

---

# ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ, МЕХАНИЗАЦИИ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ

УДК 621.74

**О. В. Соценко, А. С. Снетков, А. В. Белич, И. Л. Соковнин**

Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КАЛАНДРОВЫХ ВАЛОВ

*Проведено комп'ютерне моделювання процесу затверднення каландрового вала в комбінованій литейній формі. Показана ефективність впливу товщини стінки форми на розміри і розміщення усадочних дефектів в отливке.*

**Ключевые слова:** каландровый вал, затвердевание, усадочные дефекты, толщина стенки формы.

*Проведено комп'ютерне моделювання процесу тверднення каландрового валу в комбінованій ливарній формі. Показана ефективність впливу товщини стінки форми на розміри і розміщення усадкових дефектів у виливку.*

**Ключові слова:** каландровий вал, тверднення, усадкові дефекти, товщина стінки форми.

*Computer simulation of solidification process calendering rolls in combined mold. The efficiency of the influence of wall thickness forms on the size and location of shrinkage defects in the casting.*

**Keywords:** calendering roll, solidification, shrinkage defects, thickness wall of forms.

**Постановка проблемы.** Каландровые валы используются в машинных каландрах бумагоделательных и картоноделательных машин для обработки давлением бумажного или картонного полотна. Валы относятся к наиболее динамически и статически нагруженным элементам конструкции таких машин, а вопрос производства и повышения работоспособности валов машинных каландров является одним из наиболее важных [1].

В мировой практике производства каландровых валов для бумажной промышленности наибольшее распространение получило изготовление их в вертикальных комбинированных формах. Форма для литья каландрового вала состоит из нескольких частей: нижняя шейка (цапфа) вала, затвердевающая в песчано-глинистой форме; бочка в металлической форме – в многосекционном массивном кокиле (рис. 1, а).

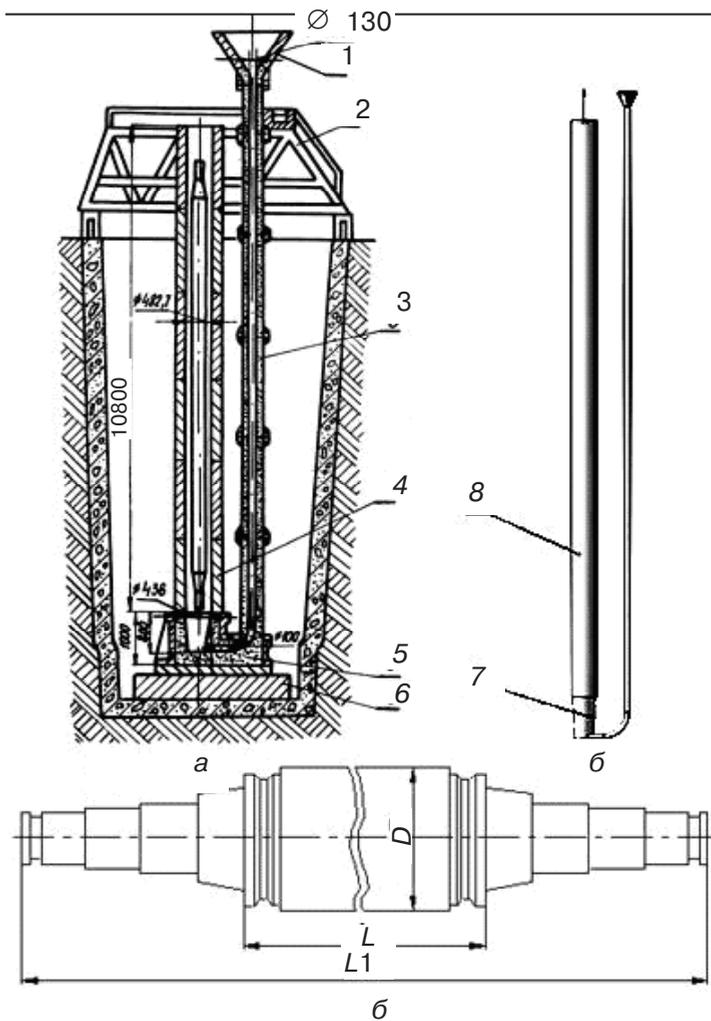


Рис. 1. Элементы литейной формы (а), 3D модель (б) и чертеж (в) каландрового вала: 1 – заливочная воронка; 2 – монтажные мостки; 3 – форма литникового стояка; 4 – кокильная часть формы; 5 – форма нижней шейки; 6 – опорная плита; 7 – нижняя шейка вала; 8 – бочка вала

Такие формы собирают и заливают металлом в специальных кессонах глубиной 8,5-10,0 м со стационарными монтажными площадками и эффективной системой вытяжной вентиляции.

Каландровые валы изготавливают цельнолитыми из легированного отбеленного чугуна с пластинчатым или шаровидным графитом. Масса каландрового вала в зависимости от диаметра ( $D = 250-1020$  мм) и длины ( $L = 1800-7100$  мм) бочки при общей длине ( $L_1 = 3400-10100$  мм) составляет 0,70-45,5 т (рис. 1, в). Для машин с обрезной шириной полотна более 4200 мм применяют литые валы из легированного отбеленного чугуна с запрессованными стальными цапфами.

Основными требованиями к материалу каландровых валов, которые определяют их высокую эксплуатационную стойкость, являются оптимальная для конкретных условий твердость и достаточно большая глубина рабочего слоя, что обеспечивает необходимую длительность работы вала в машинном каландре до перешлифовки его рабочей поверхности. Факторами, определяющими твердость и величину рабочего слоя вала, являются количество карбидной составляющей, степень дисперсности продуктов распада аустенита, являются уровень комплексного легирования и скорость затвердевания чугуна.

## **Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья**

В настоящее время каландровые валы отливают с карбидоперлитным или карбидобейнитным рабочим слоем твердостью 65-80 ед по Шору. Основные элементы конструкции формы для литья каландровых валов типоразмера 457x7162 мм из отбеленного чугуна, легированного хромом, никелем и молибденом, показаны на рис. 1, а.

Применение песчано-глинистой формы позволяет обеспечить затвердевание чугуна нижней шейки вала преимущественно по стабильной системе. При этом содержание белой (карбидной) составляющей в чугуне минимальное, а дисперсность продуктов распада аустенита сравнительно небольшая. Тангенциальное расположение питателя по отношению к полости формы нижней шейки обеспечивает интенсивное вращение металла. Это способствует уплотнению периферийных слоев вала и оттесняет в его центральную зону взвешенные неметаллические включения. Кроме того, песчано-глинистая или песчано-цементная форма нижней шейки вала предупреждает «размывание» внутренней поверхности нижнего кокиля и снижает риск приваривания отливки к металлической форме.

Высокая скорость теплоотвода в кокильной части формы практически полностью останавливает распад жидкой фазы на графит и аустенит. При этом рабочий слой вала формируется по метастабильной системе с выделением аустенито-карбидной эвтектики. С отдалением от поверхности кокиля к центру формы скорость теплоотвода снижается и формируется переходный слой с половинчатой структурой чугуна.

Поскольку центральные области вала затвердевают со скоростью того же порядка, что и материал нижней шейки, то верхнюю шейку получают в кокиле с диаметром, равным диаметру бочки вала, а затем на вальцетокарном станке обтачивают до нужных размеров. Такая технология несколько усложняет изготовление вала из-за необходимости срезать при механической обработке высокотвердый отбеленный слой. Но, как показала практика производства каландровых валов, при образовании в верхней части литой заготовки вала значительных усадочных дефектов вал можно сдвигать в полностью здоровую часть заготовки (рис. 1, а).

Электropечной чугун с содержанием (%мас.): С – 3,30-3,50; Si – 0,20-0,70; Mn – 0,20-0,60; P – 0,40-0,60; S – 0,10-0,15; Cr – 0,10-0,70; Ni – 2,0-3,0 и Mo – 0,3-0,8 заливают в форму при температуре 1380-1400 °С. Каландровый вал размером 457x7162 мм выдерживают в форме не меньше 32 ч, после чего форму разбирают. Продолжительность технологического процесса изготовления крупногабаритных каландровых валов с диаметром бочки 800-1020 мм и массой отливки 45-70 т нередко достигает 180 ч.

Если твердостные характеристики, макро- и микроструктура чугуна каландрового вала при прочих равных условиях регулируются уровнем комплексного легирования и модифицирования, то однородность свойств металла по длине осевой зоны определяется преимущественно интенсивностью процессов затвердевания отливки в радиальном сечении. Стабильность уровня физико-механических свойств чугуна сердцевинной части по длине каландровых валов имеет особенно большое значение для обеспечения необходимой точности бомбировки бочки (не менее  $\pm 0,005$  мм) и статического биения (не более 0,01 мм) [1].

Отливки каландровых валов имеют большое отношение длины к диаметру ( $> 20$ ) и могут рассматриваться как «бесконечно длинные». Поэтому вполне допустимо предположить, что они должны иметь практически одинаковые физико-механические свойства в соответствующих зонах разных сечений по всей длине – высоте по положению в литейной форме. Однако экспериментальные данные указывают на то, что это не так.

Исследование твердости и плотности чугуна в объеме отливки каландрового вала (рис. 2) показало, что в поперечных сечениях центральной зоны на расстоянии 0,5; 2; 5; и 9 м от низа наблюдаются локализованные зоны с пониженным уровнем твердости (рис. 2, а) и плотности (рис. 2, б) чугуна [2]. Причем, между этими

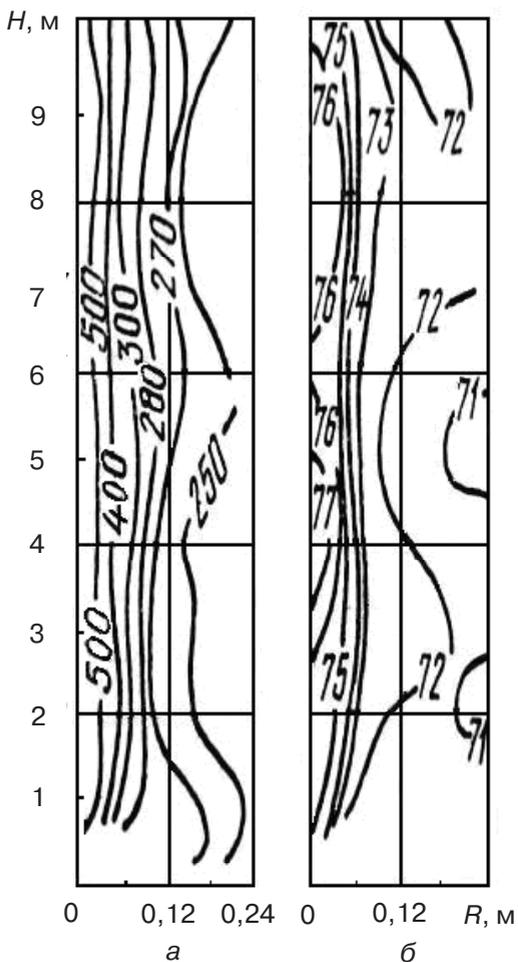


Рис. 2. Изограммы изменения твердости HB (а) и плотности чугуна  $\rho \times 10^2$ , кг/м<sup>3</sup> (б) в продольном осевом сечении каландрового вала

свойствами имеется достаточно высокий уровень корреляционной связи (рис. 3), такая зависимость вполне закономерна, так как в центральной зоне отливки в области усадочной пористости измерение твердости чугуна по Бринеллю дает более низкие значения, чем в высокотвердом рабочем слое с повышенной плотностью чугуна (рис. 2, б).

*Цель работы.* Исходя из указанных требований к материалу каландровых валов, в статье были поставлены такие задачи:

- выполнить компьютерное моделирование процесса затвердевания отливки каландрового вала при различной толщине стенки кокильной формы;
- сопоставить результаты моделирования с экспериментальными данными;
- провести анализ причин образования аномальных зон усадочных дефектов по высоте отливки;
- предложить пути снижения влияния негативных последствий локализации усадочных дефектов на качество отливки.

*Методика проведения исследования.* Для решения этих задач была выбрана система автоматизированного моделирования литейных процессов LVM Flow, которая имеет ряд преимуществ по сравнению с известными аналогами Poligon, ProCast и др. К отличительным особенностям этой программы следует отнести относительно низкую стоимость, простоту решения задач, адекватность результатов

моделирования и достаточную скорость расчета процессов заливки и затвердевания отливки [3]. По мнению автора работы [4], нет особого смысла размышлять по пово-

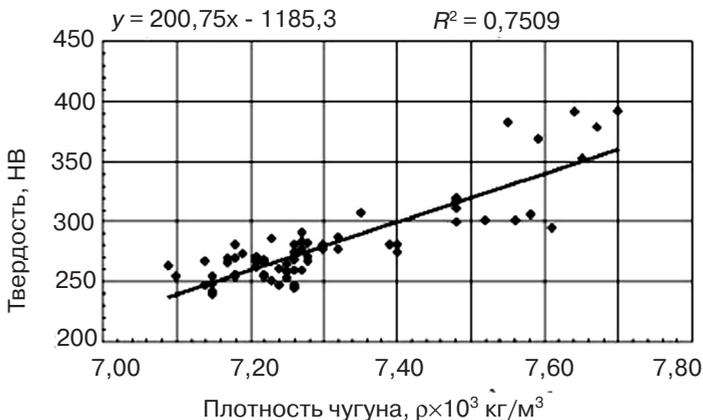


Рис. 3. График взаимосвязи твердости и плотности чугуна в объеме отливки каландрового вала

ду выбора той или иной программы, поскольку все они одинаково надежно решают тепловую задачу и постоянно обновляются, участвуя в конкурентном развитии. Поэтому выбор программы LVM Flow определяется чаще всего профессионализмом и индивидуальным выбором исследователя или технолога.

Компьютерное моделирование с помощью пакета прикладных программ LVM Flow позволяет наблюдать и анализировать все процессы заполнения формы, затвердевания и охлаждения отливки, а также выявлять области вероятного формирования усадочных дефектов. Расчеты для модели выполняются методом конечных разностей на регулярной прямоугольной сетке, а моделирование образования усадочных дефектов основано на положениях теории перколяции [3].

Температурные поля и области вероятного образования усадочных дефектов в осевом сечении отливки в разные моменты времени регистрировали путем снятия скриншотов. Числовые и цветовые шкалы-эталоны (в данной работе – шкала оттенков серого цвета) позволяют количественно в градусах и процентах, соответственно, оценить динамику изменения исследуемых параметров. Регистрацию температурных полей в ходе затвердевания металла в процессорном модуле «Полное задание» можно проводить, не останавливая расчет, и на основании скриншотов наблюдать изменение разных параметров. В процессе моделирования доступен просмотр всех расчетных параметров: температуры, объема жидкой фазы, локализации усадочных дефектов и времени затвердевания.

Для моделирования процессов формирования отливки каландрового вала в процессорном модуле «Полное задание» использовали следующие начальные установки и параметры заливки: размер ячейки – 10 мм; общее количество ячеек – 23 812 422; узлов отливки – 2 129 643; объем требуемой памяти – 1098,7 Mb; материал отливки – специальный отбеленный чугун; материал формы нижней шейки вала и формы литникового стояка – песчано-глинистая смесь; материал кокильной части формы – серый чугун; заданная температура заливки – 1400 °C; начальная температура кокиля и песчаной формы – 20 °C; способ заливки – гравитационное литье; критерий «Автостопа», то есть условия прекращения расчетов, – достижение в отливке температуры 300 °C.

*Результаты исследования и их обсуждение.* Приведенные на рис. 4 расчетные температурные поля затвердевания и охлаждения модели каландрового вала в осевом сечении в разные моменты времени от начала заполнения полости формы металлом и до полного его затвердевания дают представление о типичном характере тепловых процессов, протекающих в форме и отливке. На рис. 5 представлены результаты моделирования процессов формирования усадочных дефектов в отливке каландрового вала, затвердевающей в кокильной форме с разной толщиной стенки.

Как следует из полученных результатов, при толщине стенки кокиля 100 мм усадочные дефекты расположены отдельными локализованными участками в центральной области бочки и шейки отливки (рис. 5, а) с образованием открытой усадочной раковины в прибыльной части отливки. При увеличении толщины стенки кокиля до 145 мм наблюдается более выраженная дифференциация зоны усадки на отдельные локальные участки (рис. 5, б). При этом в верхней (прибыльной) части отливки отсутствует открытая усадочная раковина, а зона 90%-ной усадки более объемна и распространяется на большую длину отливки. Дальнейшее увеличение толщины стенки кокиля до 175 мм приводит к такой же локализации усадочных дефектов, но область перемерзания открытой прибыльной части увеличивается (рис. 5, в).

Характерно, что размеры и форма 90%-ной усадочной зоны в нижней шейке отливки, которая формируется в песчано-глинистой форме, остаются практически неизменными (рис. 5) при разных толщинах стенки кокильной части формы. Это представляется вполне естественным, так как при использовании сифонной лит-

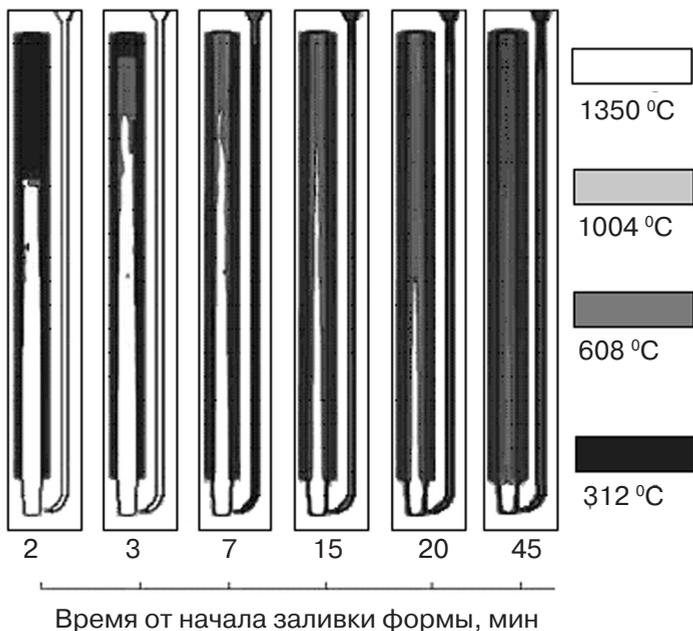


Рис. 4. Расчетные температурные поля затвердевания и охлаждения отливки каландрового вала в разные моменты времени после заливки литейной формы

никовой системы металл нижней шейки имеет наиболее высокую температуру (рис. 4) и затвердевает в последнюю очередь. Усадка в этой зоне не компенсируется в достаточной мере металлом из вышерасположенной кокильной части формы.

Сопоставление результатов моделирования характера формирования усадочных зон в отливке каландрового вала (рис. 5, а) с результатами производственного эксперимента, проведенного при такой же толщине стенки кокиля 100 мм как и для модели (см. рис. 2, б), дает основание считать их достаточно адекватными. Как в модели, так и реальной отливке области усадочных дефектов располагаются в верхней и нижней частях вала, а также на удалении 5-6 м от низа отливки.

Анализ результатов моделирования позволяет рассмотреть некоторые особенности затвердевания отливки и причины формирования локализованных зон усадочного происхождения в осевой области каландрового вала. При сифонном подводе наиболее холодный металл оказывается в верхней части формы, вследствие чего в первую очередь начинает затвердевать прибыльная зона отливки. Чем выше форма вала, тем сильнее проявляется температурная разница между «горячей» и «холод-

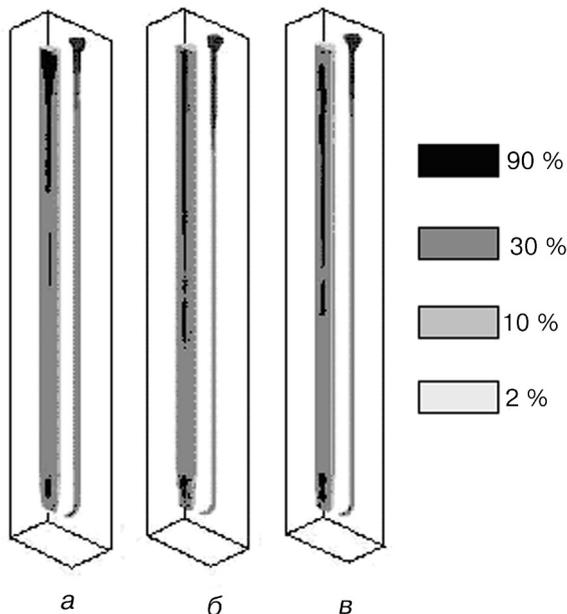


Рис. 5. Расчетные поля размещения усадочных дефектов в процессе затвердевания и охлаждения каландрового вала при толщине стенки кокиля 100 (а), 145 (б) и 175 мм (в)

ной» ее частями. Линии пересечения двухфазных зон с тепловой осью отливки на заключительных стадиях затвердевания движутся по ней в направлении от прибыльной к разогретой в процессе заливки нижней части формы (см. рис. 4), что создает отрицательно направленное затвердевание [5]. При этом в отливке образуется температурный перепад обратного знака, и область расплава может делиться на две или большее число частей [6, 7].

Б. Б. Гуляев [8] также отмечал, что вследствие неравномерного роста отдельных групп дендритов смыкание твердого металла в области тепловой оси отливки происходит неодновременно по всей ее длине, в результате чего могут образоваться перехваты. Это подтверждается [9] результатами зондирования затвердевающих отливок прокатных валков стальными щупами через прибыльную часть формы. Зондирование показало, что перехваты могут образовываться и на ранних стадиях затвердевания. Р. У. Радл [6] также указывал на возможность образования перехватов и мостов по длине (высоте) отливок при ускоренном поперечном затвердевании, что затрудняет свободное течение металла от горячих мест и создает условия для образования участков, затвердевание которых происходит изолированно.

Ликвационные явления, протекающие в процессе затвердевания отливки, могут, по-видимому, вносить значительные искажения в исходное распределение химических элементов в столбе жидкого металла. Химическая неоднородность, образовавшаяся в результате развития ликвационных явлений [10] в начальных стадиях затвердевания, может служить причиной неоднородности теплофизических свойств чугуна в различных участках отливки. Это, в свою очередь, определяет характер процесса затвердевания [8].

Отдельные группы дендритов, находящиеся в более благоприятных теплофизических и концентрационных условиях по сравнению с соседними участками, получают преимущественное развитие и создают предпосылки для образования перехватов. По мере роста слоя затвердевшего металла и продвижения фронта кристаллизации в направлении тепловой оси перехваты образуются, в первую очередь, в верхней части отливки.

Таким образом, моделирование процесса заливки в программе LVM Flow показало, что изменение условий затвердевания отливки посредством увеличения толщины стенки кокильной части формы от 100 до 175 мм повысило вероятность образования локализованных зон усадочного характера в осевой области отливки и не способствует формированию открытой усадочной раковины в прибыльной части отливки. Применение кокильной оснастки с толщиной стенки 100 мм является наиболее приемлемым технологическим решением. Такой вариант технологии предусматривает удаление нижней и прибыльной частей отливки с концентрированными усадочными дефектами и с остатками 30%-ной зоны усадочной пористости и формирование обеих шеек каландрового вала в «здоровой» части отливки путем механической обработки (см. рис. 1, а).

Следует отметить, что эксперименты с использованием традиционной в производстве прокатных валков стационарной прибыли для питания верхней шейки каландрового вала оказались недостаточно эффективными вследствие большой длины отливки. Одним из возможных путей активного воздействия на процессы формирования отливки каландрового вала может быть применение плавающих прибыльных вставок [11].

## **Выводы**

Результаты компьютерного моделирования показали возможность адекватно

прогнозировать расположение усадочных зон в центральных областях отливки каландрового вала, что позволяет эффективно влиять на условия ее формирования. Одним из путей повышения однородности свойств металла в центральных областях отливки является целенаправленное изменение толщины стенки кокильной части формы.



## Список литературы

1. Эксплуатация каландров и суперкаландров / А. Е. Кривошеев, О. В. Соценко, А. Ф. Каменев и др. – М.: Лесная промышленность, 1975. – 168 с.
2. Основы научных исследований в литейном производстве / А. Е. Кривошеев, Г. Е. Белай, О. В. Соценко и др. – Киев; Донецк: Вища школа, 1979. – 168 с.
3. *Акимов О. В., Марченко А. П., Алехин В. И.* Научные основы проектирования литых деталей блок-картеров ДВС // Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2009. – № 1. – С. 54-57
4. *Огородникова О. М., Кокушкин Н. В.* Разработка технологий литья под давлением цинковых сплавов в программной среде CAD/CAE/CAM // Литейн. пр-во. – 2010. – № 12. – С. 20-28
5. *Кривошеев А. Е., Соценко О. В.* Влияние химической неоднородности на качество и стойкость чугунных прокатных валков // Металлургия и коксохимия. – 1969. – Вып. 18. – С. 104-111.
6. *Радл Р. У.* Затвердевание отливок. – М.: Машгиз, 1960. – 392 с.
7. *Петриченко А. М.* Теория и технология кокильного литья. – Киев: Техника, 1967. – 250 с.
8. *Гуляев Б. Б.* Литейные процессы. – М.; Л.: Машгиз, 1960. – 416 с.
9. *Кривошеев А. Е.* Литые валки. – М.: Металлургиздат, 1957. – 360 с.
10. *Ефимов В. А.* Влияние конвективного тепло- и массопереноса на формирование отливок // Литейн. пр-во. – 1990. – № 11. – С. 4-8.
11. Определение температурного поля плавающей прибыльной вставки / В. Е. Хрычиков, В. Ю. Селиверстов, В. Ф. Мазорчук, Р. В. Усенко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – № 3. – С. 36-38

Поступила 25.02.2011

\*\*\*\*\*

## **Уважаемые подписчики!**

*Подписаться на журнал «Процессы литья»  
через Интернет  
можно на сайте ГП «Пресса» [www.presa.ua](http://www.presa.ua)  
с помощью сервиса «Подписка On-line».*

\*\*\*\*\*