



*The analysis of the temperature fields in a casting and graphite catalyzer at hardening is carried out on the basis of the developed mathematical model of the bimetallic castings continuous horizontal founding process. The dependence of sizes of this zone on temporal and thermo-physical parameters of casting is studied.*

Е. И. МАРУКОВИЧ, А. М. БРАНОВИЦКИЙ, Ю. А. ЛЕБЕДИНСКИЙ,  
ИТМ НАН Беларуси

УДК 621.74.047.001.57

## АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОТЛИВКИ

В настоящее время в связи с ограниченностью ресурсов для Республики Беларусь актуальна разработка ресурсосберегающих и импортозамещающих технологий и создание новых конструкционных материалов с повышенными технико-экономическими показателями. К таким технологиям относится создание биметаллических композиций, которые применяются в нефтехимической, транспортной, энергетической, электрохимической отраслях промышленности. Проблеме получения биметаллических заготовок уделяется большое внимание [1–3]. При этом основная задача состоит в обеспечении прочного соединения компонентов биметаллической отливки и качественной поверхности контакта. Существует множество способов получения биметаллических композиций, сущность которых определяется физико-химическими процессами, вызывающими образование неразъемных соединений. Это совместная деформация металлов в холодном и горячем состоянии, наплавка, напыление, диффузионная сварка, сварка взрывом, ультразвуком, трением и др. Для получения требуемого качества соединения компонентов применяют механические и химические способы подготовки плакируемой поверхности, такие, как дополнительное легирование компонентов, создание защитной атмосферы, флюсование и т. д. Эти приемы приводят к значительному удорожанию готовой продукции.

Разработанный в ИТМ НАН Беларуси способ получения биметаллических заготовок [3], при котором металлы соединяются в жидкофазном состоянии без перемешивания в процессе непрерывной разливки, лишен этих недостатков. Отпадает необходимость в подготовке поверхности металла основы; в применении защитных газовых сред, раскисляющих и межфазовоактивных компонентов; в предварительном нагреве.

Особенностью технологии непрерывного литья биметаллических отливок является протекание процесса в условиях контакта жидкого расплава одного металла с твердой поверхностью второго или контакта металлов в жидком состоянии.

Для производства прямоугольных двухслойных заготовок методом непрерывного горизонтального литья разработана схема, где разделительным элементом служит пластина. Расплавы металлов 1 и 2 заливают в металлоприемник 3, разделенный на две секции (рис. 1). Металл 2 через канал 7, образуемый графитовой вставкой 8 и пластиной 6, подается в верхнюю часть, а металл 1 через канал 4, образуемый пластиной 6 и графитовой вставкой 5, подается в нижнюю часть, формирующейся в кристаллизаторе биметаллической отливки 10. Полученную плоскую биметаллическую заготовку вытягивают при помощи валков 11. Конструкция кристаллизатора обеспечивает отвод тепла преимущественно через верхнюю и нижнюю поверхности формирующейся в кристаллизаторе биметаллической отливки.

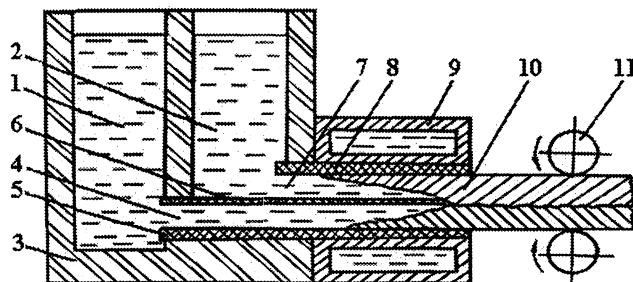


Рис. 1. Схема установки горизонтального типа для получения биметаллических прямоугольных заготовок: 1 – металл 1; 2 – металл 2; 3 – металлоприемник; 4 – нижний канал; 5 – нижняя графитовая вставка; 6 – пластина; 7 – верхний канал; 8 – верхняя графитовая вставка; 9 – водоохлаждаемый корпус кристаллизатора; 10 – биметаллическая отливка; 11 – тянущие клети.

Были проведены численные эксперименты по моделированию процесса непрерывного литья биметаллических заготовок для композиций алюминий–медь, чугун–бронза и алюминий–силумин.

Для расчетов были использованы теплофизические данные [4] для материалов отливки медь, алюминий, бронза ОЦС5-5-5, серый чугун и силумин (Si–12%), а также данные для кристаллизатора Ст45 и графита плотностью 1700 кг/м<sup>3</sup>. Геометрические размеры кристаллизатора, мм: длина кристаллизатора – 275; толщина слоев биметаллической отливки – 20; ширина отливки – 60; толщина графитовой вставки – 20; длина разделительной пластины – 165; толщина разделительной пластины – 4,5.

Для решения уравнения теплопроводности применяли метод конечных разностей [5–7]. Температурное поле рассчитывали как в самой отливке, так и в графитовых пластинах кристаллизатора. Анализировали зависимость протяженности зоны сваривания от теплофизических параметров и режимов непрерывного литья.

На процесс непрерывного горизонтального литья существенное влияние оказывает образование зазора между отливкой и кристаллизатором на верхней границе “металл–графит”. Определение коэффициентов теплопередачи на этой границе, как правило, осуществляется с помощью экспериментального измерения температуры в кристаллизаторе в процессе литья. В данном случае использована методика, аналогичная [8], позволяющая с достаточной точностью определить коэффициенты теплоотдачи при квазистационарном режиме литья. На практике часто используется предварительный подогрев кристаллизатора, что значительно уменьшает время выхода на квазистационарный режим литья.

Значение протяженности зоны сваривания для анализа берется к моменту окончания извлечения отливки и соответствует максимальному значению в цикле процесса литья. Во всех случаях шаг извлечения в цикле составлял 30 мм. Предполагается, что металл с большей плотностью подается в нижнюю часть кристаллизатора.

В системе “алюминий–силумин” силумин, имеющий меньшую температуру плавления, заливают в верхнюю часть кристаллизатора. На рис. 2, а показаны типичный вид лунки и изотермы с интервалом 30°С. Длина лунки силумина больше, чем алюминия. Отметим различие в направлениях тепловых потоков на границе между металлами. Вначале тепловой поток направлен от более тугоплавкого алюминия к силумину. Затем вследствие появления зазора на границе “силумин–графит” условия охлаждения силумина ухудшаются, его температура становится выше, чем алюминия, и тепловой поток меняет направление. Время выхода на квазистационарный процесс литья составляет 7–10 циклов (50–90 с) после выхода

заготовки из кристаллизатора. При этом изменение размеров лунки в нижнем металле после выхода заготовки из кристаллизатора значительно меньше, чем в верхнем. С уменьшением времени цикла время переходного режима уменьшается. До выхода на квазистационарный режим литья величина лунок постепенно увеличивается, в начале зона сваривания отсутствует, появляясь только после 2–4 циклов после выхода отливки из кристаллизатора. Зависимость протяженности зоны сваривания в установившемся режиме от времени цикла при перегреве алюминия на 180°С и силумина 120°С приведена на рис. 3, а зависимость протяженности зоны сваривания от температур перегрева металлов при времени цикла 10 с – на рис. 4, а.

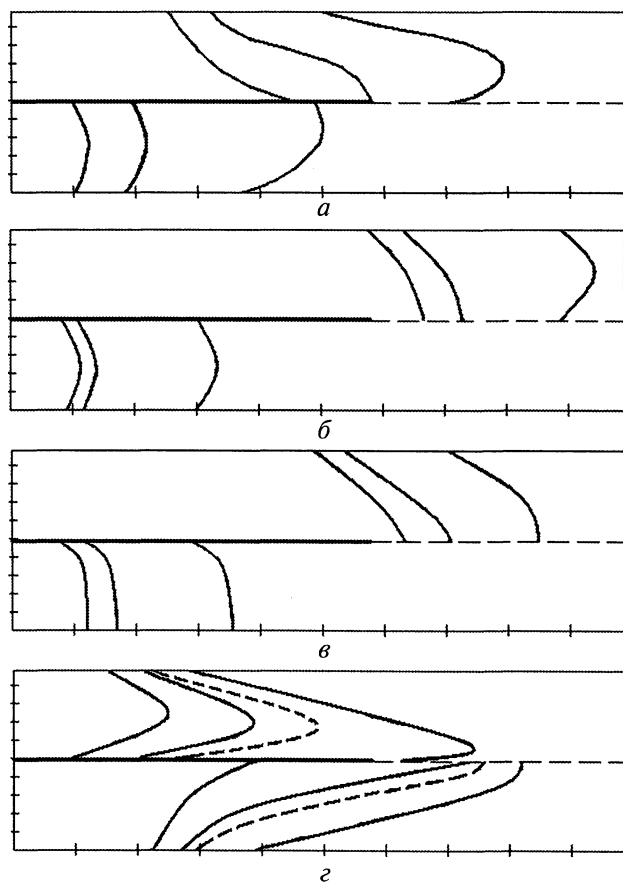


Рис. 2. Образец лунки для системы “алюминий–силумин” (а), “медь–алюминий” (б, в), “бронза–чугун” (г) в центральном вертикальном сечении отливки, плоскость сечения параллельна оси кристаллизатора. Жирной линией выделена пластина, разделяющая металлы. Перегрев составляет 100°С. Для чистых металлов и эвтектики нанесены изотермы:  $T_{\text{крист}} + 30$ ,  $T_{\text{крист}} + 60$ . Для сплавов изотермы:  $T_{\text{sol}}'$ ,  $T_{\text{lig}}'$  (штриховая линия),  $(T_{\text{sol}} + T_{\text{lig}})/2 + 30$ ,  $(T_{\text{sol}} + T_{\text{lig}})/2 + 60$

Для отливки “медь–алюминий” расчеты показывают невозможность образования биметаллической отливки при обычных тепловых условиях литья. Ввиду значительной разницы температур плавления меди и алюминия корка алюминия удовлетворительной толщины образуется только при практически полном застывании медной части заготовки, что неприемлемо по технологичес-

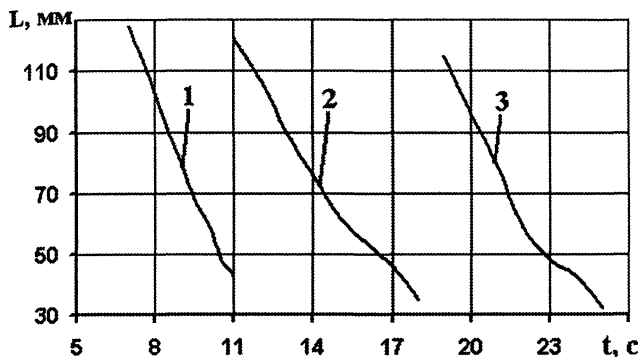


Рис. 3. Зависимость протяженности зоны сваривания  $L$  в квазистационарном режиме от времени цикла  $t$ : 1 – “алюминий–силумин”; 2 – “чугун–бронза”; 3 – “медь–алюминий”

ким соображениям (см. рис. 2, б). Поэтому для процесса литья предлагается создание особых тепловых условий формирования отливки с уменьшенным охлаждением нижней границы графита и одновременным увеличением времени цикла вытяжки. При этом охлаждение происходит в основном через верхнюю границу и для исследуемых толщин отливки формируются лунки, обеспечивающие образование биметаллической отливки (см. рис. 2, в). Но даже в этом случае зона контакта металлов в жидкой фазе отсутствует, наблюдается взаимодействие жидкой фазы с твердой. Зависимость протяженности зоны сваривания в установившемся режиме от времени цикла при перегреве металлов  $100^\circ\text{C}$  приведена на рис. 4, б (время цикла 21 с). При этом, как видно из рис. 3, время цикла в 2–3 раза больше, чем для остальных композиций. Переходный режим в этом случае длится 300–400 с. На первых циклах литья в этом режиме медная часть отливки может охладиться практически целиком в случае непрогретой нижней пластины кристаллизатора. Чтобы избежать данного явления, необходимо либо предварительно прогреть пластину, либо уменьшить время цикла вытяжки в переходном режиме. Кроме того, можно уменьшить толщину нижней пластины и разместить на ее нижней границе материала с низкой теплопроводностью.

Рассмотрим формирование биметаллической заготовки “бронза–чугун”. Здесь в отличие от предыдущих вариантов более легкий материал является одновременно более тугоплавким и протяженность зоны сваривания рассчитывается на основе более длинной лунки нижнего металла. Образец лунок показан на рис. 2, г. Отметим тонкую вытянутую форму лунки для чугуна. Зависимость протяженности зоны сваривания от времени цикла при перегреве металлов на  $100^\circ\text{C}$  приведена на рис. 3. Времена цикла в данном случае достаточно велики. Прочность соединения определяется временем диффузии материалов. Уменьшение отвода тепла, особенно в нижней части кристаллизатора, и увеличение времени цикла способствуют увеличению диффузии материалов.

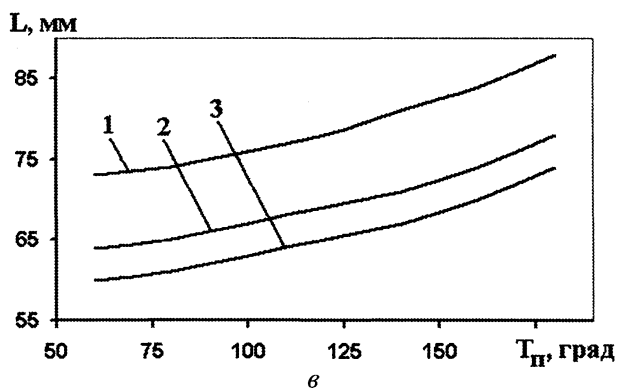
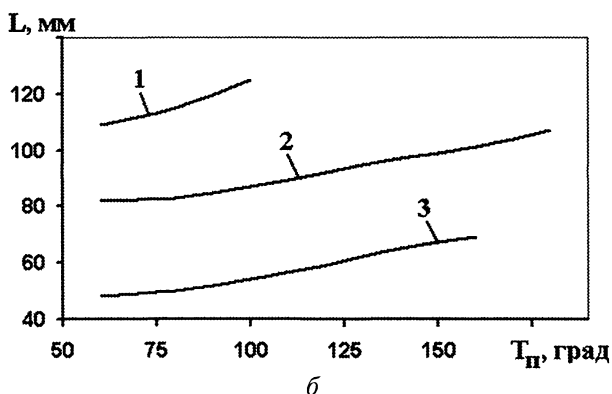
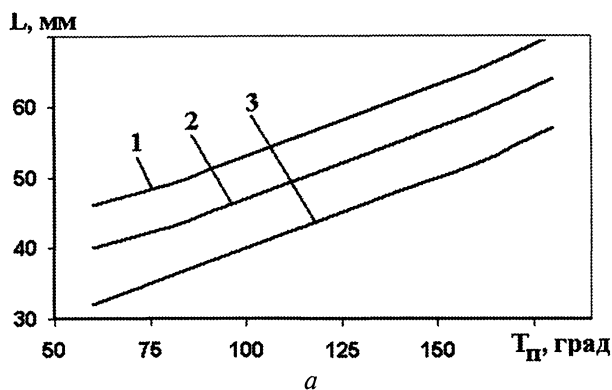


Рис. 4. Зависимость протяженности зоны сваривания  $L$  от степени перегрева  $T_n$  биметаллической отливки: а – “алюминий–силумин”; б – “медь–алюминий”; в – “бронза–чугун”;  $T_n$  – перегрев компонента указанного вторым; 1 – перегрев первого компонента  $180^\circ\text{C}$ ; 2 –  $120^\circ\text{C}$ ; 3 –  $60^\circ\text{C}$

Таким образом, на основе компьютерного моделирования проведено исследование процесса затвердевания непрерывнолитых биметаллических отливок с прямоугольным сечением для композиций алюминий–медь, чугун–бронза и алюминий–силумин. Установлены зависимости, показывающие изменение протяженности зоны сваривания от технологических параметров процесса литья. Определены параметры вытяжки, при которых возможен устойчивый процесс литья. Показана невозможность образования биметаллической отливки “медь–алюминий” при обычных тепловых условиях процесса литья. В этом случае предложено уменьшить охлаждение нижней границы графита и увеличить время цикла вытяжки.

**Литература**

1. Композиционные материалы: Справ. / Под общ. ред. Д.М. Карпиноса. Киев: Наукова думка, 1985.
2. Заславский М.И. Производство армированных и биметаллических отливок // Итоги науки и техники. М.: ВИНТИ, 1979.
3. Марукович Е.И., Чой Ки-Йонг, Брановицкий А. М., Анисович А.Г. Исследование принципиальной возможности получения биметаллических отливок методом непрерывного литья в условиях непосредственного соединения компонентов в жидком состоянии // Металлургия. Сб. науч. тр. Мн.: Выш. шк., 2004. С. 68–81.
4. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: Атомиздат, 1968.
5. Marukovich E.I., Branovitsky A.M. Three-dimensional thermal model of solidification of continuous casted

rectangular billets // The 4-rd International Conference Simulation, Designing and Control of Foundry Processes 25–26 November 1999, Krakow, Poland.

6. Марукович Е.И., Брановицкий А.М. Трехмерная тепловая модель процесса непрерывного литья прямоугольных биметаллических заготовок // Докл. НАН Беларуси. 2001. Т. 45. №2. С. 127–132.

7. Марукович Е.И., Брановицкий А.М., Харьков В. А. Двухмерная математическая модель для расчета затвердевания цилиндрической непрерывной отливки // Литье и металлургия. 2002. №1. С. 27–30.

8. Брановицкий А.М., Станюленис Ю.Л., Лебединский Ю.А. Уточнение коэффициентов теплопередачи для решения задачи затвердевания цилиндрических непрерывнолитых заготовок с использованием экспериментальных температурных данных кристаллизатора в установившемся режиме литья // Литье и металлургия. 2005. №1. С. 91–93.



**ВЫСТАВКИ, СЪЕЗДЫ, КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ**

**16–19.05.2006 «МАШИНОСТРОЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ»** (XIV международная специализированная выставка) г. Запорожье, (Украина), дворец спорта «Юность». Организатор – Запорожская торгово-промышленная палата, т./ф.: +38 (0612) 13-50-26, 13-51-67; E-mail: [expo@cci.zp.ua](mailto:expo@cci.zp.ua)

**21–24.09.2006 «Metallurgy Litmash 2006»** (Международная выставка машин, оборудования, технологий и продукции металлургической промышленности) г. Москва (Россия), Красная Пресня, ЗАО «Экспоцентр». Организатор – Металл-Экспо, т.: +7 (095) 247-91-29; ф.: +7 (095) 287-82-73; E-mail: [info@metal-expo.ru](mailto:info@metal-expo.ru); <http://www.metal-expo.ru>

**21–24.09.2006 «Tube Russia 2006»** (Международная выставка трубной промышленности и трубопроводов) г. Москва (Россия), Красная Пресня, ЗАО «Экспоцентр». Организатор – Металл-Экспо, т.: +7 (095) 247-91-29; ф.: +7 (095) 287-82-73; E-mail: [info@metal-expo.ru](mailto:info@metal-expo.ru); <http://www.metal-expo.ru>

**21–24.09.2006 «Aluminium / Non-Ferrous 2006»** (Международная выставка по алюминию, цветным металлам, материалам, технологиям и продукции) г. Москва (Россия), Красная Пресня, ЗАО «Экспоцентр». Организатор – Металл-Экспо, т.: +7 (095) 247-91-29; ф.: +7 (095) 287-82-73; E-mail: [info@metal-expo.ru](mailto:info@metal-expo.ru); <http://www.metal-expo.ru>

**10–12.10.2006 «Машиностроение. Металлообработка»** (Специализированная выставка) г. Волгоград (Россия), Выставочный центр «ВолгоградЭКСПО». Организаторы – Российский Союз промышленников и предпринимателей и выставочный центр «ВолгоградЭКСПО» при поддержке администрации Волгоградской области, т.: +7 (8442) 96-50-59, 96-52-72; E-mail: [roman@volgogradexpo.ru](mailto:roman@volgogradexpo.ru); <http://www.volgogradexpo.ru>

**10–13.10.2006 «МАШПРОМ»** (6-я Международная специализированная выставка) г. Днепропетровск (Украина). Организатор – Экспо-центр «Метеор», т.: +38 (056) 373-93-70; +38 (0562) 35-73-57; <http://www.expometeor.com>

**18–19.10.2006 «Приводы и двигатели»** (1 международная специализированная выставка-конференция), г. Запорожье (Украина), Запорожская торгово-промышленная палата (г. Запорожье, бул. Центральный, 4). Оргкомитет: +38 (0612) 13-50-27, 12-51-16; E-mail: [info2@cci.zp.ua](mailto:info2@cci.zp.ua); руководитель проекта Семченко Алла Владимировна.

**19–21.10.2006 «Металл-Форум Украина-2006»** г. Киев (Украина), Выставочный центр «КиевЭкспо-Плаза». Контактные данные организаторов: т/ф.: +38 (044) 451-84-34, 482-05-56, 246-41-09; E-mail: [forum@dzi.mfert.gov](mailto:forum@dzi.mfert.gov); <http://www.metal-forum.com.ua>

**07–10.11.2006 «Металлообработка»** Оборудование, инструменты, материалы, технологии процессов производства и обработки металлоизделий. "Тюменская ярмарка" Россия, 625013, Тюмень, ул. Севастопольская, 12, Выставочный зал [www.tyumfair.ru](http://www.tyumfair.ru); e-mail: [expo@tmn.ru](mailto:expo@tmn.ru)