

УДК 621.746.62:669.13

ЗАВИСИМОСТЬ ОТБЕЛА ЧУГУНА ОТ ЕГО УГЛЕРОДНОГО ЭКВИВАЛЕНТА

*Тен Э.Б., д.т.н., профессор кафедры «Литейные технологии и художественная
обработка материалов» (edis_ten@mail.ru)*

*Коль О.А., старший преподаватель кафедры «Литейные технологии и художественная
обработка материалов» (kohlolga@mail.ru)*

**Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский проспект, 4)**

Аннотация. Исследована количественная связь показателей отбела чугуна (протяженности отбеленного слоя H и объемной доли в нем ледебурита Q_n) с его углеродным эквивалентом C_E . Эти данные позволяют с высокой вероятностью прогнозировать развитие процесса формирования отбеленного поверхностного слоя при изготовлении отливок различной толщины из чугуна разного химического состава. Объектом исследования являлись нелегированные чугуны индукционной плавки восьми вариантов химического состава с углеродным эквивалентом от 3,30 до 5,53 %. Из этих чугунов в песчаной форме с нижним холодильником изготавливали ступенчатые отливки с размерами ступенек 100×60 мм толщиной 5, 10, 20 и 40 мм. Протяженность (глубину) отбеленного слоя измеряли в изломах отливок и оценивали по толщине зоны чистого отбела. Объемную долю ледебурита определяли металлографическим методом с применением компьютерной программы «Nexsys-Imageexpertpro 3». Согласно экспериментальным данным, при толщине отливок 5 и 10 мм сквозной (на всю толщину) чистый отбел формируется при углеродном эквиваленте $\leq 4,08$ % и $\leq 3,67$ % соответственно. В отливках толщиной 20 и 40 мм зона чистого отбела отсутствует, при этом глубина отбеленного переходного слоя возрастает с уменьшением углеродного эквивалента, но снижается с увеличением толщины отливки X . Установлено, что зависимость H от C_E имеет экспоненциальный характер и описывается уравнением типа $H = A \exp(-kC_E)$, где A и k – эмпирические коэффициенты. Объемная доля ледебурита у поверхности контакта отливки с холодильником во всех пробах составляет ~90 %, но по мере удаления от поверхности уменьшается с разной интенсивностью в зависимости от величины углеродного эквивалента и толщины отливки. Математической обработкой экспериментальных данных, полученных на расстоянии 5 мм от поверхности контакта отливки с холодильником, установлено, что количественная связь Q_n в отбеленном слое отливки со значением C_E

описывается экспоненциальной зависимостью $Q_n = 1000 \left(\frac{7}{X + 10} \right) \exp(-C_E)$.

Ключевые слова: песчаная форма, чугун, индукционная плавка, углеродный эквивалент, ступенчатая проба, толщина отливки, излом, глубина отбела, микроструктура, объемная доля ледебурита.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-1-57-62

ВВЕДЕНИЕ

Наличие отбеленного слоя на поверхности отливок из чугуна может являться как признаком их дефектности по несоответствию структуры, так и технически регламентированным [1 – 3]. Поэтому исследованию факторов, влияющих на его формирование, уделяется пристальное внимание [4 – 8].

Формирование отбела является следствием метастабильной кристаллизации чугуна с образованием вместо аустенитно-графитной эвтектики ледебурита, представляющего собой аустенитно-цементитную эвтектику. Ледебури́т имеет высокую твердость из-за присутствия в нем цементита Fe_3C , поэтому наличие отбела затрудняет механическую обработку отливок. Вследствие этого формирование отбеленного слоя на отливках из серого чугуна является нежелательным. В данных случаях необходимо решать прямую задачу – устранить отбел. Это можно сделать путем проведения графитизирующего отжига, при котором цементит распадается на аустенит и графит [9]. Однако этот способ

исправления дефекта малоэффективен из-за затратности и низкой производительности. Поэтому чаще применяют методы предупреждения формирования отбела путем варьирования составом чугуна [4], оптимизации температуры заливки форм [6], условий формирования отливок [7], графитизирующего модифицирования расплава перед разливкой [10, 11], а также других технологических решений.

Вместе с тем, отливки из отбеленного чугуна применяют во многих устройствах как износостойкие детали, в том числе в качестве валков металлургического и неметаллургического оборудования, рабочих элементов дробилок, мельниц, крановых колес и др. [1, 10 – 13]. Поэтому исследованию свойств чугунных отливок с отбеленным поверхностным слоем посвящены многие работы [1, 14 – 17]. При этом при производстве отливок из отбеленного чугуна необходимо решать обратную задачу – получить на отливках отбеленный слой требуемой протяженности [1].

Следовательно, для решения как прямой, так и обратной задачи необходимы знания о факторах,

оказывающих влияние на формирование ледебурита в чугунных отливках, таких как высокая скорость затвердевания отливок [1, 18], повышенное содержание в чугуне растворенных газов (водорода и кислорода) [19, 20], пониженное содержание в нем углерода и кремния [21], присутствие различных легирующих элементов [22, 23] и введение добавок [24]. В связи с этим проводятся различные исследования, направленные на управление процессом формирования отбеленного слоя на поверхности отливок. В частности, исследуется влияние различных факторов на кинетику и теплофизические аспекты затвердевания отливок из чугуна [7, 22 – 24], проводится компьютерное моделирование процесса формирования структуры и свойств отбеленного чугуна [25].

Вместе с тем, наиболее важным фактором управления процессом формирования отбела на поверхности отливок из серого чугуна является углеродный эквивалент C_E . Он представляет собой показатель эквивалентного (кажущегося) содержания углерода [12], который учитывает вклад компонентов чугуна на его положение относительно эвтектического состава на псевдо двойной диаграмме состояния железо – углерод. Численное значение C_E определяют по соотношению [26]

$$C_E = C + 0,30Si + 0,33P + 0,40S - 0,03Mn. \quad (1)$$

Склонность чугунов к отбелу исследована во многих работах [1, 3, 4, 11, 22 – 25, 27]. Однако до настоящего времени не установлена количественная связь показателей отбела чугуна (протяженности отбеленного слоя на отливках и объемной доли в нем ледебурита) от углеродного эквивалента.

Целью работы является установление зависимости показателей отбела чугуна от величины его углеродного эквивалента для прогнозируемого управления процессом его формирования при изготовлении отливок

Химический состав исследованных чугунов и значения их углеродного эквивалента

Chemical composition of studied cast irons and value of their carbon equivalent

Номер плавки	Содержание элементов в чугуне, % (по массе)					Углеродный эквивалент C_E
	C	Si	Mn	S	P	
1	4,00	1,69	0,70	0,032	0,100	4,53
2	3,98	1,71	0,68	0,030	0,100	4,52
3	3,60	1,52	0,67	0,036	0,086	4,08
4	3,57	1,53	0,67	0,034	0,085	4,05
5	3,23	1,39	0,66	0,037	0,088	3,67
6	3,20	1,35	0,68	0,036	0,086	3,63
7	2,94	1,33	0,67	0,038	0,085	3,36
8	2,89	1,29	0,68	0,038	0,085	3,30

различной толщины из чугуна разного химического состава.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлись отливки из чугунов с углеродным эквивалентом C_E от 3,3 до 4,5 % (см. таблицу).

Чугуны плавил в индукционной тигельной печи из доменного литейного чугуна марки Л6, %: 4,4 С; 1,8 Si; 0,80 Mn; 0,034 S; 0,10 P и лома углеродистой стали, %: 0,2 С; 0,13 Si; 0,70 Mn; 0,05 S; 0,04 P. После расплавления шихты жидкий чугун перегревали до 1400 °С и выдерживали в печи в течение 10 мин. Затем его выпускали в ковш и при температуре 1350 °С разливали в песчаные формы, в которых получали четырехступенчатые отливки размером 100×60 мм и толщиной 5, 10, 20 и 40 мм. Для провоцирования отбела в соответствии с рекомендациями [3, 28] пробы отливали с нижним стальным холодильником толщиной 12 мм (рис. 1).

В отбеленных отливках в поверхностном слое выделяли, как рекомендовано в работах [11, 14], три зоны: зону чистого отбела I у поверхности, зону частичного отбела II за ней и зону серого чугуна III на большей глубине (рис. 2, а).

В настоящей работе отбел оценивали по протяженности зоны I [3, 14] и, также как в работе [18], по объемной доле ледебурита в зонах I и II. Для этого каждую ступенчатую отливку ломали на примерно две равные части. Одну часть использовали для измерения по излому протяженности зоны I отбеленного слоя (см. рис. 1, б). Из другой части изготавливали шлиф и получали металлографическое изображение микроструктуры чугуна. В нем по методике, изложенной в работе [18], выделяли ледебурит (рис. 2, б). Далее с помо-

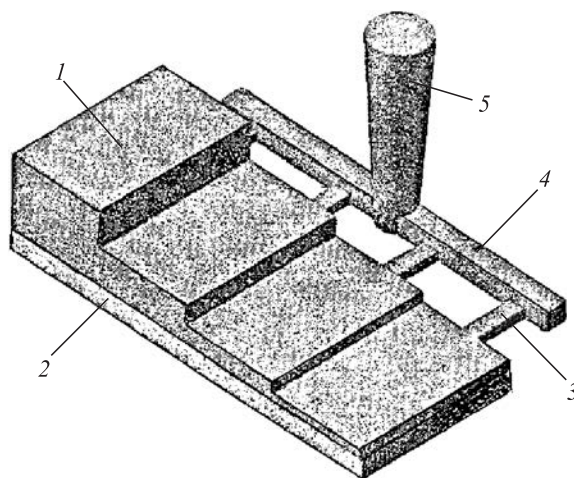


Рис. 1. Схема изготовления ступенчатых отливок: 1 – отливки; 2 – холодильник; 3 – питатели; 4 – литниковый ход; 5 – стояк

Fig. 1. Scheme of production of step-by-step castings: 1 – castings, 2 – chiller, 3 – gates, 4 – runner, 5 – downright

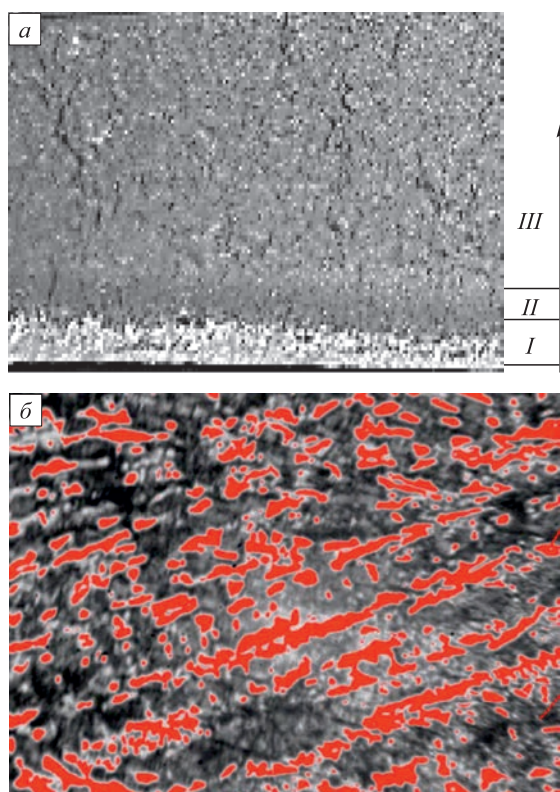


Рис. 2. Фрагмент излома отливки с отбеленным слоем: I – зона чистого отбела; II – зона частичного отбела; III – зона серого чугуна (а) и микроструктура отбеленного слоя с ледебуритом (б)

Fig. 2. Fracture fragment of the casting with chilled layer: I – zone of full chill; II – zone of not full chill; III – zone of grey cast iron (a) and microstructure of chilled layer with ledeburite (withdrawed by red color) (b)

щью компьютерной программы «Nexsys-Image expert pro 3» подсчитывали объемную долю ледебурита.

При математической обработке экспериментальных данных вид уравнения регрессии выбирался, исходя из характера экспериментальной зависимости. При этом расчет параметров (коэффициентов) уравнения регрессии проводили с помощью метода наименьших квадратов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОСУЖДЕНИЕ

Результаты измерения протяженности зоны чистого отбела на отливках из чугунов с различным углеродным эквивалентом приведены на рис. 3.

Как видно, при изменении углеродного эквивалента чугуна в пределах 3,30 – 4,53 % C все отливки толщиной от 5 до 40 мм имеют отбеленный поверхностный слой с протяженностью зоны I от 2,6 до 15,9 мм. При этом на отливках толщиной 5 мм при углеродном эквиваленте $C_E \leq 4,1$ % наблюдается сквозной отбел. Такой же эффект наблюдается на отливках толщиной 10 мм при углеродном эквиваленте $C_E \leq 3,7$ %. Данные, полученные на отливках толщиной 20 и 40 мм, четко показывают существенную зависимость глубины отбелен-

ного слоя H от величины углеродного эквивалента C_E . Так, на отливках толщиной 20 мм значение H возрастает в 5 раз (с 3,5 до 17,6 мм) при снижении углеродного эквивалента C_E с 4,5 до 3,3 %. При толщине отливок 40 мм при таком же изменении C_E значение H возрастает в 6 раз (с 2,6 до 15,9 мм).

Математическая обработка данных, полученных на отливках толщиной 20 и 40 мм, показала, что зависимость H от C_E описывается экспоненциальным уравнением типа $H = A \exp(-kC_E)$, где A и k – эмпирические коэффициенты. В частности, для отливок указанной толщины она соответственно имеет вид:

$$H_{20} = 1826,2 \exp(-1,43C_E) \text{ при } R^2 = 0,9992; \quad (2)$$

$$H_{40} = 1609,3 \exp(-1,35C_E) \text{ при } R^2 = 0,9916. \quad (3)$$

Из рис. 3 и соотношений (2) и (3) следует, что с увеличением толщины отливок X глубина отбеленного слоя H уменьшается.

Метод оценки склонности чугуна к отбелу по толщине отбеленного слоя применяют как в научных исследованиях [18, 24], так и в производственных условиях [3, 28]. Однако он недостаточно точен и не дает полную характеристику структуры поверхностного слоя чугунных отливок. Более адекватна оценка по количеству ледебурита в структуре зон I и II поверхностного отбеленного слоя [18]. На рис. 4 показана схема распределения объемной доли ледебурита по сечению отливок разной толщины.

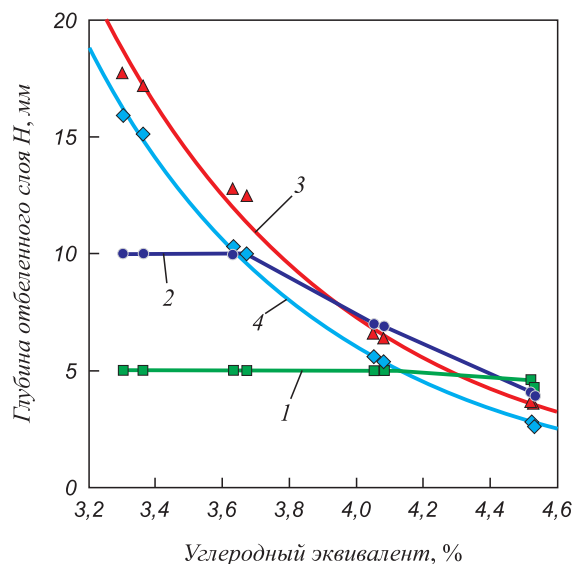


Рис. 3. Влияние углеродного эквивалента на глубину отбеленного слоя в отливках толщиной 5 мм (1); 10 мм (2); 20 мм (3); 40 мм (4) (маркерами показаны экспериментальные точки, черными линиями аппроксимирующие кривые)

Fig. 3. Influence of carbon equivalent on the depth of chilled layer in castings with the width of 5 mm (1); 10 mm (2); 20 mm (3); 40 mm (4) (markers indicate the experimental points, black lines indicate the approximating curves)

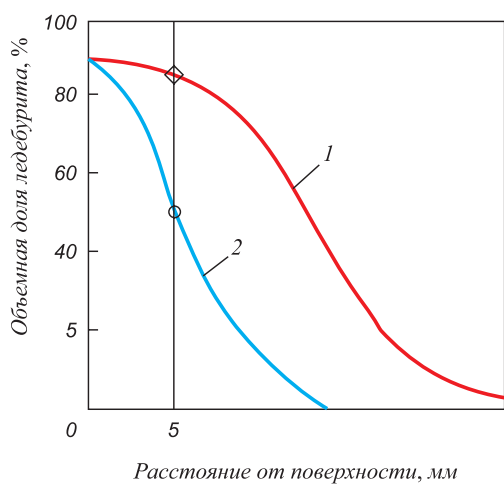


Рис. 4. Схема распределения объемной доли ледеburита по сечению отливок толщиной 20 (1) и 40 (2) мм при углеродном эквиваленте чугуна $C_E = 3,30\%$

Fig. 4. Scheme of ledeburite volume quota distribution along the castings section in with the thickness of 20 (1) and 40 (2) mm at cast iron carbon equivalent $C_E = 3.30\%$

Объемная доля ледеburита Q_L у поверхности контакта отливки с холодильником при всех ее толщинах примерно одинакова и составляет $\sim 90\%$, но по мере увеличения расстояния от поверхности она уменьшается. При этом у самой поверхности значения Q_L при изменении C_E и толщины отливок X различаются незначительно. Поэтому проведено сравнение данных, полученных на расстоянии 5 мм от поверхности отливки (см. рис. 4). Результаты приведены на рис. 5.

Данные рис. 5 показывают, что с увеличением углеродного эквивалента C_E объемная доля ледеburита Q_L при одинаковых условиях охлаждения отливок в процессе затвердевания снижается. Она также уменьшается при увеличении толщины отливки.

Математическая обработка экспериментальных данных, приведенных на рис. 5, показала, что зависимость объемной доли ледеburита Q_L от величины углеродного эквивалента C_E носит экспоненциальный характер и описывается следующим эмпирическим уравнением:

$$Q_L = 1000 \left(\frac{7}{X + 10} \right) \exp(-C_E). \quad (4)$$

Сопоставление экспериментальных результатов и рассчитанных по уравнению (4) значений Q_L показало, что они отличаются в среднем на 5%.

Таким образом, при оценке отбела на чугунных отливках в качестве его показателя, наряду с протяженностью отбеленного слоя, следует использовать также объемную долю в нем ледеburита.

Полученные в результате математической обработки экспериментальных данных количественные связи показателей отбела чугуна (протяженности зоны чистого отбела и объемной доли ледеburита) от величины

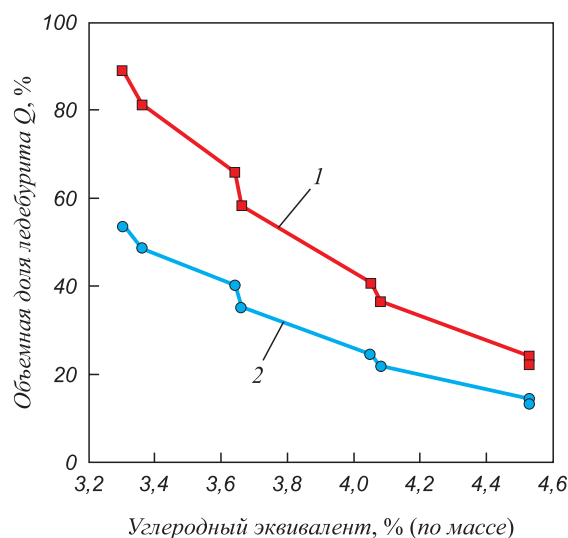


Рис. 5. Влияние углеродного эквивалента на объемную долю ледеburита в отливках толщиной 20 мм (1) и 40 мм (2) на расстоянии 5 мм от поверхности отливки

Fig. 5. Influence of carbon equivalent on ledeburite volume quota at castings with thickness of 20 mm (1) and 40 mm (2) on the distance of 5 mm from the casting's surface

углеродного эквивалента являются дополнительным инженерным инструментом. Они необходимы для выбора мотивированных технических решений как при производстве чугунных отливок без отбела, так и при изготовлении чугунных отливок с регламентированным отбеленным поверхностным слоем.

Выводы

Показано, что при оценке отбела на чугунных отливках в качестве его показателя, наряду с протяженностью отбеленного слоя, следует использовать также объемную долю ледеburита в нем.

Установлены зависимости показателей отбела чугуна от его углеродного эквивалента.

Зависимость протяженности в отбеленном слое зоны чистого отбела H от углеродного эквивалента C_E имеет экспоненциальный характер и описывается уравнением типа $H = A \exp(-kC_E)$, где A и k – эмпирические коэффициенты.

Распределение объемной доли ледеburита Q_L в отбеленном слое отливки в зависимости от величины углеродного эквивалента описывается экспоненциальной зависимостью $Q_L = B \left(\frac{7}{X + 10} \right) \exp(-C_E)$, где X – толщина отливки, мм; B – коэффициент, зависящий от расстояния от поверхности охлаждения.

Применение представленных эмпирических зависимостей позволяет прогнозировать формирование отбеленного слоя на поверхности отливок. Это особенно актуально при производстве литья широкой номенклатуры, когда из чугуна разного химического

состава необходимо изготавливать отливки различной толщины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник по чугуному литью / Под ред. Н.Г. Гиршовича. – Л.: Машиностроение, 1978. – 758 с.
2. Лакедемонский А.В., Кваша Ф.С., Медведев Я.И. и др. Литейные дефекты и способы их устранения. – М.: Машиностроение, 1972. – 152 с.
3. Чугунное литье в станкостроении / Под ред. Г.И. Клецкина. – М.: Машиностроение, 1975. – 320 с.
4. Seidu S.O., Ogunniyi I.O. Control of chilling tendency in grey cast iron reuse // *Materials Research*. 2013. Vol. 16. No 1. P. 145 – 149.
5. Gobinath V.M., Annamalai K. Effect of coating in chilled cast iron tapret with different chill material // *Indian Journal of Science and Technology*. September 2016. Vol. 9. Issue 35. P. 1 – 5.
6. Gobinath V.M., Kumar A., Annamalai K., Arunachalam R. Effect of pouring temperature in chilled cast iron with different chill material // *International Journal of Applied Engineering Research*. July 2015. Vol. 10. Special Issue. No. 57. P. 160 – 163.
7. Hemanth J. Solidification behavior of water-cooled and subzero-chilled cast iron on mechanical properties // *Journal of Materials Engineering and Performance*. April 2001. Vol. 10. Issue 2. P. 212 – 219.
8. Albu C.B., Riposan I. Chill (carbide) control in low sulphur electric melt grey cast irons // *Solid State Phenomena*. 2012. Vol. 188. P. 324 – 329.
9. Васильев Е.А. Отливки из ковкого чугуна: Производство, свойства, применение. – М.: Машиностроение, 1976. – 239 с.
10. Справочник по машиностроительным материалам. Т. 3: Чугун / Под ред. Н.Ф. Болховитинова и А.Ф. Ланда. – М.: Машгиз, 1959. – 359 с.
11. Гиршович Н.Г. Чугунное литье. – М.: Metallurgizdat, 1949. – 708 с.
12. Леви Л.И., Кантеник С.К. Литейные сплавы. – М.: Высшая школа, 1967. – 435 с.
13. Fras E., Gorny M., Kapturkiewicz W., Lopez H.F. Chilling tendency and chill of cast iron // *Tsinghua Science & Technology*. 2008. Vol. 13. No. 2. P. 177 – 189.
14. Бунин К.П., Таран Ю.Н. Строение чугуна. – М.: Metallurgia, 1972. – 160 с.
15. Ahamed M.S., Kumar Y.V., Rahman J.F., Bharat V. Mechanical properties of sub zero chilled cast iron useful for wear functional requirement of engineering components // *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 5. P. 540 – 549.
16. Li P., Li F., Cai A., Wei B. Fracture analysis of chilled cast iron camshaft // *China Foundry*. 2009. Vol. 6. No. 2. P. 104 – 108.
17. Ahamed M.S., Kumar Y.V., Rahman J.F. etc. Evaluation of hardness, wear and compression strength of grey and chilled cast iron // *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2014. Vol. 3. No. 7. P. 424 – 428.
18. Тен Э.Б., Коль О.А., Громова Н.В. Исследование количественной связи параметров отбела чугуна с линейной скоростью его затвердевания // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2010. № 5. С. 51 – 54.
19. Производство чугуновых отливок / Под ред. В.М. Колокольцева и Ри Хосена. – Магнитогорск: МГТУ, 2009. – 521 с.
20. Тен Э.Б., Коль О.А., Буй Т.Х. Влияние растворенного кислорода на структуру чугуна // *Металлургия машиностроения*. 2018. № 2. С. 24 – 25.
21. Жуков А.А. Основы расчета состава, структуры и прочности серого чугуна // *Вопросы теории литейных процессов*: Сб. тр. – М.: Машгиз, 1960. С. 163 – 252.
22. Fras E., Lopez H.F., Kawalec M., Gorny M. Role of alloying addition in the solidification kinetics and resultant chilling tendency and chill cast iron // *Metals*. 2015. Vol. 5. No.1. P. 256 – 288.
23. Klancnik U., Habjan J., Klancnik G. Thermal analysis of indefinite chill cast iron modified with ferrovandium and ferrotungsten // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2017. Vol. 127. No. 1. P. 71 – 78.
24. Riposan I., Chisamera M., Stan S., Barstow M. Improving chill control in iron powder treated slightly hypereutectic grey cast irons // *China Foundry*. 2011. Vol. 8. No. 2. P. 228 – 234.
25. Kumruoglu L.C. Mechanical and microstructure properties of chilled cast iron camshaft: Experimental and computer aided evaluation // *Materials and Design*. 2009. Vol. 30. No. 4. P. 927 – 938.
26. Литейное производство / Под ред. В.Д. Белова. – М.: ИД МИСиС, 2015. – 287 с.
27. Harsea L.M., Riposan I. Chillsensitivity in 4 % carbon equivalent, low-S, inoculated grey iron thin wall castings // *Metalurgia International*. 2013. Vol. 18. P. 99 – 104.
28. Standard Test Methods of Chill Testing of Cast Iron. ASTM A367-11 (2017). <https://www.astm.org/standards/A367.htm> (дата обращения 27.10.2018).

Поступила в редакцию 14 января 2019 г.
После доработки 16 августа 2019 г.
Принята к публикации 1 октября 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 1, pp. 57–62.

DEPENDENCE OF CAST IRON CHILL FROM ITS CARBON EQUIVALENT

E.B. Ten, O.A. Kol'

National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS),
Moscow, Russia

Abstract. Numerical relation of cast iron chill characteristics (distance of chilled layer H and volume quota of ledeburite in it Q_L) with its carbon equivalent C_E was investigated. This data helps to prognosticate with high probability the evolution of the surface chilled layer forming at the production of castings with different thickness from cast iron of various chemical compositions. The object of study is the unalloyed induction melted cast iron with eight variants of chemical composition with carbon equivalent from 3.30 up to 5.53 %. From these cast irons we made the step-by-step castings with steps sizes of 10×60 mm and thickness of 5, 10, 20 and 40 mm. The distance (depth) of chilled layer was measured at the fractures of the castings and gaged on thickness

of full chill zone. Ledeburite volume quota was detected by metallographic method using "Nexsys-Image expert pro 3" computer program. According to experimental data, when the casting thickness is 5 and 10 mm the through (at all thickness) full chill is formed at carbon equivalent ≤ 4.08 % and ≤ 3.67 % consequently. At the castings with 20 and 40 mm thickness the zone of full chill is absent, and in this case the chilled layer depth increases with a decrease of carbon equivalent and decreases with an increase of casting's thickness X . The dependence of H from C_E have the exponential character and can be described by the equation $H = A \exp(-kC_E)$, where A and k are empirical coefficients. Ledeburite volume quota near the contact surface of casting with chiller is near 90 %, but with an increase in the distance from the surface it decreases with different intensity depending on changes of carbon equivalent and casting's thickness. By mathematical processing of the experimental data received for the distance of 5 mm from the contact surface of the casting with chiller, we have detected that numerical re-

lation Q_n in casting chilled layer with value of C_E can be described by the exponential dependence: $Q_n = 1000 \left(\frac{7}{X+10} \right) \exp(-C_E)$.

Keywords: send mold, cast iron, induction melting, carbon equivalent, step-by-step sample, thickness of castings, fracture, chilled layer depth, microstructure, ledeburite volume quota.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-1-57-62

REFERENCES

1. *Spravochnik po chugunnomu lit'yu* [Handbook on cast iron casting]. Girshovich N.G. ed. Leningrad: Mashinostroenie, 1978, 758 p. (In Russ.).
2. Lakedemonskii A.V., Kvasha F.S., Medvedev Ya.I., Sherman A.D., Kiyan E.F. *Liteinye defekty i sposoby ikh ustraneniya* [Casting defects and methods of their elimination]. Moscow: Mashinostroenie, 1972, 152 p. (In Russ.).
3. *Chugunnoe lit'e v stankostroenii* [Cast iron casting at machine tool manufacture]. Kletskin G.I. ed. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 320 p. (In Russ.).
4. Seidu S.O., Ogunniyi I.O. Control of chilling tendency in grey cast iron reuse. *Materials Research*. 2013, vol. 16, no. 1, pp. 145–149.
5. Gobinath V.M., Annamalai K. Effect of Coating in Chilled Cast Iron Tappet with Different Chill Material. *Indian Journal of Science and Technology*. September 2016, vol. 9, Issue 35, pp. 1–5.
6. Gobinath V.M., Kumar A., Annamalai K., Arunachalam R. Effect of Pouring Temperature in Chilled cast Iron with Different Chill Material. *International Journal of Applied Engineering Research*. July 2015, vol. 10, Special Issue, no. 57, pp. 160–163.
7. Hemanth J. Solidification Behavior of Water-Cooled and Subzero-Chilled Cast Iron on Mechanical Properties. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2001, vol. 10, no. 2, pp. 212–219.
8. Albu C.B., Riposan I. Chill (carbide) control in low sulphur electric melt grey cast irons. *Solid State Phenomena*. 2012, vol. 188, pp. 324–329.
9. Vasil'ev E.A. *Otlivki iz kovkogo chuguna: Proizvodstvo, svoystva, primeneniye* [Castings from malleable cast iron: production, properties, application]. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 239 p. (In Russ.).
10. *Spravochnik po mashinostroitel'nyim materialam. T. 3: Chugun* [Handbook on mechanical-engineering materials. Vol. 3: Cast iron]. Bolkhovitinov N.F., Landa A.F. eds. Moscow: Mashgiz, 1959, 359 p. (In Russ.).
11. Girshovich N.G. *Chugunnoe lit'e* [Cast iron casting]. Moscow: Metallurgizdat, 1949, 708 p. (In Russ.).
12. Levi L.I., Kantenik S.K. *Liteinye splavy* [Casting alloys]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 435 p. (In Russ.).
13. Fras E., Gorny M., Kapturkiewicz W., Lopez H.F. Chilling tendency and chill of cast iron. *Tsinghua Science & Technology*. 2008, vol. 13, no. 2, pp. 177–189.
14. Bunin K.P., Taran Yu.N. *Stroenie chuguna* [Structure of cast iron]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 160 p. (In Russ.).
15. Ahamed M.S., Kumar Y.V., Rahman J.F., Bharat V. Mechanical properties of sub zero chilled cast iron useful for wear functional requirement of engineering components. *Procedia Materials Science*. 2014, vol. 5, pp. 540–549.
16. Li P., Li F., Cai A., Wei B. Fracture analysis of chilled cast iron camshaft. *China Foundry*. 2009, vol. 6, no. 2, pp. 104–108.
17. Ahamed M.S., Kumar Y.V., Rahman J.F., Rakesh S.G., Bharat V. Evaluation of hardness, wear and compression strength of grey and chilled cast iron. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2014, vol. 3, no. 7, pp. 424–428.
18. Ten E.B., Kol' O.A., Gromova N.V. Quantitative causal relation study of cast iron bleaching parameters and linear solidification rate. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no 5, pp. 51–54. (In Russ.).
19. *Proizvodstvo chugunnykh otlivok* [Production of cast iron castings]. Kolokol'tsev V.M., Khosen R. eds. Magnitogorsk: MG TU, 2009, 521 p. (In Russ.).
20. Ten E.B., Kol' O.A., Bui T.Kh. Influence of solute oxygen on cast iron structure. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2018, no 2, pp. 24–25. (In Russ.).
21. Zhukov A.A. Calculation of composition, structure and strength of grey cast iron. In: *Voprosy teorii liteinykh protsessov: sb. tr.* [Problems of casting processes theory]. Moscow: Mashgiz, 1960, pp. 163–252. (In Russ.).
22. Fras E., Lopez H.F., Kawalec M., Gorny M. Role of alloying addition in the solidification kinetics and resultant chilling tendency and chill cast iron. *Metals*. 2015, vol. 5, no. 1, pp. 256–288.
23. Klancnik U., Habjan J., Klancnik G. Thermal analysis of indefinite chill cast iron modified with ferrovandium and ferrotungsten. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2017, vol. 127, no. 1, pp. 71–78.
24. Riposan I., Chisamera M., Stan S., Barstow M. Improving chill control in iron powder treated slightly hypereutectic grey cast irons. *China Foundry*. 2011, vol. 8, no. 2, pp. 228–234.
25. Kumruoglu L.C. Mechanical and microstructure properties of chilled cast iron camshaft: Experimental and computer aided evaluation. *Materials and Design*. 2009, vol. 30, no. 4, pp. 927–938.
26. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry production]. Belov V.D. ed. Moscow: ID MISiS, 2015, 287 p. (In Russ.).
27. Harsea L.M., Riposan I. Chill sensitivity in 4 % carbon equivalent, low-S, inoculated grey iron thin wall castings. *Metallurgia International*. 2013, vol. 18, pp. 99–104.
28. Standard Test Methods of Chill Testing of Cast Iron. *ASTM A367-11* (2017). Electronic resource. Available at URL: <https://www.astm.org/standards/A367.htm> (Accessed 27.10.2018).

Information about the authors:

E.B. Ten, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Foundry Technology and Art Processing of Materials” (edis_ten@mail.ru)

O.A. Kol', Senior Lecturer of the Chair “Foundry Technology and Art Processing of Materials” (kohlolga@mail.ru)

Received January 14, 2019

Revised August 16, 2019

Accepted October 1, 2019