Н. И. Габельченко, Н. А. Кидалов, А. А. Белов, М. Д. Безмогорычный, А. И. Габельченко

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАМЕДЛЕНИЯ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ
В ИНТЕРВАЛЕ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ
НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОТЛИВОК ИЗ СЕРОГО ЧУГУНА**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mitlp@vstu.ru

Работа посвящена исследованию влияния замедления скорости охлаждения в интервале эвтектического превращения на структуру и механические свойства отливок из серого доэвтектического чугуна. Для замедления скорости охлаждения в интервале эвтектического превращения использовали экзотермическую углеродосодержащую добавку – мазут топочный М-100. Показано, что применение регулируемого охлаждения позволяет значительно увеличить показатель качества чугуна без введения в состав чугуна дополнительных легирующих элементов.

Ключевые слова: отливка, чугун, эвтектическое превращение, углеродосодержащая добавка, скорость охлаждения, механические свойства.

N. I. Gabelchenko, N. A. Kidalov, A. A. Belov, M. D. Bezmogorychnyy, A. I. Gabelchenko

**RESEARCH OF THE INFLUENCE OF SLOW-DOWN COOLING SPEED
IN THE INTERVAL OF EUTECTIC TRANSFORMATION ON THE STRUCTURE
AND MECHANICAL PROPERTIES OF CAST IRON CASTINGS**

Volgograd State Technical University

The work is devoted to the study of the effect of slowing down the cooling rate in the interval of eutectic transformation on the structure and mechanical properties of castings from gray doeutectic iron. To slow down the cooling rate in the interval of eutectic transformation, an exothermic carbon-containing additive, fuel oil M-100, was used. It is shown that the use of controlled cooling can significantly increase the quality index of cast iron without introducing additional alloying elements into the composition of cast iron.

Keywords: casting, cast iron, eutectic transformation, carbon-containing additive, cooling rate, mechanical properties.

Введение

Среди конструкционных материалов, используемых в машиностроении, важное место по-прежнему принадлежит железоуглеродистым сплавам, повышение качественных характеристик которых является актуальной проблемой литейного производства. Существующие методы решения данной проблемы с применением легирования и совершенствования технологии выплавки металла уже во многом исчерпали возможности все более возрастающих требований к прочностным свойствам отливок.

Общеизвестно, что скорость охлаждения отливки влияет на образование той или иной структуры чугуна. При этом считают, что с увеличением скорости охлаждения отливки повышается содержание в чугуне цементита; с уменьшением скорости охлаждения отливки увели-

чивается содержание в чугуне графита [1–5]. Однако влияние скорости охлаждения в локальных температурно-временных интервалах кристаллизации чугуна совсем неоднозначно и принципиально по-разному влияет на формирование структуры, а значит, и механических свойств серого чугуна [6–8].

Если отдельно рассматривать схему кривой охлаждения серого чугуна (рис. 1), то первый структурно чувствительный интервал представляет собой интервал дендритного роста от начала кристаллизации до достижения им температуры эвтектического превращения. Именно в этом интервале формируются дендриты первичного аустенита, и повышение скорости охлаждения приведет к увеличению дисперсности формируемой структуры, а значит, положительно скажется на прочностных характеристиках чугуна.

Рис. 1. Кривая охлаждения чугуна:

T_L – температура начала кристаллизации дендритов; $T_{эвт}$ – эвтектический интервал температур, в котором происходит кристаллизация эвтектики; T_S – температура конца затвердевания; V_1 – скорость охлаждения жидкой фазы; V_2 – скорость дендритной кристаллизации; V_3 – скорость эвтектической кристаллизации; V_4 – скорость охлаждения затвердевшего чугуна; $\tau_{ден}$ – продолжительность дендритной кристаллизации; $\tau_{эвт}$ – продолжительность эвтектической кристаллизации [9]

Следующим структурно-чувствительным интервалом является температурно-временной интервал эвтектического превращения. Состав эвтектики и температура эвтектического превращения зависят от того, по какой системе (стабильной или метастабильной) оно происходит. При превращении по стабильной системе эвтектика состоит из смеси аустенита и графита. В метастабильной системе эвтектическое превращение протекает при более высоких скоростях охлаждения и эвтектика – ледебурит – состоит из смеси аустенита и цементита [1–6].

После эвтектического превращения замедление или ускорение охлаждения чугунной от-

ливки в интервале температур перекристаллизации неизбежно отражается на соотношении в структуре металлической основы перлита и феррита. При повышении скорости охлаждения в структуре увеличивается количество перлита и повышается его дисперсность. При замедлении скорости охлаждения возрастает количество феррита, а перлит становится вначале среднепластинчатым, а затем и грубопластинчатым, существенно утрачивая свою твердость и прочность [8–10].

При этом, несмотря на наличие по меньшей мере трех структурно чувствительных интервалов в период кристаллизации и охлаждения –

дендритная кристаллизация, эвтектическая кристаллизация, перлитное превращение, – основные характеристики качества чугуна формируются в двух первых, т. е. в интервале дендритной и эвтектической кристаллизации [6]. Поэтому для достижения гарантированной структуры серого чугуна в доэвтектическом интервале температур необходимо увеличить скорость охлаждения, а в интервале эвтектического превращения следует замедлить протекание процесса затвердевания. Дифференцируемые режимы охлаждения отливок в этих структурно-чувствительных интервалах, исключая-

щие однонаправленность термокинетических воздействий на металл, могут решить проблему оптимизации структуры и повышения качества чугунных отливок.

Материалы и методы исследования

Отработку режима получения отливок с дифференцированным охлаждением в литейной форме проводили на доэвтектическом чугуне, кристаллизующимся с отбелом в клиновой пробе. В таких отливках формируются структуры половинчатого чугуна [1, 5]. Химический состав полученного чугуна представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав чугуна

Значения элементов в пробах (масс. %)										S ₃ *
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	
3,5	0,77	2,68	0,05	0,042	0,055	0,119	0,22	0,009	0,017	0,99

*S₃=C/4,3-(0,3(%Si)+0,027(%Mn)-0,3(%P)-0,4(%S)+0,063(%Cr)+0,015(%Mo)-0,053(%Ni)-0,074(%Cu)+0,135(%V)) [11]

Шихту доэвтектического серого чугуна указанного выше состава (табл. 1) расплавляли в среднечастотной индукционной нагревательной установке «ИПП-15». Затем жидкий чугун при температуре 1450 °C ±10 °C заливался в экспериментальную песчано-глинистую литейную форму. По достижении отливкой температуры 1300 °C в ресивер подавали сжатый воздух при давлении 3 атм, и температуре 1100 °C продувку завершали. Температуру отливок фиксировали при помощи платина-сплава платины и родия (10 % Rh) термопар.

В нижнюю опоку формовали две равноудаленные от стояка литниково-питающей системы цилиндрические модели (контрольная и опытная) диаметром 13 мм, высотой 120 мм. Форма в сборе герметично устанавливалась на поддон (ресивер). Внутри поддон был разделен на две половины, к одной из которых обеспечивался подвод сжатого воздуха. Контроль расхода воздуха осуществлялся редуктором. Вторая половина оставалась изолированной от продувки изоляционной перегородкой, что позволяло контрольной отливке затвердевать обычным путем. Активацию экзотермической добавки проводили сжатым воздухом, который при попадании в полость формы возбуждал реакцию горения добавки, сопровождающуюся выделением тепла.

Для замедления скорости охлаждения было решено в облицовочную формовочную смесь вводить экзотермическую углеродосодержащую

добавку – мазут топочный М-100 в количестве 3 %. Состав наполнительной смеси – песок Орловского карьера 2К2О₂02 и бентонитовая глина БС1Т₂. Влажность смеси составляла 4 %. Сравнение полученных результатов достигали одновременной записью кривых охлаждения отливок с регулируемым и нерегулируемым охлаждением в экспериментальной литейной форме на потенциометре «КСП-4». Далее из полученных отливок вырезались и подготавливались образцы для металлографического анализа и определения механических свойств.

Металлографические исследования полученных образцов проводили на микроскопе «OLYMPUS BX51M». Травление образцов на действительную структуру производили в 4%-м растворе HNO₃. Далее исследовались механические свойства контрольной и опытной отливок. Временное сопротивление σ_b , Н/мм² определялось в соответствии с ГОСТ 1497-84 на испытательной универсальной машине «ИР 5082-100». Для определения твердости исследуемых образцов по методу Бринелля (ГОСТ 9012-59) применялся твердомер «ТБ 5004».

Результаты и их обсуждение

К моменту эвтектического превращения происходили активация экзотермической углеродосодержащей добавки и выделение теплоты на этапе формирования эвтектики. Кривые охлаждения контрольной и опытной отливок представлены на рис. 2.

Рис. 2. Кривые охлаждения контрольной и опытной отливок

Как видно из рисунка, активация углеродосодержащей добавки формовочной смеси опытной отливки сжатым воздухом в начале эвтектического превращения позволила разогреть литейную

форму и уменьшить степень переохлаждения на 23 °С, что отразилось на формировании аустенито-графитной эвтектики и способствовало резкому снижению количества ледебурита (рис. 3).

а

б

Рис. 3. Микроструктура контрольной (а) и опытной (б) отливок

Замедление скорости охлаждения в интервале эвтектического превращения, увеличивая графитизирующую способность чугуна, существенно уменьшило образование эвтектических карбидов в его в структуре, соответственно снижая отбел. В этом состоит положительный эффект замедления скорости охлаждения в дан-

ном структурно-чувствительном интервале посредством разогрева литейной формы, который реализуется без повышения степени эвтектичности чугуна при неизменном количестве графитизирующих элементов химического состава.

Механические свойства опытной и контрольной отливок представлены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства полученных отливок

Отливка	Временное сопротивление σ_b , Н/мм ²	Твердость, НВ	Показатель качества $K = \sigma_b / \text{HB}$ [1]
Контрольная	238	229	1,03
Опытная	260	217	1,35

В результате такого изменения скорости охлаждения предел прочности на разрыв опытной отливки увеличен на 9 %; твердость снижена на 5 %; показатель качества при этом увеличен на 31 %, что говорит об эффективности примененного режима охлаждения.

Выводы

1. Показана возможность замедления скорости охлаждения чугуновой отливки в период эвтектического превращения за счет активации в облицовочном слое формовочной смеси углеродосодержащей экзотермической добавки мазутоп М-100.

2. Замедление скорости охлаждения отливки в песчано-глинистой литейной форме в интервале эвтектического превращения позволяет значительно увеличить показатель качества серого чугуна без введения в его состав дополнительных легирующих элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник по чугунному литью / А. А. Жуков [и др.] ; под ред. Н. Г. Гиршовича. – Л. : Машиностроение ; Ленингр. отд-ние, 1978. – 758 с.

2. *Glicksman, M. E.* Principles of solidification, an introduction to modern casting and crystal growth concepts / M. E. Glicksman. – New York : Springer-verlag, 2010. – 520 p.

3. *Christian, J. W.* The theory of transformations in metals and alloys / J. W. Christian. – Oxford : Elsevier Science Ltd., 2002. – 1200 p.

4. *Mingguo, X.* Bidirectional impact of undercooling on eutectic structural formation of hypoeutectic grey iron and its physical connotation / X. Mingguo, Z. Changan, Z. Jianxin // Materials Research Innovations. – 2015. – № 19. – P. 5157–5162.

5. *Гиршович, Н. Г.* Кристаллизация и свойства чугуна в отливках / Н. Г. Гиршович. – М. : Metallurgy, 1979. – 562 с.

6. *Бунин, К. П.* Строение чугуна / К. П. Бунин, Ю. Н. Таран. – М.: Metallurgy, 1972. – 160 с.

7. *Górny, M.* Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of thin-walled ductile iron castings / M. Górny, E. Tyrała // J. Mater. Eng. Perform. – 2013. – № 22 (1). – P. 300–305.

8. Исследование режимов охлаждения чугунных отливок / Л. В. Костылева, В. А. Ильинский, Н. И. Габельченко, А. В. Пожарский, В. А. Гулевский // Литейное производство. – 1999. – № 2. – С. 9–11.

9. Study of the effect of differentiated cooling modes on the structure and mechanical properties of gray cast iron / Н. И. Габельченко, Н. А. Кидалов, А. А. Белов, А. И. Савченко, Н. В. Григорьева // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – N 747. – С. 7.

10. *Габельченко, Н. И.* Production of High-Quality Castings from Gray Iron by Differentiated Cooling in Iron Mould / Н. И. Габельченко, А. А. Белов, О. А. Мещерякова // Materials Science Forum. – 2019. – N 973. – С. 15–20.

11. Cast iron / L. Sofroni, I. Riposan, V. Brabie, M. Chisamera // Editura Didactica si Pedagogica Publisher. – 1985. – P. 36–49.