

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

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

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

Одесский национальный политехнический университет, Одесса

## Кинетика затвердевания сплава при большой интенсивности теплообмена низкотемпературных форм

Представлены расчетные и экспериментальные данные скорости охлаждения отливок из различных сплавов, заливаемых в низкотемпературные формы (НТФ) и песчано-глинистые формы (ПГФ). Полученные результаты показали, что моделирование обеспечивает выполнение достоверных расчетов нестационарных температурных полей отливок, залитых в ПГФ и НТФ. Определены параметры литья в НТФ (время затвердевания, твердость, величина усадочных дефектов), выполнен анализ полученных результатов.

**Ключевые слова:** низкотемпературная форма, песчано-глинистая форма, чугун СЧ15, алюминий АК5М2, компьютерное моделирование.

**Введение.** Литье в НТФ – одно из наиболее перспективных направлений развития литейного производства. Особенностью литья в НТФ является существенное увеличение прочности форм, по сравнению с литьем в ПГФ, а также возможность использования воды в качестве основного связующего. Данный метод изготовления форм улучшает структуру, повышает точность и геометрию отливок, экономит формовочные материалы, и, что особенно важно, улучшает экологию, устраняя вредные выбросы в атмосферу [1].

**Целью исследования** является верификация программного комплекса LVMFlow для заливки НТФ. НТФ является неустойчивой формой, так как при заливке сплав кристаллизуется в соответствии с законом квадратного корня, а сама форма теряет свои свойства и рассыпается. При этом измерение температуры поверхности формы практически невозможно. НТФ позволяет заливать сплав под давлением, получая высокое качество поверхности отливки (СЧ 15 Rz = 40 – 20 мкм, АК5М2 Rz = 20 – 10 мкм), хорошие механические и технологические свойства. Это дает возможность удешевить способ изготовления оснастки, уменьшить время изготовления формы, получать отливки в разовую форму под давлением различной конфигурации и размеров.

**Материалы и методы исследования.** Моделирование теплопереноса в НТФ реализовано в программном комплексе LVMFlow (демоверсия), состоящей из отдельных модулей, предназначенных для решения конкретных задач литейного производства. Процесс заполнения формы расплавом описывается уравнениями Навье-Стокса, где вязкость учитывается в виде поправки. Одновременно моделировался процесс заполнения формы расплавом и его затвердевание.

Уравнения гидродинамики для вязкой несжимаемой жидкости имеют следующий вид [2]:

$$\operatorname{div}(v) = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla p - \mu \Delta v + \rho(v \cdot \nabla)v - \rho F = 0, \quad (2)$$

где  $\rho = \text{const}$  – постоянная плотность;  $\mu$  – коэффициент внутреннего трения;  $p$  – давление (скалярная величина);  $v = [v_x, v_y, v_z]$  – скорость (векторная величина);  $F = [F_x, F_y, F_z]$  – сила (векторная величина);  $x, y, z, t$  – пространственные координаты и время.

В каждом отдельном модуле процессы теплопереноса описываются замкнутой динамической системой уравнений, основанных на законах сохранения энергии, импульса, массы, уравнений состояния многокомпонентных сплавов, которые решаются на прямоугольной сетке методом конечных разностей (МКР) с автоматическим выбором шага интегрирования по времени.

При выполнении работы был задан сплав, материал формы, температура формы, температура окружающей среды, способ заливки. Параметры заливки указаны в табл. 1.

Таблица 1

Параметры заливки

Свойства	Параметры
Металл	СЧ 15 АК5М2
Материал формы	НТФ ПГФ
Температура формы	20 °С – 20 °С – 60 °С
Способ заливки	Литье под давлением (0,13–0,16 МПа) Гравитационное литье
Температура окружающей среды	20 °С

Заливка в НТФ моделировалась под давлением, в ПГФ – гравитационным литьем. Исследовались два сплава: СЧ15, АК5М2. Температура формы составляла 20 °С в ПГФ и (-20), (-60) °С в НТФ. 2D-геометрия отливки приведена на рис. 1. Заливалась цилиндрическая отливка 50 мм диаметром и 100 мм высотой. 3D геометрия отливки в форме показана на рис 2. Подвод металла осуществлялся сифоном.

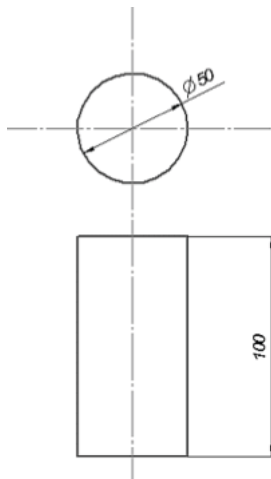


Рис. 1. Эскиз отливки

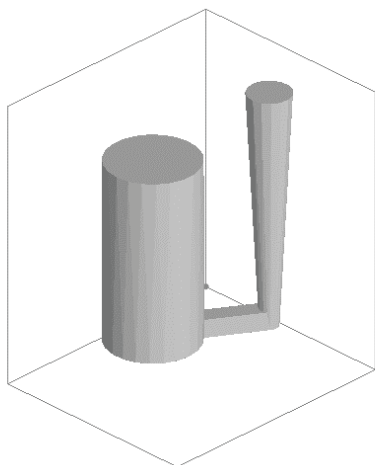


Рис. 2. 3D геометрия отливки в форме

**Результаты и обсуждения.** На рис. 3 представлены 3D модели из сплава СЧ 15, на рис. 4 – 3D модели из сплава АК5М2, заливаемые в НТФ -60 °С (а), в НТФ -20 °С (б), ПГФ 20 °С (в). В обоих случаях приведены расчетные данные времени затвердевания.

Для верификации программы было проведено сравнение результатов, полученных при моделировании и измеренных в процессе физического эксперимента (табл. 2, 3).

Физический эксперимент проводился следующим образом. Собранную низкотемпературную форму устанавливали в установку литья под низким давлением (0,13–0,16 МПа). Устанавливались хромель-алюмелевые термопары и милливольтметр МР-64-02, что позволяло измерять и регулировать температуру металла в тигле, а в НТФ – с помощью прибора

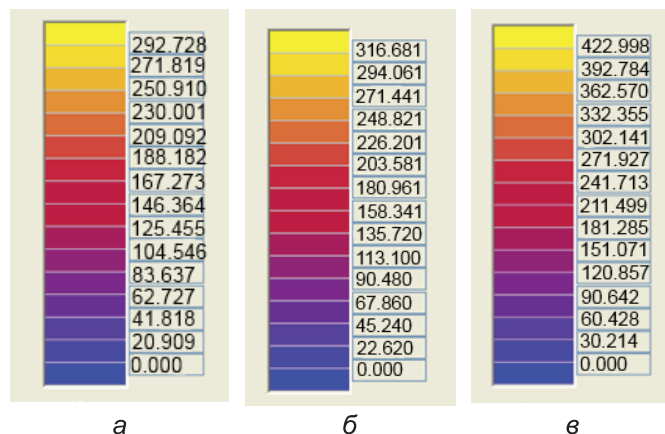
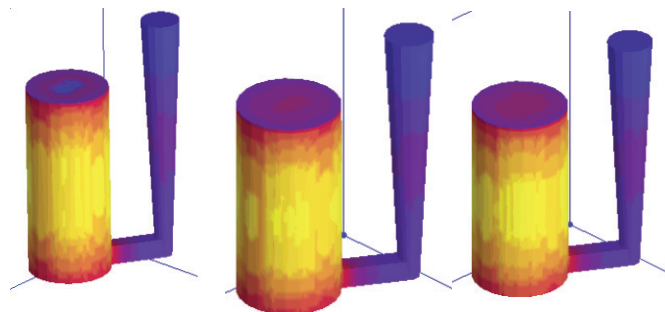


Рис. 3. Время затвердевания отливки из сплава СЧ 15 (3D модель): а – НТФ (-60) °С; б – НТФ (-20) °С; в – ПГФ 20 °С

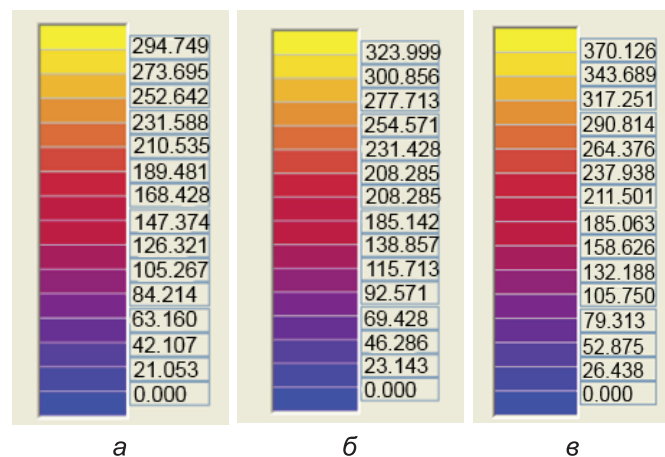
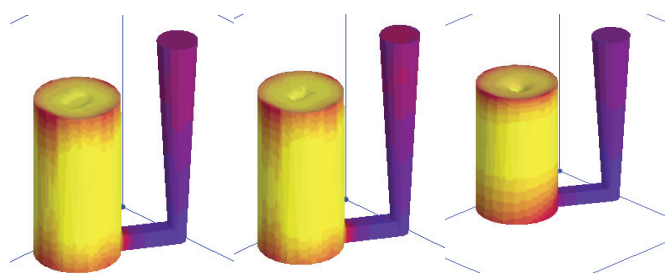


Рис. 4. Время затвердевания отливки из сплава АК5М2 (3D модель): а – НТФ (-60) °С; б – НТФ (-20) °С; в – ПГФ 20 °С

ТМ200 термопары типа К. Сжатый воздух подавался в кожух печи с помощью пульта, который позволял регулировать скорость заливки и время выдержки отливки под давлением [1].

Расчетные кривые и экспериментальные точки для скоростей охлаждения отливок из АК5М2 и СЧ15 приведены на рис. 5 и 6.

Таблица 2

## Скорость охлаждения АК5М2, °С/с

НТФ -60 °С	НТФ -20 °С	ПГФ
Расчетные данные в интервале температур 720–500 °С		
2,9	2,7	2,4
Экспериментальные данные в интервале температур 720–500 °С		
2,8	2,5	2,0
Расчетные данные в интервале температур 720–577 °С		
3,1	2,7	2,5
Экспериментальные данные в интервале температур 720–577 °С		
3,0	2,6	2,2

Таблица 3

## Скорость охлаждения СЧ15, °С/с

НТФ -60 °С	НТФ -20 °С	ПГФ
Расчетные данные в интервале температур 1350–1150 °С		
4,24	4,8	3,9
Экспериментальные данные в интервале температур 1350–1150 °С		
4,3	4,1	4,4
Расчетные данные в интервале температур 1350–750 °С		
4,75	4,57	4,9
Экспериментальные данные в интервале температур 1350–750 °С		
4,8	4,6	4,5

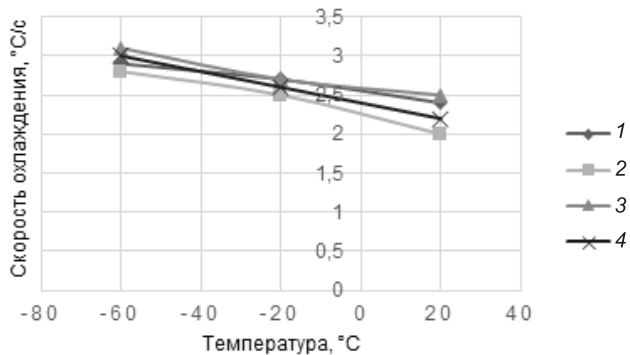


Рис. 5. Расчетные зависимости скорости охлаждения отливок из АК5М2 от начальной температуры формы: 1 – в интервале температур 720–577 °С; 2 – экспериментальные данные 720–577 °С; 3 – в интервале температур 720–500 °С; 4 – экспериментальные данные 720–500 °С

Определялась твердость СЧ15 и АК5М2, заливаемых в НТФ (-60, -20°С) и ПГФ. В ходе моделирования установлено, что при заливке СЧ15 в НТФ (-60) °С НВ = 225 МПа, в НТФ (-20) °С НВ = 200 МПа, в ПГФ НВ = 175 МПа. НВ для СЧ 15 составляет 130–241 МПа. Результаты расчетов приведены на рис. 7.

При заливке АК5М2 предел прочности составил: НТФ (-60) °С НВ = 73 МПа, в НТФ (-20) °С НВ = 69 МПа, в ПГФ НВ = 67 МПа. НВ Для АК5М2 составляет 65–76 МПа. Результаты расчетов представлены на рис. 8.

Таким образом, НВ, полученные расчетом для СЧ15 и АК5М2, соответствует стандартам.

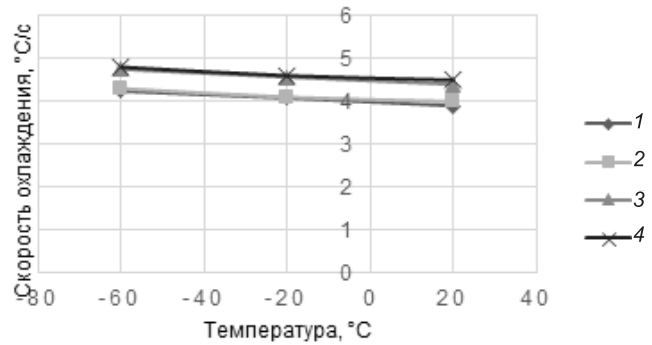


Рис. 6. Расчетные зависимости скорости охлаждения отливок из СЧ15 от начальной температуры формы: 1 – в интервале температур 1350–1150 °С; 2 – экспериментальные данные 1350–1150 °С; 3 – в интервале температур 1350–750 °С; 4 – экспериментальные данные 1350–750 °С

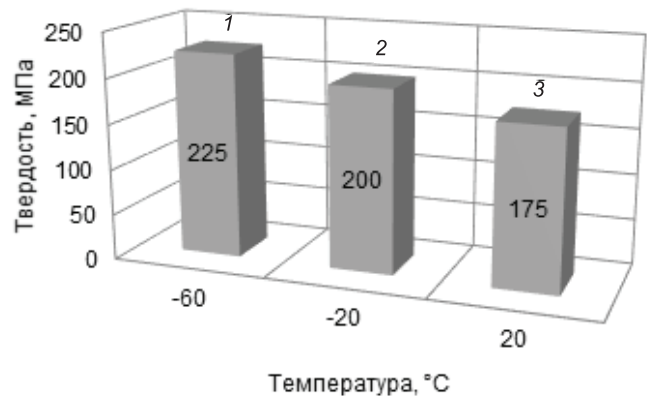


Рис. 7. Твердость по Бринеллю для СЧ15: 1 – НТФ -60 °С; 2 – НТФ -20 °С; 3 – ПГФ 20 °С

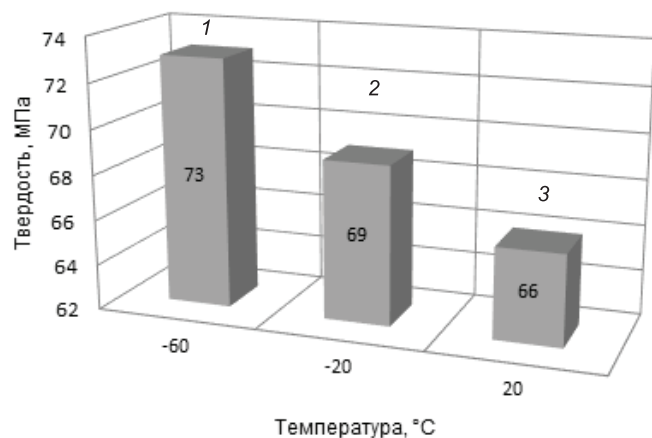


Рис. 8. Твердость по Бринеллю для АК5М2: 1 – НТФ -60 °С; 2 – НТФ -20 °С; 3 – ПГФ 20 °С

Процесс образования усадочных раковин сплава СЧ15 и формирование усадочной пористости показаны на рисунках в табл. 4. Объем усадочной пористости и усадочных раковин рассчитывался от всего объема отливки.

В табл. 4 приведены результаты моделирования, полученные при заливке СЧ15 в НТФ и ПГФ.

Процесс образования усадочных раковин сплава АК5М2 и формирование усадочной пористости показаны на рисунках в табл. 5. Усадочная пористость располагается от центра отливки до верхней ее ча-

## Результаты моделирования при заливке СЧ15




№	Форма	Время затвердевания, с	НВ, МПа	Дефекты	2D изображение дефекта
1	НТФ –60 °С	292,7	225	Усадочная пористость – 7 % Усадочная раковина – 0 %	
2	НТФ –20 °С	316,7	200	Усадочная пористость – 8 % Усадочная раковина – 0 %	
3	ПГФ	422	175	Усадочная пористость – 7 % Усадочная раковина – 5 %	



Рис. 9. Отливка «крышка», чугун СЧ 20 ГОСТ 1412-85



Рис. 11. Отливка «корпус часов», сплав БрО6Ц6С2х ГОСТ 614-97



Рис. 10. Отливка «анемостат», сплав АК5М2 ГОСТ 1583-93

сти, занимает 40 % объема отливки. В табл. 5 приведены результаты моделирования, полученные при заливке АК5М2 в НТФ и ПГФ.

Отливки, полученные в НТФ, приведены на рис. 9–11:

- «крышка», чугун СЧ 20 ГОСТ 1412-85;
- «анемостат», сплав АК5М2 ГОСТ 1583-93;
- «корпус часов», сплав БрО6Ц6С2х ГОСТ 614-97.



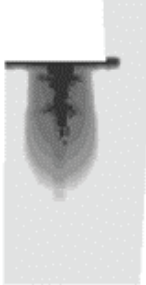
Данные отливки получились с высоким качеством поверхности (СЧ 15 Rz = 40–20 мкм, АК5М2 Rz = 20–10 мкм), с хорошими технологическими и механическими свойствами.

### Выводы

Для определения параметров технологического процесса изготовления отливок из сплавов СЧ15 и АК5М2 использовали программный комплекс



## Результаты моделирования при заливке АК5М2

№	Форма	Время затвердевания, с	НВ, МПа	Дефекты	2D изображение дефекта
1	НТФ –60 °С	295	73	Усадочная пористость – 35 % Усадочная раковина – 1 %	
2	НТФ –20 °С	324	69	Усадочная пористость – 40 % Усадочная раковина – 1 %	
3	ПГФ	370	67	Усадочная пористость – 35 % Усадочная раковина – 10 %	

LVMFlow (демоверсия). Сопоставление полученных расчетных и экспериментальных данных позволило сделать вывод: моделирование обеспечивает выполнение достоверных расчетов нестационарных температурных полей отливок, залитых в НТФ.

В ходе работы определялись такие параметры:

- время затвердевания;
- скорость охлаждения отливок;
- твердость;
- величина усадочных дефектов.

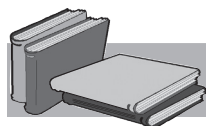
Полученные результаты позволили сделать вывод, что наилучшая отливка из сплава СЧ15 и АК5М2 получается при заливке в НТФ –60 °С.

Данная технология позволяет заливать различные сплавы с повышенным давлением в разовые формы,

при этом достигая высокого качества отливок (СЧ 15 Rz = 40–20 мкм, АК5М2 Rz = 20–10 мкм).

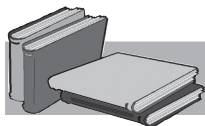
НТФ позволяет получать габаритные отливки под давлением, облегчает изготовление оснастки любой конфигурации, используя вторичное формовочное сырье. Что, в свою очередь, приводит к хорошему экономическому эффекту, не загрязняет окружающую среду.

Скорость охлаждения в НТФ выше, чем в ПГФ. Этому способствует большая теплопроводность НТФ, а также отсутствие зазора между металлом и стенкой формы. Этот фактор препятствует ликвационным явлениям, что приводит к повышению прочности металла.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Низкотемпературные литейные формы: монография / Шинский О. И., Лысенко Т. В., Прокопович И. В. и др. – Одесса: Фенікс, 2017. – 248 с.
2. Шинский О. И., Лысенко Т. В., Солоненко Л. И. Влияние состава, дисперсности и температуры охлаждения формовочных материалов на прочностные свойства низкотемпературных форм // Металл и литье Украины. – 2016. – № 11–12. – С. 47–51.
3. Шинский О. И., Лысенко Т. В., Ясюков В. В., Солоненко Л. И., Васильев Д. С. Низкотемпературный холодильный комплекс для замораживания литейных форм и стержней // Металл и литье Украины. – 2016. – № 7. – С. 21–25.



## REFERENCES

1. Shinskii O. I., Lysenko T. V., Prokopovich I. V. et al. (2017). Nizkotemperaturnye liteinye formy: monografiia [Low-temperature casting molds: monograph]. Odessa: Feniks, 248 p. [in Russian].
2. Shinskii O. I., Lysenko T. V., Solonenko L. I. (2016). Vliianie sostava, dispersnosti i temperatury okhlazhdeniia formovochnykh materialov na prochnostnye svoistva nizkotemperaturnykh form [The influence of composition, dispersity and temperature of cooling mold materials on the mechanical properties of low-temperature forms]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 11–12, pp. 47–51 [in Russian].
3. Shinskii O. I., Lysenko T. V., Yasiukov V. V., Solonenko L. I., Vasil'ev D. S. (2016). Nizkotemperaturnyi kholodil'nyi kompleks dlia zamorazhivaniia liteinykh form i sterzhnei [The low-temperature refrigerating complex for freezing of casting molds and cores]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 7, pp. 21–25 [in Russian].

### Анотація

*Лисенко Т. В., Ясюков В. В., Солоненко Л. І.*

Кінетика затвердіння сплаву при великій інтенсивності тепломасообміну низькотемпературних форм

Представлено розрахункові та експериментальні дані швидкості охолодження виливків з різних сплавів, що заливаються в низькотемпературні форми (НТФ) та піщано-глинисті форми (ПГФ). Отримані результати показали, що моделювання забезпечує виконання достовірних розрахунків нестационарних температурних полів виливків, що залиті в ПГФ і НТФ. Визначено параметри лиття в НТФ (час затвердіння, твердість, величину усадочних дефектів), виконано аналіз отриманих результатів.

### Ключові слова

*Низькотемпературна форма, піщано-глиниста форма, чавун СЧ15, алюміній АК5М2, комп'ютерне моделювання.*

### Summary

*Lysenko T., Yasiukov V., Solonenko L.*

Kinetics of solidification of an alloy at a high intensity of heat and mass transfer of low-temperature forms

Calculated and experimental data on the cooling rate of castings from various alloys, cast into low-temperature forms (LTF) and sand-clay forms (SCF) are presented. The obtained results showed that the simulation provides reliable calculations of the unsteady temperature fields of castings filled in SCF and LTF. The casting parameters in the LTF (solidification time, hardness, and shrinkage values) were determined, and the obtained results were analyzed.

### Keywords

*Low-temperature form, sandy-clay form, cast iron СЧ15, aluminum АК5М2, computer simulation.*

Поступила 15.11.17