

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.746.464.011

Булитко Е.В., Савинов А.С., Феоктистов Н.А., Чернов В.П., Зарицкий Б.Б.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВСТАВКИ НА ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ СИСТЕМЫ «ОТЛИВКА-ФОРМА»

Аннотация. Одним из важнейших вопросов получения качественного литья является организация эффективного питания отливки. Чтобы исключить возможность появления усадочных дефектов в теле отливки, необходимо грамотно установить прибыли в местах, являющихся местом концентрации усадочных дефектов. В настоящее время актуальной задачей является использование экзотермических вставок с целью уменьшения металлоемкости формы за счет уменьшения прибыли, без потери качественного питания отливки. Такое решение улучшает процесс производства отливок и уменьшает контактную поверхность прибыли с отливкой, устранение которой после извлечения отливки требует затрат денежных средств. В статье рассмотрено влияние теплового состояния экзотермической вставки на тепловое поле системы «отливка-форма». Произведено математическое моделирование по известной методике конечных разностей. Показан алгоритм расчета к применению конкретной модели экзотермической вставки, который позволяет уменьшить проблемы усадки и улучшить качество литых изделий на металлургическом предприятии ООО «МРК». Также разработан математический аппарат, позволяющий рассчитать температурные поля при применении экзотермических вставок. Рассмотрен вопрос о влиянии размеров прибыли на время ее полного затвердевания и возможность питания отливки. Выявлено, что уменьшение размеров диаметра прибыли в 3 раза позволяет качественно питать отливку.

Ключевые слова: экзотермическая вставка, тепловое поле, математическое моделирование, система «отливка-форма», метод конечных разностей, оболочка, литье, усадка.

Введение

Основной задачей любого производства является повышение качества продукции, что невозможно без совершенствования технологии и оборудования, максимальной механизации и автоматизации всех технологических процессов. В условиях рыночной экономики рентабельность литейных предприятий напрямую связана со снижением себестоимости продукции: снижение материалоемкости и трудоемкости изготовления отливок; экономия топливно-энергетических ресурсов; применение малоотходных и безотходных технологий; механизация и автоматизация технологических операций; увеличение технологического выхода годного.

Одним из важнейших вопросов получения качественного литья является организация эффективного питания отливки, а также грамотно подобранная установка прибыли в местах, являющихся местом концентрации усадочных дефектов.

Однако чем больше объем прибыли, тем больше металлоемкость литейной формы и, как следствие увеличение стоимости конечной продукции. В настоящее время актуальной задачей является использование экзотермических вставок с целью уменьшения металлоемкости формы за счет уменьшения прибыли, без потери качественного питания отливки. Такое решение улучшает процесс производства отливок и уменьшает контактную поверхность прибыли с отливкой, устранение которой после извлечения отливки требует затрат денежных средств.

Для повышения эффективности работы литейных прибылей и снижения их массы применяют экзотермические оболочки (вставки), которые в результате горения увеличивают время питания отливки и уменьшают объем питаемой прибыли.

Экзотермические оболочки бывают различных форм [1]:

- закрытые (колпачковые) цилиндрические оболочки;
- открытые цилиндрические серии, овальные и конусообразные;
- компактные точечные оболочки;
- специальные (могут иметь форму шара);
- изоляционные сегментированные маты;
- экзотермические порошки и таблетки.

Наиболее важными характеристиками оболочек являются постоянство термических и изоляционных характеристик, а также стабильность геометрических и прочностных характеристик.

Чтобы понять целесообразность применения экзотермических вставок, необходимо провести математический расчет теплового взаимодействия прибыли с формой.

В настоящее время существуют различные методы расчёта систем взаимодействия «отливка-форма», основанные на численном решении задач теплопроводности, позволяющие с высокой точностью оценить динамику тепловых процессов в различных металлургических системах.

Одним из таких методов является метод конечных разностей (МКР), целесообразность которого подтверждена различными источниками [2-4]. При применении метода МКР возникает вопрос учёта тепла, выделяющегося при сгорании экзотермической вставки.

Теоретическая часть

Рассмотрим открытую экзотермическую вставку с толщиной стенки δ . Величина её наружного и внутреннего диаметров равны D и d соответственно. В соответствии с принципами метода МКР разобьём стенку экзотермической вставки (ЭВ) на ряд слоев $i=1, \dots, N$. Величина слоя между границами i и $i+1$ равна h , как показано на рис. 1.

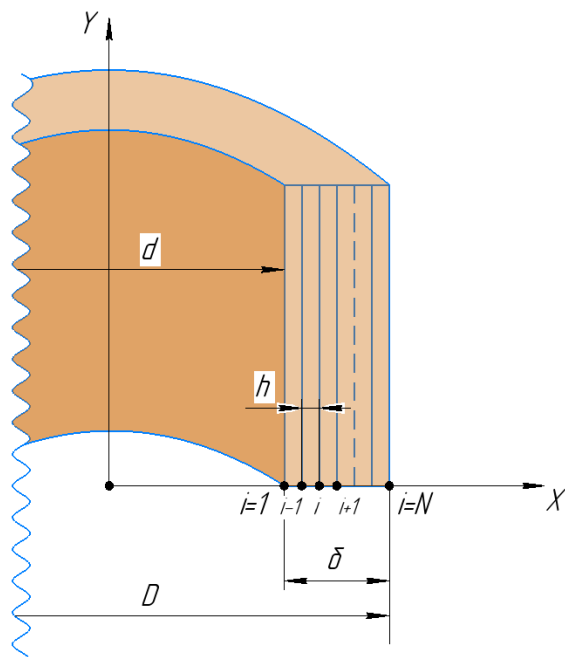


Рис. 1. Открытая экзотермическая вставка

Пусть элементарный слой толщиной h , расположенный между границами i и $i+1$, при сгорании выделяет тепло, равное $Q_{сг}$.

Количество данного тепла можно определить как

$$Q_{сг} = m_{эл} \cdot W_{сг}, \quad (1)$$

где $m_{эл}$ – масса элементарного слоя, расположенного между границами i и $i+1$, кг; $W_{сг}$ – удельная теплота сгорания материала экзотермической вставки (ЭВ), Дж/кг.

Приняв в первом приближении, что всё выделившееся тепло уйдет на нагрев элементарного слоя массой $m_{эл}$, температуру слоя $T_{кон}$ количественно можно определить из следующего выражения:

$$Q_{сг} = m_{эл} \cdot c \cdot (T_{кон} - T_{сг}), \quad (2)$$

где c – теплоемкость экзотермической вставки, Дж/кг·°С; $T_{сг}$ – температура возгорания материала экзотермической вставки, °С.

Учитывая, что теплота сгорания расходуется на нагрев системы, составим равенство выражений (1) и (2). Получим

$$m_{эл} \cdot W_{сг} = m_{эл} \cdot c \cdot (T_{кон} - T_{сг}), \quad (3)$$

откуда

$$T_{кон} = \frac{W_{сг}}{c} + T_{сг}. \quad (4)$$

Слагаемое выражения (4) $W_{сг}$ является величиной добавочной температуры, которая может быть прибавлена к текущей температуре экзотермической вставки, определенной методом МКР. То есть

$$T_i^{k+1} = T_i^k + \frac{W_{сг}}{c}, \quad (5)$$

где T_i^{k+1} , T_i^k – температура i -й границы экзотермической вставки в предыдущий и текущий момент времени соответственно, °С.

Практическая часть

Рассмотрим влияние экзотермической вставки на тепловое поле прибыли отливки «Рамка» (рис. 2), изготовленной на предприятии ПАО «ММК», ООО «МРК».

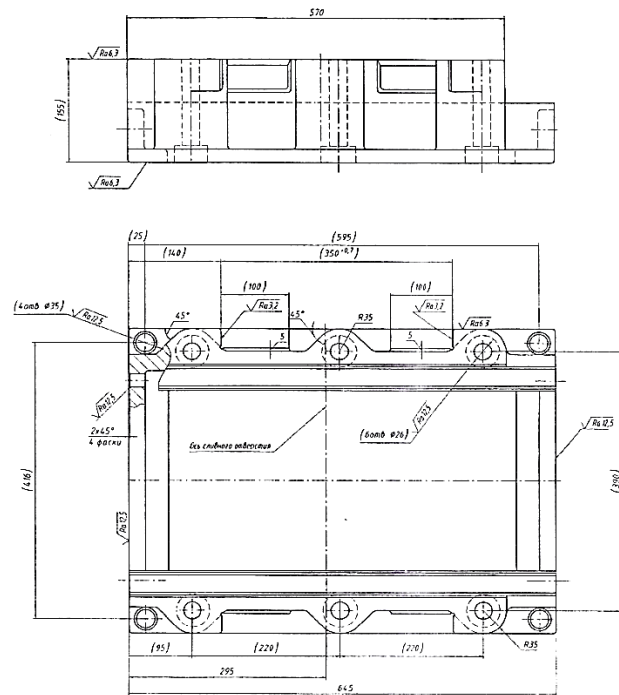


Рис. 2. Чертеж отливки «Рамка»

Материал отливки Ст 35Л ГОСТ 977-88. Масса отливки равна 120 кг. Для ее изготовления на предприятии используют шесть цилиндрических прибылей открытого типа диаметром $D = 150$ мм. При производстве отливки используют холодно-твердеющую смесь (ХТС). В расчетах теплопроводность отливки принималась равной $\lambda = 28$ Вт/(м·град), теплоёмкость $c = 699$ Дж/(кг·град), плотность $\rho = 7,8$ т/м³, температура заливки $T_{зал} = 1580$ °С, интервал затвердевания 1530–1460°С, теплота кристаллизации $Q_{кр} = 80000$ Дж/кг. При расчете использовали данные о экзотермической вставке модели FT500-A70/100СХ фирмы ООО «Огнеупор-

Комплект-НТ», г. Нижний Тагил. Толщина стенки экзотермической вставки составляет $\delta = 21$ мм, теплопроводность равна $\lambda = 1$ Вт/(м·град), теплоёмкость $c = 800$ Дж/(кг·град), плотность $\rho = 0,6$ т/м³, температура начала реакции составляет $T_{\text{возг}} = 900^\circ\text{C}$, время протекания экзотермической реакции составляет от 50 до 240 с. Схема расчета представлена на рис. 3.

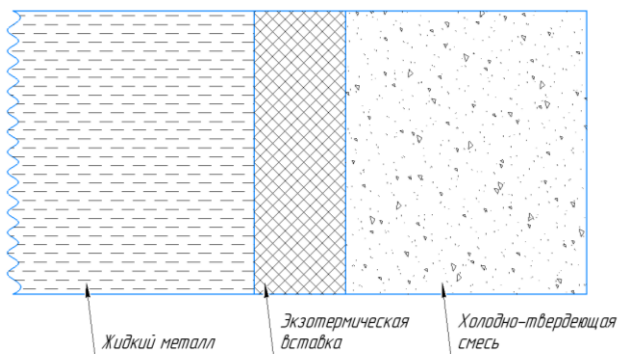


Рис. 3. Схема к расчету экзотермической вставки

Расчёт производили методом МКР, детально описанном в источнике [3]. Теплоту кристаллизации учитывали по методике, описанной в источниках [5, 6]. Как видно из рис. 3 время затвердевания центра отливки составляет 367 с. Исходя из производственных данных, выдержка в течение этого времени полностью обеспечивает питание при затвердевании стенки отливки. Кривая 2 отображает температуру металла на границе «отливка-форма». На рисунке видно, что после первоначального охлаждения периферийных слоёв металла идёт его последующий нагрев. Этим объясняется зубец, полученный на графике (рис. 4).

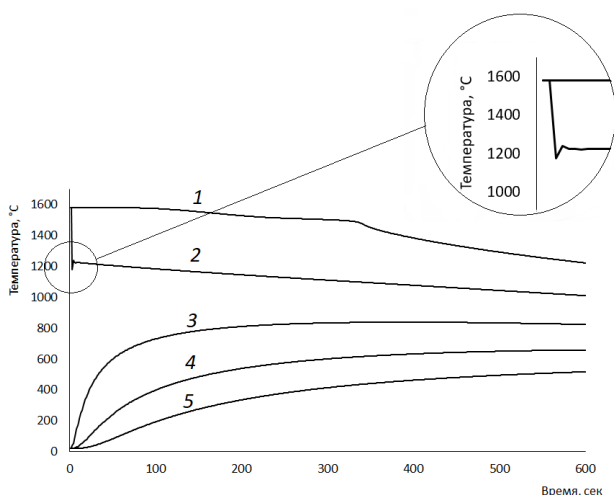


Рис. 4. Тепловое поле системы «отливка-форма»: 1 – температура центра; 2 – температура границы «металл-форма»; 3 – 5 мм от температуры границы; 4 – 10 мм от температуры границы; 5 – 15 мм от температуры границы

Результаты расчета динамики затвердевания, а также теплового поля системы «отливка-форма» без экзотермической вставки представлены на рис. 4.

На рис. 5 отображена динамика охлаждения и затвердевания центра прибыли с учетом теплового воздействия экзотермической вставки и без неё. Как видно из рис. 5, время затвердевания с применением экзотермической вставки возросло с 367 до 1133 с, что, как следствие, позволяет уменьшить объём используемой прибыли.

Рассмотрим изменение кривых затвердевания центра прибыли при изменении её диаметра с 150 до 50 мм (рис. 6).

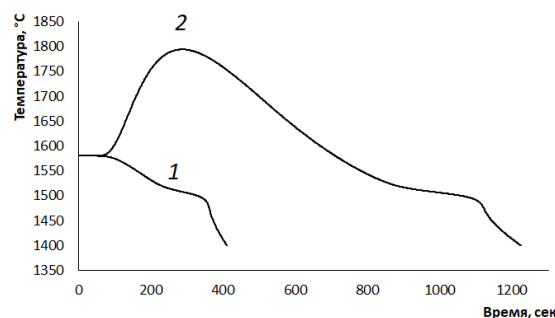


Рис. 5. Кривые затвердевания в системе «отливка-форма»:

1 – температура центра без экзотермической оболочки; 2 – температура центра с экзотермической оболочкой модели FT500-A70/100CX

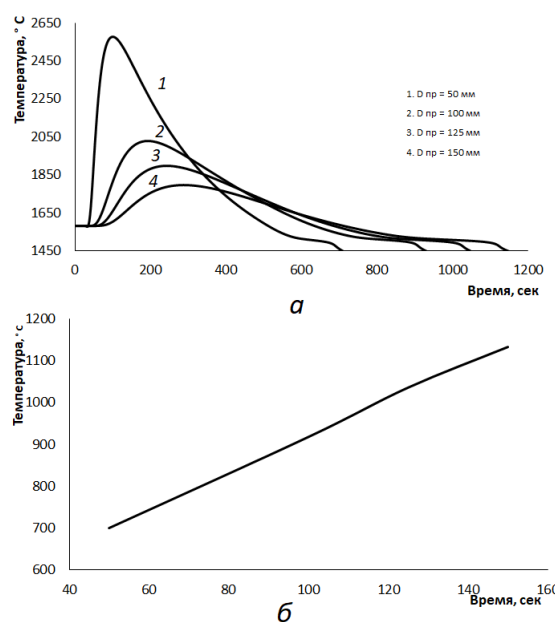


Рис. 6. Влияние размеров прибыли с экзотермической вставкой толщиной 21 мм на динамику охлаждения и время её затвердевания:

а – динамика охлаждения центра прибыли; б – время затвердевания центра прибыли при её охлаждении

На рис. 6, а отображены кривые охлаждения и затвердевания центра прибыли различных диаметров.

Как видно из рисунка, наибольший перегрев имеет прибыль наименьшей металлоемкости. Это объясняется тем, что толщина стенки экзотермической вставки остаётся неизменной. Поэтому количество тепла, отданное в тело прибыли, значительно увеличивает её температуру. Между тем скорость охлаждения прибыли с диаметром 50 мм значительно выше прибылей с другим типоразмером. Как следствие, время затвердевания центра прибыли меньше, что и видно на рис. 6, а.

Исходя из полученных данных (рис. 6.б), время затвердевания даже трёхкратно уменьшенного размера диаметра прибыли больше, чем время затвердевания прибыли без экзотермической вставки, что в первом приближении позволяет говорить о значительном уменьшении металлоемкости прибыли. Экстремальное значение перегрева металла в прибыли, а также зависимость, представленная на рис. 6, б, говорит о том, что толщина стенки экзотермической вставки 21 мм избыточна, и, как следствие, для данных прибылей можно уменьшить толщину стенки экзотермической вставки, а следовательно, уменьшить её стоимость. Основываясь на расчетах прибыли без экзотермической вставки, гарантированное время затвердевания отливки составляет 367 с. Представляет интерес, какова температура металла на границе «прибыль–экзотермическая вставка» в зависимости от размера прибыли (рис. 7).

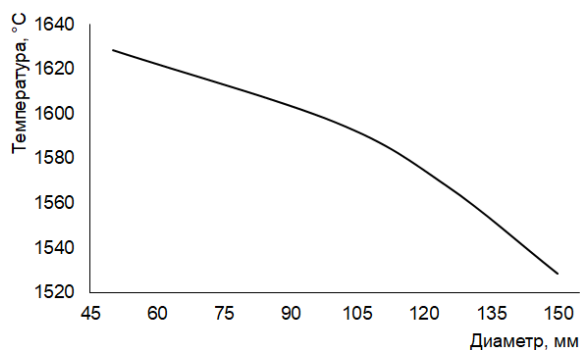


Рис. 7. Влияние размеров прибыли на температуру граничных слоёв металла через 367 с после заливки

Как видно из данного графика, в момент полного затвердевания тепловых узлов отливки её граница находится в жидком состоянии, а следовательно, питание отливки будет обеспечено.

Таким образом, разработан математический аппарат, позволяющий рассчитать температурные поля при применении экзотермических вставок.

Рассмотрен вопрос о влиянии размеров прибыли на время ее полного затвердевания и возможность питания отливки.

Выявлено, что уменьшение размеров диаметра прибыли в 3 раза позволяет качественно питать отливку.

Предложенный математический аппарат не учитывает скорость горения материала, а также качественное распределение тепла, выделяющегося при сгорании экзотермической вставки.

Список литературы

1. Интернет-ресурс: <https://uralresources.ru/shell>
2. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: учебник для вузов. М.: Металлургия, 1990. 239 с.
3. Кузнецов Г.В., Шерemet М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.
4. Вержбицкий, В.М. Основы численных методов. М.: Высш. шк., 2002. 840 с.
5. Савинов А.С., Тубольцева А.С., Варламова Д.В. Расчет теплового поля сырой песчано-глинистой формы // Черные металлы. 2011. Спец. вып. С. 36-38.
6. Температурные поля системы отливка–литейная форма в условиях неравновесной кристаллизации комплекснолегированных сплавов / В.М. Колокольцев, К.Н. Вдовин, Е.В. Синицкий, А.С. Савинов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 28–31.

Сведения об авторах

Булитко Елена Викторовна – аспирант кафедры литейных процессов и материаловедения, группа МТа-18-3, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: lena94-ne@mail.ru

Савинов Александр Сергеевич – заведующий кафедрой механики, директор института металлургии, машиностроения и материаловедения, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: a.savinov@magtu.ru

Феоктистов Николай Александрович – заведующий кафедрой литейных процессов и материаловедения, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: n.feoktistov@vuz.magtu.ru

Чернов Виктор Петрович – профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: tchernov@magtu.ru

Зарицкий Борис Борисович – старший преподаватель кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: Zaritskii.Boris.Borisovich@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE EXOTHERMAL INSERT ON THE HEAT FIELD OF THE "CAST-FORM" SYSTEM

Bulitko Elena V. – Post-graduate student of the Department of Foundry Processes and Materials Science, group MTa-18-3, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: lena94-ne@mail.ru

Savinov Alexander S. – Head of the Department of Mechanics, Director of the Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: a.savinov@magtu.ru

Feoktistov Nikolay A. – Head of the Department of Foundry Processes and Materials Science, Candidate of Technical Sciences, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: n.feoktistov@vuz.magtu.ru

Chernov Victor P. – Professor of the Department of Foundry Processes and Materials Science, Doctor of Technical Sciences, Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tchernov@magtu.ru

Zaritsky Boris B. – Senior Lecturer, Department of Mechanics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Zaritskii.Boris.Borisovich@yandex.ru

Abstract. One of the most important issues in obtaining high-quality casting is the organization of effective feeding of the casting. To exclude the possibility of the appearance of shrinkage defects in the body of the casting, it is necessary to correctly establish the profits in places that are the place of concentration of shrinkage defects. Currently, an urgent task is the use of exothermic inserts in order to reduce the metal consumption of the mold, by reducing profits, without losing high-quality feeding of the casting. This solution improves the production process of castings and reduces the contact surface of the head with the casting, the elimination of which after the removal of the casting costs money. The article deals with the influence of the thermal state of the exothermic insert on the thermal field of the "casting-mold" system. Mathematical modeling was carried out using the well-known finite difference technique. The calculation algorithm for the application of a specific model of the exothermic insert is shown, which allows to reduce the problems of shrinkage and improve the quality of cast products at the metallurgical enterprise MRK LLC. Also, a mathematical apparatus has been developed that allows you to calculate the temperature fields when using exothermic inserts. The question of the influence of the size of the profit on the time of its complete solidification and the possibility of feeding the casting is considered. It was revealed that a 3-fold reduction in the diameter of the head allows for high-quality feeding of the casting.

Key words: Exothermic insert, thermal field, mathematical modeling, casting-mold system, finite difference method, shell, casting, shrinkage.

Ссылка на статью:

Оценка влияния экзотермической вставки на тепловое поле системы «отливка-форма» / Булитко Е.В., Савинов А.С., Феоктистов Н.А., Чернов В.П., Зарицкий Б.Б. // Теория и технология металлургического производства. 2021. №4(39). С. 26-30.

Bulitko E.V., Savinov A.S., Feoktistov N.A., Chernov V.P., Zaritsky B.B. Evaluation of the influence of the exothermal insert on the heat field of the "cast-form" system. *Teoria i tehnologiya metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 39, no. 4, pp. 26-30.