



УДК 621.74:669.13.017

Поступила 24.09.2021

ХАРАКТЕРИСТИКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СВОЙСТВ СИНТЕТИЧЕСКОГО ЧУГУНА ДЛЯ ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК ЛОКОМОТИВОВ

Е. А. СИРЕНКО, Физико-технологический институт металлов и сплавов Национальной академии наук Украины, г. Киев, Украина, бульвар Академика Вернадского, 34/1. E-mail: thermoexp.metal@gmail.com

Для области факторного пространства, ограниченного массовой долей химических элементов в составе и углеродного эквивалента синтетического чугуна, применяемого для тормозных колодок марки «М» согласно ГОСТ 30249-97, показано, что их твердость и прочность при испытаниях на излом не коррелируют со значениями углеродного эквивалента, рассчитанного по известным формулам. Установлены статистические параметры распределений C, Si, Mn, P, S в промышленных партиях чугуна для изготовления тормозных колодок марки «М», выплавленного в трехтонной индукционной печи на заводе ООО «М-ЛИТ». Показано, что технология производства синтетического чугуна этого назначения обеспечивает почти в 2 раза более узкие, чем указанные в стандарте, диапазоны содержания C, Si, Mn, P. Доля S в составе чугуна не превышает 0,05%. Отмечена принципиальная возможность оптимизации технических требований стандартов на тормозные колодки для локомотивов, изготавливаемые из синтетического чугуна.

Ключевые слова. Синтетический чугун, тормозные колодки, химический состав, углеродный эквивалент, твердость, прочность, стандарты, усовершенствования.

CHARACTERISTICS OF THE CHEMICAL COMPOSITION AND PROPERTIES OF SYNTHETIC CAST IRON FOR LOCOMOTIVE BRAKE PADS

E. A. SIRENKO, Physical-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine, 34/1, Acad. Vernadskogo Boul. E-mail: thermoexp.metal@gmail.com

For the area of factor space limited by the mass fraction of chemical elements in the composition and carbon equivalent of synthetic cast iron used for brake pads of grade «M» in accordance with GOST 30249-97, it is shown that their hardness and strength during fracture tests do not correlate with the values of the carbon equivalent calculated according to known formulas. Statistical parameters of distributions C, Si, Mn, P, S in industrial batches of cast iron for the manufacture of brake pads of the brand «M», smelted in a three-ton induction furnace at the plant «M-LIT» were established. It is shown that the technology of production of synthetic iron for this purpose provides almost twice as narrow as specified in the standard, the ranges of content C, Si, Mn, P. The share of S in the composition of pig iron does not exceed 0.05%. The principal possibility of improving technical requirements of the standards for brake pads for locomotives made of synthetic cast iron was noted.

Keywords. Synthetic cast iron, brake pads, chemical composition, carbon equivalent, hardness, strength, standards, improvements.

Несмотря на поиски новых материалов для тормозных колодок железнодорожного подвижного состава, чугун по-прежнему остается наиболее надежным материалом применительно к изготовлению этой весьма ответственной продукции литейных заводов. В последнее время предпринимаются попытки использовать для производства тормозных колодок из металлокерамических, полимерных и так называемых «композиционных» материалов, представляющих собой вулканизированную смесь резины с асбестом или другими, аналогичными асбесту, наполнителями [1–3 и др.]. Однако, как установлено результатами многочисленных исследований, тормозные колодки из «композиционного» материала в большей мере, чем чугунные, повреждают рабочую поверхность и скорее выводят из строя колеса железнодорожных транспортных средств [3 и др.], что делает эксплуатацию таких «композиционных» колодок экономически невыгодной. Кроме того, вследствие истирания «композиционного» материала колодок в процессе торможения транспортных средств, выделяющиеся тысячи тонн пыли оказывают негативное влияние на здоровье людей и окружающую среду. Известны рекомендации ученых запретить применение тормозных колодок из «композиционного» материала (резиноасбестовой

и резинобесасбестовой смеси) на железнодорожном транспорте [4]. Результаты массового обследования тормозных локомотивных колодок типа «М», изготовленных из чугуна согласно требованиям ГОСТ 30249-97, засвидетельствовали [5], что они также имеют недостатки, в частности поверхностные и внутренние дефекты. В этой связи возрастает актуальность задачи усовершенствования технологии выплавки чугуна для тормозных колодок и оптимизации требований стандартов и другой технической документации на эту продукцию.

Актуальность исследований, связанных с построением модели типа «химический состав – свойства» чугунов, отмечена в [6–8 и др.]. Такие модели желательны иметь и использовать при прогнозировании эксплуатационных свойств изделий из чугуна или при оптимизации технологических режимов его выплавки для получения заданных химического состава и механических свойств отливок, в том числе и применительно к изготовлению тормозных колодок из синтетического чугуна. В указанных статьях приведены заслуживающие внимания зависимости твердости, прочности чугуна, протяженности отбеленного слоя и объемной доли в нем ледебурита от углеродного эквивалента.

Для оценки различных свойств стали и чугуна широкое распространение получил показатель их углеродного эквивалента, например, для оценки свариваемости сталей. Для определения углеродного эквивалента предложены разные формулы. Каждая из известных формул для расчета углеродного эквивалента металла разработана под решение конкретных задач и поэтому предусматривает разный комплект учитываемых химических элементов. В данной работе применительно к исследованию синтетического чугуна, предназначенного для изготовления тормозных колодок, использовали следующие наиболее распространенные в исследовательской практике формулы.

Согласно ГОСТ 27772-88 «Прокат для строительных стальных конструкций», углеродный коэффициент $C_{\text{эКВ}}$, %, определяется по формуле:

$$C_{\text{эКВ}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Cr}}{5} + \frac{\text{Ni}}{40} + \frac{\text{Cu}}{13} + \frac{\text{V}}{14} + \frac{\text{P}}{2}. \quad (1)$$

Здесь и далее C, Mn, Cr, Ni, Cu, V, P – массовые доли углерода, марганца, кремния, хрома никеля, меди, ванадия, фосфора, %. Отметим, что эта формула не учитывает влияние содержания серы (S, %) на углеродный эквивалент стали.

Химический состав чугуна для изготовления тормозных колодок типа «М» локомотивов по требованиям ГОСТ 30249-97 должен соответствовать следующим нормам: C = 2,7–3,4%; Si = 0,7–1,0; Mn = 0,4–0,9; P = 0,4–0,9; S не более 0,20%. Допускаемые отклонения элементов: C – ± 0,1%; Si – ± 0,2; Mn – ± 0,1; P – 0,1; S – + 0,02%. Наличие и определение содержания в чугуне колодок бария или кальция не обязательно. Учитывая, что в составе чугуна для колодок «М» по требованиям ГОСТ 30249-97 не контролируется содержание Cr, Ni, Cu, V и S, то приведенную выше формулу для расчета углеродного эквивалента далее будем рассматривать в упрощенном виде, без указания этих элементов:

$$Ce1 = C + 0,17 \text{ Mn} + 0,04 \text{ Si} + 0,5 \text{ P}. \quad (2)$$

Сразу же отметим, что, согласно требованиям ГОСТ, твердость тормозной колодки из чугуна марки «М» должна соответствовать 229–302 НВ.

В работе [8] для расчета углеродного коэффициента чугунов была предложена формула:

$$Ce2 = C + 0,3 \text{ Si} + 0,33 \text{ P} - 0,015 \text{ Mn} + 0,26 \text{ S}. \quad (3)$$

Авторы статьи [7] при изучении зависимости отбела чугуна от углеродного коэффициента использовали следующую формулу для его расчета:

$$Ce3 = C + 0,3 \text{ Si} + 0,33 \text{ P} - 0,03 \text{ Mn} + 0,40 \text{ S}. \quad (4)$$

Формулы для расчета углеродного коэффициента стали и чугуна отличаются одна от другой незначительно. Эти формулы предложены применительно к оценке свойств литейных чугунов, в то время как формула (1) – для определения качества проката из легированных сталей. Обратим внимание, что формула (1) не учитывает влияния серы на углеродный эквивалент стали, но влияние фосфора в ней выражено в 1,5–2 раза сильнее, чем в формулах (2) и (3), коэффициент влияния кремния почти в ~10 раз меньше, а марганец, согласно (1), влияет на $C_{\text{эКВ}}$ противоположным образом, чем по формулам (2) и (3). Несмотря на то что Ce2 и Ce3 предназначены для оценки химического состава и свойств чугунов, но они различаются большими величинами коэффициентов при процентных содержаниях Mn и S в формуле Ce3.

Согласно [9], углеродный эквивалент чугуна можно рассчитывать по формуле: $Ce4 = C + 0,3 \text{ Si} + 0,3 \text{ P}$.

Эта простейшая формула будто бы учитывает смещение фигуративной точки сплава на двойной диаграмме железо-углерод под влиянием примесей, в частности кремния и фосфора. В работе [9] приведено выражение для определения степени эвтектичности чугуна: $S_{эвт} = \frac{\%C + 0,15(\%Si) - 2,1}{2,2 - 0,15(\%Si)}$. К сожалению, в [9], как и в [7, 8], не указаны диапазоны применимости предложенных формул для оценки изучаемых показателей качества чугунов.

Анализируя приведенные формулы для расчета углеродного коэффициента чугунов, обратим внимание также, что содержание фосфора увеличивает $C_{эКВ}$ и, согласно всем формулам, его влияние показано как практически одинаковое – коэффициенты перед P равны 0,3 или 0,33. Влияние Mn на $C_{эКВ}$ чугунов весьма слабое. Поэтому в формуле Ce4 содержание Mn не учитывается. Близкие по величине (0,26 и 0,40) значения коэффициентов отражают влияние S на $C_{эКВ}$.

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований стабильности качества ответственной литейной продукции, а именно тормозных колодок типа «М» для железнодорожных локомотивов, полученные статистической обработкой данных о химическом составе, твердости и прочности синтетического чугуна 100 промышленных плавов, проведенных на Никопольском заводе ООО «М-ЛИТ». Состав и характеристики трехтонной индукционной печи и другого литейного оборудования завода «М-ЛИТ» приведены в [1]. Параметры распределений содержания (%) химических элементов, углеродного коэффициента, твердости НВ по двум измерениям, разрушающей нагрузки (прочности) при испытаниях на излом колодки (тс), отношения C/Si и $S_{эвт}$ представлены в таблице.

Статистические характеристики показателей качества чугунных колодок типа «М» производства завода «М-ЛИТ»

Параметры распределений	Содержание, %									$S_{эвт}$	Твердость НВ	Прочность, тс	C/Si
	C	Si	Mn	P	S	Ce1	Ce2	Ce3	Ce4				
Средние значения	2,89	1,17	0,87	0,7	0,03	3,43	3,47	3,46	3,45	0,48	251/261	17,5	2,47
Минимальные	2,76	1,04	0,68	0,61	0,02	3,52	3,33	3,33	3,13	0,41	229/229	13,0	2,33
Максимальные	3,04	1,20	0,96	0,83	0,04	3,62	3,64	3,63	3,63	0,55	302/302	21,7	2,80

Анализ данных таблицы приводит к следующим выводам.

Диапазон 2,89–3,04 % варьирования от минимального до максимального значений массовой доли C в плавках чугуна на практике существенно меньше (2,7–3,4 %), чем допускается ГОСТ 30249-97. Диапазон разброса содержания Mn, Si, P на практике также заметно уже, чем указанные в этом стандарте. Заметим, что в рассматриваемых 100 промышленных партиях чугуна диапазон содержания Si смещен в сторону максимально разрешаемых величин, но с учетом допускаемого отклонения доли кремния $\pm 0,02\%$ требования ГОСТ выполняются. Позитивной оценки заслуживает весьма низкий уровень содержания серы (0,020–0,044 %) в чугуне по сравнению с допускаемой стандартом величиной 0,2 %. Значения углеродного эквивалента, рассчитанного по различным формулам, весьма близки. Это обстоятельство позволяет заключить, что в исследовательской практике можно применять все указанные формулы для расчета $C_{эКВ}$. Представленные результаты дают основание утверждать, что применяемая технология выплавки синтетического чугуна для тормозных колодок локомотивов является надежной с позиций обеспечения требований ГОСТ 30249-97 к химическому составу чугуна и позволяет ставить вопрос об ужесточении их в стандартах для исключения в статье [5] случаев поступления некачественной литейной продукции к потребителям. Твердость и прочность тормозных колодок не зависят от величины углеродного эквивалента чугуна при сравнительно узком диапазоне его изменения в условиях промышленного производства тормозных колодок для локомотивов.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что требования ГОСТ 30249-97 к содержанию химических элементов в составе чугуна ныне не являются чрезмерно жесткими для условий его выплавки в электрических индукционных печах. Поэтому имеются возможности минимизировать затраты на шихту (металлолом, ферросплавы, карбюризаторы) и регулирование по ходу плавки химического состава чугуна с целью уменьшения расходов на производство тормозных колодок. В этом аспекте перспективным мероприятием является реализация в промышленности метода термического экспресс-анализа состояния жидкого чугуна по референтным кривым его охлаждения в процессе плавки [10, 11].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Попов Е. С., Шинский О. И.** Анализ показателей качества колодок тормозных и композиционных для железнодорожного подвижного состава // *Литье и металлургия*. 2021. № 1. С. 27–37.
2. **Мазур В. Л., Найдек В. Л., Попов Є. С.** Порівняння чавунних і композиційних з чавунними вставками гальмових колодок для рухомого складу залізниці // *Met. lit'е Ukr*. 2021. Vol. 29. № 2(325). С. 30–39.
3. **Неижко И. Г., Найдек В. Л., Гаврилюк В. П.** Тормозные колодки железнодорожного транспорта. Киев: Наукова думка, 2009. 121 с.
4. **Мартинів І. Е., Негволода К. С.** Аналіз чинників, що впливають на ефективність використання автоматичних гальм вантажних вагонів // *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2013. Вип. 139. С. 230–235.
5. **Климов, А. А.** Некоторые результаты массового обследования тормозных локомотивных колодок / А. А. Климов, С. В. Домнин, А. В. Стручков, Д. С. Хацкевич, Р. А. Денисов, И. В. Хабаров // *Системы, методы, технологии*. 2015. № 1 (25). С. 73–77.
6. **Демин Д. А.** Исследование прочности чугуна с пластинчатым графитом в факторном пространстве «углерод [C] – углеродный эквивалент [C_{экв}]» в диапазонах C = (3,425–3,563 %) и C_{экв} = (4,214–4,372 %) // *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2017. № 1 (1).
7. **Тэн Э. Б., Коль О. А.** Зависимость отбела чугуна от его углеродного эквивалента // *Изв. высш. учеб. завед.* 2020. Т. 63. № 1. С. 57–62.
8. Determining the Carbon Equivalent of Cast Iron by the Thermo-Calc Program // *Steel in Translation*, 2011. Vol. 41. No. 11. P. 896–899.
9. Производство отливок из чугуна. Донецк: Изд-во «Норд-Пресс», 2005. 245 с.
10. **Zakharchenko, E.** New Computer Method of Derivative Thermal Express Analysis of Cast Iron for Operational Prediction of Quality / E. Zakharchenko, E. Sirenko, A. Goncharov, A. Bogdan // *Journal of Casting and Materials Engineering*. 2019. Vol. 3. No. 2. P. 31–42.
11. **Захарченко Э. В.** Усовершенствование универсального метода термического экспресс-анализа жидких чугунов, основанного на распознании формы кривых охлаждения / Э. В. Захарченко, Л. Д. Жуков, Е. А. Сиренко, А. В. Богдан, А. Л. Гончаров, Е. В. Кравченко // *Процессы литья*. 2015. № 2. С. 3–9.