

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА БОРИРОВАНИЯ ЧУГУНА ПРИ ЛИТЬЕ

Т.В. Мустафина, Г.А. Мустафин, И.В. Марширов

Статья посвящена исследованию влияния борирования на деформационные характеристики образцов из чугуна. Приведены микроструктуры борированного чугуна и зависимость микротвердости от глубины борирования. Приведена технология борирования чугуна при литье, необходимые материалы и режимы. Разработана матрица планирования, выбраны параметры и факторы оптимизации. Разработано уравнение регрессии для определения направления оптимизации.

Ключевые слова: борирование, деформация, структура, планирование эксперимента, фактор, параметр, термопара.

Одним из способов повышения долговечности многоазовых металлических литейных форм – кокилей – является химикотермическая обработка [1]. Исследование стальных образцов показало, что борирование уменьшает остаточные деформации, что благоприятно сказывается на долговечности стальных кокилей. Для изучения влияния борирования на деформационную картину чугуна было проведено печное борирование чугунных образцов с последующим испытанием на специальной установке.

Борирование проводилось путем насыщения поверхности полого цилиндрического образца длиной 165 мм, диаметром 15 мм, толщиной стенки 2 мм из порошковой смеси, состоящей из карбида бора и буры в герметичном контейнере. Борирование проводилось в двух печах при температурах 970 °С и 700 °С. Было проведено 4 цикла, каждый из которых состоял из выдержки в течение 40 минут при 970 °С и 15 минут при 700 °С. Далее контейнер охлаждался на воздухе и вновь подвергался термообработке: нормализации при 890 °С в течение 1 часа с последующим охлаждением на воздухе до 300 °С, нагреву и отпуску при 650 °С в течение 1 часа. Все высокотемпературные процессы проводились без распаковки контейнера.

Одновременно такому же режиму термообработки подвергался неборированный образец, также изолированный в контейнере.

Для контроля ХТО и ТО в каждый из контейнеров были помещены образцы-свидетели такого же сечения, что и обрабатываемые образцы.

Все образцы перед борированием и ТО были исследованы на реологической установке.

Подготовленные образцы (очищенные от окалины и обезжиренные) помещались в контейнер на постель из смеси для борирования на основе карбида бора (карбид бора B_4C –

90 %, бура $Na_2B_4O_7$ – 10 %), предварительно набив внутреннюю часть образца этой же смесью, сверху засыпают ту же смесь для борирования. Смесь для борирования предварительно прокалывают при температуре $T = 400$ °С в течение полутора часов для удаления химически связанной воды. Затем в контейнер поверх смеси с образцом укладывают стальную пластину (пластина является разделителем между смесью для борирования и бентонитом для герметизации), поверх пластины засыпают бентонит, который частично исключает подсос воздуха. Смесь для герметизации (бентонит) предварительно прокалывают при $T = 700$ °С в течение двух часов. Поверх смеси для герметизации укладывают лист асбеста.

После полного охлаждения были проведены металлографические исследования образцов-свидетелей.

На внутренней поверхности борированного образца образовался слой боридов толщиной 135–150 мкм, на внешней поверхности – 180 мкм. Слои сплошные, стабильные по толщине по всей поверхности образца. Слой состоит в основном из борида Fe_2B , борного цементита и насыщенной бором α -фазы.

Были произведены исследование микротвердости образцов-свидетелей. Исследование проводилось от насыщаемой поверхности вглубь отливки в трех сечениях шлифа. По средним значениям микротвердости были построены графики зависимости микротвердость-расстояние укола индентора от поверхности. Так как слой состоит из небольших по площади элементов фаз, то не выявлено значений микротвердости отдельных фаз слоя. Выявлено среднее значение микротвердости слоя и среднее значение микротвердости основного металла, также не являющейся однородной (состоящей из металлической матрицы и графитовых включений)

(рисунок 1). Исследования микротвердости подтверждают результаты металлографического исследования – граница слоев находится на глубине 150–180 мкм от поверхности.

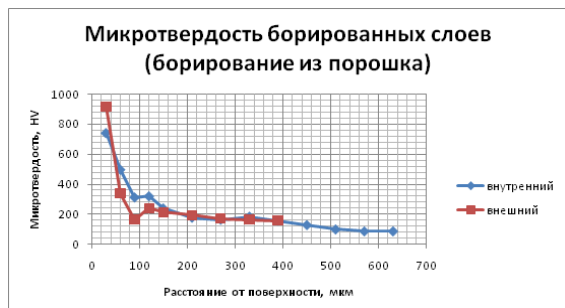


Рисунок 1 – Микротвердость борированных слоев

Борированный и термообработанный образцы были исследованы на реологической установке. Результаты исследований приведены на рисунке 2. Как видно из приведенных графиков, борирование образцов уменьшает склонность испытываемого материала к образованию остаточных деформаций. Последнее уменьшает термонапряженное состояние литейной формы и должно обеспечить повышение ее долговечности.

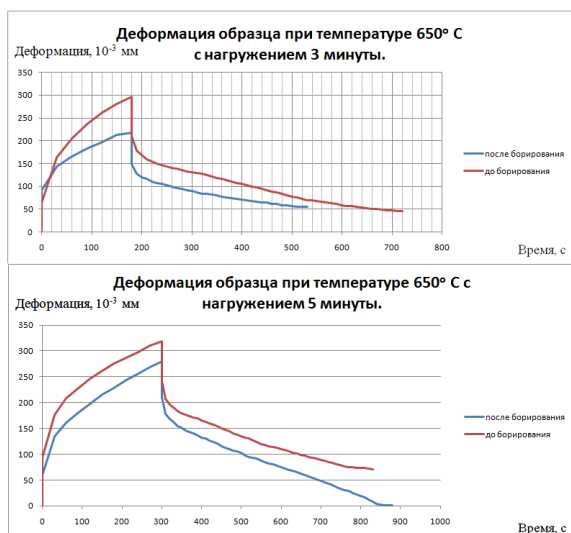


Рисунок 2 – Результаты реологических исследований

Более экономичным способом получения борированных изделий является борирование при заливке жидким расплавом. При заливке стали можно получить борированные слои значительной толщины [2]. Борирование чугуна при заливке исследовано недостаточно.

Проведен предварительный эксперимент по насыщению бором чугунной отливки. Насыщение производилось из обмазки

толщиной 1 мм, состоящей из карбида бора и бентонита, нанесенной на стержень из жидкостекольной смеси. Высота стержня 8–9 мм, диаметр 50 мм.

После сушки при 105–110 °С в течение 2 часов и охлаждения до комнатной температуры, стержень с обмазкой помещался в открытую песчано-глинистую форму в соответствии с рисунком 3. Форма была залита серым чугуном при температуре 1350 °С.

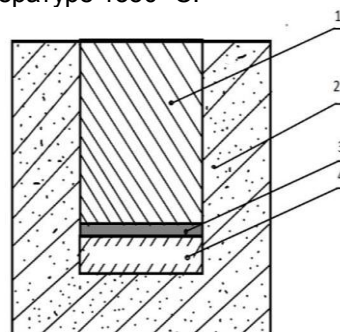


Рисунок 3 – Песчано-глинистая форма для борирования, где 1 – чугунная отливка; 2 – форма; 3 – обмазка; 4 – песчаный стержень

После выбивки и очистки был вырезан элемент отливки для металлографического исследования, дающий наиболее полную информацию о насыщении поверхности на глубину 10 мм и об изменении толщины слоя по радиусу отливки в соответствии с рисунком 4.



Рисунок 4 – Схема вырезки образца

При макроанализе выявлен, а затем подтвержден микроанализом, непрерывный борированный слой с преобладающей по длине шлифа толщиной 1,5–2 мм, и отдельными участками с меньшей толщиной (минимальный слой 650 мкм), состоящий из крупных различно ориентированных кристаллов боридов железа и зон ледебуритной эвтектики. Зона столбчатых боридов отсутствует (рисунок 5).



Рисунок 5 – Совмещенный снимок полученного борированного слоя

При исследовании микротвердости было выбрано минимальное сечение борированного слоя 650 мкм. Высокое значение микротвердости на глубине 250 мкм подтверждает, что в указанной зоне действительно находится крупный кристалл (толщиной 30 мкм и длиной 500 мкм) борида железа Fe_2B . Исследование микротвердости также подтверждает глубину борированного слоя. Как показано на рисунке 6, резкое снижение микротвердости происходит на глубине свыше 650 мкм.

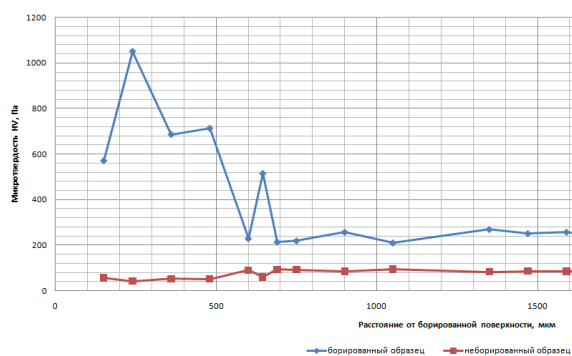


Рисунок 6 – Диаграмма микротвердости

Такое строение борированного слоя, полученного при заливке расплавом формы, предполагает более высокий комплекс механических свойств упрочненного слоя, в частности, его пластичности, что позволяет использовать литые диффузионно-упрочненные детали при динамических и знакопеременных нагрузках без опасности скалывания слоя, несмотря на значительно большую его толщину в сравнении с борированными слоями, полученными классическими способами ХТО [2].

Для оптимизации процесса борирования при литье принят метод Бокса–Уилсона. Идея этого метода основана на последовательной постановке небольшого серий опытов, в каждом из которых одновременно варьируются по определенным правилам переменные факторы, влияющие на изучаемую величину.

В качестве факторов для оптимизации процесса выбраны: x_1 – приведенная толщина

на образца, равная отношению объема образца к суммарной его поверхности; x_2 – начальная температура борирования. А в качестве параметра оптимизации – толщина борированного слоя y .

Количество опытов в матрице рассчитано по формуле (где k – количество факторов):

$$N = 2^k = 2^2 = 4.$$

Таблица 1 – Матрица планирования

№ опыта	x_1	x_2	$x_1 x_2$	Y
1	-	-	+	30
2	+	-	-	240
3	-	+	-	60
4	+	+	+	240

Для выполнения опытов в соответствии с матрицей планирования (таблица 1) была изготовлена модельная плита, на которой размещены модели из алюминиевого сплава для двух типоразмеров чугуновых борлируемых отливок (рисунок 7). Модели II, III, V, VII, X, XI, XIV, XV для получения отливок массой $m_{отлб} = 1,13$ кг и модели I, IV, VI, VIII, IX, XII, XIII, XVI для получения отливок массой $m_{отлм} = 0,37$ кг.

Каждая ветвь, состоящая из четырех моделей, соответствует одному дублю выполнения опытов в соответствии с матрицей. Следовательно, с помощью этой модельной плиты можно одновременно провести четыре дубля опытов. Одновременная заливка из центрального стояка позволит исключить влияние на борирование колебаний температуры заливки и химического состава сплава.

Таблица 2 – Уровни факторов

Фактор	Верхний уровень	Нижний уровень	Основной уровень
x_1	9,66 мм	6,27 мм	8,0 мм
x_2	1160 °C	980 °C	1070 °C

Для изменения начальной температуры борирования (фактор x_2 матрицы планирования) варьировалось расстояние между парами отливок и расстояние от центрального стояка (таблица 2). Контроль температуры борирования контролировался термопарами,

состоящими из двух вольфрамо-рениевых проводов ВР5 и ВР20 где 5 и 20 % рения соответственно. Кроме того, проводился расчет температур борирования с помощью разработанной программы [3]. Данные по температурам хорошо совпадали (рисунок 8). На рисунке 9 приведены вводимые данные для расчета температур.

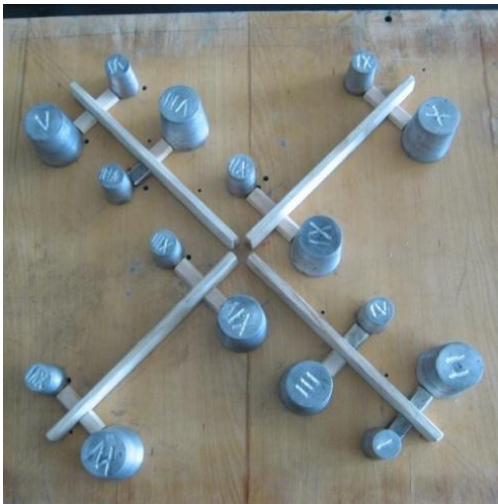


Рисунок 7 – Модельная плита

Для создания обзамок был использован стальной лист, толщиной 1 мм, из которого вырезались пластинки диаметром соответствующие размеру моделей отливок, на которые наносился слой боридной обзапки и сушился в печи при температуре 100 °С (рисунок 10).

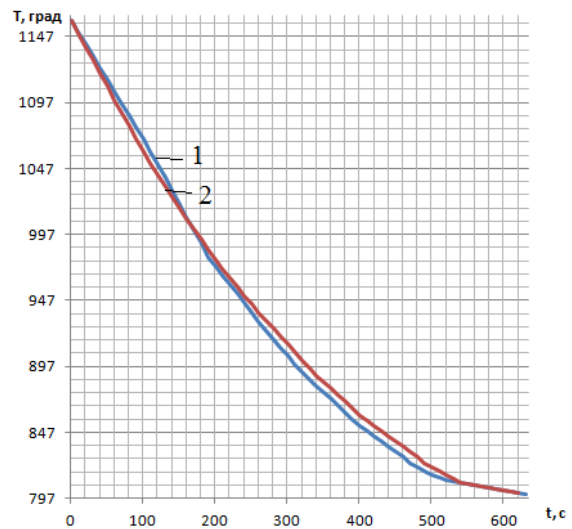


Рисунок 8 – Температурное распределение в песчано-глинистой форме:
1 – рассчитанное в программе;
2 – экспериментально измеренное

После формовки и извлечения моделей обзапка в соответствии со своим размером устанавливалась в каждой полости нижней полуформы, полуформы собирались, и производилась заливка. Спай термопар фиксировал температуру слоя обзапки, прилегающий непосредственной к поверхности чугунной отливки. На рисунке 11 приведены изменения температур в полостях V (ближняя к центральному стояку) и XV (дальняя полость).

Параметр	Значение
Металл отливки	СЧ20
Температура заливки (град. Цельсия)	1159
Температура фоны	300
Температура кристаллизации сплава	1001
Температура выбивки	800
Шаг по длине отливки	0,019
Шаг по длине формы	0,01
Шаг в град.	1
Кoeffициент теплопроводности жидкого металла	0,000027
Кoeffициент теплопроводности твердого металла	0,000017
Кoeffициент теплопроводности формы	0,0000007
Кoeffициент теплопроводности борированного слоя	3
Толщина диаметра отливки	0,053
Толщина стенки формы	0,014
Толщина борированного слоя	0,0006
Теплоемкость материала отливок	480
Плотность материала отливок	7100
Шаг по времени	12
Температура, при которой и выше находится кокель	500
Температура окружающей среды	29

Рисунок 9 – Данные для расчета

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА БОРИРОВАНИЯ ЧУГУНА ПРИ ЛИТЬЕ



Рисунок 10 – Обмазка для борирования

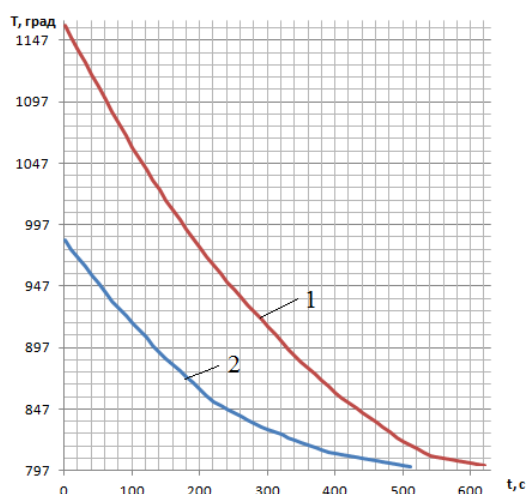


Рисунок 11 – Графики зависимости изменения температуры на границе отливка – обмазка от времени: 1 – первая термопара (полость V); 2 – вторая термопара (полость XV).

Если принять за начальную температуру интенсивного растворения бора в железе 850 °С [4], то дальний образец (XV) находится в зоне интенсивного борирования 220 с, а ближний (V) – 440 с. В результате структурных исследований установлено, что этой продолжительности достаточно для формирования боридных слоев во всех образцах.

Для построения уравнения регрессии рассчитаны его коэффициенты и получено окончательно:

$$y = 150 + 105x_1 + 15x_2.$$

Из уравнения следует, что увеличение приведенной толщины отливки и начальной температуры борирования приводит к росту толщины слоя. В указанных пределах варьирования факторов наибольшее влияние на толщину слоя оказывает приведенная толщина отливки. По уравнению легко рассчитать градиент движения, по которому можно попасть в оптимальную область.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литье в кокиль / под. ред. А. И. Вейника. – М.: Машиностроение, 1980. – 415 с.
2. Гурьев, М. А. Повышение износостойкости деталей машин и инструмента поверхностным легированием при производстве литых изделий: дис. ... канд. техн. наук. – Барнаул, – 2010. – 191 с.
3. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013618009. Расчет температурных полей в многослойной форме / Г. А. Мустафин, Т. В. Мустафина, А. П. Гроссу. – № 2013615793; заявл. 04.07.2013; регистр. в Реестре программ для ЭВМ 28.08.2013г.
4. Костик, В. О. Формирование микроструктуры борированного слоя на поверхности углеродистой конструкционной и инструментальной сталей из обмазок при печном нагреве / В. О. Костик, О. В. Сапуцкая, Е. А. Костик // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – 5/1 (17). – С. 63–64.

Мустафина Татьяна Владимировна – аспирант кафедры МТМО, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, тел. 8-929-378-5199, mystaphina@mail.ru.

Мустафин Геннадий Акрамович – к.т.н., доцент кафедры МТМО, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова тел. 8-929-378-5234, mustafing@mail.ru.

Марширов Игорь Викторович – к.т.н., доцент кафедры МТМО, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, тел. 24-54-90, i_marsh@mail.ru.