

Металлургия и материаловедение

УДК 669.1

DOI: [10.12737/article_59cd75f7e8b363.24143847](https://doi.org/10.12737/article_59cd75f7e8b363.24143847)

Г.Г. Бурый

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДБОРА МОДИФИКАТОРА ЧУГУНА

Рассмотрен процесс подбора модификатора чугуна. Приведены теоретические исследования о модификаторах чугунов, их влиянии на образование графита. Представлено влияние модификаторов на химический состав, форму графита и свойства чугунов. Приведены зависимости, позволяющие

подбирать модификаторы, изменяющие долю и вид графита в чугуне, в зависимости от требуемых свойств чугуна.

Ключевые слова: чугун, модификатор, металлургия, процесс подбора, графит.

G.G. Bury

PERFECTION OF CAST IRON MODIFIER SELECTION PROCESS

The paper reports cast iron modification with the purpose of globular graphite formation in it. It is possible at the formation a barrier round a primary crystal. The barrier formation is possible at the definite characteristics of modifiers. Such characteristics are a small coefficient of addition distribution in a modified phase and an element solvability in an alloy liquid basis –austenite. On the basis of these parameters there was formed a diagram where into a rectangle the most suitable modifiers fall for the production of globular graphite. There were also carried out additional researches of elements for the cast iron modification which have shown the strongest impact upon the globular graphite shape formation of element Eu. In the paper the interaction of the modifier introduced and the fixed carbon content is presented. Besides, in the paper the values of hardness according to Vickers method

and the values of strength limits at the cast iron modification with some elements are shown. For the purpose of the reliability assurance of parts operation at different loads it is necessary that a quantitative connection should be established between a graphite form, dispersion degree and mechanical properties. The paper reports the analyzed parameter of “graphite inclusion form factor” combining in itself such factors as a graphite form, dispersion degree and mechanical properties. The dependence for the definition of a graphite volume part in cast iron is presented. The paper reports the equations of regression which could be used for the assessment of structure factors impact upon a breaking point, impact elasticity and relative elongation after hardening and HF tempering.

Key words: cast iron, modifier, selection process, graphite.

Введение

Основными направлениями повышения механических свойств чугунов, из которых изготавливаются автомобильные детали, являются разработка методов воздействия на их жидкое состояние и оптимизация составов. При эвтектической кристаллизации двух различных фаз модифицирующее воздействие на каждую из них осуществляется различными модификато-

рами, так как маловероятно, чтобы один и тот же элемент одинаково эффективно воздействовал на обе фазы. При эвтектической кристаллизации чугуна по стабильной системе мы имеем дело с двумя основными фазами - аустенитом и графитом. В данной работе рассмотрено модифицирование только графита, направленное на получение его в сфероидальной форме.

Подбор модификатора чугуна

Для придания первичному кристаллу округлой формы модификатор должен интенсивно образовывать в жидкой фазе барьер около его поверхности за счет избирательной кристаллизации. Условиями этого являются: возможно, малый коэффи-

циент распределения добавки в модифицируемой фазе ω (отношение растворимостей в твердом и жидком состояниях при температуре кристаллизации этой фазы); нахождение растворимости добавки в жидкой основе сплава в определенном ин-

тервале (слишком малая растворимость не позволит ввести добавку в сплав, а слишком большая вызовет диффузионное рассеяние барьера).

Для реализации указанного подхода необходимо располагать хотя бы приближенными значениями растворимостей элементов периодической системы в твердой и жидкой модифицируемой фазе. Если для Si такие экспериментальные и расчетные данные имеются, то для углерода они практически отсутствуют. Для их определения в соответствии с принципами синтеза сплавов было проведено прогнозирование этих величин, основанное на аналогии закономерностей растворимости элементов периодической системы. На рисунке [1-4; 8] показана окончательная диаграмма для выбора модификаторов графита в чугунах. По вертикали отложены величины коэффициентов распределения элементов в углероде, по горизонтали - растворимости элементов в жидкой основе сплава (аустените $\delta_{\gamma-Fe}$). Ввиду очень больших диапазонов изменения этих величин обе построены в логарифмическом масштабе. Каждый элемент в плоскости изображается

в виде точки, около которой стоит соответствующий символ [1-4; 8].

Все известные сфероидизирующие модификаторы графита в чугуне собрались в виде компактной группы, выделенной четырехугольниками. Внутренний четырехугольник объединяет наиболее сильные модификаторы: Mg, Y, Ce, La, Gd. В литературе практически отсутствуют данные о сфероидизирующем влиянии на графит Gd. Поэтому проведены специальные эксперименты, подтвердившие указанное влияние Gd на форму графита в чугуне. Во внешнем прямоугольнике располагаются элементы: Te, Zr, In, Ti, Sc, Ca, Ba, Sr.

Последние могут служить слабыми сфероидизаторами. Таким образом, условия сфероидизирующего действия элементов на графит в чугуне можно записать в виде $\omega=10^{-8}/10^{-9}$ и $\delta_{\gamma-Fe}=10^{-1}/10^{-2}$. Полученные результаты совершенно четко показывают, что эффект сфероидизации определяется созданием соответствующими модификаторами барьера в жидкой фазе на границе кристаллов графита в процессе их роста [1-4; 8].

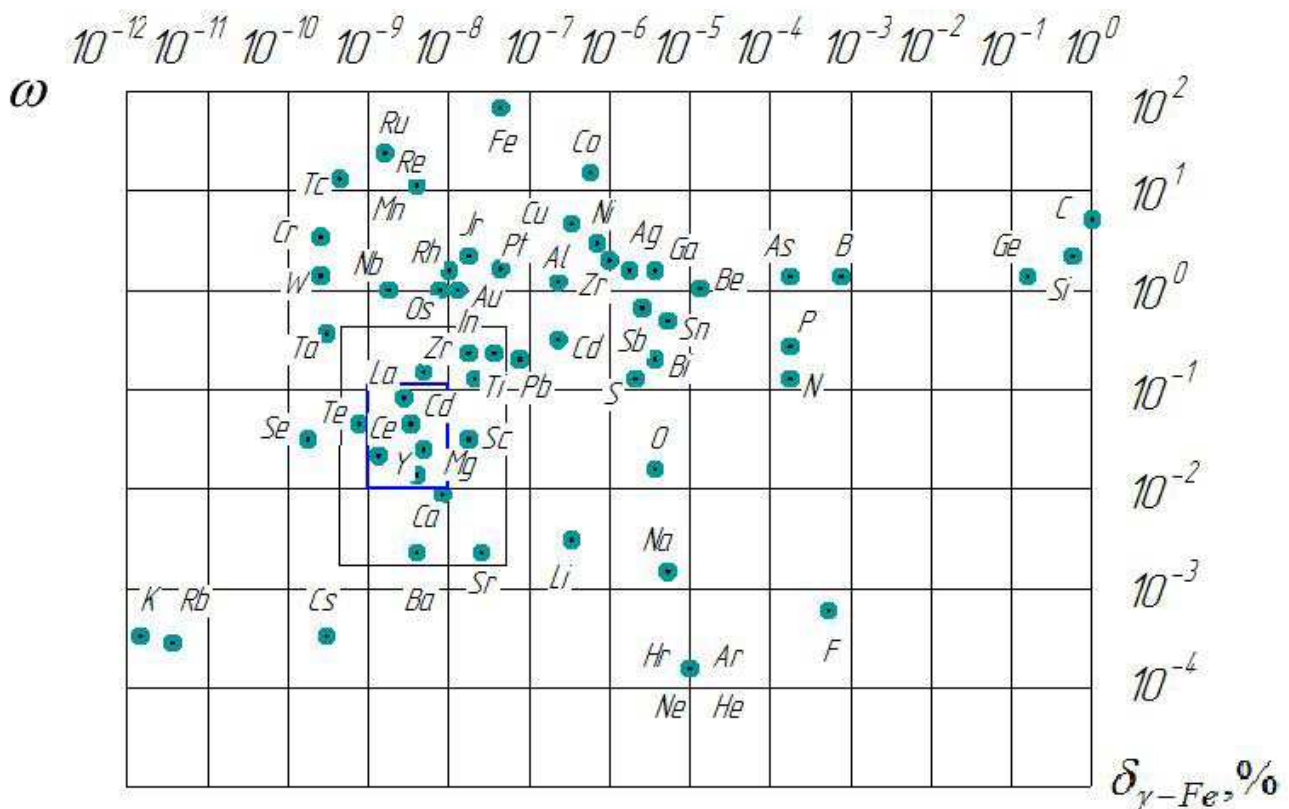


Рис. Диаграмма для выбора модификаторов графита в чугунах

Подтвержден и расширен список сфероидизаторов графита в чугунах. Исследовали модифицирование металла Ce, Dy, Er, Eu, Tb, Ho, Gd, La, Nd, Pr, Sm, Y и Yb, восстановленными из их окислов. Установлено, что степень сфероидизации графита металла максимальна (80%) при модифицировании Eu и минимальна (6%) при модифицировании Yb.

Компактные формы графита достигают 44% при модифицировании Tm, а минимум (всего 8%) данных форм наблюдается при модифицировании чугуна Eu. Наибольшее суммарное количество шаровидного графита (88%) - при модифицировании Eu, минимальное (36%) - при модифицировании Sm. Таким образом, наибольшее сфероидизирующее действие на графит металла оказывают Eu и Pr, в значительно меньшей степени это действие проявляется при модифицировании Dy, Nd, Cd, Tb и La (-50% шаровидного графита), а при модифицировании Er, Ho, Tm, Y, Sm и Yb степень сфероидизации графита соответственно равна 38, 34, 33, 22, 18 и 6%. При модифицировании Eu графит в основном шаровидный, мелкий и равномерно распределен по сечению.

В случае модифицирования Ce размеры включений графита значительно возрастают, распределены они менее равномерно. Количество шаровидного графита уменьшается. При модифицировании Yb размер графитовых включений примерно одинаков с размером графита при модифицировании металла Ce, но шаровидного графита очень мало [1-4; 8].

Полученные результаты подтверждают теоретическое предположение возможности восстановления редкоземельных металлов (РЗМ) из их окислов, так как установлено их сфероидизирующее действие на графит металла. Химический состав металла показывает, что десульфуризирующая способность всех РЗМ одинакова (остаточное содержание S - 0,01%), кроме Eu (0,008%) и Pr (0,009%). На усвоение Al в металле РЗМ практически не влияют (в наплавках 0,2-0,27% Al). В зависимости от применяемого окисла РЗМ содержание в металле С, Si и Mn изменяется в небольших пределах. Так, содержание углерода

максимально при вводе в порошковую проволоку окисла Pr (3,34% С) и минимально при вводе окисла Y (3,1% С); содержание Si достигает 2,8% при вводе окисла Si и снижается до 2,37% при вводе окисла Nd; содержание Mn максимально при вводе окисла Tb (0,49% Mn) и минимально при вводе Er (0,38% Mn). Особенно значительно изменяется содержание в металле Eu и связанного углерода в зависимости от применяемого окисла РЗМ. Так, содержание в металле связанного углерода при вводе окисла Eu составляет всего 0,06%, а при вводе окисла Y - 1,79%. Количество P в металле минимально (0,026%) при вводе окисла Gd и максимально (0,04-6%) при вводе окисла Pr. Количество Ce изменяется от 3,91% при вводе окисла Dy до 4,11% при вводе окисла Pr. Таким образом, металл во всех случаях представляет собой доэвтектический чугун [1-4; 8].

Микротвердость цементита составляет HV 570 при модифицировании Eu и HV 835 при модифицировании Y. Микротвердость перлита минимальна (HV 282) при модифицировании Eu и максимальна (HV 401) при модифицировании Y. Микротвердость феррита изменяется от HV 197 при модифицировании Eu до HV 246 при модифицировании Ce. Твердость металла минимальна (HV 202) при модифицировании Eu и максимальна (HV 429) при модифицировании Y. Твердость зоны сплавления изменяется от HV 210 при модифицировании Tm до HV 450 при модифицировании Sm [1-4; 8].

Наиболее высокое значение предела прочности металла обеспечивается при модифицировании Gd, Tm, Ce (470 МПа), самое низкое значение (414 МПа) - при модифицировании Y. Предел прочности металла максимальный (400 МПа) при модифицировании Sm, а минимальный (320 МПа) - при модифицировании Ho. Ударная вязкость достигает $2,1 \cdot 10^5$ Дж/м² при модифицировании Yb и имеет минимальное значение $0,35 \cdot 10^5$ Дж/м² при модифицировании Sm.

Относительное сужение максимально (8,05%) при модифицировании Tm и минимально (1%) при модифицировании Tb. Относительное удлинение максимально

(6,5%) при модифицировании Eu и минимально (0,2%) при модифицировании Yb. Таким образом, после термообработки пластические показатели значительно улучшаются при относительно небольшом уменьшении показателей прочности, поэтому термообработка при модифицировании металла РЗМ, восстановленными из их окислов, целесообразна всегда.

Таким образом, результаты модифицирования металла РЗМ, восстановленными из их окислов, хорошо согласуются с

известными данными модифицирования чугуна в условиях литейного производства. По возрастающей глобуляризирующей способности РЗМ можно расположить в ряд: Yb, Sm, Y, Tm, Ho, Er, La, Tb, Gd, Nd, Dy, Ce, Pr, Eu. Карбидостабилизирующее действие проявляют Yb, Gd, La и Y, а ферритизирующее - Er, Pr, Tb, Nd, Ho, Dy, Sm, Ce, Eu, что хорошо согласуется с их соответствующим влиянием на количество связанного углерода [1-4; 8].

Влияние модификаторов на свойства чугуна

В отливках из высокопрочного чугуна (ВЧ) с шаровидным графитом наблюдаются колебания содержания магния и серы, поэтому в их структуре трудно получить включения графита только шаровидной формы. В структуре отливок может присутствовать графит вермикулярной, звездообразной, разорванной и других форм. Такая неоднородность формы графитных частиц приводит к снижению механических свойств чугуна. С целью обеспечения надежности работы литых деталей, особенно в сложных условиях нагружения и изнашивания, необходимо установить количественную связь между формой графита, степенью дисперсности и механическими свойствами деталей. Фактор формы графитных включений Φ определяли сравнением с эталонными формами. Каждому значению Φ соответствуют два варианта, учитывающие шаровидную (Ш) и вермикулярную (В) формы графита в исследованных образцах. Обобщенный фактор формы рассчитывали с учетом доли каждой из форм графита [5-7]:

$$\Phi = \sum_{i=1}^2 \Phi_i q_i,$$

где Φ - фактор формы включений графита (для графита шаровидной формы $\Phi = 1$, а вермикулярной - $\Phi = 0,2 \dots 0,5$ в зависимости от расположения его колоний и их размеров); q - объемная доля графита каждой из форм в структуре ВЧ [5-7].

Объемную долю графита, соответствующую каждой из форм мартенсита, определяли одновременно методом точек на

травленном шлифе при увеличении в 100-200 раз. Относительная ошибка измерения при вероятности 50% составляла менее 10%. Расчетную объемную долю графита Γ (%) определяли по известному уравнению [5-7]

$$\Gamma = (\%C - 0,8\Pi) \cdot 7,86 / 2,16,$$

где % C - массовая доля углерода в ВЧ; 0,8\Pi - содержание углерода в перлите; 7,86 и 2,16 - плотность матрицы и графита соответственно, г/см³ [5-7].

После закалки и отпуска ВЧ его механические свойства существенно зависят от фактора формы, особенно ударная вязкость и относительное удлинение. При увеличении фактора формы Φ от 0,43 до 0,98 все исследованные механические свойства повышаются. Пластичность матрицы невысока, что связано с влиянием фактора формы графита, который определяется количеством графита В и характером его расположения в структуре матрицы. Максимальное влияние графита В проявляется, когда его колонии в объеме матрицы расположены неравномерно и $\Phi = 0,43$. Вследствие этого в структуре отливок деталей должно содержаться не более 30 % графита В [5-7].

Влияние структурных составляющих ВЧ на механические свойства отливок оценивали методом корреляционного анализа данных (ЭВМ типа ЕС-1020). Получены уравнения регрессии, которые можно использовать для оценки влияния структурных факторов на предел прочности σ , ударную вязкость α и относительное удлинение γ после закалки и отпуска ВЧ [5-7]:

$$\sigma = 1067 + 0,81Ш - 0,35В, \quad (1)$$

$$\alpha = 12 + 0,091Ш - 0,073В, \quad (2)$$

$$\gamma = 1,1 + 0,032Ш - 0,016В. \quad (3)$$

Заключение

Из уравнений (1), (2) и (3) следует, что необходимые свойства можно получить путем изменения значения Φ . Таким образом, для получения после закалки и отпуска высоких свойств ($\sigma = 1300 \text{ Н/мм}^2$, $\alpha = 20 \text{ Дж/см}^2$, $\gamma = 2,2\%$) необходимо, что-

бы $\Phi = 0,98 \dots 1,0$, т.е. количество графита В должно быть не менее 10%. Это может быть достигнуто в каждом конкретном случае модифицированием жидкого чугуна [5-7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Новиков, И.И. Теория термической обработки металлов / И.И. Новиков. - М.: Metallurgy, 1978. - 392 с.
- Бурый, Г.Г. Использование математической модели для выбора модификатора чугуна / Г.Г. Бурый, В.П. Расщупкин, Н.Ф. Гребенкина / Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования: материалы IV Всероссий. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. - Омск: СибАДИ, 2009. - С. 115-116.
- Расщупкин, В.П. Сущность и особенности производства чугуна: учеб. пособие / В.П. Расщупкин, М.С. Коротков. - Омск: СибАДИ, 2007. - 28 с.
- Вегман, Е.Ф. Metallurgy of cast iron: college textbook / E.F. Vegman, B.N. Zhrebina, A.N. Pokhvisnev. - M.: Academbook, 2004. - 774 p.
- Леонтьев, А.Н. Поверхностное модифицирование отливок из серого чугуна / А.Н. Леонтьев, В.П. Расщупкин, Ю.К. Корзунин, Н.В. Матвеева // Вестник СибАДИ. - 2007. - № 5. - С. 213-215.
- Акимов, В.В. Жидкий чугун - серый, белый, высокопрочный, ковкий, его свойства и структурные изменения / В.В. Акимов // Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации: материалы междунар. конгресса ФГБОУ ВПО «СибАДИ»: 67-я науч.-практ. конф. «Теория, методы проектирования машин и процессов в строительстве», посвящ. 100-летию со дня рождения засл. деятеля науки и техники РСФСР, д-ра техн. наук, проф. Т. В. Алексеевой (с междунар. участием). - Омск: СибАДИ, 2013. - Кн. 2. - С. 19-22.
- Расщупкин, В.П. Производство стали. Методика выплавки: учеб. пособие / В.П. Расщупкин, М.С. Коротков. - Омск: СибАДИ, 2007. - 31 с.
- Гольдштейн, Я.Е. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали / Я.Е. Гольдштейн, В.Г. Мизин. - М.: Metallurgy, 1986. - 272 с.
- Novikov, I.I. Theory of Metal Heat Treatment / I.I. Novikov. - M.: Metallurgy, 1978. - pp. 392.
- Bury, G.G. Simulator use in cast iron modifier choice / G.G. Bury, V.P. Rasshchupkin, N.F. Grebenkina / Development of road vehicle complex and building infrastructure based on efficient nature use: Proceedings of the IV-th All-Russian Scientific Practical Conf. of Students, Post graduate students and Young Scientists. - Omsk: Siberian RI, 2009. - pp. 115-116.
- Rasshchupkin, V.P. Essence and Peculiarities of Cast Iron Production: manual / V.P. Rasshchupkin, M.S. Korytov. - Omsk: Siberian RI, 2007. - pp. 28.
- Vegman, E.F. Cast Iron Metallurgy: college textbook / E.F. Vegman, B.N. Zhrebina, A.N. Pokhvisnev. - M.: Academbook, 2004. - pp. 774.
- Leontiev, A.N. Grey iron casting surface modification / A.N. Leontiev, V.P. Rasshchupkin, Yu.K. Korzunin, N.V. Matveyeva // Bulletin of Siberian RI. - 2007. - No. 5. - pp. 213-215.
- Akimov, V.V. Liquid iron - grey, white, high-tensile, malleable iron, its properties and structural changes / V.V. Akimov // Architecture. Building Construction. Transport. Technologies. Innovations: Proceedings of the Inter. Congr. FSBEI HVE "SiberianRI": 67-th Scientific Practical Conf. "Theory, Methods of Machine and Processes Design in Building Construction" devoted to the 100-th Anniversary of Prof. T.V. Alexeyeva, Prof., Honored Worker of Science and engineering of the RF, D. Eng. (with international participation). - Omsk: Siberian RI, 2013. - Vol.2 - pp. 19-22.
- Rasshchupkin, V.P. Steel Production. Smelting Methods: manual / V.P. Rasshchupkin, M.S. Korytov. - Omsk: Siberian RI. 2007. - pp. 31.
- Goldstein, Ya, E. Modification and Micro-alloying of Steel and Cast Iron / Ya.E. Goldstein, V.G. Mizin. - M.: Metallurgy, 1986. - pp. 272.

Статья поступила в редколлегию 30.08.17.

Рецензент: д.т.н., профессор СибАДИ
Евстифеев В.В.

Сведения об авторах:

Бурый Григорий Геннадьевич, к.т.н., доцент кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии» Сибирского государственного авто-

мобильно-дорожного университета (СибАДИ), тел.: 8-913-621-92-33, e-mail: buryy1989@bk.ru.

Bury Grigory Gennadievich, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Motor Vehicles, Construction Mate-

rials and Techniques", Siberian State Road University, e-mail: buryy1989@bk.ru.