

О.В. Соценко, д.т.н., профессор, А.В. Белич, аспирант (Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина)

# Компьютерное моделирование формирования макроструктуры отливок из легированной стали

*Выполнено многовариантное компьютерное моделирование формирования отливок из марганцевистой стали. Показана практическая возможность обеспечения высоких эксплуатационных свойств отливок на основе компьютерного анализа технологического процесса.*

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, марганцевистая сталь, усадочные дефекты, литье, экзотермическая вставка.

*Виконано багатоваріантне комп'ютерне моделювання формування виливків з марганцевистої сталі. Показана практична можливість забезпечення високих експлуатаційних властивостей виливків на основі комп'ютерного аналізу технологічного процесу.*

**Ключові слова:** комп'ютерне моделювання, марганцевиста сталь, усадкові дефекти, литво, екзотермічна вставка.

*The multiple computer design of forming of founding is executed from manganese steel. Practical possibility of providing of high operating properties of founding is shown on the basis of computer analysis of technological process.*

**Keywords:** computer design, manganese steel, shrinkage defects, casting, exothermic insertion.

## Анализ состояния проблемы.

Непрерывный рост объемов производства и переработки продукции в горнорудной, строительной и других энергоемких отраслях промышленности стран СНГ ставит перед необходимостью систематического улучшения качества износостойких деталей из стали 110Г13А для машин и агрегатов, поиска новых аналогов этой стали, сокращения сроков разработки технологии литья, удешевления выпускаемой продукции, повышения ее конкурентоспособности.

В последние годы решение этой проблемы сосредоточено в основном на трех направлениях: поиск новых экономичных износостойких сталей с пониженным содержанием марганца, дополнительным легированием и оптимальным соотношением Mn/C [1-6]; исследование механизма износа деталей в различных условиях эксплуатации [7]; усовершенствование процессов термической обработки отливок [8-11].

Все перечисленные направления и средства в разной степени эффективны для решения поставленной задачи. Нередко их реали-

зация приводит к существенному повышению стоимости отливок или увеличению сроков получения оптимального результата. Это в свою очередь снижает конкурентоспособность продукции.

Значительно меньше внимания уделяется модернизации и поиску оптимальных технологий с минимизацией газо-усадочных дефектов в отливках из высокомарганцевистых сталей [10] на основе современных методов компьютерного моделирования [12]. Опыт компьютерного 3D моделирования литых заготовок и деталей [12-19], накопленный за последние годы, показал высокую эффективность использования такого метода в разработке и совершенствовании технологических процессов. Исследование гидродинамических и тепловых процессов на 3D моделях дает достаточно объективную информацию о размерах и размещении в отливках усадочных дефектов.

Положительные результаты получены при компьютерном моделировании процессов литья насадок на шнеки промышленных смесителей [14, 15], дробильных

плит для горнорудного оборудования [16], крупных валов [17], колосников для агрегационных машин [19] и др. Сопоставление результатов компьютерного моделирования с результатами весьма трудоемких экспериментальных исследований показало высокую степень адекватности в определении зон формирования усадочных дефектов [17, 18].

Растущие требования промышленности можно успешно обеспечить при использовании современных программ компьютерного моделирования, которые позволяют выполнить разработку и усовершенствование технологии литейного производства в кратчайшие сроки. Метод «проб и ошибок», часто применяемый на литейных предприятиях, в условиях конкуренции нередко приводит к необходимости многократного исправления модельной оснастки, проведения дополнительных плавов и в итоге к неоправданно длительному периоду освоения новой продукции [12]. Обеспечение технолога-литейщика современной компьютерной техникой с комплексом программ, таких как

SolidWorks и LVMFlow, для твердотельного 3D-моделирования отливок и визуализации процессов заполнения формы металлом и затвердевания отливок позволяет выявлять прогнозируемые места образования усадочных дефектов и предлагать эффективные технологические решения для минимизации негативного влияния их на эксплуатацию литых деталей.

Высокое сопротивление износу поверхностей деталей в условиях ударно-абразивных нагрузок при сохранении пластических и прочностных свойств высокомарганцевой стали 110Г13Л обусловили целесообразность ее применения для изготовления целого ряда нагруженных деталей машин, в том числе для горнорудной промышленности. В качестве примера можно рассмотреть зуб ковша экскаватора. В производстве зубьев ковша экскаватора предъявляются высокие требования к химическому составу стали, её механическим свойствам, способу литья для получения отливок высокого качества.

Эффективным методом повышения качества отливок зуба ковша экскаватора может быть поиск оптимального технологического процесса с минимизацией газосадочных дефектов, литейных напряжений, засоров отливки неметаллическими включениями на основе современных методов компьютерного моделирования. Изготовление отливок по оптимизированной технологии позволяет получать высокие эксплуатационные и механические характеристики даже при условии ведения плавки методом переплава. Такой метод повышения качества отливок зубьев ковша экскаватора может позволить не только получить заданное качество литья, но и снизить расходы на ферросплавы и энергоносители при ведении плавки стали 110Г13Л традиционного химического состава.

**Постановка задачи.** Цель исследования – разработка и компьютерное моделирование технологического процесса литья зубьев для ковша экскаватора из стали 110Г13Л с минимизацией прогнозируемых усадочных дефектов и обеспечением высоких эксплуата-

ционных и механических свойств изготавливаемой продукции при одновременном снижении затрат на ее производство.

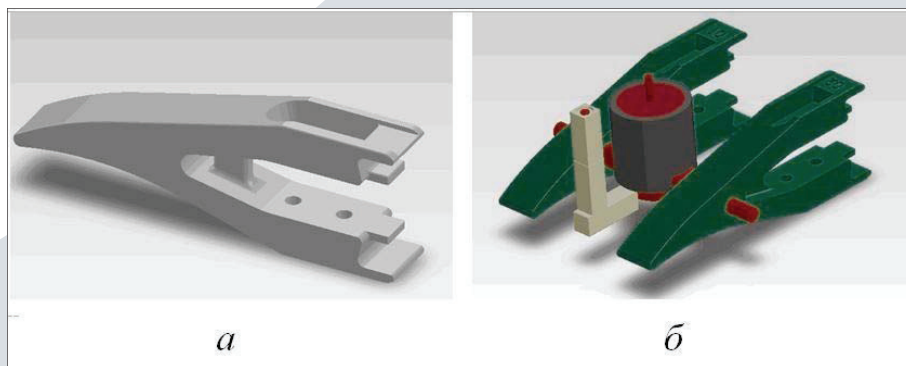
**Методика и результаты моделирования.** В качестве объекта исследования была выбрана отливка самозатачивающегося зуба ковша экскаватора. Масса детали 196 кг, габаритные размеры 1120x390x170 мм. Моделирование технологического процесса осуществлялось с использованием комплекса программ SolidWorks – LVMFlow. SolidWorks – система гибридного параметрического компьютерного моделирования. Программа предназначена для проектирования в трехмерном пространстве деталей и сборок (рис. 1, а, б) с возможностью проведения различных видов «экспресс-анализа» и создания технической документации на их основе. Программа LVMFlow применяется технологами литейных цехов для разработки литейной технологии с получением достоверных результатов моделирования, на основании которых проводится анализ и корректировка технологического процесса. В результате чего представляется возможность в кратчайшие сроки, в течение одного – двух рабочих дней подготовить технологию получения качественных отливок, минуя дорогостоящий этап получения пробной отливки [20].

При моделировании основных этапов и технологических вариантов формирования отливки в процессорном модуле «Полная задача» программы LVMFlow задавали следующие начальные параметры: материал отливки – сталь 110Г13Л,

формы и стержня – песчано-глинистая смесь; каналов питателей – шамот или материал формы; прибылей – экзотермический материал или материал формы; температура жидкого металла 1470°C; начальная температура формы 20°C; способ заливки – из стопорного ковша; условие прекращения расчетов – достижение температуры металла в форме 300°C.

Моделирование выполняли по пяти вариантам поисковых технологических решений (ТР) изготовления отливки, в которых опробованы различные сочетания размерных параметров прибылей и питающих перешейков, материалов прибыли и питателя. В качестве количественного критерия оценки размеров усадочных дефектов в отливке использовали отношение общей площади продольных сечений зон усадочных дефектов  $F_{yдо}$  к площади продольного сечения отливки  $F_o$ , выраженное в процентах. Эффективность использования металла прибыли оценивали аналогично по отношению площади усадочных дефектов  $F_{yдп}$  к площади продольного сечения прибыли  $F_n$ .

Области локализации усадочных дефектов определяли визуальным сравнением с цветовой палитрой (рис. 2, б). Для количественной оценки этих площадей была использована функция программы LVMFlow «вывод сетки», с помощью которой производили расчет площади выделенных сечений (рис. 2, в). Расчет вели с использованием ячеек размером 10x10 мм, на которые делится модель при выводе функции «вывод сетки».



**Рис. 1. Разработанная в SolidWorks в программе LVMFlow трехмерная модель отливки зуба ковша экскаватора (а) и сборки по оптимальному варианту технологического процесса (б)**

Ячейку размером 10x10 мм задавали в модуле программы LVMFlow «Начальные установки» при определении параметра «число ячеек/размер ячейки». Из заданного количества ячеек создается расчетное поле программы – объем, в котором находится модель и производится моделирование. От размера ячейки, на которые делится расчетное поле, зависит точность и скорость расчета. Заданный размер ячейки с учетом габаритов детали позволил получить достаточно высокую точность моделирования.

В процессе моделирования реализовали 5 вариантов технологических решений (ТР). Способы подвода металла в полость формы, размеры элементов литниковопитающей системы (ЛПС), а также оценки эффективности ТР приведены в таблице.

Проведенное компьютерное моделирование разных вариантов технологического процесса дало возможность определить характер развития усадочных, гидравлических и тепловых процессов в форме, контролировать давление жидкого металла на стенки литниковопитающей системы и формы во время заливки (рис. 3).

Анализ результатов моделирования показал, что все варианты литниковой системы обеспечивают допустимое давление металла на стенки формы, что исключает их размывание. Для технологического процесса ТР-5, который был практически реализован, выбрали подвод металла через керамическую трубку. Это позволило исключить попадание в тело отливки частиц материала литниковой системы и формы.

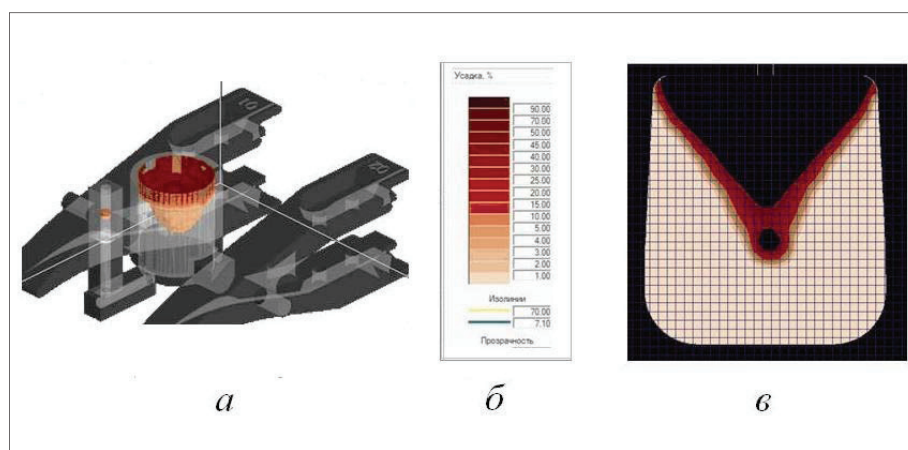
Следует отметить, что ТР3, ТР4 и ТР5 отличаются в основном разной длиной перешейка между отливкой и прибылью. Установлено, что помимо размеров прибыли именно длина перешейка является одним из важнейших параметров технологического процесса. Для ТР3 и ТР4 с экзотермическими вставками задавали большие значения длины перешейка, т.к. были опасения разрушения стенки между полостью формы и наружной частью экзотермической вставки. Эти ТР оказались не при-

годными для производства, т.к. перешеек перемерзает раньше чем прекращается питание отливки. Наиболее приемлемая длина перешейка, как видно из ТР1 и ТР5, равна 65 мм. Уменьшение длины перешейка для ТР5 может привести к разрушению стенки в форме при извлечении из нее модели верха.

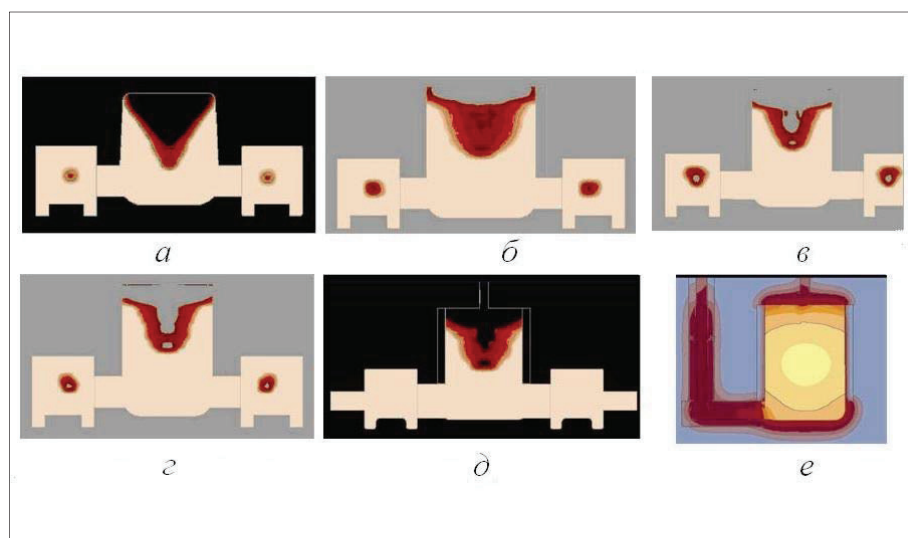
Размеры прибылей для технологий ТР2, ТР3, ТР4 и ТР5 существенно не изменялись, т.к. применяли промышленные экзотермические вставки производства Чехии с заданными размерами типоразмерами. Из результатов моделирования видно, что применение прибыли с

Ø250 мм и высотой  $h=300$  мм позволяет получить качественную отливку и использование прибыли большего типоразмера как в ТР2 не целесообразно.

По технологии ТР5 было отлито и поставлено заказчику 100 отливок зуба ковша экскаватора. На рис. 4 показаны отдельные элементы процесса производства отливок по технологии ТР5, основанной на результатах компьютерного моделирования. Термическую обработку отливок выполняли в электрической закалочной печи при температуре 1050 °С с выдержкой 5 часов. Все зубья ковша экскаватора отработали заданный предприятием-заказчиком срок эксплуатации.



**Рис. 2. Оптимальный вариант ТР 5:** области локализации усадочных дефектов (а) с цветовой палитрой (б); результат действия функции программы LVMFlow «вывод сетки» с размером ячейки 10x10мм (в)



**Рис. 3. Результаты моделирования:** а - ТР1, б - ТР2, в - ТР3, г - ТР4, д - ТР5, е - контроль температурных полей формы при оформлении канала питателя в керамике и использовании экзотермической прибыли

Таблица. Основные параметры и характеристики технологических решений

ТР	Рисунок	Способ подвода металла	Площади сечений, см <sup>2</sup>	Размеры прибыли, мм	Длина перешейка, мм	Масса ЛПС, кг	Отношение площадей сечений, %	
							$F_{удп}/F_{п}$	$F_{удо}/F_{о}$
ТР1	Рис. 3, а	Через шлаковик и 2 питателя в прибыль по линии разъема	$F_{шл} = 23,7$ $\Sigma F_n = 18,26$	Ø280 $h = 310$	65	156	35	0,5
ТР2	Рис. 3, б	Через питатель по линии разъема в экзотермическую прибыль ( $\delta = 25$ мм)	$F_n = 9,7$	Ø300 $h = 300$	71	160	35	0,5
ТР3	Рис. 3, в	То же	$F_n = 9,7$	Ø250 $h = 300$	96	165	30	1,1
ТР4	Рис. 3, г	Через прибыль по линии разъема в экзотермическую прибыль ( $\delta = 25$ мм)	$F_n = 9,7$	Ø250 $h = 300$	75	161	34	0,6
ТР5	Рис. 3, д	Через питатель из керамики в экзотермическую прибыль ( $\delta = 25$ мм)	$F_n = 9,7$	Ø250 $h = 300$	65	158	38	0

Примечание. В ТР2 – ТР5 диаметр нижней части прибыли 100 мм, в ТР1 – 120 мм. Во всех ТР использовали по 2 перешейка с площадью сечения 65 мм<sup>2</sup>.

## Выводы

Компьютерное моделирование позволило в полной мере спрогнозировать и оценить возможные результаты разрабатываемых технологических процессов литья деталей из стали 110Г13Л. Использование технологии по пятому варианту обеспечивает минимизацию литейных дефектов и высокие эксплуатационные свойства отливок, что подтверждено положительными результатами производственного освоения их литья и испытаний в промышленных условиях.

## Список литературы:

1. Малинов А.С. Ударно – абразивная износостойкость марганцовистых сталей с пониженным содержанием марганца. / А.С.Малинов., В.А.Малинов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1999. – № 6. – С. 39 – 42.

2. Чейлях А.П. Создание и управление свойствами экономнолегированных метастабильных сплавов нового поколения. // *Металл и литье Украины*, 2005. – №7-8. – С. 49–55.

3. Мулявко Н.М. Анализ эксплуатационной стойкости отливок из стали 110Г13Л // *Известия Челябинского научного центра*, вып. 4 (13), 2001. – С. 28-30

4. Мирзаев Д.А. Влияние металлургических факторов на механические свойства и износостойкость литых марганцовистых сталей / Д.А. Мирзаев, Ю.Д. Корягин, К.Ю. Окишев // *Известия Челябинского научного центра*, вып. 3, 1999. – С. 18-22

5. Сильман Г.И. Сплавы системы Fe–C–Mn. Часть 4. – Особенности структурообразования в марганцевых и высокомарганцевых сталях // *МиТОМ*. – 2006. – № 1. – С. 3 – 7.

6. Сильман Г.И. Сплавы системы Fe–C–Mn. Часть 5. – Особенности структурообразования в высокомарганцевых чугунах // *МиТОМ*. – 2006. – № 3. – С.3–8.

7. Галико А.В. Ударно-абразивное изнашивание деталей машин та агрегатів // *Наукові записки*. – Вип.8. – Кіровоград: КНТУ, 2007. – С. 77-78

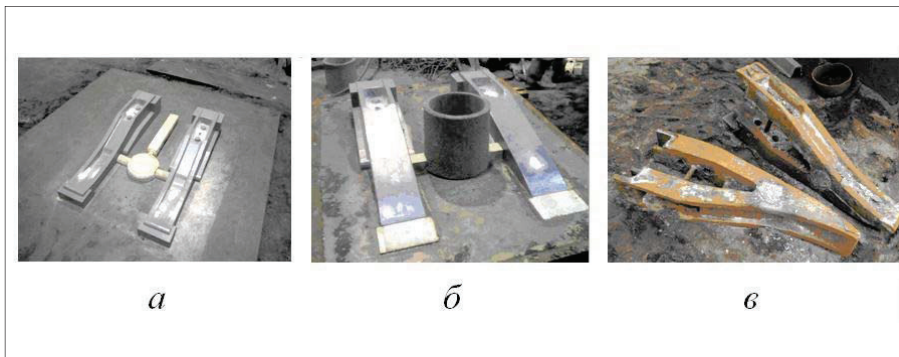


Рис. 4. Элементы реализованного технологического процесса TP5: модельная оснастка (а, б) и общий вид готовых отливок (в)

8. Малинов А.С. Использование эффекта самозакалки при нагружении, регулирование структуры и мартенситного превращения для повышения износостойкости экономнолегированных чугунов / А.С.Малинов, И.Е.Мальшева, В.А.Малинов // *Металл и литье Украины*. – 2001. – №10–11. – С. 12–15.

9. Ильинский В.А. Стабилизация свойств литой стали 110Г13Л / В.А. Ильинский, Н.И. Габельченко, Н.В. Волкова // VI Всероссийская научно-практическая конференция «Инновационные технологии в обучении и производстве», Камышин 15-16.12.2009, Материалы конференции, Том 3. – С. 47-49

10. Воронин Ю. Повышение качества литья, характерные особенности окисных газовых раковин / Ю. Воронин, С. Воронин // *Технической альманах «Оборудование»*, ноябрь 2006. – С. 49-55

11. Плюта В.А. Экономнолегированные износостойкие сплавы: проблемы и перспективы / В.А. Плюта, А.М.Нестеренко, С.В. Бобырь // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. Збірник наукових праць*. – 2008 - № 17. – С. 231-239

12. Турицев В. Автоматизация ОГМет: переход от метода «проб и ошибок» к современному производству! // *Литейщик России*. – 2010. – № 6. – С. 7-9

13. Акимов О.В. Научные основы проектирования литых деталей блок-картеров ДВС / О.В. Акимов, А.П. Марченко, В.И. Алехин // *Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов*, 2009. – №1. – С. 54-57

14. Посыпайко И.Ю. Оптимальные решения в технологии литья износостойких деталей для промышленных смесителей / И.Ю. Посыпайко, О.В. Соценко, С.И. Репях // *Металл и литье Украины*, 2012. – №6. – С. 17-23

15. Соценко О.В. Оптимальная технология литья износостойких накладок на шнеки смесителей / О.В. Соценко, И.Ю. Посыпайко // *Процессы литья*, 2012. – №6. – С. 41-49

16. Соценко О.В. Компьютерное моделирование процессов литья деталей из стали 110Г13Л / О.В. Соценко, А.В. Белич, И.Ю. Посыпайко // *Литейное производство*, 2011. – №7. – С. 36-39

17. Соценко О.В. Компьютерное моделирование процесса затвердевания крупногабаритных каландровых валов / О.В.Соценко, А.С. Снетков, А.В. Белич., И.А. Соковнин // *Процессы литья*, 2011. – №3. – С. 45-52

18. Соценко О.В. Практика и компьютерное моделирование литейных процессов / О.В. Соценко, А.С. Снетков // *Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов*, 2011. – №4. – С. 100-101

19. Рудницкий А.А. Усовершенствование конструкции литейной системы отливок колосников / А.А. Рудницкий, О.В. Соценко, А.В. Малый // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2007. – №4/1. – С. 36-40

20. Турицев В. Моделирование литейных процессов: что выбрать? CADmaster. – 2005. – № 2. – С. 33-35.