
9. Piwonka T. S., Flemings M. C. (1966). Trans. AIME, 236, 1157.

Поступила 18.02.2016