



There is worked out and incorporated the calculation algorithm and packet of application programs for control of characteristics and structure of hypoeutectic gray cast iron of cupola heat (rough and low-alloyed) by means of optimization of the mixture components, chemical composition of alloy and its modification and microalloying.

*А. Н. СУЧКОВ, О. И. КАРАБИЦ, ООО «РЛЗ», г. Ростов-на-Дону,
Е. В. КУЗНЕЦОВ, В. Н. ПУСТОВОЙТ, ДГТУ, г. Ростов-на-Дону,
В. М. МАЛОВ, ОАО «РОСТОВВОДПРОМ», г. Батайск*

УДК 669.131.622

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННОГО, МИКРОЛЕГИРОВАННОГО И МОДИФИЦИРОВАННОГО ДОЭВТЕКТИЧЕСКОГО СЕРОГО ЧУГУНА

Свойства чугуна в отливках формируются в процессе первичной и вторичной кристаллизации и, в конечном итоге, определяются свойствами основных структурных составляющих — аустенита, графита, эвтектических зерен, перлита, феррита, промежуточных (в том числе и неметаллических) фаз. Основой повышения эксплуатационных свойств обычного и низколегированного серого чугуна являются увеличение количества первичного аустенита в виде мелких и сильно разветвленных дендритов (армирование чугуна дендритами первичного аустенита); уменьшение размера эвтектических зерен и графитовых включений; повышение количества и степени дисперсности перлита; появление в структуре мелких и равномерно распределенных промежуточных фаз в виде самостоятельных и сложных карбидов, нитридов, карбонитридов, интерметаллидов, неметаллических включений; повышение квазиизотропии отливок; малое легирование твердых растворов. Это достигается увеличением в составе шихты доли стального лома, уменьшением углеродного эквивалента выплавляемого чугуна, низким легированием, микролегированием, модифицированием.

При прочих равных условиях эффективным способом воздействия на структуру и свойства серого чугуна является модифицирование и микролегирование. Для определения качественного состава модифицирующих и микролегирующих присадок надо знать характер развиваемых при их вводе в чугун процессов на каждом этапе кристаллизации и охлаждения сплава. Наиболее подробно эти вопросы рассмотрены в принятой нами за основу теории модифицирования и микролегирования железоуглеродистых сплавов, изложенной в работах [1–7].

В рамках данной теории для модифицирования и микролегирования доэвтектических чугунов следует использовать комплексные присадки, содержащие щелочноземельные (Mg, Ca, Ba, Sr), редкоземельные (Y и лантаноиды La, Ce и др.), карбидо- и нитридообразующие (Ti, Zr, V, Nb, W) элементы. Ввод этих элементов ведет к снижению в растворе концентрации серы, кислорода, азота, а также к развитию сложных физико-химических процессов образования и диссоциации оксидов, сульфидов, оксисульфидов, карбидов, нитридов, карбонитридов и других промежуточных соединений, следствием чего становится измельчение первичного аустенита за счет роста числа центров его кристаллизации и увеличение склонности чугуна к графитизации за счет снижения в растворе карбидостабилизирующих элементов. Образовавшиеся при этом соединения играют роль дополнительных центров кристаллизации графита. В итоге это все ведет к измельчению дендритов первичного аустенита, эвтектических зерен, графитовых включений, устранению отбела при первичной кристаллизации, повышению плотности чугуна, его жидкотекучести, снижению склонности к образованию газовых раковин и т. п. Кроме того, сами эти элементы, оказавшиеся в химически несвязанном состоянии, микролегируют твердый раствор или располагаются на поверхностях раздела фаз, и таким образом влияют на устойчивость аустенита, повышая степень его переохлаждения при эвтектоидной кристаллизации. При этом возрастают доля перлита и его дисперсность. В ряде случаев (при микролегировании карбидо- и нитридообразующими присадками) при охлаждении отливок ниже 700°C в структуре появляются мелкодисперсные карбиды и нитриды, дополнительно повышая прочность матрицы.

Для повышения эффективности действия указанных выше присадок они обычно вводятся с определенным количеством кремния и (или) алюминия, которые в период эвтектической кристаллизации уменьшают растворимость углерода в растворе, увеличивают его активность и снижают относительное переохлаждение при эвтектической кристаллизации (т. е. не изменяя величины реального переохлаждения при кристаллизации в данных условиях, увеличивают ширину интервала между температурами кристаллизации стабильной и метастабильной эвтектик). Все это способствует активации образующихся при модифицировании неметаллических включений в качестве центров кристаллизации графита, изменяет форму графитовых включений и повышает графитизирующую способность чугуна.

Наиболее часто используемые в низколегированных серых чугунах присадки Cr, Ni, Mn, Cu, Mo оказывают следующее влияние на структуру чугуна:

- при первичной кристаллизации (литье в землю) Ni, Cu, Mo способствуют графитизации, а Cr и Mn – карбидообразованию;
- при эвтектической кристаллизации Ni и Cu повышают квазиизотропию серого чугуна за счет выравнивания доли перлитной составляющей в различных сечениях отливок и одновременно несколько повышают как общее количество перлита, так и его дисперсность; Cr, Mo, Mn более существенно повышают дисперсность перлита и его количество, но в меньшей степени влияют на квазиизотропию чугуна.

Изложенные выше концепции позволяют осуществить качественный выбор присадок для модифицирования и микролегирования. Количественные же значения присадок пока еще приходится определять в основном методами прямых экспериментов применительно к конкретным условиям производства.

Обработка результатов практических экспериментов, проведенных авторами для синтетического и полусинтетического чугуна*, позволила найти обобщенные уравнения оценки уровня свойств (прочности при растяжении и твердости в кг/мм²) в зависимости от содержания в нем основных компонентов химического состава (2,95–3,25% C, 2,05–2,35% Si), легирующих присадок (до 0,8% Cr, до 0,1% Ni, до 1,5% Cu, до 1,0% Mo, 0,8–1,5% Mn), микролегирующих присадок (до 0,25% Ti, до 0,3% V, до 0,3% Zr) и введенного количества модифицирующих присадок (до 0,3% Al или его сплавов с Mg, Si; до 0,3% SiBa с 22% Ba; до 0,3% SiPЗМ с 20% PЗМ; до 0,4% SiCa с 20–30% Ca):

$$\sigma_B = K_\sigma (65,22 - 9,17C - 5,875Si - 1,83Al - 4(SiBa) + 0,33(SiPЗМ) - 0,76(SiCa)),$$

$$HB = K_{HB} (490,35 - 61,67C - 16,25Si - 51,67Al - 85(SiBa) - 68,83(SiPЗМ) - 21,25(SiCa)),$$

где K_σ и K_{HB} – соответственно коэффициенты изменения значений прочности и твердости чугуна под действием легирующих (Cr, Ni, Cu, Mo) и микролегирующих (V, Ti, Zr) присадок; C, Si – массовые доли углерода и кремния в чугуне, %; Al, SiBa, SiPЗМ, SiCa – массовые доли введенных в чугун модифицирующих присадок, %.

Для расчета значений K_σ и K_{HB} авторами найдены следующие уравнения:

$$K_\sigma = PK_{\sigma,j} = K_{\sigma,Cr} K_{\sigma,Ni} K_{\sigma,Cu} K_{\sigma,Mo} K_{\sigma,Mn} K_{\sigma,Ti} K_{\sigma,V} K_{\sigma,Zr},$$

$$K_{HB} = PK_{HB,j} = K_{HB,Cr} K_{HB,Ni} K_{HB,Cu} K_{HB,Mo} K_{HB,Mn} K_{HB,Ti} K_{HB,V} K_{HB,Zr},$$

где величины $K_{\sigma,j}$ и $K_{HB,j}$ рассчитываются в зависимости от фактического содержания (массовые доли, %) легирующих и микролегирующих присадок в чугуне по уравнениям, приведенным в таблице. С использованием этих уравнений легко рассчитать (особенно при наличии ПК) составы ваграночного чугуна (в том числе и по легирующим компонентам), которые при оптимальном модифицировании и микролегировании обеспечивают гарантированное получение отливок с прочностью при растяжении до 30 кг/мм² и более (т. е. обеспечивают получение марки чугуна вплоть до СЧ30 по ГОСТ 1412-85).

Применимость общетеоретических положений и найденных уравнений к решению практических вопросов была неоднократно доказана в промышленных условиях (литейные цехи серого чугуна ОАО «Ростовводпром» и ООО «Ростовский литейный завод») с получением значительного экономического эффекта за счет замены в составе шихты чушковых чугунов чугуном и стальным ломом, уменьшения массы литых деталей с соответствующим снижением расхода металлической шихты и кокса, за счет увеличения выхода годного (или снижения доли брака), повышения срока эксплуатации литых деталей и др.

* Если в составе шихты полностью отсутствуют чушковые чугуны, то сплав называется синтетическим, если же присутствует до 15% чушковых чугунов, то – полусинтетическим.

Элемент	Уравнение для расчета степени изменения уровня свойств серого чугуна при легировании и микролегировании	
	σ_B	HB
Cr	$K_{\sigma, Cr} = 1 + 0,40Cr$	$K_{HB, Cr} = 1 + 0,1017Cr + 0,0429Cr^2$
Ni	$K_{\sigma, Ni} = 1 + 0,05Ni$	$K_{HB, Ni} = 1 + 0,055Ni$
Cu	$K_{\sigma, Cu} = 1 + 0,086Cu$	$K_{HB, Cu} = 1 + 0,53Cu - 0,0363Cu^2 + 0,04Cu^3$
Mo	$K_{\sigma, Mo} = 1 + 0,44Mo$	$K_{HB, Mo} = 1 + 0,1125Mo - 0,0686Mo^2 + 0,064Mo^3$
Mn	$K_{\sigma, Mn} = 1 + 0,1(Mn - 0,8)$	$K_{HB, Mn} = 1 + 0,0715(Mn - 0,8)$
Ti	$K_{\sigma, Ti} = 1 + 0,24Ti$	$K_{HB, Ti} = 1 + 0,25Ti$
V	$K_{\sigma, V} = 1 + 0,534V$	$K_{HB, V} = 1 + 0,176V + 0,007V^2 - 2,74V^3$
Zr	$K_{\sigma, Zr} = 1 + 0,24Zr$	$K_{HB, Zr} = 1 + 0,176Zr + 0,007Zr^2 - 2,74Zr^3$

Литература

1. Сучков А. Н. Кинетика и термодинамика металлургических реакций при раскислении, модифицировании и микролегировании и получение отливок повышенного качества из железоуглеродистых сплавов // Прогрессивная технология литейного производства в тракторном и сельскохозяйственном машиностроении. Ростов н/Д: Ин-т с.-х. машиностр., 1977. С. 21–33.
2. Сучков А. Н. Модифицирование и микролегирование серого чугуна в целях повышения литейных, механических и эксплуатационных свойств // Прогрессивная технология литейного производства в тракторном и сельскохозяйственном машиностроении. Ростов н/Д: Ин-т с.-х. машиностр., 1979. С. 65–78.
3. Сучков А. Н. Некоторые вопросы теории кристаллизации и модифицирования с точки зрения электронного строения металлов // Прогрессивная технология литейного производства в тракторном и сельскохозяйственном машиностроении. Ростов н/Д: Ин-т с.-х. машиностр., 1980. С. 3–16.
4. Сучков А. Н. К вопросу о квазикристаллическом строении жидких металлов и сплавов и гомогенном образовании центров кристаллизации // Прогрессивные методы термического упрочнения в тракторном и сельскохозяйственном машиностроении. Ростов н/Д: Ин-т с.-х. машиностр., 1980. С. 140–149.
5. Сучков А. Н. Повышение технологических и эксплуатационных свойств отливок из углеродистых и низколегированных сталей за счет модифицирования и микролегирования // Прогрессивная технология литейного производства в тракторном и сельскохозяйственном машиностроении. Ростов н/Д: Ин-т с.-х. машиностр., 1981. С. 10–23.
6. Сучков А. Н. Управление структурой и свойствами стали путем модифицирования и микролегирования // Прогрессивная технология литейного производства в тракторном и сельскохозяйственном машиностроении. Ростов н/Д: Ин-т с.-х. машиностр., 1982. С. 3–20.
7. Сучков А. Н., Соловьев В. П. К вопросу о роли неметаллических включений в формировании первичной структуры алюминиевых сплавов // Прогрессивная технология литейного производства в тракторном и сельскохозяйственном машиностроении. Ростов н/Д: Ин-т с.-х. машиностр., 1982. С. 50–57.