

УДК 669.131  
DOI: 10.12737/17141

С.В. Давыдов, Д.А. Болдырев, В.М. Сканцев, Л.И. Попова

## ЭВОЛЮЦИЯ НЕРЕГЛАМЕНТИРУЕМЫХ ФОРМ ГРАФИТНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ГРАФИТИЗИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЧУГУНАХ

Проанализировано и обосновано влияние эволюции формы графита от пластинчатой к шаровидной на свойства конструкционных чугунов, рассмотрены их особенности, оценена перспективность их промышленного применения. Показана целесообразность рационального использования для изготовления отливок нерегламентированных графитизированных чугунов с промежуточной, пе-

реходной морфологией графитных включений взамен высоких марок серого чугуна с пластинчатым графитом (СЧ30, СЧ35) и ковкого чугуна. Приведено обоснование уместного использования чугунов данных типов с учётом их особенностей.

**Ключевые слова:** конструкционные чугуны, графит, микроструктура, механические свойства.

S.V. Davydov, D.A. Boldyrev, V.M. Skantsev, L.I. Popova

## EVOLUTION OF UNREGULATED FORMS OF GRAPHITE INCLUSIONS IN GRAPHITIZED STRUCTURAL CAST IRON

The evolution influence of the graphite form (from a plate-type form to a globular one) upon structural cast iron properties was analyzed and grounded, there were also considered cast iron peculiarities and prospects of their commercial application is estimated. For castings production the expediency of rational application of unregulated graphitized cast iron with the intermediate transitional morphology of graphite inclu-

sions instead of grey iron high grades with lamellar graphite (GI 30, GI 35) and malleable cast iron is shown. The appropriate use substantiation of mentioned cast iron types taking into account their peculiarities is shown.

**Key words:** structural cast iron, graphite, microstructure, stress-strain properties.

До настоящего времени в РФ и за рубежом в нормативных документах официально закреплены 4 типа конструкционных чугунов в зависимости от формы графитных включений: СЧПГ, ЧВГ, КЧ и ВЧШГ. Однако в процессе сфероидизирующего модифицирования расплава чугуна эволюция формы графитных включений от пластинчатой к шаровидной через вермикулярную протекает не дискретно, скачкообразно, а непрерывно, монотонно, через формирование разнообразных промежуточных, переходных форм графита, до сих пор полноценно не классифицированных, движущие силы и механизм образования которых не объяснены.

Актуальной и в полной мере не решённой проблемой, имеющей важное прикладное значение, является необъяснённая, необоснованность формирования нормированных (по ГОСТ 3443-87) и ненормированных форм графитных включений в чугунах, их размеров, распределения, количественных характеристик в за-

висимости от комплекса технологических факторов (химического состава чугуна, температуры выплавки и заливки, параметров модифицирующей обработки (в том числе химического и фракционного состава модификаторов), габаритов, толщины стенки, особенностей конструкции отливки и др.).

Многие из нерегламентированных форм графита в чугуне априорно, без достаточной аргументации относятся к дефектам литейного происхождения, часто не отличаются стабильностью (воспроизводимостью). При этом их влияние на механические и эксплуатационные свойства чугуна до сих пор основательно не исследовано. Некоторые из форм графита действительно имеют отрицательное влияние на комплекс свойств чугуна. Это, например, такие вырожденные формы шаровидного графита, как колонии ВГр5 вермикулярного графита («чанки»-графит) - результат высокого содержания РЗМ (рис. 1), «взорванный» графит ШГф1, формирую-

щийся вследствие высокого углеродного эквивалента, низкой скорости охлаждения или высокого содержания РЗМ (рис. 2), игольчатый графит ПГф3, выделяющийся при высоком содержании свинца, висмута и сурьмы (рис. 3), на образование которых объективно влияют явные отклонения, нарушения в технологическом процессе.

Однако при обработке расплава чугуна элементами-сфероидизаторами в

определённых диапазонах их концентраций в структуре чугуна происходит постепенное видоизменение морфологии графитных включений от пластинчатой формы к вермикулярной и шаровидной. Наименее исследованными и поэтому представляющими наибольший интерес являются формы графита, образующиеся в структуре чугуна при превращении пластинчатой формы в вермикулярную.

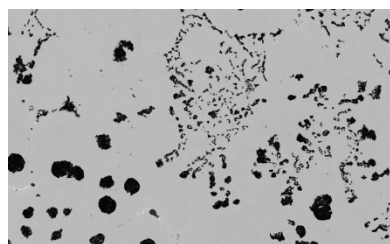


Рис. 1. Колонии ВГр5 вермикулярного графита («чанки»-графит)

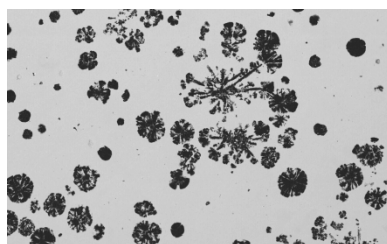


Рис. 2. «Взорванный» графит ШГф1

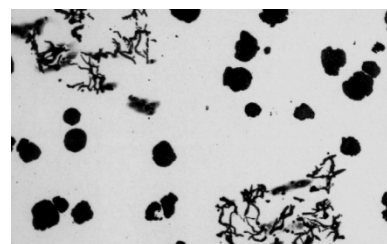


Рис. 3. Игольчатый графит ПГф3

Укрупнённо переход от СЧПГ к ВЧШГ при эволюции компактности гра-

фитных включений можно представить в виде, показанном на рис. 4.

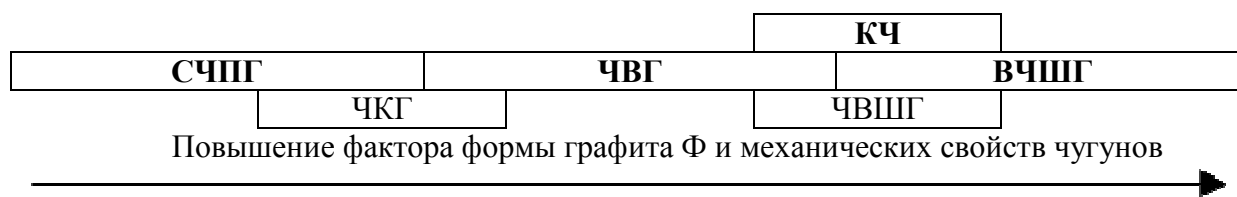


Рис. 4. Понятная схема эволюции типов конструкционных чугунов в зависимости от степени компактности графитных включений

В общем случае при увеличении содержания остаточного магния в расплаве чугуна включения графита изменяют свою форму в следующей последовательности.

Пластинчатый равномерно распределённый графит ПГр1 и небольшие зоны с его междендритным распределением ПГр8, ПГр9 (рис. 5-7) содержатся в исходном немодифицированном сером чугуне.

Пластинчатый графит правильной формы ПГф1 образуется в чугуне при содержании остаточного магния менее 0,01%. При этом пластинки становятся толще, формируются зоны с розеточным графитом ПГр7 – ветвистыми включениями, растущими из одного центра (рис. 8), прочность чугуна увеличивается на 10-20 МПа.



Рис. 5. Равномерное распределение графита ПГр1

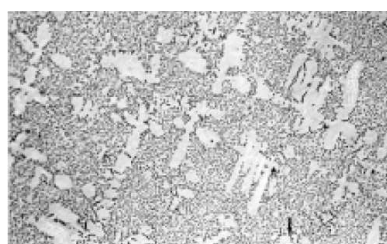


Рис. 6. Междендритное (ненаправленное) распределение графита ПГр8



Рис. 7. Междендритное пластинчатое (направленное) распределение графита ПГр9

При увеличении количества вводимого в расплав магния уменьшается количество эффективных зародышей графита, что приводит к усилению образования розеточного распределения графита ПГр7. Кристаллизация начинается с образования дендритов аустенита, а графит растёт в междендритном пространстве, что способствует его измельчению и междендритному распределению. Розеточное распределение графита ПГр7 изначально соседствует с междендритным ПГр8, ПГр9, а затем им полностью заменяется.

Сфероидизирующее действие магния на графит начинает проявляться при его концентрации 0,010-0,014% и характеризуется формированием наряду с розеточным распределением пластинчатого графита ПГр7 разветвлённого псевдопластинчатого кораллоподобного графита, наиболее близкого по морфологии розеточному распределению вермикулярного графита ВГр3 и нитевидному графиту КГф1 (рис. 9, 10) с более высоким, чем у пластинчатого графита, фактором формы [1]:

$$\Phi = 3,545 \sqrt{F/P},$$



Рис. 8. Розеточное распределение пластинчатого графита ПГр7



Рис. 9. Розеточное распределение вермикулярного графита ВГр3

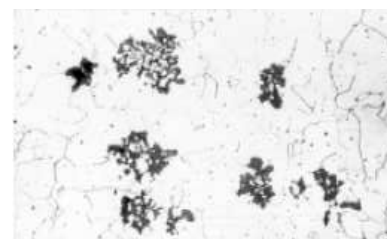


Рис. 10. Нитевидный графит КГф1

Таким образом, последовательность эволюции морфологии графита от пластинчатого к вермикулярному выглядит следующим образом: ПГр1 → ПГр8, ПГр9 → ПГр7 → ВГр3 → КГф1 → ВГф2, ВГф3.

При концентрации магния свыше 0,014% его сфероидизирующее влияние на графит усиливается, образуется вермикулярный графит ВГф2, ВГф3, растущий из шаровидных зародышей. Шаровидный графит при этом вырождается из-за формирования на его поверхности графитных ответвлений, растущих в контакте с рас-

где  $F$  и  $P$  – площадь и периметр включения графита соответственно.

По сути, такой тип чугуна уже не является СЧПГ, но и не классифицируется как ЧВГ, поэтому в данной статье ему присвоено условное название ЧКГ. Усиленная оценка экономической составляющей процесса получения ЧКГ показывает, что его стоимость ниже стоимости высоких марок СЧПГ (СЧ30, СЧ35), получаемых путём дополнительного печного или ковшевого микролегирования базового расплава чугуна такими элементами, как марганец, медь, олово. При соотносимой стоимости модифицирующей обработки расплава чугуна гарантированное достижение временного сопротивления свыше 300 МПа возможно при ферритно-перлитной металлической основе нелегированного чугуна (в отличие от чисто перлитной для марок СЧ30, СЧ35) за счёт уменьшения надрезающего действия окончаний графитных включений и их более компактного сосредоточения (более низкого коэффициента концентрации напряжений псевдопластинчатого кораллоподобного графита по сравнению с пластинчатым).

Механизм роста вермикулярного графита является комбинированным, смешанным, с присущими чертами формирования обеих форм графита – пластинчатой и шаровидной. С увеличением в расплаве содержания остаточного магния вермикулярный графит полностью заменяется шаровидным [2].

До конца 1980-х гг. отливки многих деталей, в том числе корпусных, таких как картер редуктора заднего моста (рис. 11), крышка подшипника дифференциала заднего моста (рис. 12), автомобилей ГАЗ,