

УДК 621.743.074:544.332-971.2

Д.М. КУКУЙ, д-р техн. наук,  
Ю. Н. ФАСЕВИЧ,  
П.Е. ЛУЩИК (БНТУ),  
А.И. ТУРОК (РУП МТЗ)

### ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАБОТЫ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ПРИБЫЛИ

Основной задачей современного литейного и металлургического производства является создание конкурентоспособных изделий, обладающих высоким качеством и минимальной себестоимостью изготовления. Решение этой задачи осуществляется в определенной степени на стадии технологической подготовки производства, где предусматривается проектирование оптимальных технологических процессов, обеспечивающих получение заданного качества изделий.

Работа экзотермической вставки для прибыли определяется тем, как долго она может задержать отверждение металла внутри прибыли. Теплота, выделившаяся экзотермической вставкой, может замедлить или даже предотвратить потери теплоты от прибыли, тем самым замедляя формирование отливки на ранних стадиях отверждения, а также увеличивая общее время затвердевания прибыли. В отдельном случае вставка для прибыли может быть спроектирована таким образом, чтобы обеспечить теплотой перегрев металла в прибыли, что приведет к значительному увеличению времени отверждения.

По этой причине знание о выделяющейся теплоте от экзотермической вставки важно для правильного моделирования процесса отверждения металла в прибыли и определения питания металлом отливки. Однако здесь следует обратить внимание на своего рода непригодность программного обеспечения систем моделирования литейных процессов к точному решению задачи теплообмена

в литейной форме, изготовленной из различного материала. Использование при расчетах температурно-зависимых свойств компонентов как экзотермической смеси, так и формовочного материала литейной формы корректно при условии стабильности структуры смеси во времени при изменении температуры. В рассматриваемом случае нагрев сопровождается превращениями в компонентах материалов и фазовый переход, описываемый химическими реакциями, протекает в течение ограниченного промежутка времени, и нестабильность структуры будет определяться не только температурой, но и временем нахождения при данной температуре. Очевидно, что моделирование всего комплекса особенностей, которые приводят к высвобождению экзотермической теплоты, находится за пределами моделирования процесса литья.

Вместе с тем, современный рынок средств автоматизированного проектирования (CAD) и систем инженерного анализа (CAE) предлагает программные продукты, способные промоделировать потери теплоты, используя следующие параметры: удельная теплоемкость и тепловая проводимость материалов экзотермической вставки и литейной формы; температура, выше которой воспламеняется вставка и начинается реакция (температура воспламенения); промежуток времени, когда небольшой образец материала вставки высвобождает существенную энергию (время горения).

Особый интерес представляет пакет ProCAST, который является профессиональной и эффективной системой трехмерного компьютерного моделирования литейных процессов с использованием метода конечных элементов. В пакет ProCAST входит полностью автоматический генератор трехмерной сетки, а также интерфейс с наиболее распространенными системами трехмерного проектирования (CAD). Это одна из немногих доступных сегодня на рынке систем, которая обеспечивает полное совмещение моделирования тепловых процессов и процессов течения [1]. Среди пользователей в странах СНГ, уже успешно работающих с программным комплексом ProCAST, следует отметить одно из крупнейших предприятий Республики Беларусь – РУП «Минский тракторный завод».

Настоящая работа направлена на создание модели моделирования процесса изготовления отливок с применением прибылей, обогреваемых экзотермическими элементами. Применение такой технологии изготовления отливок обеспечивает сокращение метал-

лостности прибыли, повышение плотности отливки в процессе реализации технологического процесса изготовления. Наиболее успешной схемой проектирования является создание в каждом локальном объеме отливки необходимых температурных режимов направленного затвердевания.

Примером группы отливок, где важным является получение плотного строения металла, служат литые изделия, получаемые в сталелитейном цехе РУП «МТЗ». Эти отливки являются наиболее сложными для разработки литейной технологии, поскольку имеют протяженную или кольцевую форму при больших отношениях к ширине и толщине стенки. Для данной группы отливок все массивные узлы должны быть обеспечены прямым питанием массивных узлов при затвердевании. В качестве объекта для компьютерного моделирования и проверки эффективности применения прибылей, обогреваемых экзотермическими элементами, была выбрана стальная отливка 2522-2407536A1 «Водило».

На начальном этапе, анализируя температурные поля рассматриваемой отливки, были выявлены зоны с наибольшей продолжительностью затвердевания для металла отливки. Отдельные зоны отливки, в которых происходило образование литейных дефектов (рис. 1), имели пониженные значения параметра направленности

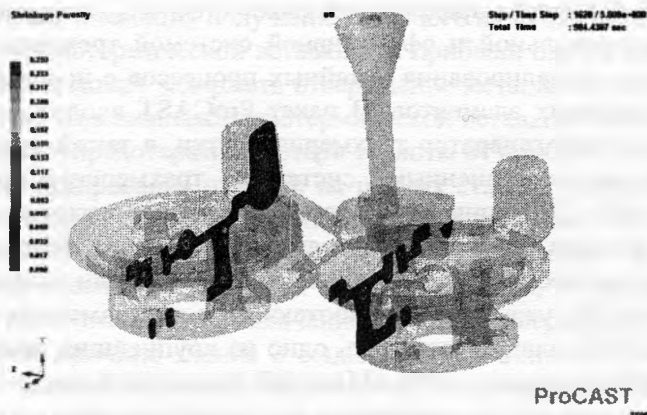


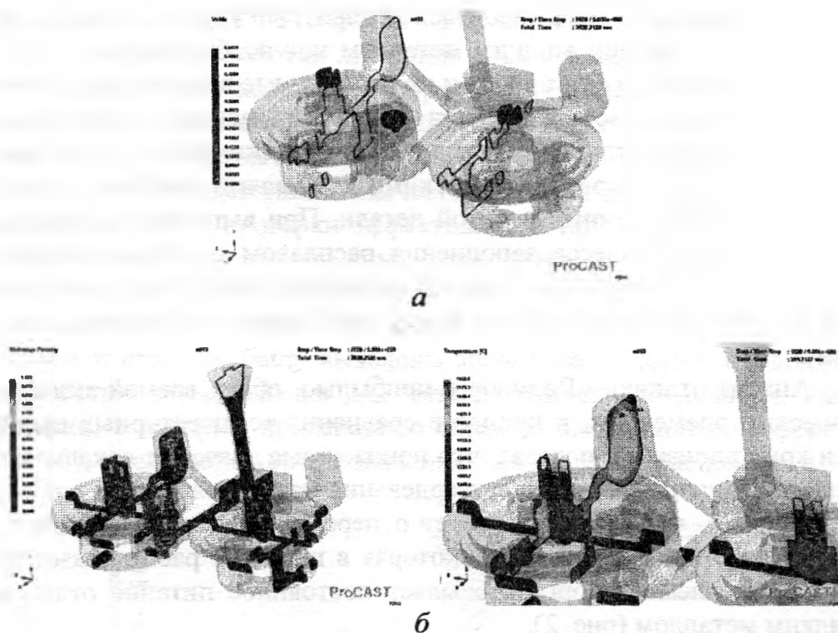
Рисунок 1 – Компьютерная модель исходной отливки с литниковой системой

затвердевания из-за отсутствия питания. Для осуществления наилучшего питания необходимо, чтобы жидкий металл подавался в подобные зоны в течение всего времени кристаллизации, что обеспечивается оптимальным расположением прибыли, обогреваемой экзотермическим элементом. Размер экзотермической прибыли определялся геометрией горизонтальных сечений отливки и объемом термического узла, соответствующего необходимому моменту затвердевания, когда сформировался дендритный каркас отливки, и в дальнейшем питании жидким металлом нет необходимости. Установка экзотермической прибыли на выявленные в процессе анализа отливки зоны образования дефектов основывалась на усилении степени направленного затвердевания. В результате было обеспечено точное перекрытие экзотермическими прибылями наиболее холодных зон, обнаруженных в литой детали. При выполнении численных расчетов процесса заполнения расплавом с использованием компьютерной модели выбранной отливки с измененной литниковой системой окружающая их форма разбивалась на конечные элементы.

Анализ отливки «Водило» с прибылью, обогреваемой экзотермическим элементом, в процессе сравнения температурных полей при кристаллизации показал, что пониженные значения локального параметра направленности затвердевания находятся только в объеме прибыли, что свидетельствует о перемещении температурного центра из отливки в прибыль, которая в процессе работы экзотермического элемента организует постоянное питание отливки жидким металлом (рис. 2).

Изменение темпа образования твердой фазы приводит к увеличению продолжительности затвердевания. Кинетические особенности работы экзотермической прибыли, как показал анализ режима питания, на начальном этапе затвердевания приводят к образованию 25% твердой фазы за счет большого температурного градиента между жидким металлом и экзотермическим элементом. Далее в условиях выделения теплоты происходит разогрев металла в прибыли и снижение образования до 1-3% твердой фазы, при этом полностью происходит формирование дендритного каркаса отливки. По окончании работы экзотермического элемента подпитка отливки жидким металлом происходит в междендритных каналах, вместе с тем снижается объем усадки металла, находящегося в зоне околосо-

лидусной температуры. Анализ кинетики образования твердой фазы показал, что при добавлении жидкого металла в отливку через прибыль, которая обогревается экзотермическим элементом, происходит увеличение продолжительности затвердевания, что способствует наилучшей подпитке дендритного каркаса отливки [2].



*а* – отливка с литниковой системой после кристаллизации; *б* – разрез по температурному центру в процессе работы экзотермического элемента

Рисунок 2 – Результаты моделирования литейного блока отливки, выполненной при помощи СКМ ЛП ProCAST

Для проведения промышленных испытаний и подтверждения данных, полученных при компьютерном моделировании, были изготовлены промышленные отливки по новой технологии с применением прибылей, обогреваемых экзотермическими элементами. Судя по уровню достигнутого технологического выхода годных

отливок (рис. 3), а также проведенных сопоставлений расчетных контуров отливки при помощи системы компьютерного моделирования литейных процессов ProCAST, получен оптимальный технологический вариант изготовления качественной отливки с плотным строением металла.

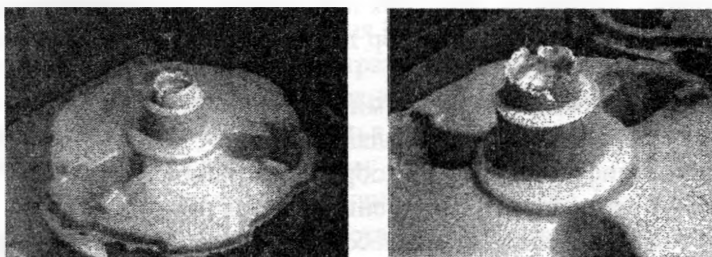


Рисунок 3 – Отливка «Водило», полученная по технологии с применением экзотермической прибыли

### Литература

1. **Монастырский, А. В.** Моделирование литейных процессов / А. В. Монастырский // Литейное производство. – 2009. – № 2. – С. 29–34.

2. **Структурообразование и свойства стали в отливках** / Л. В. Десницкая [и др.]. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского института машиностроения, 2004.

УДК 621.74:669.714

**Е.И. МАРУКОВИЧ**, д-р техн. наук,  
**В.Ю. СТЕЦЕНКО**, канд. техн. наук (ИТМ НАН Беларуси)

### МОДИФИЦИРОВАНИЕ СПЛАВОВ СТРУКТУРНО-ВЫСОКОДИСПЕРСНЫМИ СИЛУМИНАМИ

Основная масса отливок для машиностроения изготавливается из сталей, чугунов, силуминов и бронз. В настоящее время главным