

ЛИВАРНЕ ВИРОБНИЦТВО

УДК 669.187.2

© Скребцов А.М.¹, Хлестов В.М.², Качиков А.С.³,
Проценко Д.Н.⁴, Терзи В.В.⁵

СТЕПЕНЬ НЕРАВНОВЕСНОСТИ СТРУКТУРЫ ЗАТВЕРДЕВШИХ ПРОБ СТАЛИ, ОТОБРАННЫХ ВО ВРЕМЯ ЕЕ ПЛАВКИ В ДУГОВОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ

Пробы металла отбирали по ходу плавки малоуглеродистой стали в дуговой электропечи и анализировали затвердевший сплав на содержание феррита и перлита. Найдено, что содержание феррита в затвердевшей пробе, как правило, отклоняется от равновесного, особенно в начале плавки. В конце плавки его содержание стабилизируется и составляет 0,91-0,93 доли равновесного. Достижение в конце плавки температуры равновесной микронеоднородности расплава приводит к уменьшению брака затвердевшего металла.

Ключевые слова: пробы металла, жидкая сталь, наследственная структура твердого металла, микронеоднородность структуры, феррит, перлит.

Скребцов О.М., Хлестов В.М., Качиков О.С., Проценко Д.Н., Терзи В.В. Рівень нерівноважності структури затверділих проб сталі, відібраних під час її плавки у дугової електропечі. Проби металу відбирали по ходу плавки малоуглецевої сталі в дуговій електропечі і аналізували затверділий сплав на утримання фериту і перліту. Знайдено, що зміст фериту в затверділої пробі, як правило, відхиляється від рівноважного, особливо на початку плавки. Наприкінці плавки його зміст стабілізується і становить 0,91-0,93 частки рівноважного. Досягнення в кінці плавки температури рівноважної микронеоднорідності розплаву призводить до зменшення браку затверділого металу.

Ключові слова: проби металу, рідка сталь, спадкова структура твердого металу, микронеоднорідність структури, ферит, перліт.

O.M. Skrebtsov, V.M. Khlestov, O.S. Kachikov, D.N. Protsenko, V.V. Terzi. The degree of non-equilibrium microstructure of hardened steel samples taken during its melting in an electric arc furnace. Austenite to ferrite and pearlite transformation has not been studied enough for low-carbon peritectic steels. Experiments were carried out in the electric arc furnace. Samples of the liquid metal were taken during smelting; three sample from melting, oxidation and reduction as well as one sample from the bucket were taken. The optical binocular microscope Axio Imagez A2m (production of the German company Zeiss AG) was used to analyze the samples for the chemical composition of the elements and for the microstructure (ferrite and pearlite amount). It makes it possible to determine ferrite-to-pearlite relation in steel by means of the special program Thixomet Pro. Experimental percentage of ferrite was compared with the equilibrium percentage of ferrite calculated from the carbon content in the sample from the Fe-C phase diagram. It has been found that during charge melting experimental ferrite content is 0,52-1,7 equilibrium ferrite content. During the recovery period the microstructural heterogeneity stabilizes and

¹ д-р техн. наук, професор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

³ аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, aleksej.sergeevich@mail.ru

⁴ аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

⁵ ст. лаб., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

is equal to 0,91-0,93 equilibrium heterogeneity. This ratio is in good agreement with the data available in literature. The amount of rejected finished metal as function of the temperature of the melt at the outlet of the furnace has been determined as well. The amount of rejected steel is minimum if steel is 1,052-1,07 times overheated above the liquidus point which is equal to the temperature of equilibrium microheterogeneity of the molten metal.

Keywords: metal samples, liquid steel, hereditary structure of the solid metal, microheterogeneity structures, ferrite, pearlite.

Постановка проблеми. В літературі існують роботи, в яких вивчаються рівноважна мікроструктура твердого металу в залежності від умовної виплавки його в різних плавильних агрегатах. Незважаючи на це в роботі [1] відзначається: «во многих низкоуглеродистых и низколегированных сталях при охлаждении и нагреве протекают полиморфное δ (α) \rightarrow γ превращение. Закономерности этого превращения в сталях и его связь с исходной структурой изучены еще не достаточно».

Анализ последних исследований и публикаций. Перегрев металу над точкою його ліквідуса і хімічний склад сталі впливають на властивості і структуру затвердівшого металу [1, 2]. Цим питанням уделено велике уваження в монографії Б.А. Баум з соавторами [3], в статті Скребцова А.М. [4], в роботі [5] і т. д. Однак для обобщаючих висновків по обговорюваному питанню матеріалів явно недостатньо.

Цель статьи. Вивчення впливу хімічного складу сталі і її перегреву над точкою ліквідуса на ступінь нерівноважності мікроструктури і якість затвердівшого металу.

Изложение основного материала. Спроби проводили в 20 – т дугової електродній при виплавці перитектичної сталі наступного хімічного складу: 0,17–0,25 С %; 0,90–1,4 Мп %; 0,30–0,50 Si %; \leq 0,030 S %; \leq 0,040 Р %; \leq 0,30 Cr %; \leq 0,30 Ni %; \leq 0,60 Cu %; 0,07–0,13 V%.

Технологія плавки металу була стандартною і вона достатньо детально описана в роботі [6].

Всього було проведено 5 спробних плавки. В час плавки, з допомогою ложки сталевара, відбирали пробки рідкого металу, які заливали в масивні чугунні пробники. Розміри проб: висота 70 мм, діаметр 38 мм, маса проб – 500 – 560 г. Схему відбору проб по періодах плавки була наступною: плавлення - 1^{ая}, 2^{ая}, 3^{ая}; окислення - 4^{ая}, 5^{ая}, 6^{ая}; відновлення - 7^{ая}, 8^{ая}, 9^{ая} і 10^{ая} – із ковша. Для всіх проб металу виконали їх хімічний аналіз і вивчили мікроструктуру. Хімічний аналіз проб металу проводили на оптико – емісійному спектрометрі GS – 1000 із модельного ряду OBLE.

Для металлографічного аналізу отожжених проб металу зробили мікрошліфи, які протравили в 4% розчині азотної кислоти. При збільшенні \times 100 крат шліфи досліджували на оптичному бінокулярному мікроскопі марки Axio Imagez A2m (виробництво німецької фірми Zeiss AG). Він дозволяє, з допомогою спеціальної програми Thixomet Pro визначати по мікроструктурі кількісне співвідношення ферриту і перлиту в сталі.

Мікроструктура металу. Нашли, що кількість ферриту в пробках змінюється від 0 % до 70-75 % об'єму металу, а вміст вуглецю зменшується за час плавки від 0,90 % до 0,15-0,20 % Характерні мікроструктури сталі з різним кількістю ферриту представлені на рис. 1, де показані найбільш типові мікроструктури на різних стадіях плавки. Можливо зробити висновок, що мікроструктура змінюється відповідно до зміни вмісту вуглецю в пробках. В початку стадії розплавлення при С - 0,9%, структура представляє собою пластинчастий перлит з невеликим кількістю вторинного цементиту (рис. 1, поз. а). Кінці періоду розплавлення в обраних пробках містяться \sim 0,64% С і в структурі спостерігається поряд з перлитом \sim 0,20% ферриту (світла складова на рис. 1, б). При зниженні вмісту вуглецю до 0,4% утворюється структура, що складається з перлиту \sim 40% і ферриту приблизно 60% (рис.1, в). Кінці окислювального періоду вміст вуглецю досягає значення \sim 0,18% і в наступному стабілізується, тому мікроструктура проб №6 - №10 була приблизно однаковою, що складається з \sim 80% ферриту і 20% перлиту (темна складова на рис. 1, г).

Для наступного аналізу результатів дослідження надійшли наступним чином. Во-

первых, учли опытные значения процента феррита ($\% Fe_{on}$) Во вторых, по содержанию углерода в пробе вычислили по правилу отрезков [7] $\% Fe_{pc}$. Заметили, что в первой половине продолжительности плавки (плавление, окисление), при отсутствии легирующих элементов в расплаве, содержание углерода в эвтектоиде равно 0,8%. Во второй половине плавки (восстановительный период) в расплаве содержится около 1% Mn, который понижает содержание углерода в эвтектоидной точке. В соответствии с данными работами [7], в этом случае можно принять содержание углерода в затвердевшем эвтектоиде 0,7%. Нашли отношение $N = Fe_{on} / Fe_{pc} \%$ На рис. 2, а представлена величина N для начального периода плавки (пробы № 1-6). Видно, что в первых двух пробах (№ 1, 2) феррит в структуре металла отсутствует, а в пробах № 3 величина N изменяется в пределах от 0,52 до 1,7. Это свидетельствует о сильной неравновесности микроструктуры проб затвердевшего металла в период плавления шихты. В окислительный период плавки (пробы 4, 5, 6) неравновесность микроструктуры сохраняется; к концу этого периода (проба 6) величина отношение $\% Fe_{on} / \% Fe_{pc}$ стабилизируется и составляет 0,91 – 0,93. Такая же величина этого отношения сохраняется в восстановительный период плавки, – это свидетельствует о том, что наследственная структура затвердевшего металла не достигает равновесного состояния – в равновесном состоянии должно выполняться отношение $Fe_{on} \% / Fe_{pc} \% = 1$.

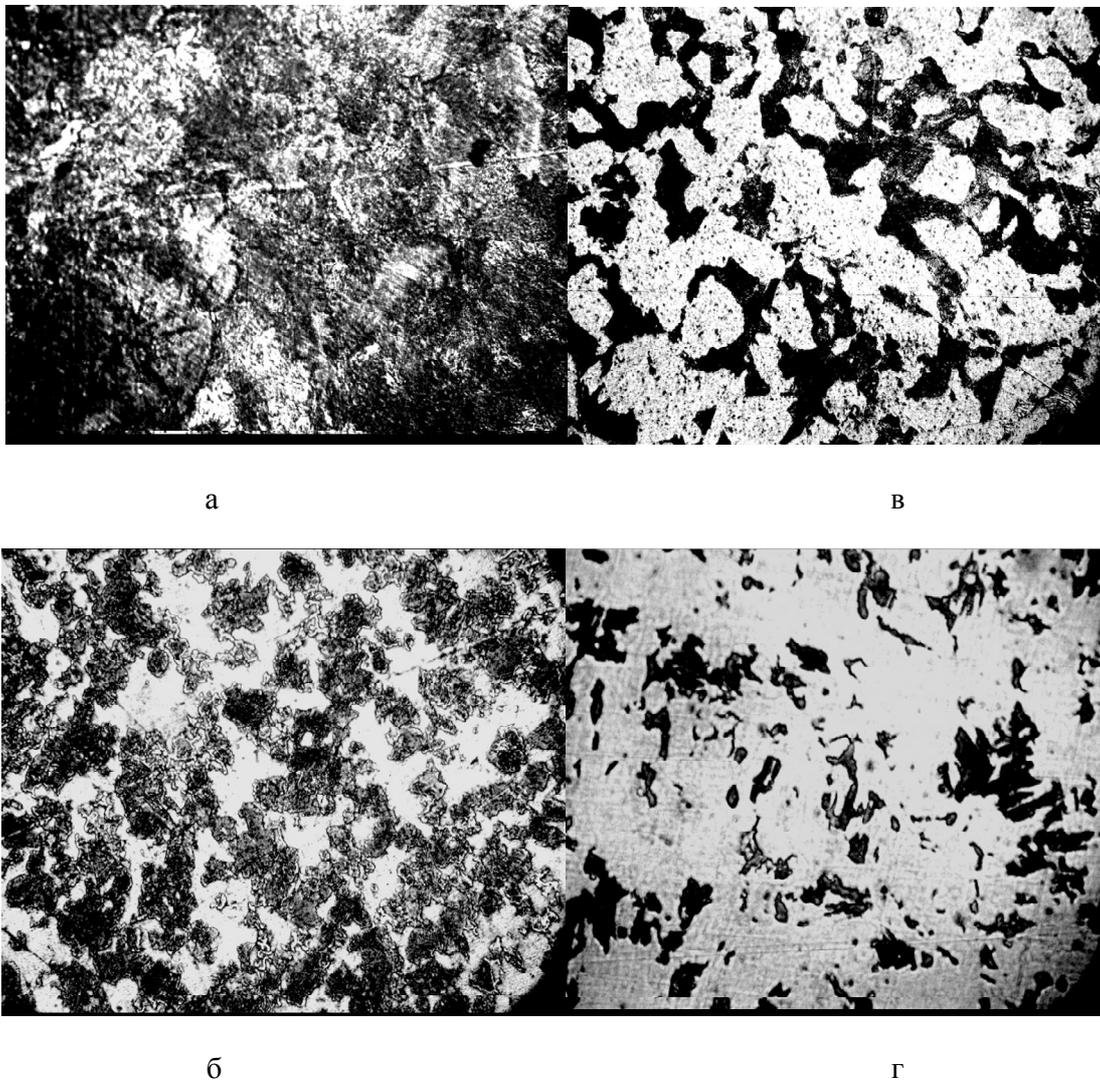


Рис. 1 – Микроструктура проб малоуглеродистой стали выплавленной в 20-т электродуговой печи и отобранных в различные периоды ее плавки: а – проба № 1, пластинчатый перлит, с небольшим количеством цементита; б – проба № 3, конец плавления: феррит до 25%; в – проба № 4, перлит примерно 40% и феррит 60%; г – проба № 6, 80% феррит + 20% перлита

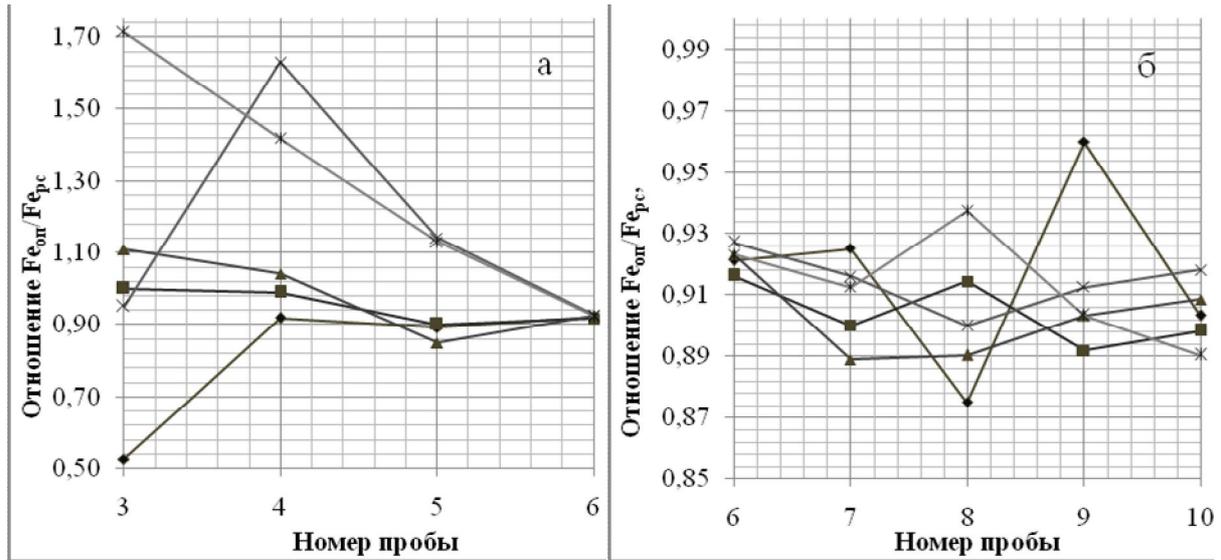


Рис. 2 – Отношение $Fe_{opt}\% / Fe_{rc}\%$ на протяжении периода отбора проб металла опытных плавок стали: а – период плавления и окисления; б – восстановление (пробы 7 – 9 из ковша – проба 10); ♦ – пл. № 1, ■ – пл. № 2, ▲ – пл. № 3, × – пл. № 4, * – пл. № 5

В работе [1] отмечается, что в малоуглеродистых сталях при полиморфном превращении $Fe_{\delta(\alpha)} \rightarrow Fe_{\gamma} \rightarrow Fe_{\alpha}$ «концентрация неоднородности может достигать 0,90...0,93, т.е. уровня дендритной ликвации». Таким образом, результаты изучения ферритной неоднородности на шлифах металла, представленные на рис. 2, практически согласуются с экспериментальными данными работы [1], по этому вопросу.

Неравновесность наследственной структуры затвердевшего металла связана с температурным режимом плавки стали. Его характеризовали безразмерной величиной отношения текущей температуры расплава t_i °С, выплавляемой стали, т. е. t_i °С / $t_{л}$ °С. На рис. 3 представлено отношение $t_i / t_{л}$ по пробам различных периодов плавки. Из рисунка видно, что перегрев расплава $t_i / t_{л}$ постоянно увеличивается на протяжении плавки металла. Особенно это видно в окислительный период плавки. После раскисления стали, на выпуске ее из печи, перегрев металла уменьшается примерно с 1,080 до 1,060. При таком перегреве в расплаве достигается равновесная микронеоднородность жидкого металла [4]. При ней металл теряет свойство наследственности шихты и появления возможность его термовременной обработки [3].

Из приведенного видно, что перегрев жидкого металла над точкой ликвидуса влияет на неоднородность наследственной структуры затвердевшего металла, и очевидно на качество выплавленной стали. Поэтому мы обобщили производственные данные по влиянию перегрева жидкого стали над точкой ликвидуса на качество твердого металла.

Влияние перегрева жидкой стали над ликвидусом при выпуске ее из печи на относительный брак металла. Основой для выполнения этой части работы является опытные данные из работ [8-11]. В работе [8] наблюдения за качеством металла проводили на сталях марок 19Г2, 19Г и СХЛ – 4, выплавленных в 60 т мартеновской печи. В работе [9] качество металла изучали для сталей марок 25Х2ГНТА и 20К, выплавленных в 150 – т мартеновской печи. В работах [8, 9] приведены кривые для брака готового металла, в %, в зависимости от температуры жидкой стали при выпуске ее из печи. В работе [10] изучали качество сталей марок Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5. В этой работе после прокатки слитков на блюминге, поверхность металла была обработана огневой зачисткой. Мерой качества металла был процент блюмов, зачищенных перед прокаткой на сортовых станах.

В работе [11] приведена таблица 8 (стр. 318) оптимальных температур выпуска стали разных марок из печи t_i , при которых достигается минимальный брак прокатанного металла.

При обработке экспериментальных данных работ [8-11] считали по химическому составу температуру ликвидус $t_{л}$ металла по формуле из работы [12] для каждой марки стали. Далее

учли температуру металла при выпуске его из печи t_i , и как в работе [4], нашли относительные температуры $t_i/t_{л}$.

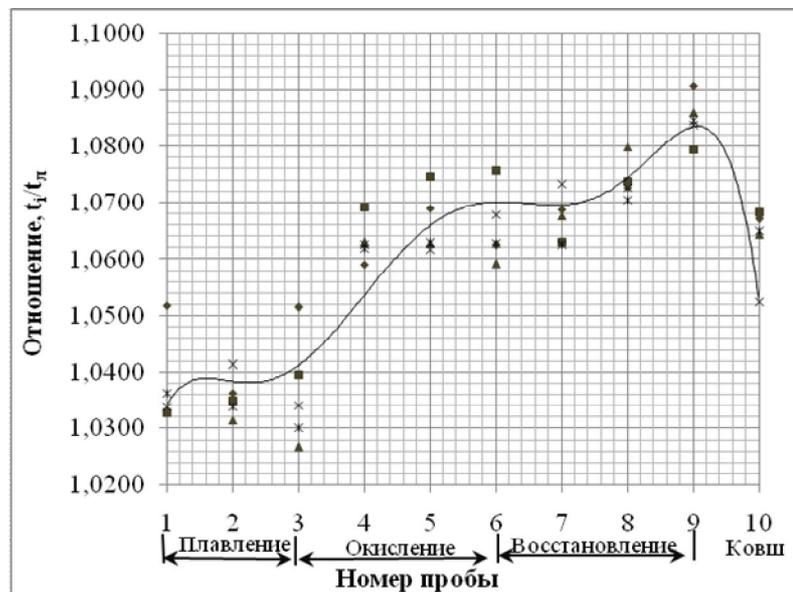


Рис. 3 – Отношение температуры металла при отборе проб, t_i , °С к температуре ликвидус стали $t_{л}$, °С по периодам плавки: \blacklozenge – пл. № 1, \blacksquare – пл. № 2, \blacktriangle – пл. № 3, \times – пл. № 4, \ast – пл. №5

На кривых качества металла [8-10] минимальное количество брака приняли за 100%. Остальные величины брака или зачистки блюмов пересчитали в относительные % этого значения. На рис. 4, а для сталей из работ [8, 9] представлен относительный процент брака малоуглеродистых сталей в зависимости от перегрева расплава перед выпуском его из печи $t_i/t_{л}$. На рис. 4, б показан относительный процент зачистки блюмов в зависимости от аналогичного перегрева для марок сталей из работы [10].

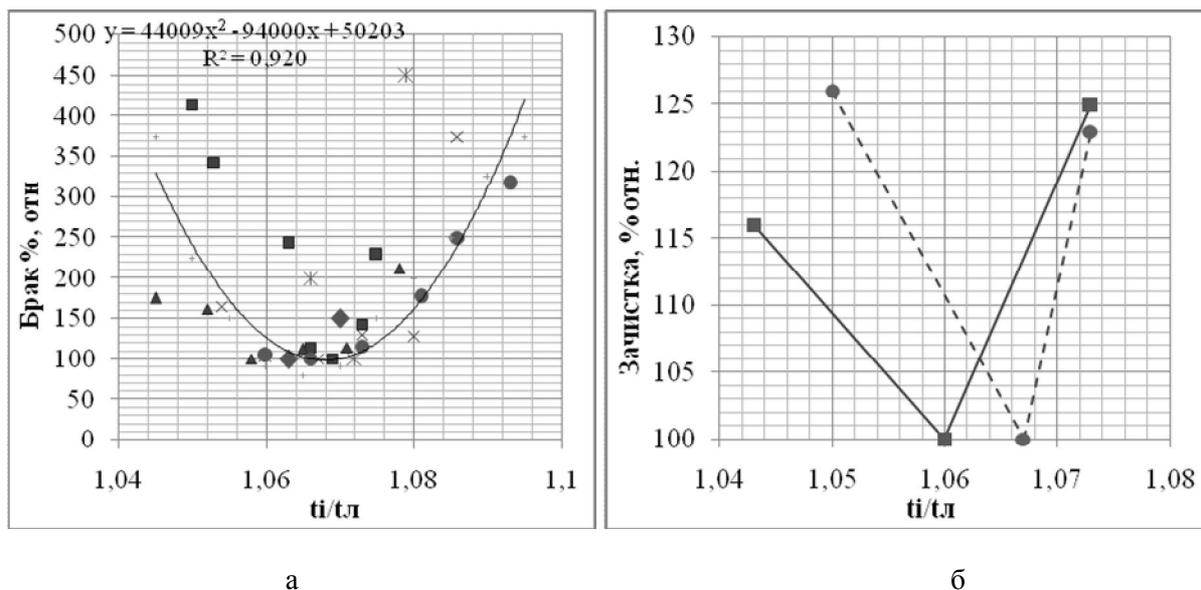


Рис. 4 – Отношение брак стали, %, (а) и зачистки блюмов после прокатки металла, %, (б) в зависимости от перегрева стали $t_i/t_{л}$ перед выпуском ее из печи: \times – 09Г2 [8]; \ast – 19Г [8]; \bullet – СХЛ – 4; \blacksquare – 25Х2ГНТА [9]; \blacklozenge – 025Х2ГНТА [9]; \blacktriangle – Ст20, (а). \blacksquare – среднеуглеродистая сталь [10], \bullet – малоуглеродистая сталь [10], (б)

Из рис. 4, а видно, что опытные данные по разным плавкам удовлетворительно согласуются друг с другом, - минимальное количество брака наблюдается на плавках с перегревом расплава $t_i/t_{л} = 1,060 - 1,070$.

Из рис. 4, б следует, что для малоуглеродистых сталей минимальная зачистка подобных сталей наблюдается при том же значении $t_i/t_{л}$, что и на рис. 4, а. Для среднеуглеродистых сталей минимум зачистки блюмов обнаруживается при несколько меньшем значении $t_i/t_{л}$, равном 1,060.

В монографии [11] для разных марок сталей приведены рекомендуемые оптимальные температуры жидкого металла t_i при выпуске его из печи, обеспечивающее минимум его брака. Для этих марок, как и в предыдущем случае [8-10], вычислили их температуры ликвидус $t_{л}$ и отношение $t_i/t_{л}$. Оказалось, что для сталей с содержанием углерода $<1\%$ (8 марок), $t_i/t_{л} = 1,058 \pm 0,012$, а для стали с содержанием 2,0 – 2,3% углерода (1 марка) отношение $t_i/t_{л} = 1,103 \pm 0,015$.

Из литературы известно, что при выпуске малоуглеродистой стали из печи с отношением $t_i/t_{л} = 1,060$ достигается ее равновесная микронеоднородность расплава [4]. Для сплавов Fe-C, Fe-Cu, Fe-Mn [13] экстраполяция к нулевой концентраций добавочных элементов приводит к отношениям равновесной микронеоднородности расплавов при величинах $t_i/t_{л}$ равных, соответственно – 1,030, 1,040 и 1,060.

Все эти данные хорошо согласуется с кривой 1 рис.1 работы [4], которая была построена по зависимостям свойств расплавов от температуры (вязкость, плотность, электропроводность и т.д.). Названная кривая характеризует состояние равновесной микронеоднородности расплава, при которой достигается полная потеря наследственных свойств шихты и появляется возможность проведения термовременной обработки стали [3].

Следовательно, из результатов анализа работ [8-11] видно, что минимальное количество брака готового металла согласуется с достижением равновесной микронеоднородности жидкого расплава перед заливкой его в литейные формы [4].

Выводы

1. В опубликованной литературе отмечается, что в малоуглеродистых сталях закономерности превращения аустенита в феррит и перлит изучены недостаточно. Поэтому в настоящей работе особое внимание уделялось структурным превращениям в затвердевшем металле.
2. После затвердевания проб жидкого металла, отобранных из ванны электродуговой сталеплавильной печи, определили доли феррита и перлита в наследственной структуре стали. Нашли, что доля феррита в структуре металла от его равновесного значения составляет в период плавления от 0,52 до 1,7, а в восстановительный период плавки 0,93 – 0,95. Последние цифры согласуются с литературными значением этой величины по дендритной неоднородности стали.
3. Минимальный брак малоуглеродистой стали достигается при относительном ее перегреве над точкой ликвидуса равной 1,060 – 1,070, что соответствует оптимальной температуре достижения её равновесной микронеоднородности металлического расплава.

Список использованных источников:

1. Яценко А.И. Структурно-концентрационные особенности $\delta(\alpha) \rightarrow \gamma$ -превращения в низкоуглеродистых сталях / А.И. Яценко, К.Ю. Доронкин, П.Д. Гришко // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1986. – №7. – С. 18-20.
2. Яценко А.И. Концентрационно-структурная микронеоднородность низколегированных листовых сталей / А.И. Яценко, Г.В. Левченко, П.Д. Грушко // Сталь. – 1990. – №5. – С. 78-82.
3. Жидкая сталь / Б.А. Баум [и др.]. – М.: Металлургия, 1991. – 158 с.
4. Скребцов А.М. Особенности структурных превращений металлических расплавов в интервале температур ликвидус-кипения / А.М. Скребцов // Сталь. – 2010. – №10. – С. 14-19.
5. Влияние температуры нагрева жидкого алюминиевого сплава на микроструктуру затвердевшего металла / А.М. Скребцов, Г.А. Иванов, Ю.Д. Кузмин, А.С. Качиков, Е.В. Золотарева // Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер. : Технічні науки : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь. 2011. – Вип. 23. – С. 138-142.
6. Крамаров А.В. Производство стали в электропечах / А.В. Крамаров. – М.: Металлургиздат. – 1969. – 440 с.

7. Гуляев А.П. *Металловедение* / А.П. Гуляев. – М.: *Металлургия*. 1986. – 542 с.
8. *Непрерывный контроль температур жидкой стали в период доводки мартеновской печи* / В.С. Кочо, Г.В. Самсонов, А.Г. Стрельченко, П.С. Кислый. – Киев: *Техника*. – 1965. – 228 с.
9. *Еланский Г.Н. Строение и свойства жидкого металла – технология плавки – качество стали* / Г.Н. Еланский, В.А. Кудрин. – М.: *Металлургия*. – 1984. – 239 с.
10. *Ефимов В.А. Стальной слиток* / В.А. Ефимов. – М.: *Металлургиздат*. – 1961. – 356 с.
11. *Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали* / В.А. Ефимов. – М.: *Металлургиздат*. – 1976. – 552 с.
12. *Процессы непрерывной разливки* / А.Н. Смирнов, В.А. Пилушенко, А.А. Минаев, С.В. Момот, Ю.Н. Белобров. – Донецк: *ДОННТУ*, 2002. – 536 с.
13. *Филиппов Е.С. Строение, физика и химия металлургических расплавов* / Е.С. Филиппов. – М.: *Металлургиздат*. – 1995. – 304 с.

Bibliography:

1. Yatsenko A.I. Structural-concentration effects $\delta(\alpha) \rightarrow \gamma$ -becoming a low-carbon steel / A.I. Yatsenko, K.Y. Doronkin, P.D. Grishko // *Metallurgy and heat treatment of metals*. – 1986. – №7. – P.p. 18-20. (Rus.)
2. Yatsenko A.I. The concentration-microinhomogeneity structural alloy steel sheet / A.I. Yatsenko, G.V. Levchenko, P.D. Grushko // *Steel*. – 1990. – №5. – P.p. 78-82. (Rus.)
3. *Liquid steel* / B.A. Baum [and others]. – Moscow: *Metallurgiya*. 1991. – 158 p. (Rus.)
4. Skrebtsov A.M. Features of structural transformations in metallic melts at temperatures liquidus-boiling / A.M. Skrebtsov // *Steel*. – 2010. – №10. – P.p. 14-19. (Rus.)
5. Effect of heating temperature of molten aluminum alloy microstructure of solidified metal / A.M. Skrebtsov, G.A. Ivanov Y.D. Kuzmin, A.S. Kachik, E.V. Zolotarev // *Reporter of the Priazovskyi state technical university. Section: Technical sciences : Collection of scientific works / PSTU*. – Mariupol, 2011. – Issue. 23. – P.p. 138-142. (Rus.)
6. Kramarov A.V. The production of steel in electric furnaces / A.V. Kramarov. – М.: *Metallurgizdat*. – 1969. – 440 p. (Rus.)
7. Gulyaev A.P. *Metallurgy* / A.P. Gulyaev. – М.: *Metallurgiya*. – 1986. – 542 p. (Rus.)
8. *Continuous monitoring of the temperature of molten steel in the period finishing OHF* / V.S. Kochko, G.V. Samsonov, A.G. Strel'chenko, P.S. Sour. – Kiev: *Technika*. – 1965. – 228 p. (Rus.)
9. *Elansky G.N. Structure and properties of liquid metal – smelt – quality steel* / G.N. Elansky, V.A. Kudrin. – М.: *Metallurgiya*. – 1984. – 239 p. (Rus.)
10. *Efimov V.A. Steel ingot* / V.A. Efimov. – М.: *Metallurgiya*. – 1961. – 356 p. (Rus.)
11. *Efimov V.A. Casting and crystallization began* / V.A. Efimov. – М.: *Metallurgiya*. – 1976. – 552 p. (Rus.)
12. *continuous casting process* / A.N. Smirnov, V.A. Pilyushenko, A.A. Minaev, S.W. Momot, Y.N. Belobrov. – Donetsk: *Donetsk National Technical University*, 2002. – 536 p. (Rus.)
13. *Filippov E.S. Structure, physics and chemistry of metallurgical melts* / E.S. Filippov. – М.: *Metallurgiya*. – 1995. – 304 p. (Rus.)

Рецензент: В.Г. Ефременко
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 10.04.2015