

**В. В. Ясюков**, канд. техн. наук, приват-профессор

**Т. В. Лысенко**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой

**Л. И. Солоненко**, ст. преподаватель, e-mail: joy\_ludmila.89@ukr.net

**Е. А. Пархоменко**, аспирант

Одесский национальный политехнический университет, Одесса

## Методы воздействия на процесс формирования отливки

*При наложении внешнего воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл интенсифицируются процессы теплообмена и массопереноса. Это приводит к устранению газовой и усадочной пористости, измельчению структуры отливки, улучшению механических свойств металла, повышению скорости затвердевания. Предложено комплексное воздействие воздушного давления на кристаллизацию и охлаждение широкоинтервального алюминиево-магниевого сплава в сочетании с направленной кристаллизацией, создаваемой проточными наружными холодильниками при литье в керамизированные формы.*

**Ключевые слова:** воздействие давления на жидкий и кристаллизующийся металл, алюминиево-магниевого сплавы, наружные холодильники, разовые керамизированные формы.

**Актуальность работы.** Одной из важнейших составляющих технологического процесса получения отливок является формообразование. Здесь сосредоточены основные преимущества и недостатки литейного производства. К преимуществам следует отнести, прежде всего, одномоментное формирование изделия с заданной конфигурацией, массой от нескольких граммов до десятков и сотен тонн; следует отметить многообразие литейных сплавов на основе железа, меди, алюминия, магния, цинка и других металлов. Некоторые сплавы, например чугун, используют только в литейном производстве, так как вследствие хрупкости их нельзя подвергать обработке давлением. При анализе конкурентоспособности литья, как основной заготовительной базы машиностроения, необходимо принимать во внимание широкий спектр изделий различного назначения: работающих под воздействием многообразных механических нагрузок; в широком диапазоне температур; отличающихся высокой коррозионной стойкостью и т. д.

В то же время существующие методы производства отливок заключают в себе большой недостаток, отрицательно сказывающийся на качестве литья. Если рассматривать одну из основных характеристик качества отливок – сплошность и однородность строения, то оказывается, что эти дефекты формируются в интервале температур ликвидус-солидус. Сюда следует добавить такие дефекты, как напряжения, горячие трещины, зарождающиеся в этом интервале температур, то есть тогда, когда на металл формирующейся отливки со стороны фактически никакого влияния не оказывается. В таких условиях основные пороки отливки исключить полностью не представляется возможным. Поэтому для повышения эффективности литейного производства большое значение имеет применение различных методов воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл, с целью интенсификации процессов теплообмена и массопереноса в затвердевающих сплавах. Достигается это

использованием теплосиловых воздействий: давления, электромагнитных полей, вибрации, ультразвука и др.

Известно [1], что при наложении давления на расплавы их свойства изменяются: тепловые, механические, электрические, физические и многие другие. Существует зависимость равновесной температуры плавления от давления, выражаемая уравнением Клапейрона:

$$\frac{\Delta T_p}{\Delta P} = -\frac{T_m \Delta V}{\Delta H}, \quad (1)$$

где  $\Delta T_p$  – изменение равновесной температуры плавления при изменении давления  $P$ ;  $\Delta P$  – изменение давления на зеркале жидкого металла;  $T_m$  – равновесная температура плавления;  $\Delta H$  – изменение энтальпии системы;  $\Delta V$  – изменение объема при переходе твердой фазы в жидкую.

Из этого уравнения следует, что приложение высоких давлений на расплавы превращает их в твердые тела. Графическая зависимость этого процесса изображена на рис. 1, где показан сдвиг равновесных кривых ликвидуса и солидуса при повышении давления на расплав.

Давление, оказываемое на отливку, кроме температуры плавления сплава, существенно изменяет ее свойства: устраняется газовая и усадочная пористость, измельчается структура, улучшаются механические свойства металла, возрастает скорость затвердевания.

Существующие методы литья под давлением отличаются большим разнообразием, объединяет их, в основном, металлическая оснастка (пресс-формы, кокили, изложницы). В этой связи экономическая целесообразность методов достигается при массовом и крупносерийном производстве отливок ограниченного размера и сравнительно низких температур плавления

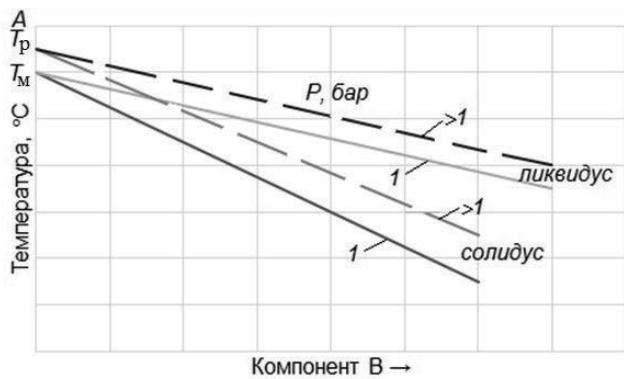


Рис. 1. Зависимость влияния давления на расплав

сплавов. В противовес этим методам при автоклавном литье используют разовые и металлические формы, заливаемые при атмосферном давлении с последующим помещением в автоклав. Ограничениями здесь являются: дорогостоящее оборудование, возможность возникновения механического пригара за счет проникновения жидкого металла в поры песчаной формы, увеличенный расход металла на прибыль, затрудненная заполняемость литейных форм.

**Постановка задачи.** В некоторых отраслях народного хозяйства широко используются алюминиево-магниевого сплавы. Эти сплавы, применяемые в авиационной промышленности, обеспечивают снижение массы деталей, способствуют борьбе конструкторов за скорость, высоту и дальность полета. Такие сплавы затвердевают в широком интервале температур и склонны к образованию газоусадочных пороков [2]. Отливки производят в условиях мелкосерийного и индивидуального производства, поэтому для их изготовления используют разовые песчаные газотворные формы на различных связующих. В таких формах интенсификация процесса отвода тепла при кристаллизации может быть реализована двумя путями: введением в формовочную смесь эндотермического компонента, разлагающегося с поглощением тепла, забираемого от находящегося в форме расплава (борная кислота), и введением в формовочную смесь компонента, обладающего высокой теплопроводностью (электрокорунд). Сравнительные испытания прочностных характеристик сплава АЛ23-1 показывают [3], что при обычной формовочной смеси  $\sigma_b = 183$  МПа,  $\delta = 5,6$  %; при смеси с эндотермическими добавками  $\sigma_b = 228$  МПа,  $\delta = 10,2$  %; при смеси с электрокорундом  $\sigma_b = 227$  МПа,  $\delta = 10,1$  %. Скорость охлаждения жидкого металла на границе форма-металл: при литье в обычную формовочную смесь —  $1,1$  °C/с; при литье в кокиль —  $2,03$  °C/с; при литье в формовочную смесь с электрокорундом —  $1,87$  °C/с. Однако брак по газоусадочным раковинам и механическому пригару отливок сложной конфигурации, к которым предъявляются повышенные эксплуатационные требования, достигает 50–70 %. Поэтому разработка надежной технологии, позволяющей повысить размерную точность отливок и эксплуатационную надежность литых деталей, остается актуальной задачей.

**Цель работы.** Целью работы является устранение основных дефектов алюминиево-магниевого

отливок, возникающих в температурном интервале ликвидус-солидус, улучшение качества поверхности отливок путем комплексного воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл воздушного давления, направленной кристаллизации, создаваемой наружными холодильниками, использованием разовых керамизированных форм.

**Сущность и методы исследования.** Для создания повышенного давления в полости формы при заливке сплава АЛ23-1 использовали сжатый воздух, подводимый в прибыль с давлением 0,1–0,6 МПа [4]. Прибыль формировалась пенополистироловой моделью шаровидной формы с пережимом, обеспечивающим легкость отделения прибыли от отливки. В качестве исходного материала был выбран пенополистирол марки «Styroshell» Д 833А. Модели прибыли изготавливались по базовой технологии, разработанной на ОАО «Камет-ТАС» [5]. Поверхность модели перед установкой в форму окрашивалась противопожарной краской Дисопаст 6230/8. Масса прибыли составляла 18 % от массы отливки. После окончания заливки стояки замораживались, и в прибыль подавалось избыточное давление воздуха, преследующее цель интенсификации питания отливки в интервале ликвидус-солидус ( $\Delta T = 120$ – $140$  °C) и предотвращение выделения водорода в связи с изменением растворимости. Установлено, что при создании давления в прибыли до 0,6 МПа песчаная форма не изменяет геометрии, и разброс размеров отливки укладывается в поле допуска 14 квалитета. Увеличение давления свыше 0,6 МПа приводит к искажению размеров отливки за счет деформации формы.

Избыточное давление способствует проникновению жидкого металла в поры формы. Испытания влияния давления на глубину проникновения металла в поры формы показало, что поверхность песчаных форм из кварцевого песка фракций 063, 0315, 02 при давлении до 0,2 МПа пропитывается на недопустимую величину. Поэтому было предложено использование керамизированных форм из холодногеливаемой керамики, наносимой на песчано-жидкостекольную основу [6, 7, 8]. Это позволило избежать проникновения металла в поры формы и предохранить форму от деформации. Шероховатость литой поверхности образцов, оцененная на профилометре методом прерывистого ощупывания, соответствовала 4–5 классу чистоты по ГОСТ 2789 – 95 (рис. 2).

Оценку эффективности давления проводили, сравнивая наличие пористости по классам ВИАМ (ВНИИ АМ), а также по механическим испытаниям образцов. Так, пористость с увеличением давления от 0,1 до 0,6 МПа снижается с 5 до 1–2 класса. Дальнейшее повышение давления для керамизированных форм невозможно из-за их разрушения. Поэтому возникла необходимость интенсификации процесса захлаживания расплава с целью изменения градиента температур по сечению отливки и содействия переводу объемного затвердевания в последовательное. С этой целью необходимо создать градиент температур, больший интервала затвердевания сплава. Одним из эффективных средств регулирования скорости охлаждения отливки в процессе затвер-

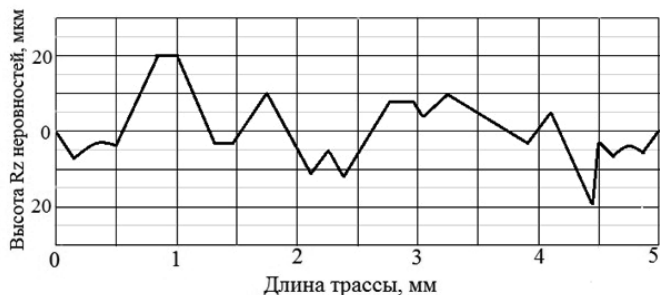


Рис. 2. Профилограмма поверхности отливки

девания в литейной форме, создания необходимой направленности процесса, предотвращения формирования горячих трещин в тепловых узлах, являются наружные холодильники. В данном случае необходимо было провести сравнительные исследования холодильников по конфигурации, по способу производства и принципу действия. Наиболее подходящими для конкретных отливок были выбраны холодильники косвенного действия, повторяющие конфигурацию поверхности отливки в месте установки; решающие разграничение стенок отливки на определенные зоны питания; оказывающие влияние на газоусадочные, ликвационные процессы; оснащенные каналами для регулируемого отбора тепла при помощи различных теплоносителей.

Поиск методов изготовления позволил сформулировать требования к таким холодильникам: прочность, герметичность, наличие тонких каналов для движения жидкостей с интенсивным отводом тепла, технологичность изготовления. В качестве базового был избран метод изготовления пористых металлокерамических оболочек (ПМКО) из порошков железа [9] с последующей пропиткой этой фасонной фигуры расплавом меди. В итоге формируется прочная оболочка с внутренними полостями; прочность такого композиционного материала  $\sigma_b$  составляет 170–180 МПа, коэффициент теплопроводности – 170–180 Вт/м·К. При использовании таких холодильников создается направленное затвердевание к прибыли при охлаждении их средами с различной интенсивностью и температурой. Так, при расходе воды 0,05; 0,1; 0,15 л/с с температурой 18 °С, при толщине стенки отливки до 30 мм, градиент температур по сечению изменяется в широких пределах: 10, 64, 134 °С.

Прочностные характеристики отливок из сплава АЛ21–1, залитых в песчано-жидкостекольные формы с керамизированной поверхностью, при давлении в прибыли 0,6 МПа и охлаждении проточной водой с расходом 0,15 л/с приведены на рис. 3: I – исходный сплав; II – совместное воздействие давления, охлаждения и керамизации литейной формы (все образцы закалке не подвергались).

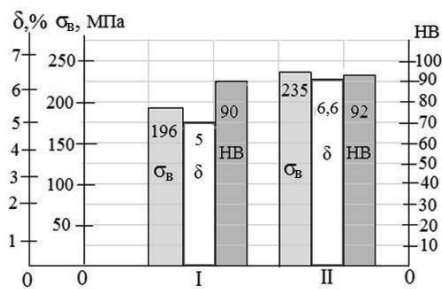


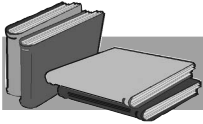
Рис. 3. Прочностные характеристики отливок из сплава АЛ21-1: I – исходный сплав; II – совместное воздействие давления, охлаждения и керамизации литейной формы

## Выводы

Для повышения эффективности литейного производства большое значение имеет использование различных методов воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл с целью интенсификации процессов теплообмена и массопереноса в затвердевающих сплавах. Свойства расплавов при наложении давления изменяются: растет температура плавления, устраняется газовая и усадочная пористость, измельчается структура отливок, улучшаются механические свойства, возрастает скорость кристаллизации. Наложение давления на отливку проблематично в единичном и мелкосерийном производстве, использующем разовые песчаные формы. Это характерно для алюминиево-магниевого сплава, имеющих широкий интервал затвердевания и склонных к образованию газоусадочных раковин. Поэтому устранение основных пороков, возникающих в интервале температур ликвидус – солидус, является нерешенной задачей.

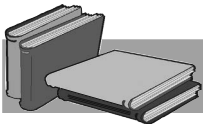
Эта проблема решается путем комплексного воздействия воздушного давления на жидкий и кристаллизующийся металл в сочетании с направленной кристаллизацией, создаваемой проточными наружными холодильниками при литье в керамизированные формы. Эффективность этого предложения состоит в следующем:

1. Шероховатость литой поверхности отливок соответствует 4–5 классу чистоты по ГОСТ 2789-95.
2. Пористость литья снижается с 5 до 1–2 класса по шкале ВИАМ.
3. Прочностные характеристики отливок возросли:  $\sigma_b$  – на 20 %,  $\delta$  – на 32 %.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Флемингс М. Процессы затвердевания. – М.: Мир, 1977. – 423 с.
2. Гуляев А. П. Металловедение. – М.: Metallurgiya, 1986. – 544 с.
3. Строганов Г. Б. и др. Сплавы алюминия с кремнием. – М.: Metallurgiya, 1977. – 272 с.
4. Лысенко Т. В., Ясюков В. В., Сердюк Л. И. Кристаллизация отливок с использованием внешних факторов // VI Международная научно-практическая выставка-конференция «Литье-2010», Запорожье 2010. – С. 210–212.
5. Ясюков В. В., Лысенко Т. В., Солоненко Л. И., Чередник В. А. Анализ и синтез физико-химического воздействия на эксплуатационную надежность отливок // Металл и литье Украины. – 2016. – № 8-10. – С. 19–23.
6. Ясюков В. В., Буланова А. В. Развитие методов керамизации разовых песчаных форм // XII Международная научно-практическая конференция «Литье-2016», Запорожье 2016. – С. 255–257.
7. Ясюков В. В., Лысенко Т. В., Солоненко Л. И. Процессы кристаллизации при наложении давления и охлаждения на жидкий металл отливки // Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві. Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, Краматорськ 2017. – С. 154–155.
8. Ясюков В. В., Солоненко Л. И., Цыбенко О. В. Композиционные вставки пресс-форм литья под давлением // Металл и литье Украины. – 2015. – № 9. – С. 26–29
9. Ясюков В. В., Лысенко Т. В., Волянская К. В. Композиционные отливки с регулируемым поверхностным слоем // Металл и литье Украины. – 2016. – № 4. – С. 18–23.



## REFERENCES

1. Flemings, M. (1977). Protsessy zatverdevaniia [*Curing processes*]. Moscow: Mir, 423 p. [in Russian].
2. Guliayev, A.P. (1986). Metallovedenie [*Metal science*]. Moscow: Metallurgiya, 544 p. [in Russian].
3. Stroganov, G.B. et al. (1977). Splavy aliuminiia s kremniem [*Aluminum alloys with silicon*]. Moscow: Metallurgiya, 272 p. [in Russian].
4. Lysenko, T.V., Yasiukov, V.V., Serdiuk, L.I. (2010). Kristallizatsiia otlivok s ispol'zovaniem vneshnikh faktorov [*Crystallization of castings with the use of external factors*]. VI Mezhdunarodnaia nauchno-prakticheskaia vystavka-konferentsiia «Lit'e-2010», Zaporozh'e, pp. 210–212 [in Russian].
5. Yasiukov, V.V., Lysenko, T.V., Solonenko, L.I., Cherednik, V.A. (2016). Analiz i sintez fiziko-khimicheskogo vozdeistviia na ekspluatatsionnuu nadezhnost' otlivok [*Analysis and synthesis of the physico-chemical impact on the operational reliability of castings*]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 8-10, pp. 19–23 [in Russian].
6. Yasiukov, V.V., Bulanova, A.V. (2016). Razvitie metodov keramizatsii razovykh peschanykh form [*Development of methods for the ceramics of single sand molds*]. XII Mezhdunarodnaia nauchno-prakticheskaia konferentsiia «Lit'e-2016», Zaporozh'e, pp. 255–257 [in Russian].
7. Yasiukov, V.V., Lysenko, T.V., Solonenko, L.I. (2017). Protsessy kristallizatsii pri nalozhenii davleniia i okhlazhdeniia na zhidkii metall otlivki [*Processes of crystallization in the application of pressure and cooling to the molten metal of the casting*]. Perspektivni tekhnologii, materialy i obladnannia u lyvarnomu vyrobnytstvi. Materialy VI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, Kramators'k, pp. 154–155 [in Russian].
8. Yasiukov, V.V., Solonenko, L.I., Tsybenko, O.V. (2015). Kompozitsionnye vstavki press-form lit'ia pod davleniem [*Composite inserts of die-casting molds*]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 9, pp. 26–29 [in Russian].
9. Yasiukov, V.V., Lysenko, T.V., Volianskaia, K.V. (2016). Kompozitsionnye otlivki s reguliruemym poverkhnostnym sloem [*Composite castings with a controlled surface layer*]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 4, pp. 18–23 [in Russian].

### Анотація

**В. В. Ясюков**, канд. техн. наук, приват-професор; **Т. В. Лисенко**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри; **Л. І. Солоненко**, ст. викладач, e-mail: joy\_ludmila.89@ukr.net ; **О. О. Пархоменко**, аспірант

Одеський національний політехнічний університет, Одеса

### Методи впливу на процес формування виливка

При накладенні зовнішнього впливу на рідкий метал і метал, що кристалізується, інтенсифікуються процеси теплообміну і масопереносу. Це призводить до усунення газової та усадочної пористості, подрібнення структури виливка, поліпшення механічних властивостей металу, підвищення швидкості твердіння. Запропоновано комплексний вплив повітряного тиску на кристалізацію і охолодження широкоінтервального алюмінієво-магнієвого сплаву в поєднанні зі спрямованою кристалізацією, що створюється проточними зовнішніми холодильниками при литті в керамізовані форми.

## Ключові слова

*Вплив тиску на рідкий метал і метал, що кристалізується, алюмінієво-магнієві сплави, зовнішні холодильники, разові керамізовані форми.*

## Summary

**V. V. Yasiukov**, Candidate of Engineering Sciences, private-professor;  
**T. V. Lysenko**, Doctor of Engineering Sciences, Prof., Head of Department;  
**L. I. Solonenko**, Senior Lecturer, e-mail: joy\_ludmila.89@ukr.net;  
**E. A. Parkhomenko**, Postgraduate student

*Odessa National Polytechnic University, Odessa*

## Methods of influence on the casting process

*When external influence on the liquid and crystallizing metal is imposed, the processes of heat transfer and mass transfer are intensified. This leads to elimination of gas and shrinkage porosity, refining of the cast structure, improvement of the mechanical properties of the metal, increase in the rate of solidification. A complex effect of air pressure on the crystallization and cooling of a wide-interval aluminum-magnesium alloy in combination with directional crystallization created by flowing external coolers during casting into ceramic forms is proposed.*

## Keywords

*Influence of pressure on liquid and crystallizing metal, aluminum-magnesium alloys, external refrigerators, single ceramic forms.*

Поступила 02.01.18

## ПОЗДРАВЛЯЕМ

директора Физико-технологического института металлов и сплавов

НАН Украины,

доктора технических наук

**АНАТОЛИЯ ВАСИЛЬЕВИЧА НАРИВСКОГО**

с избранием член-корреспондентом НАН Украины

и желаем новых творческих свершений!

**Администрация и коллектив  
ФТИМС НАН Украины**