

**Н. Я. Терещенко, Т. К. Пилипенко, В. С. Дорошенко, О. А. Яковышин,  
Н. В. Бабич, М. Намдармогадам\***

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

\*Компания "Azarin Nam Co", Иран

## **ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК ПРИ ЛИТЬЕ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ В ФОРМАХ ИЗ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА И МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ДРОБИ\***

*Изложены результаты исследований влияния термодинамических и кинетических факторов кристаллизации на формирование структуры отливок из серого и высокопрочного чугунов. Отмечено дифференциальное влияние изменения сечения опытной отливки на морфологию и количество структурных составляющих.*

*Представлено результати досліджень впливу термодинамічних і кінетичних факторів кристалізації на формування структури виливків з сірого та високоміцного чавуну. Відмічається диференційний вплив зміни перерізу дослідної виливки на морфологію та кількість структурних складових.*

*The results of researches of influencing of thermodynamics and kinetic factors of crystallization on forming of structure of castings from gray iron and high-strength cast iron are expounded. Differential influence on morphology and quantity of structural constituents of change of section of the experimental casting is marked.*

**Ключевые слова:** чугун, модифицирование, литье по газифицируемым моделям, температурное поле, наполнитель формы, микроструктурный анализ.

В процессе разработки технологических основ получения отливок с управляемой структурой и свойствами в литейных песчаных формах с дифференцированными теплофизическими характеристиками проведены исследования формирования структуры чугунов в отливках при изменении термодинамических и кинетических факторов их затвердевания. Интенсивность теплоотвода от поверхности отливки является решающим фактором, определяющим скорость охлаждения металла, а толщина стенки отливки и теплопроводность формы являются наиболее удобными для регулирования двумя параметрами, которые одновременно оказывают существенное влияние на скорость затвердевания и охлаждения металла в литейной форме.

С целью изучения влияния вышеуказанных факторов на структуру чугуновых отливок в условиях опытного производства института были проведены опытные плавки и изготовлены образцы по описанной ниже методике. Объектом исследования являлись серые и высокопрочные чугуны, выплавленные в индукционной печи ИСТ-0,16 с кислой футеровкой. В качестве шихтовых материалов применяли литейные и передельные доменные чушковые чугуны (ГОСТы 4832-80, 805-80), возврат серого и высокопрочного чугунов, стальной лом (ГОСТ 2787-86), ферросилиций ФС25 и ФС45. Химический состав чугуна следующий, %: углерод — 3,4-3,6; кремний — 2,2-2,7; марганец — 0,4-0,5; сера — 0,012-0,015; фосфор — 0,1.

Для сфероидизации графита при получении ЧШГ применяли кремниймагнелиевую лигатуру типа ФСМг (ТУ 14-5-134-86), которую производили в г. Гельмязеве (Украина). Сфероидизирующие присадки в дробленом виде (фракция 0,5-5,0 мм) вводили в разливочный ковш в начале наполнения его жидким металлом. Расход лигатуры составлял 2,0-2,2 % от массы жидкого металла. Сфероидизирующее модифицирование проводили при температуре 1450-1480 °С. Для графитизирующего модифицирования применяли ФСБа65 фракции до 0,3 мм.

\*Работа выполнена под руководством проф. О. И. Шинского

Для изучения структуры и механических свойств отливок из чугуна в вакуумируемых формах из сухого несвязанного кварцевого песка и чугунной дробы фракции 0,2-1,0 мм по технологии литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) в вакуумируемую форму с разрежением  $50 \pm 5$  кПа отливали ступенчатые пробы размером 400x100 мм с четырьмя ступенями различной толщины: 20, 15, 10 и 5 мм. Чертеж модельного блока показан на рис. 1.

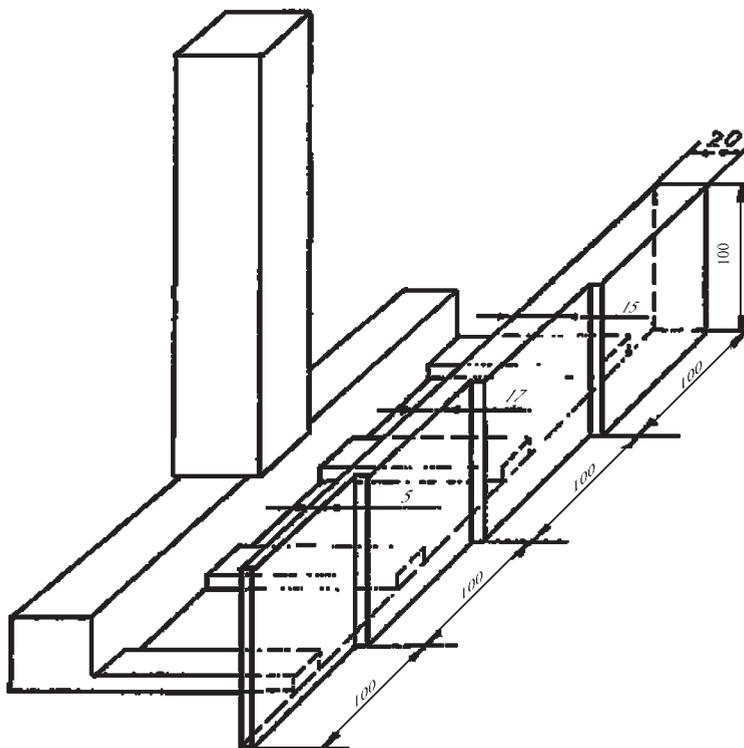
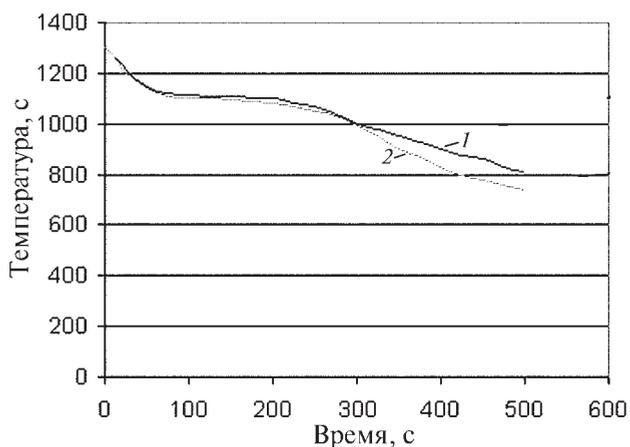


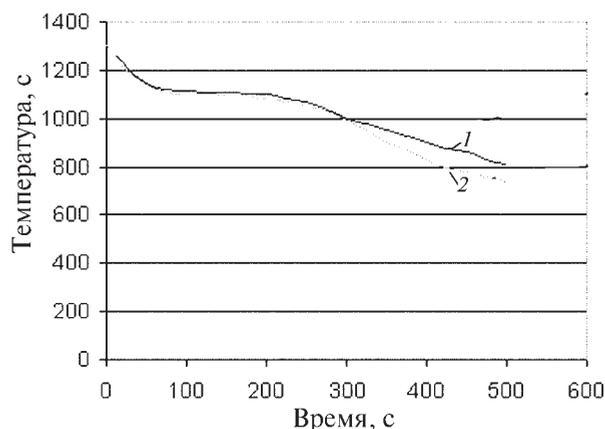
Рис. 1. Ступенчатая проба для исследования затвердевания и охлаждения чугуна

При исследовании температурных полей пробы температуру измеряли с помощью четырех хромель-алюмелевых (ХА) термопар с незащищенными спаями и многоканального устройства МИРТ-8 (разработка отдела автоматизации ФТИМС НАН Украины) для измерения и регистрации температуры.

Ход температурной кривой кристаллизации сплава определяется соотношением скоростей выделения скрытой теплоты кристаллизации и отвода теплоты от кристаллизующегося объема. При сохранении постоянных условий технологии плавки и заливки металла изменения в характере температурной кривой кристаллизации расценивали как результат изменения условий теплоотвода. Из данных термического анализа затвердевания пластины толщиной 20 мм видно (рис. 2, а, б), что кристаллизация отливок, полученных при использовании в качестве наполнителя формы металлической дробы, происходит при ускоренном охлаждении по сравнению с кварцевым песком и, как следствие, при относительном переохлаждении  $\Delta T_3$ , равном примерно  $15^\circ\text{C}$ , для ЧПГ и ЧШГ. Относительное переохлаждение расплава  $\Delta T_3$  определяли как разность между уровнями эвтектических остановок при эвтектической кристаллизации ЧПГ и ЧШГ в формах с наполнителями из кварцевого песка и металлической дробы.



а



б

Рис. 2. Охлаждение ЧШГ в сыпучем наполнителе (а): 1 — кварцевый песок, 2 — металлическая дробь; охлаждение СЧ в сыпучем наполнителе (б): 1 — кварцевый песок, 2 — металлическая дробь

Как показал микроструктурный анализ образцов из ступенчатых проб ЧПГ (рис. 3), замена кварцевого песка в качестве наполнителя формы на металлическую дробь приводит к изменению морфологии и размеров графитных включений в стенках отливок разной толщины. Особенно эти изменения заметны в пластине толщиной 5 мм и в поверхностных слоях (глубиной до 2 мм) пластин толщиной 10, 15, 20 мм. Наблюдающиеся здесь формы междендритного точечного графита Гр4 и ПГр8 (тонкодифференцированная графитная эвтектика) кристаллизуются при большом переохлаждении вне зависимости от причин, обусловивших его появление, и имеют характерное название «переохлажденный». Применение этого термина допускается, когда речь идет о переохлаждении жидкого раствора, что в нашем случае согласуется с данными термического анализа [1].

Известно, что ликвационные явления при кристаллизации Fe-C-Si сплавов влияют на изменение концентрационно-температурных условий образования избыточных и эвтектических фаз и их количественные соотношения, обуславливают переход в процессе эвтектического превращения от стабильного варианта к метастабильному, возникно-

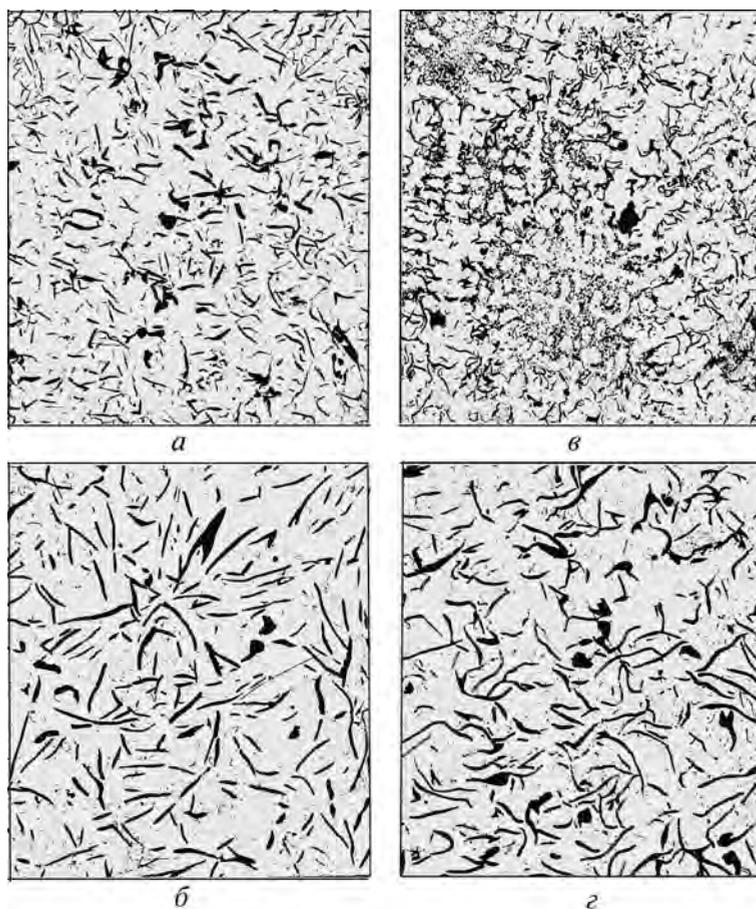


Рис. 3. Форма и размер графита в отливках ЧПГ; наполнитель формы: *а, б* – кварцевый песок; *в, г* – металлическая дробь; толщина отливки, мм: (*а, в* – 5; *б, г* – 15),  $\times 100$

вению неравновесных фаз и различных структурных модификаций эвтектики. Химическая неоднородность ликвационного происхождения отражается после затвердевания на структурно-кинетических особенностях распада переохлажденного аустенита.

Образование в тонких слоях у поверхности отливок графита ПГр 4 и ПГр 8 в условиях ускоренной кристаллизации подавляет кристаллизацию ледебурита в этих местах. Возникающие графито-аустенитные колонии отличаются очень тонкой дифференцировкой графитного агрегата, в результате чего диффузионные расстояния на фронте кристаллизации А+Г агрегатов значительно сокращаются. Поэтому такие колонии характеризуются четко выраженным кооперативным ростом, типичным для тонких эвтектик и позволяющим успешно конкурировать графитной эвтектике в скорости роста с цементитной эвтектикой [2]. Это является причиной того, что металлической основой в формах графита ПГр4 и ПГр8 чаще всего является феррит, для которого также иногда применяют термин “феррит переохлаждения” [3] (рис. 4). Все вышесказанное объясняет микроструктуру, наблюдаемую в пластине толщиной 5 мм и в поверхностных слоях пластин толщиной 10, 15 и 20 мм, полученных в форме из металлической дроби. В центральных частях пластин толщиной 10, 15 и 20 мм изменения микроструктуры по сравнению с отливкой, полученной в кварцевом песке, не столь значительны.

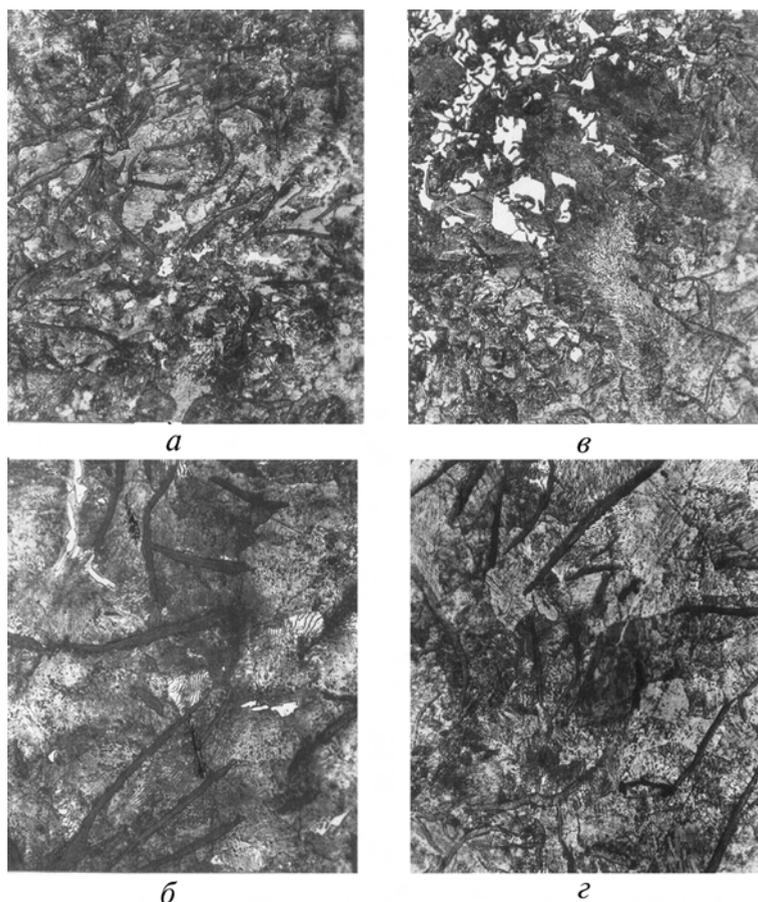


Рис. 4. Металлическая основа в отливке ЧПГ; наполнитель формы: а, б – кварцевый песок; в, г – металлическая дробь; толщина отливки, мм: (а, в – 5; б, г – 15), x500

Морфология графитных включений не меняется, наблюдаются некоторые изменения графита и уменьшается диаметр графито-аустенитных эвтектических колоний (первичного зерна) с 250 при наполнении формы кварцевым песком до 200 мкм при заливке в металлическую дробь, то есть в центральных частях пластин толщиной 10, 15 и 20 мм происходит измельчение элементов первичной структуры при кристаллизации примерно на 20 %. Металлическая матрица в обоих случаях практически одинаковая.

Микроструктурный анализ отливок из ЧШГ показал, что использование в качестве наполнителя формы металлической дроби и возросшая при этом степень переохлаждения расплава при кристаллизации с увеличением скорости теплоотвода, а значит и скорости охлаждения, приводит к увеличению числа шаровидных включений графита в 1 мм<sup>2</sup> площади шлифа в сечениях 10, 15 и 20 мм. Если в форме из кварцевого песка эти значения были 224, 168 и 148 ед, то в форме из металлической дроби – 316, 220, и 165 ед в сечениях 10, 15 и 20 мм соответственно, поскольку с увеличением скорости охлаждения, а следовательно, и степени переохлаждения расплава чугуна, повышается способность в расплаве к самопроизвольному возникновению центров кристаллизации, так как действие имеющихся в расплаве зародышей кристаллизации ослабляется интенсивностью теплоотвода [4].

В металлической основе также происходят структурные изменения под действием увеличивающейся скорости кристаллизации расплава ЧШГ. В каждом сечении сту-

## Кристаллизация и структурообразование сплавов

пенчатой отливки из ЧШГ изменяется соотношение перлит-феррит в сторону увеличения количества перлита, количество ферритной составляющей сокращается (рис. 5). Так, если в пластинах сечением 10, 15 и 20 мм из отливки, полученной в форме из кварцевого песка, доля перлита в металлической основе составляет 30-40 %, то в отливке, полученной в форме из металлической дробы, она увеличивается до 70-85 %.

Наибольшее изменение в отношении характера металлической матрицы наблюдается в пластине толщиной 5 мм из отливки, полученной в форме из металлической дробы. Здесь наименьшее количество феррита (Ф5), наибольшее — перлита (П95). Увели-

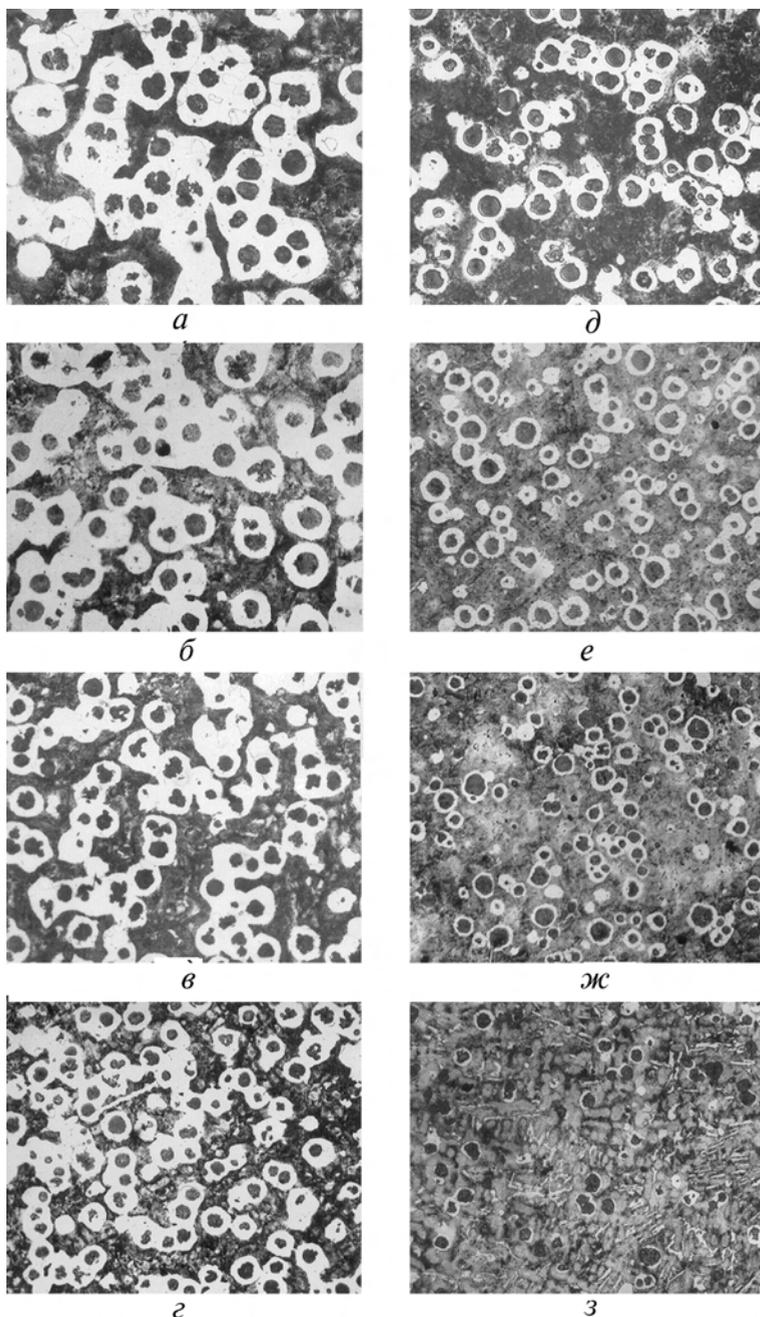


Рис. 5. Микроструктура в отливках из ЧШГ; наполнитель формы: а-г — кварцевый песок; д-з — металлическая дробь; толщина отливки, мм: (г, з — 5; в, ж — 10; б, е — 15; а, д — 20 мм),  $\times 100$

чение переохлаждения  $\Delta T_3$ , а значит и скорости охлаждения, в этом случае приводит к кристаллизации расплава частично по стабильной системе и образованию в структуре металлической основы цементита (Ц 10) в виде отдельных изолированных включений, расположенных в перлите неравномерно по площади шлифа.

### Выводы

- Термический анализ процесса затвердевания ЧПГ и ЧШГ показал, что кристаллизация расплава (образование аустенито-графитной эвтектики) в форме из металлической дробы происходит при ускоренном охлаждении и, как следствие, при относительном переохлаждении расплава  $\Delta T_3$ , равном примерно 15 °С.
- Анализ микроструктур исследованных отливок показал, что при прочих равных условиях применение металлической дробы как наполнителя формы при литье по газифицируемым моделям уменьшает дисперсность графитных включений; приводит к измельчению графито-аустенитных эвтектических колоний (первичного зерна) на 20 %, увеличивает число шаровидных включений графита в 1 мм<sup>2</sup> площади шлифа и долю перлитной составляющей в металлической основе.
- Наибольшие изменения в морфологии структурных составляющих проявляются в пластине толщиной 5 мм для ЧПГ и ЧШГ и в поверхностном слое глубиной до 2 мм в пластинах толщиной 10, 15 и 20 мм.
- В случае необходимости исключения неблагоприятных структурных составляющих (графита ПГр4, ПГр8 и цементита) следует корректировать технологические параметры получения чугуна, применяя графитизирующее модифицирование, либо снижать скорость затвердевания, переходя на форму из кварцевого песка.



### Список литературы

1. Бунин К. П., Малиночка Я. Н., Таран Ю. Н. Основы металлографии чугуна. — М.: Metallurgia, 1969. — 416 с.
2. Таран Ю. Н. // Изв. АН СССР. Металлы. — 1965. — № 3. — С. 131.
3. Чугун: Справочное издание / Под ред. А. Д. Шермана, А. А. Жукова. — М.: Metallurgia, 1991. — 576 с.
4. Богачев И. Н. Металлография чугуна. — Свердловск: Metallurgizdat, 1962. — 392 с.

Поступила 12.01.2009