

УДК 621.74.045

В. С. Дорошенко, В. О. Шинский

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ПРИМЕРЫ РАСЧЁТОВ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ ПО РАЗОВЫМ МОДЕЛЯМ

Приведены примеры расчетов себестоимости и затрат на материалы и энергию при производстве отливок тремя способами точно литья. Сравнение технико-экономических показателей процессов литья по выплавляемым, газифицируемым, и ледяным моделям будет способствовать оптимальному выбору таких процессов для конкретной номенклатуры продукции литейного цеха. Криотехнологии литья по ледяным моделям увеличивает затраты на электроэнергию, но уменьшает стоимость литья за счет недорогих материалов и предотвращает ущерб окружающей среде.

Ключевые слова: литье по выплавляемым моделям, литье по газифицируемым моделям, литье по ледяным моделям, экономические показатели, криотехнология, экология, ФТИМС НАНУ.

Наведено приклади розрахунків собівартості і витрат на матеріали та енергію при виробництві виливків трьома способами точно лиття. Порівняння техніко-економічних показників процесів лиття за моделями, що виплавляються, газифікуються, і крижаними сприятиме оптимальному вибору таких процесів для конкретної номенклатури продукції ливарного цеху. Криотехнологія лиття за крижаними моделями збільшує витрати на електроенергію, але зменшує вартість литва за рахунок недорогих матеріалів і запобігає шкоди навколишньому середовищу.

Ключові слова: лиття за моделями, що виплавляються, моделі газифікуються, lost foam casting, крижані моделі, економічні показники, криотехнологія, литво, ФТИМС НАНУ.

The review gives examples of calculations of costs and the cost of materials and energy in the production of castings in three ways precision casting. Comparison of the technical and economic indicators of investment casting process, lost foam casting and casting with icy patterns will facilitate the optimal choice of these processes for a specific range of products of the foundry. Investment casting with ice patterns increases energy costs, but reduces the cost of casting by low-cost materials and prevents damage to the environment.

Keywords: precision metal casting, lost foam casting, investment casting with ice patterns, lost wax casting, evaporated patterns, cryotechnology, economic indicators, PTIMA NASU.

Одним из главных направлений развития литейных процессов является снижение металлоёмкости отливок для машиностроения, в первую очередь транспортных средств с учётом роста их эксплуатационного ресурса [1]. С этой целью проводятся исследования под руководством проф. О. И. Шинского по теме «Разработка научных и технологических основ по созданию литых конструкций из чёрных и цветных сплавов, оптимальных процессов их получения и автоматизированных методов проектирования». Наиболее точные сберегающие металл отливки получают специальными методами литья, в частности, в неразъёмных песчаных формах по разовым моделям. Примерам расчёта экономических затрат таких литейных процессов и сравнению их по степени ресурсосбережения посвящён настоящий обзор.

Малая металлоёмкость и высокая точность литых деталей по разовым моделям достигается, главным образом, путём минимизации припусков и уклонов при их производстве, отсутствием сборки песчаных форм с присущими ей перекосами, а также высокими прочностями применяемых песчаных форм. Принципиальным подходом в указанных исследованиях является планомерное сочетание процессов точного литья (near net shape, precision casting) с технологиями выплавки высокопрочных сплавов.

Наиболее широким охватом размерных и массовых характеристик отливок, получаемых по разовым моделям, обладает процесс литья по газифицируемыми моделям (ЛГМ, Lost Foam Casting). Отработанные способы ЛГМ-процесса в вакуумируемые формы, уходя от таких энергоёмких, трудоёмких и экологически небезопасных процессов, как приготовление формовочных и стержневых смесей, изготовление из них традиционным способом форм и стержней, выбивка отливок, сокращают затраты на обрубку и очистку отливок более чем на 50 %. Исключение из технологического процесса таких трудоёмких операций позволяет достичь снижения трудоёмкости производства отливок на 20-40 %, численность производственного персонала в 1,5-2,0 раза и площади в 2-3 раза по сравнению со способами литья в песчаные формы (называемыми основными). Отсутствие традиционных форм и стержней при производстве отливок массой до 1000 кг позволяет сократить количество основных модельно-формовочных материалов до 4-х: кварцевый песок, противопопригарные покрытия, пенополистирол, плёнка полиэтиленовая, расход которых на 1 т литья составляет: 100-150 кг, 25 кг, 6 кг и 10 м², соответственно [2].

Производство 1 тонны литья из железоуглеродистых сплавов традиционными технологиями формообразования потребляет не менее 400 кг свежих формовочных песков, 100 кг бентонита, 80 кг химически твердеющих связующих, 80 кг противопопригарных покрытий, а так же 30 кг различного вида добавок. Отсутствие разъёма формы, свойственное традиционным способам литья, размещение моделей и отливок по всему объёму контейнера с песком при ЛГМ повышает выход годного по стальному и чугунному литью до 70-90 %. Применение ЛГМ повышает размерную точность мелких и средних отливок до уровня 6-7 класса по ГОСТ Р 53464-2009 (26645-85) против 9-11 класса для литья равноценных деталей с традиционными видами формовки, что позволяет снизить массу литья не менее 15 %, а в случае замены литья по выплавляемым моделям равнозначной точности обеспечить снижение энергетических, материальных затрат и трудоёмкости в 2-4 раза [2].

Характеризуя ЛГМ как самый перспективный процесс изготовления отливок малой массы, ранее в работе [3] дано ориентировочное сравнение показателей пяти современных способов литья (табл. 1).

В работе [2] представлен постатейный расход и стоимость основных материалов для промышленного производства мелких и средних отливок из чёрных и цветных сплавов заданного химического состава в современных условиях. Расчёт экономической эффективности применения технологий и оборудования ЛГМ при организации производства выполнен согласно изложенного в Приказе Минфина

Таблица 1. Сравнение технико-экономических показателей применения различных технологий производства литых заготовок

| Показатель | ПФ* | ХТС | ВПФ | ЛВМ | ЛГМ |
|---|---------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------|
| Точность (max), класс, ГОСТ 26 645-85 | 6-7 | 5-6 | 6-7 | 4-5 | 3-4 |
| Шероховатость (min, Ra) ГОСТ 26 645-85 | 10-16 | 6,3-10,0 | 3,2-6,3 | 3-2-5,0 | 3,2-6,3 |
| Расход формовочных материалов энергоносителей | $\frac{1}{1}$ | $\frac{2-4}{0,9-1,1}$ | $\frac{0,2-0,5}{11-13}$ | $\frac{5-10}{1,7-3,0}$ | $\frac{0,2-0,5}{0,9-1,1}$ |
| Трудоёмкость | 1 | 0,7-0,9 | 1,1-1,2 | 2,3-2,5 | 0,9-1,1 |
| Стоимость моделей оснастки | 1 | 1,1-1,2 | 1,1-1,2 | 2-5 | 2-5** |
| Затраты на организацию производства | 1 | 1,1-1,2 | 1,1-1,2 | 1,5-3,0 | 0,8-1,0 |
| Себестоимость отливок | 1 | 1,2-1,3 | 1,1-1,2 | 2,5-4,0 | 1,1-1,6 |

ПФ – технология литья в песчано-глинистую форму;

ХТС – технология литья по холодно-твердеющим смесям;

ВПФ – вакуум-плёночный метод формовки;

ЛВМ – технология литья по выплавляемым моделям;

ЛГМ – технология литья по газифицируемым моделям;

* – за относительную единицу приняты показатели технологии литья в ПФ;

** – при изготовлении моделей в пресс-формах

и Минэкономики Украины (218/446 от 25.09.2001 г.) документа «Методика расчёта экономической эффективности расходов на научные исследования, разработку и внедрение в производство», а также в Приказе Госкомитета Украины по вопросам науки, инноваций и информатизации (№ 18 от 13.09.2010 г.) – документа «Методические рекомендации по коммерциализации научных разработок созданных в результате научно-технической деятельности».

Расход шихтовых материалов и ферросплавов для получения 1 т годных отливок из указанных видов сплавов, марки, характеристики; их расход и стоимость представлен в табл. 2. Расход вспомогательных материалов для промышленного производства 1 т годных отливок из всех видов сплавов и их стоимости представлены в табл. 3. При этом для удобного сравнения с другими расчётами цены и стоимостные показатели приведены из работы [2] (табл. 2-4) при пересчёте в грн. по курсу Национального банка Украины на 2011 год – 1 USD = 7,97 грн.

Смета себестоимости промышленного производства 1 т годных отливок из конструкционных углеродистых сталей (Ст. 25-50Л ГОСТ 977-88), легированных сталей (Ст. 20ГФЛ, Ст. 40ХЛ ГОСТ 977-88, 20ХН4ФЛ) и серых чугунов (СЧ15-СЧ25) по газифицируемым моделям с плавкой металла в индукционных тигельных печах типа ИСТ показана в табл. 4 с учётом табл. 2, 3 [2].

Себестоимость производства отливок из сталей Ст.25-50Л и легированных сталей Ст.20ГЛ, Ст.40ХЛ (табл. 4) отличается незначительно, а из стали 20ХН4ФЛ (взамен поковок) – несколько выше – 21512 грн/т и из серого чугуна СЧ20 – ниже – 9688 грн.т. При этом чистая прибыль при производстве 1 т отливок может составить для трёх первых видов сталей и серого чугуна – 2700-3400 грн по сравнению с литьём в песчаные формы (из работы [2] в пересчёте по указанному валютному курсу). Эти данные уточняют значения по табл. 1 и показывают, что современный уровень развития ЛГМ позволяет получать снижение себестоимости отливок по сравнению с литьём в песчано-глинистые формы.

При замене производства литья по выплавляемым моделям из сталей (Ст. 25-50Л), а также легированных сталей Ст. 20ГФЛ и Ст. 40ХЛ на ЛГМ-процесс чистая прибыль

Таблица 2. Шихтовые материалы и ферросплавы для литья углеродистых и легированных сталей, а также серых чугунов

| Наименования шихтовых материалов и ферросплавов, кг | Расход годного литья, кг/т | Цена материала, грн/кг | Стоимость, грн |
|--|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Металлозавалка для получения стали 25 - 45Л ГОСТ 977-88 | | | |
| лом стали 3А1 ГОСТ2787-75 (1А ДСТУ-4121-1-2002) | 800,0 | 2,40 | 1912,80 |
| отходы металлопроката собственные (завода) | 220,0 | 0,0 | 0,0 |
| возврат собственного производства | 400,0 | 0,0 | 0,0 |
| алюминий АВ-86 ГОСТ-295-79, отходы и др. | 5,0 | 8,00 | 40,00 |
| ферромарганец ФМн 78 ГОСТ4775-80 | 5,0 | 19,93 | 99,63 |
| ферросилиций ФС 75 ГОСТ 1415-93 | 5,0 | 15,94 | 79,70 |
| феррохром ФХ200 ГОСТ 4757-91 | 15,0 | 47,82 | 717,30 |
| всего основных материалов | 1450,0 | – | 2849,28 |
| Металлозавалка для получения стали 25 - 45Л ГОСТ 977-88 | | | |
| лом стали 3А1 ГОСТ2787-75 (1А ДСТУ-4121-1-2002) | 795,0 | 2,40 | 1908,00 |
| отходы металлопроката собственные (завода) | 235,0 | 0,0 | 0,0 |
| возврат собственного производства | 400,0 | 0,0 | 0,0 |
| алюминий АВ-86 ГОСТ-295-79, отходы и др. | 5,0 | 8,00 | 40,00 |
| ферромарганец ФМн 78 ГОСТ4775-80 | 5,0 | 19,93 | 99,63 |
| ферросилиций ФС75 ГОСТ 1415-93 | 5,0 | 15,94 | 79,70 |
| феррохром ФХ20ГОСТ 4757-91 | 5,0 | 47,82 | 239,10 |
| всего основных материалов | 1450,0 | – | 2366,43 |
| Металлозавалка для получения стали 20ГФЛ ГОСТ 977-88 | | | |
| лом стали 3А1 ГОСТ2787-75 (1А ДСТУ-4121-1-2002) | 785,0 | 2,40 | 1884,00 |
| отходы металлопроката собственные (завода) | 235,0 | 0,0 | 0,0 |
| возврат собственного производства | 400,0 | 0,0 | 0,0 |
| алюминий АВ-86 ГОСТ-295-79, отходы и др. | 5,0 | 8,00 | 40,00 |
| ферромарганец ФМн 78 ГОСТ4775-80 | 15,0 | 19,93 | 298,95 |
| ферросилиций ФС75 ГОСТ 1415-93 | 5,0 | 15,94 | 79,70 |
| феррохром ФХ20ГОСТ 4757-91 | 5,0 | 47,82 | 239,10 |
| феррованадий ФВ50У0,5ГОСТ 27130-94 | 5,0 | 175,34 | 876,70 |
| всего основных материалов | 1450,0 | – | 3418,45 |

Продолжение таблицы 2

| Металлозавалка для получения серого чугуна СЧ15-СЧ25 ГОСТЧТ1412-85 | | | |
|--|--------|-------|---------|
| лом стали 3А1 ГОСТ2787-75 (1А ДСТУ-4121-1-2002) | 900,0 | 2,40 | 2160,00 |
| отходы металлопроката собственные (завода) | 160,0 | 0,0 | 0,0 |
| возврат собственного производства | 150,0 | 0,0 | 0,0 |
| ферросилиций ФС 75 ГОСТ 1415-93 | 20,0 | 16,00 | 320,00 |
| науглероживатель | 20,0 | 20,00 | 400,00 |
| всего основных материалов | 1250,0 | – | 2880,00 |

может существенно возрасти и составить 19600-20600 грн/т. Отсюда рентабельность вариантов перевода на ЛГМ составит: 30-175 % для Ст.25-50Л; 22-58 % для Ст. 20ГФЛ и 25-216 % для Ст. 40ХЛ [2].

Для полноты обзора расчётов затрат при ЛГМ и ЛВМ приведём вариант сравнения затрат на материалы для этих процессов, опубликованный на сайте [4] (табл. 5), который показывает, что стоимость материалов для ЛВМ более чем в 2,7 раза выше такой для ЛГМ.

Привлечение криотехнологии в литейные процессы позволило создать литьё по ледяным моделям (ЛЛМ, investment casting with ice patterns), в частности с целью получения экономического и экологического эффектов при снижении материалоемкости и трудоёмкости формовки путём замены органических материалов (модельных и связующих) на неорганические. Для опытно-промышленного производства, расчет и сравнение энерго- и материальных затрат на изготовление песчаных форм способами ЛГМ и ЛЛМ на 1 т чугунных отливок массой 1-10 кг приведены ниже поскольку на данном этапе технология ЛЛМ опробована на примерах чугунного алюминиевого литья [5].

В расчёте затрат материалов на производство моделей при ЛГМ-процессе учтено, что при плотности жидкого чугуна 7000 кг/м³ объём 1 т отливок или объём моделей на эту массу отливок составит ≈0,143 м³. А при средней плотности пенополистирола (ППС) для моделей 25 кг/м³ расход ППС на 1 т фасонных отливок составит 25·0,143 = 3,58 (кг). Технологический выход годного мелких чугунных отливок составляет в среднем 85 %, то с литниково-питающей системой расход ППС на 1 т отливок равен около 4,2 кг, из них – 0,6 кг обычно изготавливают из блочного ППС (ценой около 15 грн/кг) стоимостью 9,0 грн (цены 2011 г. на момент опубликования статьи [5]).

Наиболее распространённый способ получения ППС моделей – спекание из гранул, подвспененных до насыпной плотности около 25 кг/м³. Расход электроэнергии на подвспенивание для установок циклического действия (в ванне с кипящей водой) и непрерывного (полуавтоматического) процесса приблизительно равны. Для полуавтомата используется парогенератор, источник сжатого воздуха, циркуляция воды для охлаждения приёмного бункера, а также транспортная система для сушки и выдержки гранул в бункерах.

Время подвспенивания зависит от марки исходного ППС, количества загрузки и при использовании установок конструкции ФТИМС равно 3-8 мин. Объём загрузки составляет 200-1200 см³ в зависимости от потребности, или по массе 0,34-2,04 кг первичного ППС. Установленная мощность подвспенивателя $N_y \geq 11$ кВт. Для первичного подвспенивания 3,58 кг необходимо $3,58:2,04 = 1,75$ цикла загрузки, что достигается двумя загрузками суммарной продолжительности $T = 16$ мин с учётом подготовительных работ. При этом расход электроэнергии на подвспенивание ППС

Таблица 3. Перечень вспомогательных материалов для производства отливок из стали и медных сплавов по газифицируемым моделям

| Наименования шихтовых материалов и ферросплавов | Единица измерения | Расход, годного литья, кг/т | Цена материала, грн/кг, шт. | Стоимость, грн |
|--|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|
| для плавки сталей и чугунов в индукционных печах типа ИСТ 0,5 | | | | |
| футеровочная масса FINMIX 85 | кг | 40,0 | 8,0 | 320,0 |
| кирпич шамотный для ковша ГОСТ-5341-98 | шт. | 10,0 | 4,0 | 40,0 |
| сталь круг $d = 20 \div 30$ мм (для печного инструмента) ГОСТ-1050-74 | кг | 10,0 | 8,0 | 80,0 |
| сталь $l = 45$ мм (для шаблона) ГОСТ1050 - 74 | кг | 10,0 | 8,0 | 80,0 |
| термопреобразователь (термопара) ГОСТ-6616-74 | шт. | 2,0 | 40,0 | 80,0 |
| прочие (FINRAM, миканит и др., 10 %) | | | | 120,0 |
| всего | | | | 720,0 |
| для изготовления литейных пенополистирольных моделей | | | | |
| полистирол суспензионный вспенивающийся фракция 0,2-1,0 мм (производства Нидерланды) | кг | 6,0 | 32,0 | 192,0 |
| полистирол блочн.(ПСБ 25-35 ГОСТ15588-86) | кг | 1,0 | 25,5 | 25,5 |
| универсальная силиконовая смазка по типу «Си-М» ТУ2257-001-54736950-2011 | кг | 0,1 | 80,0 | 8,0 |
| антистатик «NEOSTATIC» | кг | 0,05 | 130,0 | 6,5 |
| клей типа ТИТАН | кг | 0,4 | 20,0 | 8,0 |
| прочие (10 %) | | | | 40,0 |
| всего | | | | 280,0 |
| для изготовления литейных форм | | | | |
| кварцевый песок 1К 02 (0315) ГОСТ-2138-91 | кг | 150,0 | 0,24 | 36,0 |
| плёнка полиэтиленовая ГОСТ-10354-82 | кг | 3,0 | 2,0 | 6,0 |
| прочие (10 %) | | | | 6,0 |
| всего | | | | 48,0 |
| для финишных операций с отливками | | | | |
| наконечники к установке плазменной резки | шт. | 10 | 4,0 | 40,0 |
| шлифовальный круг $d = 150$ мм ГОСТ2424-83 | кг | 2,0 | 32,0 | 64,0 |
| электроды сварочные АНО; УОНИ ДСТУ-3183-95 | шт. | 2,5 | 32,0 | 80,0 |
| эмаль ПФ 115 | кг | 10,0 | 4,8 | 48,0 |
| прочие (дробь, охлаждающие жидкости и др. 20 %) | | | | 88,0 |
| всего | | | | 320,0 |
| итого вспомогательных материалов | | | | 1368,0 |

Таблица 4. Смета себестоимости литья углеродистых и легированных сталей, серых чугунов по ЛГМ-процессу с плавкой металла в печах типа ИСТ

| Статьи затрат | Сумма, отливок из стали марок, грн /т | | | | |
|---|---------------------------------------|-------|-------|---------|-----------|
| | 25-50Л | 20ГФЛ | 40ХЛ | 20ХН4ФЛ | СЧ15-СЧ25 |
| Фонд оплаты труда (ФЗП) с учетом дополнительных оплат (40 %) | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| Начисления на ФОТ и ПФ (40,0 %) | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 |
| Основные материалы | 2366 | 3418 | 2849 | 10344 | 2880 |
| Вспомогательные материалы | 1368 | 1368 | 1368 | 1368 | 1368 |
| Накладные расходы (100 %) | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| Затраты на централизован. транспорт и обеспечение материалами (30 %) | 600 | 600 | 600 | 600 | 600 |
| Затраты на централиз. бухгалтерию (5 %) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Затраты на централизован. охрану (5 %) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Затраты на охрану труда, технику безопасности и противопожарные (5 %) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Прочие заводские расходы (5 %) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Внутрицеховые расходы (50 %), в т. ч. помещений (совместительство, по договорённости) | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Энергоносители, в т. ч. электроэнергия (1500 кВт·ч/т × 0,15) | 1800 | 1800 | 1800 | 1800 | 1520 |
| Услуги отделения термообработки и очистки отливок | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 | 0,0 |
| Себестоимость | 13534 | 14586 | 14017 | 21512 | 9688 |

для 1000 кг отливок составляет $P = N_y \cdot T : 60 = 11 \cdot 16 : 60 = 2,93$ (кВт·ч). С учётом расхода электроэнергии на изготовление моделей литниковой системы (в дополнение к фасонным моделям) методом вырезания нагретой проволокой из блочного ППС, а также сборки тепловым методом, расход энергии вместе с затратами на подвспенивание ППС не превышает 3,5 кВт·ч, что по стоимости составляет $3,5 \cdot 0,5 = 1,75$ грн (по тарифу на электроэнергию в 2011 г.).

Расход электроэнергии при производстве моделей в алюминиевых пресс-формах методом спекания подвспененного ППС определили для автоклава ГК 100-2 с камерой объёмом 100 л и установленной мощностью 12 кВт. Продолжительность спекания модели для отливки массой 1-10 кг не превышает 3 мин. Например, для получения моделей отливки массой ~10 кг суммарное время спекания 100 моделей зависит от числа одновременно загружаемых пресс-форм. При загрузке по одной пресс-форме в автоклав это время составит 300 мин с затратами электроэнергии $12 \cdot 300 / 60 = 60$ (кВт·ч), а для 4-х местной пресс-формы – в 4 раза меньше, 15 кВт·ч, что по стоимости составляет $60 \cdot 0,5 = 30$ грн и 7,5 грн соответственно.

Средняя цена ППС типа ПСВ-Л1 марок 1-5 (ОСТ-301-05-202-92Е) производства Сибур, Россия, или аналогичного производства BASF, составляет порядка 45 грн/кг (при покупке партиями до десятков килограмм в месяц), или 161,10 грн

Таблица 5. Сравнительный расход материалов на 1 тонну отливок для ЛГМ и ЛВМ

| Литьё по выплавляемым моделям | | | | Литьё по газифицируемым моделям | | | |
|--------------------------------|-------------------|-----------|------------|---------------------------------|-------------------|-----------|------------|
| материал | расход | цена, руб | сумма, руб | материал | расход | цена, руб | сумма, руб |
| парафин | 20 кг | 50,5 | 1010 | полистирол | 6 кг | 104,6 | 627,6 |
| стератин | 20 кг | 71 | 1420 | паста противопригарная | 25 кг | 15,38 | 384,5 |
| масло трансформаторное | 2 кг | 82 | 164 | песок кварцевый 0,16-0,2 мм | 50 кг | 3,6 | 180 |
| марля | 14 м | 14,5 | 203 | полиэтиленовая пленка | 10 ка. м | 0,55 | 5,5 |
| спирт | 19 кг | 102 | 1938 | стекло жидкое | 1,5 кг | 1,85 | 2,76 |
| НС1 | 1,2 кг | 21 | 252 | дробь | 70 кг | 22 | 1540 |
| этилсиликат 32 | 30 кг | 95 | 2850 | картон | 10,8 кг | 35,1 | 379 |
| лента киперная | 100 м | 0,49 | 49 | кислород | 20 м ³ | 31,6 | 632 |
| песок ГК | 320 кг | 3,55 | 1136 | лом стальной | 1087 кг | 0,6 | 652 |
| дробь | 70 кг | 22 | 1540 | алюминий | 1,5 кг | 0,27 | 0,4 |
| маршалит | 300 кг | 2,6 | 780 | ферросилиций | 16 кг | 41,5 | 664,5 |
| песок ГМ | 820 кг | 1,1 | 902 | силикокальций | 4 кг | 10 | 40 |
| H ₂ SO ₄ | 1 кг | 32 | 32 | ферромарганец | 13 кг | 57,63 | 749 |
| НВ | 5,5 кг | 72,5 | 399 | итого | | | 5857,26 |
| картон | 10,8 кг | 35,1 | 379 | | | | |
| стекло жидкое | 7 кг | 18 | 126 | | | | |
| кислород | 20 м ³ | 31,6 | 632 | | | | |
| лом стальной | 1087 | 0,6 | 652 | | | | |
| алюминий | 1,5 кг | 0,27 | 0,4 | | | | |
| ферросилиций | 16 кг | 41 | 664,5 | | | | |
| силикокальций | 4 кг | 10 | 40 | | | | |
| ферромарганец | 13 кг | 57,63 | 749 | | | | |
| и того | | | 15917,9 | | | | |

за 1000 кг отливок. Максимальный расход противопригарной краски на эту массу отливок (покрытие ППС моделей или модельных кустов) составляет 60 кг, при среднем потреблении с нанесением краски толщиной слоя 0,6-0,8 мм около 40 кг для поверхности моделей отливок средних по массе и сложности конфигурации. Такое количество краски вдвое меньше, чем указанное выше, для традиционных видов формовки [2]. Состав краски при ЛГМ тщательно подбирают, она несёт противопригарную, герметизирующую и упрочняющую поверхность песчаной формы функции. Стоимость готовой краски зависит от типа разбавителя (вода или спирт), а также от вида порошковых составляющих. По данным различных поставщиков цена 1 кг водной краски не превышает 20 грн. Средняя стоимость краски в этом случае за 1000 кг отливок составляет 800 грн.

Расход электроэнергии для приготовления, нанесения и сушки противопригарного покрытия в сушильных шкафах конструкции ФТИМС с установленной мощностью сушильного шкафа 2 кВт не превышает 10 кВт·ч. В летнее время расход электроэнергии может быть меньше при естественной сушке. Продолжительность сушки при использовании водной краски не более 3 ч, спиртовой – 0,5 ч. Продолжительность сушки моделей общей массой 3,58 кг не более 10 ч при стоимости электроэнергии на сушку около 5 грн.

Расход электроэнергии на изготовление литейной формы из сухого песка в контейнере включает использование вибростола и системы подачи песка. Максимальная установленная мощность вибростола 1,5 кВт. Продолжительность виброуплотнения одной литейной контейнерной формы при массе получаемых в ней отливок 50-100 кг обычно составляет 1 мин. Продолжительность виброуплотнения для 20 форм составит порядка 20 мин, а расход электроэнергии – 0,5 кВт·ч стоимостью 0,25 грн.

Расход электроэнергии при вакуумировании формы во время заливки её металлом зависит от применяемого вакуумного оборудования и мощности установленного насоса. Мощность (производительность) насоса рассчитывают из производственных потребностей литейного цеха и типа вакуумной системы [6]. Время заливки одного контейнера не превышает 1 мин, а продолжительность заливки 1000 кг отливок зависит от объёма ковша, системы транспортировки от печи до зоны заливки форм. По опыту использования из печей типа ИСТ время заливки такой массы чугуна не превышает 10 мин. Соответственно время работы вакуумной системы для откачки газов из заливаемых форм не превышает 15 мин при мощности насоса не более 18 кВт (марки ВВН-12). Расход электроэнергии на заливку, соответственно, не будет превышать 4,5 кВт·ч стоимостью 2,25 грн.

Затраты на технологический процесс подготовки формовочного песка, находящегося в многократном обороте, рассчитали при ЛГМ с учётом восполнения потерь до 5 %. Вторичный песок проходит очистку от включений, обеспыливание, охлаждение до температуры ниже +40 °С, транспортирование к соответствующим технологическим площадкам. Объём потребляемого формовочного песка на тонну мелких отливок из железоуглеродистых металлов составляет не более 2,0 м³ [5]. При использовании охладителя в псевдооживленном слое песка производительностью 6,0-7,0 т/ч (4,0-4,5 м³/ч), вибросита соответствующей производительности, а также системы пневмотранспорта всасывающего типа, общая установленная мощность этого оборудования не превышает 30 кВт. Соответственно расход электроэнергии будет в пределах 15 кВт·ч или 7,5 грн на тонну отливок при стоимости песка в обороте объёмом 2,0 м³, массой 3,0 т, стоимостью 300 грн [5]. К расходам на 1000 кг отливок относили также безвозвратные потери формовочного песка, не более 5 % от используемого в цикле от одной формовки до следующей, что составляет до 100 кг стоимостью 10 грн. Для экономии производственных площадей и улучшения условий труда в литейных цехах, проектируемых ФТИМС НАНУ, линии регенерации формовочного песка монтируют вне здания цеха, на открытом воздухе.

Затраты на материалы и энергию для изготовления форм при получении 1000 кг чугунных отливок ЛГМ-процессом, составляют 1004,35 грн (табл. 6), а с учётом стоимости песка, находящегося в обороте (в начале работы загружают в систему оборота), 1304,35 грн. Заработную плату, затраты на металл, его плавление, др. затраты и отчисления не учитывали, считая их одинаковыми для сравниваемых процессов.

В расчёте стоимости затрат на материалы и энергию при изготовлении форм на 1000 кг отливок по разовым ледяным моделям главной статьёй затрат является электроэнергия. Она, в основном, расходуется на замораживание модельной жидкости, формовку и сушку песчаной формы. Так как основная часть модельной жидкости – вода, то для расчётов использовали её теплофизические коэффициенты. Тепловые потери от излучения и изменение удельной теплоёмкости от температуры в узком интервале температур от 20 до -15 °С вблизи точки плавления льда не учтены в расчётах. Поскольку технология ЛЛМ отработана для мелких отливок, то расчёт затрат выполнен на примере получения чугунной отливки массой ~1 кг цилиндрической формы диаметром 50 и высотой 73 мм. Объём жидкого металла такой отливки (143 см³) равен объёму ледяной модели массой 130 г. Для получения такой модели использовали алюминиевую пресс-форму (плотность алюминия 2,9 г/см³), состоящей из цилиндра и двух крышек (все толщиной 10 мм) с устройством сборки и отверстием

Таблица 6. Затраты на материалы и энергию для изготовления форм на 1 т отливок при ЛГМ

| Технологические операции | Расход / стоимость на 1000 кг отливок | | | | Примечание |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------|---------------|---------------------------|-------------------------------------|
| | ППС, кг/грн | огнеупорная краска, кг/грн | песок, кг/грн | электроэнергия, кВт·ч/грн | |
| Подвспенивание | 4,2/170,1 | – | – | 3,5 / 1,75 | – |
| Изготовление моделей | – | – | – | 15,0 / 7,5 | 4-х местная пресс-форма |
| Покраска моделей | – | 40,0 / 800,0 | – | 10,0 / 5,0 | и сушка |
| Формовка | – | – | 100/10,0 | 0,5 / 0,25 | потери песка |
| Заливка | – | – | – | 4,5 / 2,25 | вакуумирование |
| Формовочный песок в обороте | – | – | (3000/300) | 15,0 / 7,5 | подготовка, транспорт |
| Итого: 1004, 35 грн. | 4,2/170,1 | 40,0 / 800,0 | 100/10,0 | 48,5 / 24, 25 | без учёта стоимости песка в обороте |

для заливки. Масса такой пресс-формы равна 621,8 г (масса корпуса – 398,8 г и двух крышек – 223 г).

В расчёте использовали следующие теплофизические коэффициенты. Удельная теплоёмкость C_p , кДж/(кг·град.), алюминия – 0,88 в интервале изменения температуры $\Delta t = 35^\circ\text{C}$, воды – 4,19 при $\Delta t = 20^\circ\text{C}$ и льда – 2,11 при $\Delta t = -15^\circ\text{C}$, удельная теплота плавления льда $l = 334$ кДж/кг [7, 8]. Количество теплоты Q , которое необходимо отвести от пресс-формы и воды от температуры $+20^\circ\text{C}$ до -15°C , составит $Q = cm\Delta t$, где, кроме указанных, m – масса пресс-формы, модельной жидкости или льда [7]. Тогда тепловая энергии на 1000 кг отливок, отведённая при охлаждении оснастки, составит $0,88 \cdot 621,8 \cdot 35 = 19151,4$ (кДж), жидкого модельного материала $4,19 \cdot 130 \cdot 20 = 10894,0$ (кДж), ледяной модели $2,11 \cdot 130 \cdot 15 = 4114,5$ (кДж), а также на фазовый переход при замерзании воды $130 \cdot 334 = 43420$ (кДж), что в сумме равно 77579,9 кДж или 21,55 кВт·ч.

Энергозатраты на изготовление модели с литниково-питающей системой определили при технологическом выходе годного для мелких чугуновых отливок не менее 85 %, $21,55 : 0,85 = 25,35$ (кВт·ч). Это сопоставимо с затратами 25,7 кВт·ч на 1000 кг отливок из железоуглеродистых сплавов, определённых экспериментально при построении термограмм замораживания моделей из водных композиций трёх видов до температуры ниже -12°C [9]. Также можно сравнить с затратами по отбору тепловой энергии 59,5 кВт·ч на 1000 кг стальных отливок при литье в замороженную форму, охлажденную до более низкой температуры – 30°C [10]. Отметим, что для ледяных моделей выполнение трубчатых пустотелых стояков экономично из полимерных материалов [11], применение которых связано с энергозатратами величиной не более 5 % от затрат на охлаждение модели.

Потребление электроэнергии холодильником наиболее распространённого компрессионного типа рассчитали таким образом. Компрессоры мощностью 5-10 кВт имеют коэффициент подачи порядка 0,6, что вместе с КПД соответствующего трёхфазного электродвигателя при номинальной нагрузке в пределах от 83 до 95 % (верхний предел соответствует двигателям большой мощности) – даёт общий КПД, приближающийся к 0,55. У больших винтовых компрессоров в сотни киловатт общий КПД может достигать 0,70-0,75. Среди других причин понижения КПД холодильников – механические и термодинамические потери, которые

Новые методы и прогрессивные технологии литья

менее существенны, и для поставленной задачи правомерно использовать КПД $\sim 0,5$. Тогда затраты электроэнергии холодильником на получение ледяной модели с литниковой системой составят 50,7 кВт·ч.

Стоимость 130 кг модельной жидкости из технической воды (не менее 90 %) составит $8 \text{ грн/м}^3 \cdot 0,143 \text{ м}^3 = 1,14 \text{ грн}$. Стоимость других добавленных в неё компонентов до 10 % по массе, в основном жидкого стекла натриевого (ГОСТ 13078-81) плотностью на ниже $1,36 \text{ г/см}^3$, составит не более 100 грн за 1000 кг отливок. Следующая статья затрат касается порошковой краски (ПК), наносимой на ледяные модели толщиной до 2-3 мм и составляющей основу оболочковой формы после выплавления модели. Объём ПК для приближённых расчётов приняли равным 15 % объёма модели, или 21 дм^3 , что по массе составит 32 кг на тонну отливок. Основная составляющая ПК – кварцевый песок мелкой фракции с добавкой гидратационных вяжущих, твердеющих в контакте с водой (гипс, цемент и т. п.). Технология нанесения ПК описана в работе [12]. Стоимость ПК $\sim 1,5 \text{ грн/кг}$, а стоимость 32 кг ПК на 1000 кг отливок, составляет 48 грн [5].

Для получения оболочковой формы ледяную модель с покрытием помещают в металлический контейнер, который заполняют сухим песком, выплавляют модель нагреванием теплопередачей от окружающего песка с температурой воздуха в помещении цеха ($+20 \text{ }^\circ\text{C}$), горячей водой или тёплым воздухом. Ледяная модель в процессе таяния пропитывает ПК с прилегающим слоем песка, которые затвердевают в виде оболочковой формы. При наличии, остаток жидкости выливается или откачивается, а форма подвергается сушке с применением вакуума или тёплого воздуха. Электроэнергия для расплавления и (или) создания вакуума в форме не превышает её расходов на затвердевание и охлаждение ледяной модели, то есть 13,2 кВт·ч на 1000 кг отливок, или 6,6 грн. А расходы на сушку такого количества оболочек теплым воздухом составляют до 10 кВт·ч, то есть 5 грн. К безвозвратным потерям относят формовочный песок в составе оболочки, объём его потерь не превышает потери при ЛГМ, то есть до 100 кг, стоимостью 10 грн. Стоимость и объём формовочного материала, находящегося в обороте, приняли аналогичными для процесса ЛГМ. Затраты на изготовление ледяных моделей и формовку на 1 т отливок составляют 203,6 грн (табл. 7).

Таблица 7. Затраты на материалы и энергию для изготовления форм на 1 т отливок при ЛЛМ

| Технологические операции | Расходы/стоимость на 1000 кг отливок | | | | Примечание |
|--|--------------------------------------|------------------|---------------|----------------------------|-------------------------------------|
| | модельная жидкость, кг/грн | покрытие, кг/грн | песок, кг/грн | электро-энергия, кВт·ч/грн | |
| Получение ледяной модели | 130,0/101,1 | – | – | 50,7 / 25,4 | – |
| Покрытие ледяной модели | – | 32,0 / 48,0 | – | – | – |
| Получение оболочковой формы (плавление модели) | – | – | 100 / 10 | 13,2 / 6,6 | безвозвратные потери песка |
| Сушка оболочковой формы | – | – | – | 10,0 / 5,0 | или вакуумирование |
| Формовочный песок в обороте | – | – | (3000/300) | 15,0 / 7,5 | подготовка |
| Итого: 203,6 грн | 130,0/101,1 | 32,0 / 48,0 | 100 / 10 | 88,9 / 44,5 | без учёта стоимости песка в обороте |

В расчётах затрат по табл. 6, 7 не учтены расходы на плавку металла, транспортные расходы (перемещение оснастки, шихты, отливок, форм и т. п.), заработная плата и другие отчисления, которые считали примерно одинаковыми для обоих рассматриваемых процессов. Для промышленного производства они показаны в табл. 4. Полученная оболочковая форма при ЛЛМ может длительно храниться на складе, как и модель или форма при ЛГМ. Расчёт (табл. 7) выполнен из опыта получения отливок различной конфигурации размерами до 0,3 м в литейном цехе ФТИМС НАНУ. Серийное производство ледяных моделей отливок массой выше 5 кг потребует морозильной установки для накопления моделей, в том числе при сборке их в блоки.

В связи с тем, что расход электроэнергии при ЛЛМ (табл. 7) в 1,83 раза выше, чем при ЛГМ (табл. 6), для экономии электроэнергии предложено применение жидкого азота технического (ГОСТ 9293-74) для замораживания ледяных моделей. Используя данные, приведённые в работе [10], определили затраты жидкого азота на получение ледяных моделей [5]. При испарении 1 кг жидкого азота поглощается 48 ккал., а нагрев образовавшихся паров до -15°C даёт дополнительно ещё 43,3 ккал. Для получения 1000 кг отливок по ледяным моделям отвод тепла 25,35 кВт·ч в пересчёте составляет 21797,1 ккал, на что потребуется $21797,1 : (48+43,3) = 238,7$ кг жидкого азота. При закупке жидкого азота в количестве от 1 т и поставке вблизи предприятия-производителя цена его в 2011 г. составляла 1200 грн/т (ЧП «Трансгаз», г. Днепропетровск), а стоимость на 1000 кг отливок – 286,4 грн. Его применение даст экономию электроэнергии на 60 %, но увеличит общую стоимость материалов и энергии на 1000 кг отливок в 2,4 раза до 490,0 грн, что оправдано в районах с ограничением по электропитанию.

Сравнение результатов двух последних расчётов (табл. 6 и 7) показывает снижение в 4,9 раза суммарных затрат на материалы и электроэнергию для формовки при переходе от ЛГМ к ЛЛМ в опытно-промышленном производстве. Это происходит от удешевления модельных материалов, в которых доля воды составляет не менее 90 %, а также от высокой доли стоимости огнеупорной (противопригарной) краски в затратах на материалы для ЛГМ. При ЛГМ в вакуумируемой песчаной форме к такой краске предъявляются повышенные требования. В отдельные моменты при заливке формы давление газа от газификации модели в полости формы может достигать 125 кПа (примерно на 25 кПа выше атмосферного). Тогда при вакууме с остаточным давлением 50 кПа в порах песка давление металла при его заливке и начальном контакте с краской может составлять $125 - 50 = 75$ кПа от присасывания вакуумом к поверхности краски. Это равноценно давлению 7,5 м водяного столба или столба жидкого чугуна высотой более 1 м. Что отличается от оболочковых форм без применения вакуума, когда контакт металла со стенкой формы сопровождается образованием газового зазора, и давление металла на стенку формы растёт преимущественно по мере роста металлостатического столба. Ввиду указанных давлений, усиливающих опасность термо-химического и механического разрушения, краска при ЛГМ играет роль тонкой оболочковой формы с учётом возможного наличия под ней недостаточно уплотнённых мест сыпучего песка.

Кроме того, применение криотехнологии связано с работой холодильных машин, что даёт рост энергозатрат на 83 % (на 40,4 кВт·ч), из которых 24,1 кВт·ч расходуется на обеспечение фазового перехода «вода-лёд-вода». Такие энергозатраты криотехнология «переводит» в холод, создавая ледяную конструкцию модели (1), которая затем при таянии в сухом формовочном наполнителе участвует в его связывании (2). Эта двоякая роль модели из недорогих материалов даёт «проигрыш» на затратах электроэнергии, но «выигрыш» – на стоимости материалов и минимизации ущерба, наносимого окружающей среде. Лёд как конструктивный материал разовых моделей отвечает идее применения разрушающихся, после выполнения своих функций, материалов, приближая процесс литья к безвредному обмену веществ с окружающей средой [13]. Процесс ЛЛМ при отверждении оболочковой формы, в результате фильтрации в формовочный материал талой жидкости ледяной модели

с минимальным включением неорганических связующих приближает такую крио-технология к малоотходным способам литья.

Приведённый обзор расчётов технико-экономических показателей процессов литья по разовым моделям будет способствовать оптимальному выбору таких процессов для конкретной номенклатуры продукции литейного цеха с использованием экономического обоснования применения рассмотренных технологий точного литья.



Список литературы

1. Шинский О. И. Снижение металлоемкости литейной продукции – основа развития отрасли // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2011. – № 1. – С. 78-79.
2. Шинський О. Й. «Организация производства отливок из стали, чугуна, медных и алюм. сплавов по газифицируемым моделям в объёме 1000 т/год в условиях ОАО «Завод «Легмаш». Свідоцтво про реєстрацію авт. права 52483. – Вид. Держ. службою інтелект. власності України 09.12.2013.
3. Ребонен В. Н., Косилов А. А., Лисовой А. А. Прогрессивные способы литья в современных условиях // Литейн. про-во 2002. – № 5. – С. 19-20.
4. Сайт stalimetal.ru. - URL: <http://stalimetal.ru/lite-po-modelyam.htm>! (дата обращения: 17.10.2015).
5. Дорошенко В. С., Бердыев К. Х. Сравнительный расчет экономических затрат на изготовление песчаных форм по газифицируемым и ледяным моделям в литейном производстве // Экологический вестник России. – 2011. – № 10. – С. 42-47.
6. Дорошенко В. С., Шинский В. О. Вакумирование песчаной формы при литье по газифицируемым моделям // Литейн. пр-во. – 2014. – № 8. – С. 33-38.
7. Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г. Справочник по элементарной физике. – М.: Наука, 1972. – 256 с.
8. Кулиниченко В. Р. Справочник по теплообменным расч1там. – К.: Техніка, 1990. – 165 с.
9. Дорошенко В. С., Черныш А. Г. Формирование и методы моделирования структуры литейной ледяной модели // Процессы литья. – 2011. – № 4. – С. 60-70.
10. Грузман В. М., Шалаев Д. Н. Некоторые экономические аспекты процесса литья в замороженные формы // Литейн. про-во. – 2000. – № 7. – С. 36-37.
11. Патент № 85515 Україна, МПК В22С 9/02. Спосіб виготовлення вакуумованих форм / О. Й. Шинський, В. С. Дорошенко. – Опубл. 26. 01. 2009, Бюл. № 2.
12. Дорошенко В. С. Нанесение порошковых красок на ледяные литейные модели, применяемые для получения отливок из металла // Экология и промышленность России. – 2011. – № 3. – С. 10-13.
13. Дорошенко В. С. Материалы, разрушающиеся после выполнения своих функций в формовочных процессах // Литейн. пр-во. – 2015. – № 9. – С. 15-17.

Поступила 02.11.2015