

УДК 621.74.045

**Н. И. Буровский, В. С. Дорошенко, Н. В. Бабич**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

### **ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ОБОГРЕВ ПРИБЫЛЕЙ ПРИ ЛИТЬЕ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ\***

*Отработаны три способа изготовления экзотермических (ЭТ) вставок с использованием газифицируемой модели в качестве несущей конструкции. Способы включают применение углеводородных материалов без дополнительного загрязнения формовочной песчаной смеси, находящейся при ЛГМ в многократном обороте. Расчетом затрат на производство разработанных ЭТ-вставок за счет выбора оптимального сырья, имеющегося на отечественном рынке, подтвердили эффективность их применения. Предложена концепция компьютерного моделирования геометрической формы прибыли в условиях ЛГМ.*

**Ключевые слова:** экзотермические вставки, прибыль отливки, ЛГМ-процесс, моделирование, термокомпактированные отходы.

*Відпрацьовано три способи виготовлення екзотермічних (ЕТ) вставок з використанням газифікованої моделі в якості несучої конструкції. Способи включають застосування вуглеводневих матеріалів без додаткового забруднення піщаної формувальної суміші, що знаходиться при ЛГМ в багаторазовому обороті. Розрахунок витрат на виробництво розроблених ЕТ-вставок за рахунок вибору оптимальної сировини, наявної на вітчизняному ринку, показав ефективність їх застосування. Запропоновано концепцію комп'ютерного моделювання геометричної форми надливу в умовах ЛГМ.*

**Ключові слова:** екзотермічні вставки, надлив, ЛГМ-процес, моделювання, термокомпактовані відходи.

*Three exothermic sleeves manufacturing method using a consumable pattern as a supporting structure. The methods include the use of hydrocarbon materials without additional pollution molding sand mixture kept at Lost Foam Casting in multiple turnover. Calculation of production costs developed exothermic inserts by selecting optimal raw materials available in the domestic market, confirmed the effectiveness of their application. The concept of computer modeling of geometrical forms arrived at Lost Foam Casting was proposed.*

**Keywords:** exothermic sleeves, profit casting, Lost Foam Casting, simulation, heat compacted waste.

С увеличением производства и постоянного обновления продукции машиностроения повышаются требования к качеству литых деталей машин с учетом снижения расхода металла при их изготовлении. Многочисленные исследования и литейная практика показали, что получение качественных отливок с высоким вы-

---

\*Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. О. И. Шинского

## Новые методы и прогрессивные технологии литья

ходом годного при литье как в песчаные, так и металлические формы возможно с использованием обогреваемых прибылей. С этой целью применяются экзотермические (ЭТ) вставки в литейные формы в виде оболочек, оформляющих полость прибыли, и вставки в виде усеченных конусов, цилиндров, закрепляемых в полости формы к ее стенке [1].

ЭТ-вставки обеспечивают подогрев металла в прибыли, увеличивая время питания затвердевающей отливки жидким металлом, что способствует снижению брака литья по усадочным дефектам, а также увеличению выхода годного за счет снижения массы прибылей. Некоторые отечественные предприятия предлагают поставку литейным цехам ЭТ оболочек и вставок для прибылей. Конусные или цилиндрические вставки нагревают верхнюю часть прибыли, по массе они в несколько раз легче, чем оболочки, однако оболочки, которые применяют чаще, надежнее крепятся в песчаной форме без опасности смещения и деформации такой формы.

В последние десятилетия в литейной практике все шире внедряется технология литья по газифицируемым моделям (ЛГМ-процесс). Однако описание применения ЭТ-вставок для подогрева металла в прибылях при ЛГМ-процессе не обнаружено. Об актуальности экономии металла в этом процессе свидетельствуют типовые примеры пенопластовых моделей, показанные на рис. 1. Модели подготовлены для формовки при получении стальных отливок массой 100-1000 кг и габаритными размерами до 1,5 м, фото выполнены в действующих отечественных литейных цехах. Верхние части моделей имеют массивные прибыли, в поперечном сечении приближающиеся по форме к квадрату. Переход на шарообразные прибыли, описанные ниже, с ЭТ-вставками позволит существенно сократить массу таких прибылей при стоимости литого металла не менее половины стоимости отливки.

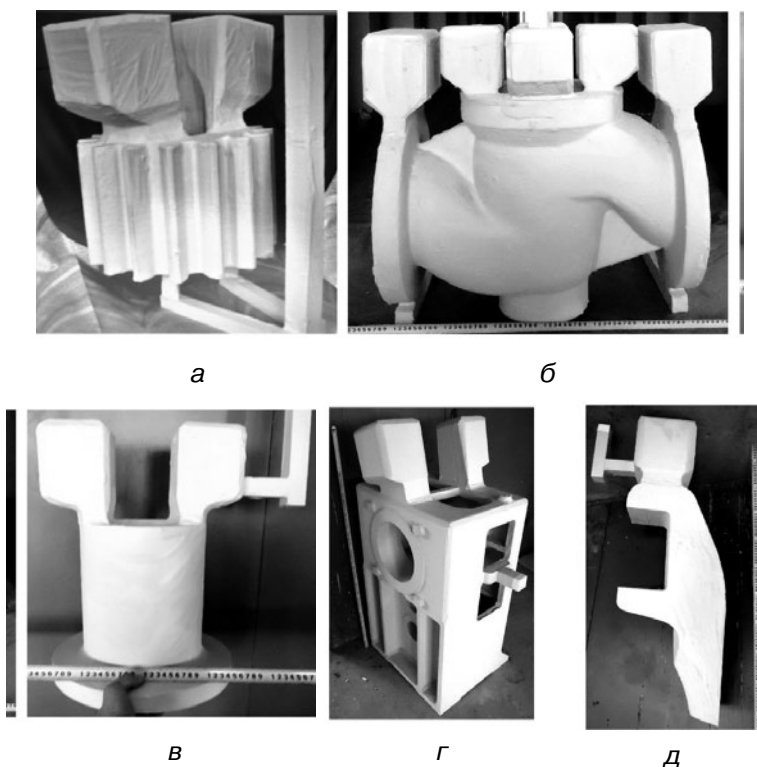


Рис. 1. Модели стальных отливок: а – шестерни; б – задвижки; в – патрубка; г, д – корпусных отливок

Проводимые под руководством проф. О. И. Шинского в ФТИМС НАН Украины исследования по совершенствованию ЛГМ-процесса, направленные на повышение

качества отливок и улучшение экономических показателей производства, включают разработку и использование ЭТ вставок в виде конуса-патрона, которые удобно помещать перед формовкой в изготовленную для этого полость в верхней части модели прибыли. При этом реализуется то преимущество газифицируемой модели, что она выполняется с емкостью или приемной камерой для конусной ЭТ-вставки, служит ее носителем и не усложняет процесс формовки, в отличие от пустотелой песчаной формы, формовка которой включает операции установки ЭТ-вставки на модель или в форму с формированием ниши для этой вставки.

На начальном этапе выполнения работ определили составы реакционных смесей для изготовления ЭТ-вставок на основе анализа стоимости соответствующих наличных на отечественном рынке промышленных материалов и опробования реакционной способности ряда выбранных материалов в литейном цехе. Основным компонентом в реакционной смеси восстановителем выбрали алюминиевый порошок марки АПВ (ТУ 48-5-152-78). В качестве окислителя использовали железорудный концентрат производства Полтавского ГОК для окатышей (ТУ 14-9-248-82). Это недефицитный и дешевый материал (по сравнению с другими железокислыми материалами), который содержит до 92 % оксидов железа, имеет пылевидную фракцию, что позволяет при его использовании исключить трудоемкую операцию измельчения (помола). В партии железорудного концентрата, взятой для проведения экспериментов,  $Fe_2O_3$  составлял 58,0; FeO – 28,0;  $SiO_2$  – 11,0; остальные 5 % – оксиды Ca, Mg и Al. Несложные расчеты показывают, что для полного протекания реакции алюминия с оксидом железа из рудного концентрата его содержание должно составлять 22,7 %. Учитывая наличие оксидной пленки на поверхности частиц алюминиевого порошка, его содержание в реакционной смеси увеличили до 25,0 %. Таким образом, соотношение реагентов в смеси – оксидов железорудного концентрата и алюминиевого порошка составляет 3:1 по массе. Следует отметить, что высокая реакционная способность окислителя в силу его мелкодисперсности позволяет значительную часть (до 80 %) алюминиевого порошка в составе смеси заменить мелкой стружкой – отходами механической обработки алюминиевых деталей.

При выполнении термодинамических расчетов экзотермической реакции реакционной смеси выбранного состава определили, что при реакции 1 г Al (масса реакционной смеси 4 г) выделяется ~3,5 ккал тепла. При сгорании 1 г реакционной смеси выделится ~0,9 ккал тепла. Такого количества тепла достаточно для нагрева жидкой стали (теплоемкость 0,2 ккал/(кг·K) массой 0,18 кг на 100 K. Согласно экспериментальным данным [1] для теплофизических расчетов, а также расчетов эффективности применения ЭТ-вставок, по сравнению с традиционными технологиями [2, 3], при получении стальной отливки по ЛГМ-процессу приняли следующие значения расхода металла при массе отливки 100 кг; литниковой системы – 15 кг и массе прибыли – 25 кг.

В работе по оптимизации технологии питания прибыли за счет применения ЭТ-вставок и минимизации формы прибыли с учетом данных [3] выполняли техническое задание по уменьшению расхода металла на прибыльную часть отливки на 10 % до 22,5 кг. В расчетах приняли, что для обеспечения продолжительности работы такой прибыли до момента завершения затвердевания отливки достаточно повысить температуру жидкого металла в ней на 100 K, для чего необходимо израсходовать:  $Q = 22,5 \text{ кг} \cdot 0,2 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{K}) \cdot 100 \text{ K} = 450 \text{ ккал}$  тепла.

Такое количество тепловой энергии выделится при реакции активных компонентов ЭТ-смеси массой 500 г. Следует отметить, что экзотермические реакции смеси протекают в закрытом объеме песчаной формы, и выделяющаяся тепловая энергия преобладающим образом трансформируется в полезную – для нагрева металла в прибыльной части отливки. Однако, тепловые потери неизбежны, в дальнейших расчетах они приняты на уровне 30 %, а коэффициент полезного использования тепловой энергии составит 70 %. Следовательно, для нагрева металла прибыли

массой 22,5 кг на 100 К массу ЭТ смеси необходимо увеличить до 714 г с количеством в ее составе алюминиевого порошка 179 г.

На этапе проектирования технологии изготовления ЭТ-вставок для ЛГМ-процесса были предложены три варианта. В первом, простейшем варианте, такую вставку изготавливали путем дозирования по массе сыпучей ЭТ смеси с упаковкой ее в пакет из синтетической пленки или в плотно заклеенный скотчем разовый стакан из полимерного листа в виде капсулы. Сыпучую ЭТ-смесь в такой «мягкой» упаковке размещали в специально вырезанной или отформованной полости модели прибыли из пенополистирола. В процессе заливки при достижении контакта жидкого металла с ЭТ-смесью и ее возгорании происходит интенсивная экзотермическая реакция со значительным выделением газообразных продуктов, что может повлиять на качество отливки, а также привести к выплеску металла из формы. Во избежание взрывного характера реакции интенсивность горения ЭТ-смеси понижали добавкой наполнителя, не участвующего в реакции, в качестве которого использовали вспученный перлит или измельченные термокомпактированные отходы полистирола в эквивалентном количестве. Легковесный перлит в контакте с жидким металлом вытесняется на зеркало металла прибыли и служит эффективным теплоизолирующим покрытием его поверхности.

Второй вариант предусматривал изготовление специальных экзотермических вставок в виде цилиндров или усеченных конусов по ранее отработанной технологии получения в пресс-формах газифицируемых моделей с так называемыми имплантатами, которыми ранее служили добавки для легирования или модифицирования металла отливки. Поскольку полистирол является основным материалом моделей в ЛГМ-процессе, то при изготовлении ЭТ-вставок его применяли как связующий материал [4]. Это позволило отказаться от других традиционных связующих (глина, жидкое стекло [3]) для таких вставок и таким образом исключить излишнее загрязнение формовочной смеси, находящейся в многократном обороте, продуктами термодеструкции и шлаками без усложнения ее частичной регенерации, применяемой в литейных цехах. Что касается газов, выделяющихся при газификации пенополистироловой модели с такой вставкой, то они не превышают количества газов, которое выделяется при выгорании пенополистироловой модели без использования ЭТ-вставки, поскольку на изготовление модели прибыли без вставки обычно расходуется большее количество пенополистирола, чем для уменьшенной модели со вставкой. При отработке процесса получения ЭТ-вставки тщательно перемешанный конгломерат, состоящий из реакционной смеси и подвспененных гранул полистирола, спекали в пресс-форме при температуре ~130°C. При изготовлении ЭТ-вставок таким способом удовлетворительные результаты получены при соотношении объемных количеств сыпучей реакционной смеси и подвспененного полистирола, не превышающих соотношения 1:7. Изделия не осыпались, обладали достаточными прочностными характеристиками, необходимыми для последующего применения в литейной форме или транспортировки.

В третьем варианте ЭТ-вставки изготавливали с использованием термокомпактированных отходов полистирола в качестве связующего, с предварительным их измельчением до фракционного состава <0,5 мм. После перемешивания эквивалентных (1:1) количеств реакционной смеси и отходов полистирола их спекали при температуре ~160 °C, аналогично работам [4, 5]. Полученные ЭТ вставки имели высокие прочностные характеристики. Объем их уменьшился (по сравнению с предыдущим вариантом изготовления) в 3 раза при одинаковых теплотворной способности и технологии применения. Такое техническое решение позволяет повторно использовать отходы полистирола вместо весьма недешевой их утилизации. Поэтому этот способ изготовления, учитывая вторичное использование сырья и экологическую актуальность, является наиболее предпочтительным.

## Новые методы и прогрессивные технологии литья

В основу оценки экономического эффекта от использования ЭТ-вставок взяты данные, приведенные в работе [2]. Согласно этой информации при годовой программе отливки «корпус» в 2500 шт (масса отливки 106 кг, цена 1 кг отливки – 20 грн/кг) в литейном цехе достигается экономический эффект в объеме 424 тыс. грн при расходе на закупку экзотермических вставок на сумму 125 тыс. грн (2 вставки на 1 отливку по цене 25 грн/шт). Для стальной отливки массой 106 кг авторы статьи провели оценочные расчеты себестоимости изготовления таких ЭТ-вставок для ЛГМ-процесса из предложенного нами состава вставки, что показано в таблице. При этом использовали порошок АПВ стоимостью 25,68 грн/кг, приобретенный у ООО «Втортех» (г. Киев).

### Материальные расходы на ЭТ-вставки для стальной отливки массой 106 кг

Перечень расходов	Объем затрат	Цена за единицу	Стоимость, грн
Al - порошок	0,19 кг	25,68 грн/кг	4,88
Железородный концентрат	0,57 кг	1 грн/кг	0,57
Пенополистирол термо-компактированный	0,1 кг	–	–
Пенополистирол суспензионный	0,1 л	1 грн/л	0,1
Время на изготовление 1 чел.	0,1 ч	30 грн/ч	3
Расход электроэнергии	1,0 кВт·ч	2 грн/(кВт·ч)	2
Всего	–	–	10,55

Как следует из данных таблицы, себестоимость ЭТ-вставки составит 10,55 грн. Если при изготовлении ЭТ-вставок 80 % Al порошка заменить измельченной стружкой стоимостью ~ 6 грн/кг, то стоимость ЭТ-вставки составит 7,56 грн. Таким образом, только по стоимости ЭТ-вставок возможна экономия 39,45 грн на одну отливку или 372 грн на тонну литья. Экономическая эффективность сохраняется и в случае, если увеличить расходы по изготовлению ЭТ вставок в 2 раза для повышения температуры жидкой стали в прибыли примерно на 200 К. Экономия литого металла и типовые составы ЭТ-вставок определяются в процессе опытно-промышленной отработки технологии в конкретном литейном цехе.

В ходе оптимизации проектирования технологии литья также анализировали геометрическую форму прибыли с точки зрения минимизации расхода металла,

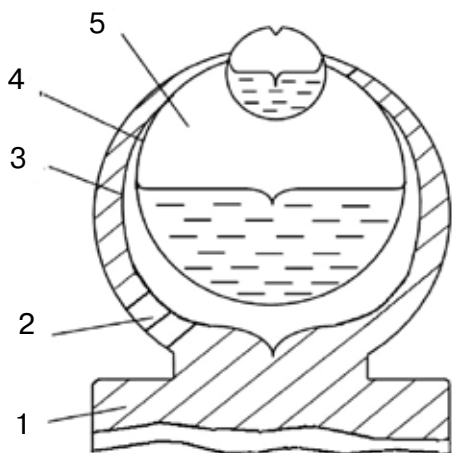


Рис. 2. Схема питания отливки шаровой прибылью при ЛГМ: 1 – отливка; 2 – прибыль; 3 – корка металла; 4 – окружность; 5 – газовая фаза

взяв за основу шаровую прибыль и учитывая специфику затвердевания металла на поверхности вакуумируемой песчаной формы, традиционной для ЛГМ-процесса. Концептуальный подход показан схематически на рис. 2, где условно представлены часть отливки 1 и прибыль 2 в разрезе. В отливку 1 из прибыли 2 движется вниз жидкая фаза по мере питания. Жидкий металл, начиная с момента контакта, удерживается вакуумом на поверхности формы и затвердевает в виде корки 3. Критичным для питания является сохранение зеркала металла в жидком виде, при этом минимальный теплоотвод объема металла обеспечивает форма шара, изображенная окружностью 4 на схеме питания прибыли.

Рассмотрим вертикальный ряд окружностей возрастающего диаметра вокруг опускающегося вниз зеркала металла, две

из которого показаны на рис. 1. Анализируя теплоотвод с подвижной границы контакта жидкой (показана штриховкой) и газообразной 5 фаз, считаем, что минимальный теплоотвод от металла в прибыли, имеющей очертания стопки шаров, можно обеспечить геометрической формой прибыли, представив ее в виде усеченного конуса, переходящего к низу в шар, что напоминает по форме луковицу.

В ходе исследований по научной теме автоматизации проектирования оптимальных литых конструкций и процессов их получения уточнение геометрической формы прибыли в условиях ЛГМ предложено выполнить методом моделирования с помощью компьютерных программ. Аналогично методу выкатывающихся окружностей снизу вверх [6] концепция питания прибыли как техническое задание для математического моделирования представлена в виде метода «вкатывающихся окружностей» сверху вниз. Совместное моделирование затвердевания отливки методом двух встречных «потоков» выкатывающихся и вкатывающихся окружностей, которые в месте стыка теплового узла отливки с прибылью создают условия вывода возможных дефектов в зону прибыли, позволит оптимизировать форму прибыли с учетом условий ЛГМ-процесса и применения ЭТ-вставок. Восходящий поток окружностей моделирует вывод усадочных дефектов, нисходящий – питание жидким металлом. Конечные окружности двух «потоков» совмещаются друг с другом в месте контакта прибыли с отливкой. Моделирование корректируется по результатам экспериментов получения отливок, в частности, включая заливку с одного стояка в литейной форме двух симметрично расположенных одинаковых отливок с различными видами прибылей, термометрию затвердевания металла над тепловым узлом и величину усадочных пустот в удаленном твердом остатке прибыли без проникновения их в тело отливки.

Таким образом, реализуя то преимущество газифицируемой модели, что она используется как несущая конструкция для ЭТ-вставки без усложнения процесса формовки (в отличие от пустотелой песчаной формы) в процессе технологической подготовки использования ЭТ-прибылей в опытно-промышленных условиях отработали три способа изготовления ЭТ вставок, которые включают применение углеводородных материалов, дополнительно не загрязняющих песчаную смесь, находящуюся при ЛГМ в многократном обороте. Оптимальный выбор сырья из материалов, имеющихся на отечественном рынке, и проведенный расчет затрат на производство разработанных ЭТ-вставок подтвердили эффективность их применения. Сформулировано техническое задание и концепция моделирования геометрической формы прибыли в условиях ЛГМ с помощью компьютерных программ.



### Список литературы

1. Ветишка А. Теоретические основы литейной технологии / А. Ветишка, Й. Брадик, И. Мацашек, С. Словак. – Киев: Вища шк., 1981. – 381 с.
2. Виноградов О. Н. Экзотермические прибыли – расчет эффекта от использования. URL: [op-v.com.ua/новости-и-статьи/технологии-и-наука/ekonomicheskaya-effektivnost-ispolz/](http://op-v.com.ua/новости-и-статьи/технологии-и-наука/ekonomicheskaya-effektivnost-ispolz/) (дата обращения: 12.06.2014).
3. Максимик М. Ю. Отработка состава экзотермических вставок для обогрева прибылей при изготовлении отливки ступица колеса прицепа в условиях стальной цеха № 2 РУП «МАЗ» // IX Респ. студ. научно.-техн. конф. 23-25.04.2008. – Минск: УП «Технопарк БНТУ «Метолит», 2008. – С. 26-27.
4. Термокомпактирование отходов пенополистирола / О. И. Шинский, О. А. Тихонова, А. А. Стрюченко и др. // Твердые бытовые отходы. – 2011. – № 4. – С. 48-50.