

УДК: 669.017: 669.141.24: 669.15 – 194.2: 621.746

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ УГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ОХЛАЖДЕНИЯ СЛИТКА И НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК

БАБАЧЕНКО А. И. *, к.т.н.
ДЁМИНА Е. Г., к.т.н.
КНЬШ А. В., к.т.н.
ХУЛИН А. Н., к.т.н.
САФРОНОВ А. Л.
КЛИНОВАЯ О. Ф.

Отдел конструкционных сталей Института чёрной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины,
пл. Академика Стародубова, 1, 49050, Днепропетровск, Украина,
тел. +38 (056) 790-05-21, +38 (056) 790-57-85, e-mail: a_babachenko@mail.ru

Аннотация. *Цель.* Исследование особенностей формирования зёрен аустенита, феррито-перлитной структуры в процессе охлаждения слитка и непрерывнолитых заготовок из углеродистых и низколегированных сталей; оценить уровень загрязнённости неметаллическими включениями слитка сифонной разливки Ø 485 мм (мартеновский процесс получения стали) и непрерывнолитых заготовок Ø 470 и 450 мм (электросталеплавильный процесс получения стали). *Методика.* Металлографические методы выявления и определения величины зерна и неметаллических включений. *Результаты.* Определено, что микроструктура непрерывнолитых заготовок для производства железнодорожных колёс отличается меньшими размерами аустенитных зёрен, более равномерным распределением доэвтектоидного феррита, меньшим содержанием неметаллических включений по сравнению с микроструктурой слитка. *Научная новизна.* Установлено, что при затвердевании непрерывнолитых заготовок содержание углерода в стали, наряду с ускоренным охлаждением, является один из главных факторов, определяющих параметры микроструктуры. *Практическая значимость.* Коренное изменение технологии производства стали и замена слитка непрерывнолитой заготовкой позволят существенно повысить качество, как исходной заготовки, так и готовой металлопродукции.

Ключевые слова: слиток; непрерывнолитая заготовка; сталь; микроструктура; неметаллические включения

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ І НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ У ПРОЦЕСІ ОХОЛОДЖЕННЯ ЗЛИТКА І БЕЗПЕРЕРВНОЛИТОГО ЗАГОТОВОК

БАБАЧЕНКО О. І. *, к.т.н.
ДЬОМІНА К. Г., к.т.н.
КНИШ А. В., к.т.н.
ХУЛІН А. М., к.т.н.
САФРОНОВ О. Л.
КЛИНОВА О. П.

Відділ конструкційних сталей Інституту чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України,
пл. Академіка Стародубова, 1, 49050, Дніпропетровськ, Україна,
тел. +38 (056) 790-05-21, +38 (056) 790-57-85, e-mail: a_babachenko@mail.ru

Анотація. *Мета.* Дослідження особливостей формування зерен аустеніту, ферито-перлітною структури в процесі охолодження злитка та безперервнолитих заготовок з вуглецевих і низьколегованих сталей; оцінити рівень забрудненості неметалевими включеннями злитка сифонного розливання Ø 485 мм (мартенівський процес отримання сталі) і безперервнолитих заготовок Ø 470 і 450 мм (електросталеплавильний процес отримання сталі). *Методика.* Металографічні методи виявлення та визначення величини зерна і неметалевих включень. *Результати.* Визначено, що микроструктура безперервнолитих заготовок для виробництва залізничних коліс відрізняється меншими розмірами аустенітних зерен, більш рівномірним розподілом доэвтектоїдного фериту, меншим вмістом неметалічних включень у порівнянні з микроструктурою

злитка. **Наукова новизна.** Встановлено, що під час твердіння безперервнолитих заготовок вміст вуглецю в сталі, поряд з прискореним охолодженням, є один з головних факторів, що визначають параметри мікроструктури. **Практична значимість.** Докорінна зміна технології виробництва сталі і заміна злитка безперервнолитою заготівлею дозволять суттєво підвищити якість, як вихідної заготовки, так і готової металопродукції.

Ключові слова: злиток; безперервнолита заготовка; сталь; мікроструктура; неметалеві включення

THE STRUCTURE FORMATION FEATURES OF CARBON AND LOW-ALLOYED STEELS DURING COOLING OF THE INGOT AND CONTINUOUS CAST BILLETS

Babachenko A. I. *, *Cand. Sc. (Tech.)*

Domina K. G, *Cand. Sc. (Tech.)*

Knysh A. V., *Cand. Sc. (Tech.)*

Khulin A. N., *Cand. Sc. (Tech.)*

Safronov A. L.

Klinovaya O. F.

Department of Constructional Steels of Z. I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Sq. Academician Starodubova, 1, 49050, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-21, +38 (056) 790-57-85, e-mail: a_babachenko@mail.ru

Abstract. Purpose. The investigation of the features of formation of austenite grains, ferrite and pearlite structure during the cooling process of the ingot and cast billets made of carbon and low-alloyed steels; the assessment of the contamination level by non-metallic inclusions of the bottom casting ingot \varnothing 485 mm (open-hearth process of making steel) and continuous cast billets \varnothing 470 and 450 mm (EAF steelmaking process). **Methodology.** The metallographic methods of detection and determination of grain size and non-metallic inclusions. **Findings.** It has been determined that the microstructure of the continuous cast billets for the production of railway wheels has smaller austenitic grain, more uniform distribution of pro-eutectoid ferrite, lower content of non-metallic inclusions as compared with the microstructure of the ingot. **Originality.** It has been established that carbon content in the steel, along with the cooling rate, is one of the main factors defining the parameters of the microstructure during the solidification of the continuous cast billets. **Practical value.** The radical change in production technology and the replacement of an ingot to a continuous cast billet will significantly improve the quality as an original billet and finished steel products.

Keywords: ingot; continuous cast billet; steel; microstructure; non-metallic inclusions

Введение

Мировой опыт показывает, что замена слитка, отлитого в изложницу, непрерывнолитой заготовкой (НЛЗ) приводит к существенным изменениям в технологии производства стали на стадиях раскисления, разливки, затвердевания, а также вносит определённые коррективы в существующие технологические режимы производства металлопродукции [2].

Коренное изменение технологии производства стали требует проведения комплексных исследований качества металлопродукции на всех стадиях производства, начиная с этапа получения исходной литой заготовки.

Цель

Цель работы заключалась в исследовании особенностей формирования зёрен аустенита, феррито-перлитной структуры в процессе охлаждения слитка и непрерывнолитых заготовок из углеродистых и низколегированных сталей; в оценке

загрязнённости неметаллических включений слитка сифонной разливки \varnothing 485 мм (мартеновский процесс получения стали) и непрерывнолитых заготовок \varnothing 470 и 450 мм (электросталеплавильный процесс получения стали).

Материал и методика исследования

Материал исследования – образцы непрерывнолитых заготовок и слитка сифонной разливки из углеродистых и низколегированных сталей различного диаметра производства ОАО «МЗ «ДНЕПРОСТАЛЬ» и ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ». Химический состав и размеры слитка и непрерывнолитых заготовок представлены в табл. 1. Углеродистые стали марки 2 и ER 7 используются для производства железнодорожных колёс, низколегированные стали 09Г2С и 32Г2С – для производства труб.

Образцы для металлографического анализа отбирали в поверхностных слоях (П), на расстоянии $\frac{1}{2}$ радиуса ($\frac{1}{2} R$) и в центральных слоях (Ц). Схема

вырезки образцов из слитка и непрерывнолитых заготовок показана на рис. 1.

Металлографические исследования выполнены на микроскопе «Axiovert 200 M MAT» производства фирмы «Carl Zeiss», количественный анализ выполнен в программе «AxioVision 4.6.3». Оценка неметаллических включений в образцах слитка и непрерывнолитых заготовках выполнена в соответствии с ГОСТ 1778 «СТАЛЬ. Металлографические методы определения неметаллических включений». Микроструктуру образцов выявляли травлением в 4-% спиртовом растворе HNO₃ (ниталь). Размер действительного зерна определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 5639 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна».

Таблица 1

Химический состав слитка и непрерывнолитых заготовок / The chemical composition of the ingot and continuous cast billets

Марка стали	Вид заготовки	Содержание элементов, масс. %				
		C	Mn	Si	P	S
2	Слиток Ø 485 мм	0,61	0,73	0,35	0,016	0,004
	НЛЗ Ø 470 мм	0,57	0,70	0,29	0,014	0,008
	НЛЗ, Ø 450 мм	0,57	0,73	0,29	0,011	0,005
Требования ГОСТ 10791-2011		0,55... 0,63	0,50... 0,90	0,22... 0,45	≤ 0,030	≤ 0,025
ER 7	НЛЗ Ø 450 мм № 1	0,48	0,73	0,29	0,008	0,005
	НЛЗ Ø 450 мм № 2	0,46	0,65	0,32	0,007	0,002
	НЛЗ Ø 450 мм № 3	0,47	0,65	0,34	0,007	0,002
Требования EN 13262 (D)		≤ 0,52	≤ 0,80	≤ 0,40	≤ 0,020	≤ 0,015
32Г2С	НЛЗ Ø 290 мм	0,41	1,68	0,49	0,015	0,010
09Г2С	НЛЗ Ø 150 мм	0,10	1,43	0,52	0,020	0,004

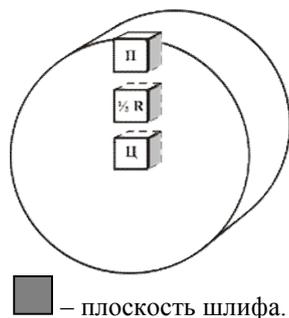


Рис. 1. Схема вырезки образцов для металлографического анализа из слитка и непрерывнолитых заготовок / The sampling scheme for metallographic analysis of the ingot and continuous cast billets

Результаты исследований

Известно, что процесс кристаллизации стали завершается образованием дендритной структуры аустенита, которая сочетает в своём строении химическую неоднородность, повышенную волнистость границ, а также содержит избыточные вакансии, дислокации, несплошности, что повышает термодинамический потенциал. Это стимулирует такие процессы как гомогенизация, полигонизация, рекристаллизация, зарастание микропор и трещин, ведущих к уменьшению термодинамического потенциала [1].

При дальнейшем охлаждении слитка в результате протекания структурных превращений дендриты ограняются и приобретают вид полиэдров. Поэтому необходимо различать дендриты и первичные зёрна (кристаллиты), которые в общем случае не тождественны друг другу [3...5].

После завершения затвердевания макроструктура стальных непрерывнолитых заготовок, как и макроструктура слитка, отлитого в изложницу, состоит из трёх характерных кристаллических зон (рис. 2).

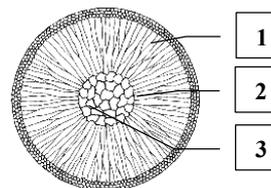


Рис. 2. Схема строения непрерывнолитой заготовки круглого сечения: 1 – зона мелких равноосных дендритов (мелкозернистая корка), 2 – зона столбчатых дендритов (зона транскристаллизации), 3 – зона равноосных различно ориентированных дендритов / The primary crystallization areas of the ingot and continuous cast billets of round section: 1 – the fine equiaxed dendrites area (the fine grain sinterskin), 2 – the columnar dendrites area; 3 – the equiaxed differently oriented dendrites area

Представляло интерес определить, как в зависимости от размера поперечного сечения изменяется размер зёрен аустенита в микроструктуре слитка сифонной разливки и непрерывнолитых заготовок. Фотографии микроструктуры по сечению слитка и НЛЗ различного диаметра представлены на рис. 3, результаты количественного металлографического анализа – в табл. 2.

После охлаждения до температуры окружающей среды микроструктура всех исследуемых образцов состоит из перлита и доэвтектоидного феррита. Выделение последнего по границам «бывших» аустенитных зёрен позволяет судить о том, как изменяется структура аустенита по сечению литых заготовок различного диаметра.

Рассмотрим особенности микроструктуры слитка сифонной разливки Ø 485 мм и НЛЗ Ø 470 и 450 мм из стали марки 2, НЛЗ Ø 450 мм из стали марки 2 и ER 7 и Ø 290 мм из стали марки 32Г2С, а также НЛЗ Ø 290 и 150 мм из стали 32Г2С и 09Г2С соответственно.

Особенности микроструктуры слитка сифонной разливки Ø 485 мм и непрерывнолитых заготовок Ø 470 и 450 мм. Марка стали 2.

Рассмотрим, как различный режим охлаждения слитка и НЛЗ повлиял на формирование зёрен аустенита (рис. 3). Строеение зёрен аустенита, как и по сечению слитка, так и непрерывнолитой заготовки имеет общие тенденции, которые полностью отражают известные представления о формировании структуры стального слитка. В поверхностных слоях при затвердевании образуются самые мелкие кристаллы. В направлении от поверхности к центральным слоям размеры дендритной структуры увеличиваются, т.е. чётко прослеживается переход от зоны столбчатых кристаллов к центральной зоне равноосных кристаллов.

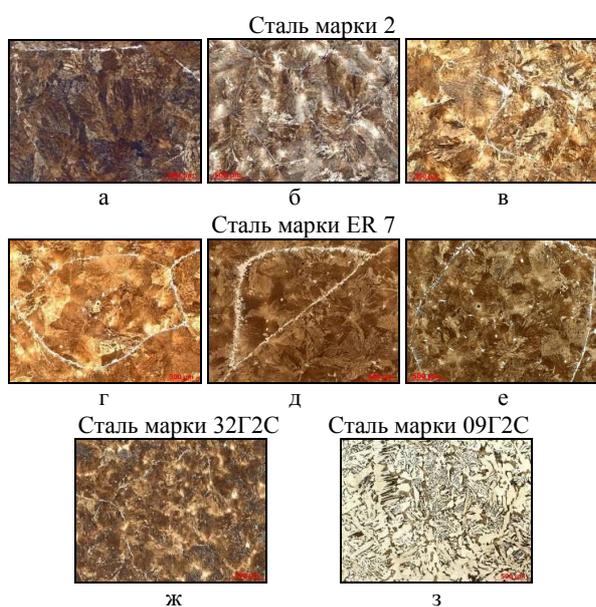


Рис. 3. Микроструктура на расстоянии ½ радиуса слитка и непрерывнолитых заготовок из углеродистых и низколегированных сталей, × 20: а – слиток Ø 485 мм, б – НЛЗ Ø 470 мм, в – НЛЗ Ø 450 мм; г...е – НЛЗ Ø 450 мм, ж – НЛЗ Ø 290 мм, з – НЛЗ Ø 150 мм / The microstructure of the ingot (a) and continuous cast billets (b – h) made of carbon and low-alloyed steels in the ½ radius distance, × 20: а – Ø 485 mm, б – Ø 470 mm, в – Ø 450 mm; д – f – Ø 450 mm, г – Ø 290 mm, h – Ø 150 mm

Металлографический анализ показал (табл. 2), что, в среднем, как по сечению слитка, так и НЛЗ (Ø практически одинаковый) средний размер аустенитных зёрен изменяется в 2 раза.

Однако средний размер аустенитных зёрен в НЛЗ меньше в 2 раза по сравнению со структурой аустенита, образовавшейся в слитке. Наиболее крупные аустенитные зёрна наблюдаются на расстоянии ½ радиуса. Это характерно и для слитка, и для НЛЗ, и связано, вероятно, с особенностями протекания рекристаллизационных процессов в зоне направленной кристаллизации.

После охлаждения до комнатной температуры микроструктура слитка, отлитого в изложницу, и непрерывнолитых заготовок состоит из перлита и избыточного феррита, выделившегося по границам «бывших» аустенитных зёрен. Содержание доэвтектидного феррита и перлита, в среднем, по сечению литого металла составило 5,0 и 95,0 % для слитка, 2,5 и 97,5 % для НЛЗ Ø 470 мм и 3,5 и 96,5 % для НЛЗ Ø 450 мм.

Таблица 2

Результаты металлографического анализа микроструктуры образцов слитка и непрерывнолитой заготовки / The results of metallographic analysis of the microstructure of the samples of the ingot and continuous cast billets

Марка стали	Литой металл, Ø, мм	Образец	Средний диаметр зерна, мкм	Номер зерна G (ГОСТ 5639)	Объёмная доля доэвтектидного феррита, %	Ширина доэвтектидного феррита, мкм
2	Слиток Ø 485	П	1776	-4,44	4,83	15,0
		½ R	3683	-6,81	1,42	26,4
		Ц	3220	-6,33	8,70	87,0
	НЛЗ Ø 470	П	789	-2,38	2,39	8,3
		½ R	1924	-4,94	1,11	11,8
		Ц	1435	-4,11	3,93	24,0
	НЛЗ Ø 450	П	967,2	-4,45	3,63	9,0
		½ R	1936,95	-4,48	3,03	12,7
		Ц	1594,6	-4,45	3,60	20,3
ER 7	НЛЗ Ø 450 № 1	П	842	-2,85	4,68	12,8
		½ R	1713	-4,90	3,23	15,5
		Ц	1850,7	-5,12	3,28	19,0
	НЛЗ Ø 450 № 2	П	818,2	-2,77	4,31	14,6
		½ R	1411,9	-4,34	4,09	19,5
		Ц	1856,3	-5,13	4,04	28,3
	НЛЗ Ø 450 № 3	П	830,2	-2,81	4,31	14,3
		½ R	1594,2	-4,69	2,76	19,1
		Ц	1755,3	-4,97	4,09	27,6
32Г2С	НЛЗ Ø 290	П	479,50	-0,47	3,31	5,5
		½ R	1239,33	-3,72	3,55	7,5
		Ц	962,55	-2,68	3,35	12,9
09Г2С	НЛЗ Ø 150	П	1225,40	-3,69	82,72	52,9
		½ R	2256,60	-5,44	84,04	83,8
		Ц	1954,20	-4,79	78,05	106,4

Более интенсивный режим охлаждения НЛЗ в зоне вторичного охлаждения приводит к тому, что избыточный феррит выделяется по границам аустенитных зёрен в виде тонкой окантовки. В микроструктуре НЛЗ сетка феррита, в среднем по сечению, 3,0 раза тоньше, чем в микроструктуре слитка. Не смотря на то, что условия затвердевания слитков углеродистой стали далеки от равновесных, при которых содержание перлита составило бы 76,25 % и 71,25 % для слитка (0,61 % C) и для НЛЗ (0,57 % C) соответственно, интенсивное охлаждение в процессе непрерывной разливки приводит к более равномерному распределению доэвтектидного феррита в микроструктуре НЛЗ, чем в микроструктуре слитка (табл. 2).

Таким образом, при практически одинаковом химическом составе и диаметре металл непрерывнолитой заготовки отличается меньшими

размерами аустенитных зёрен и более равномерным распределением доэвтектоидного феррита по сравнению с металлом слитка сифонной разливки.

Особенности микроструктуры непрерывнолитых заготовок Ø 450 мм. Марка стали 2 и ER 7

Определено, что средний размер зёрен аустенита сечению непрерывнолитых заготовок Ø 450 мм из углеродистых сталей марки 2 и ER, также имеют практически одинаковые значения (табл. 2). Это показывает, что, несмотря на повышенное содержание углерода в стали 2 по сравнению с химическим составом стали ER 7 (табл. 1), основное влияние на формирования структуры зёрен аустенита оказывает режим ускоренного охлаждения в кристаллизаторе и в зоне вторичного охлаждения.

Этот вывод правомерен и для НЛЗ № 1...3 из стали ER 7. Различное отношение содержания марганца к содержанию кремния ($Mn \% / Si \% = 2,00...2,51$) в исследуемых плавках также не оказало существенного влияния на измельчение зёрен аустенита. Так, в центральных слоях НЛЗ № 1 и 2 разница в среднем размере зёрен аустенита составляет порядка нескольких микрон.

Количество доэвтектоидного феррита в микроструктуре образцов исследуемых НЛЗ, как и в микроструктуре образцов НЛЗ Ø 470 мм, распределено равномерно и составляет, в среднем в образцах, вырезанных в поверхностных, на расстоянии $\frac{1}{2}$ радиуса и центральных слоях порядка 3,5...4,0 %.

При одинаковом диаметре (Ø 450 мм) НЛЗ выделения доэвтектоидного феррита по границам «бывших» аустенитных зёрен, в среднем по сечению заготовки, на 25 % тоньше в микроструктуре стали марки 2 по сравнению со сталью ER 7. В этом случае влияние содержание углерода очевидно.

Таким образом, основное влияние на формирование зёрен аустенита и количество доэвтектоидного феррита в микроструктуре НЛЗ Ø 450 мм из углеродистых сталей марки 2 (0,57 % C) и ER 7 (0,48 % C) оказывает режим ускоренного охлаждения. При одинаковых условиях охлаждения НЛЗ Ø 450 мм содержания углерода в стали повлияло только на толщину выделений доэвтектоидного феррита по границам «бывших» аустенитных зёрен. С повышением содержания углерода на 0,1 % размер доэвтектоидного феррита уменьшается на 25,0 %.

Особенности микроструктуры непрерывнолитых заготовок Ø 450 мм из стали марки 2 и ER 7 и Ø 290 мм из стали марки 32Г2С

Не смотря на пониженное содержание углерода и повышенное содержание марганца и кремния в стали 32Г2С (табл. 1), микроструктура по сечению НЛЗ Ø 290 мм имеет такой же фазовый состав, как и микроструктура по сечению НЛЗ 450 мм из углеродистых сталей – ~3,5 % феррита и 96,5 % перлита (табл. 2).

Принимая во внимание одинаковый фазовый состав НЛЗ из указанных сталей и превалирующее

влияние режима ускоренного охлаждения в кристаллизаторе и в зоне вторичного охлаждения на формирование их структуры, в работе выполнен сравнительный анализ особенностей микроструктуры НЛЗ разного диаметра.

Определено, что с уменьшением диаметра НЛЗ с 450 и 290 мм размер зёрен аустенита, в среднем по сечению заготовки, уменьшился в 1,8 раза (табл. 2). Наименьшая разница в 1,34 раза в размере зёрен аустенита наблюдается на расстоянии $\frac{1}{2}$ радиуса заготовок. В поверхностных и в центральных слоях она составляет 1,8 раза. В поверхностных слоях в наибольшей степени проявляется влияние скорости охлаждения. В центральных слоях эта разница в размерах аустенитных зёрен, вероятно, связана уже и как со скоростью охлаждения, так и с повышенным, по сравнению с углеродистыми сталями, содержанием легирующих элементов, которое способствует повышению числа зародышей кристаллизации и, как следствие, измельчанию структуры.

Толщина сетки доэвтектоидного феррита в микроструктуре образцов НЛЗ Ø 290 мм в среднем по сечению уменьшилась в 1,5 и 2,0 по сравнению с микроструктурой НЛЗ Ø 450 мм из стали марки 2 и ER 7 соответственно.

Таким образом, с уменьшением диаметра НЛЗ на 36 % размер зёрен аустенита уменьшился, в среднем по сечению заготовок, 1,8 раза, а толщина доэвтектоидного феррита, выделившегося по границам «бывших» аустенитных зёрен в 1,5 и 2,0 меньше по сравнению с микроструктурой НЛЗ Ø 450 мм из стали марки 2 и ER 7 соответственно.

Особенности микроструктуры непрерывнолитых заготовок Ø 290 из стали марки 32Г2С и Ø 150 мм из стали 09Г2С

С целью определения влияние химического состава и режима охлаждения в работе проанализированы особенности микроструктуры НЛЗ Ø 290 и 150 мм из низколегированных сталей 32Г2С и 09Г2С. Поскольку обе стали являются низколегированными, показано влияние углерода на такие характеристики микроструктуры как средний размер зёрен аустенита и толщина доэвтектоидного феррита.

Определено, что, не смотря на больший ~ 2 раза диаметр НЛЗ, микроструктура стали 32Г2С, в среднем по сечению, характеризуется более мелкими размерами аустенитных зёрен (табл. 2). Причём в поверхностных слоях эта разница максимальная – 2,5 раза. Здесь, наряду с основным влиянием на формирование структуры скорости охлаждения, отчётливо проявляется влияние содержания углерода, повышенное содержание которого способствует образования большего числа зародышей кристаллизации.

Толщина сетки доэвтектоидного феррита в микроструктуре образцов НЛЗ Ø 290 и 150 мм отличается практически на порядок (табл. 2).

Таким образом, содержание углерода в стали влияет на измельчение зёрен аустенита даже в большей мере, чем скорость охлаждения. С увеличением его содержания на 0,3 % средний размер зёрен аустенита уменьшается в 2 раза, а толщина сетки доэвтектоидного феррита – практически на порядок.

Оценка загрязнённости неметаллических включений металла слитка и НЛЗ для производства железнодорожных колёс

Фотографии неметаллических включений в образцах слитка и НЛЗ различного диаметра представлены на рис. 4, результаты оценки загрязнённости неметаллическими включениями металла слитка и НЛЗ различного диаметра – в табл. 3.

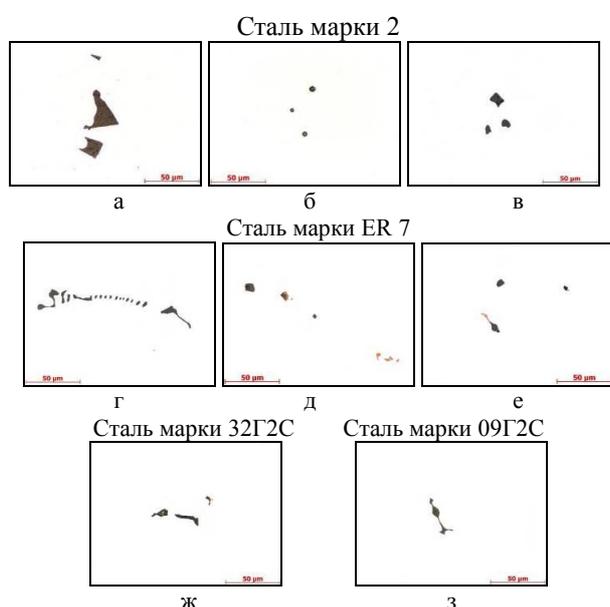


Рис. 4. Неметаллические включения в микроструктуре слитка и непрерывнолитых заготовок из углеродистых и низколегированных сталей на расстоянии 1/2 радиуса, × 400: а – слиток Ø 485 мм, б – НЛЗ Ø 470 мм, в – НЛЗ Ø 450 мм; г...е – НЛЗ Ø 450 мм, ж – НЛЗ Ø 290 мм, з – НЛЗ Ø 150 мм / The non-metallic inclusions in the microstructure of the ingot (a) and continuous cast billets (b – h) made of carbon and low-alloyed steels in the 1/2 radius distance, × 400: a – Ø 485 mm, b – Ø 470 mm, c – Ø 450 mm; d – f – Ø 450 mm, g – Ø 290 mm, h – Ø 150 mm

Максимальный балл неметаллических включений в исследованных образцах определен по методу Ш – сравнение с эталонными шкалами (ГОСТ 1778). В слитке мартеновской плавки это, в основном, сульфиды марганца, комплексные оксисульфиды марганца, карбонитриды титана. В непрерывнолитых заготовках – силикаты глобулярные, сульфиды марганца и карбонитриды титана, комплексные неметаллические включения. Причём если в центральных (наиболее загрязнённых неметаллическими включениями) слоях

непрерывнолитых заготовках максимальный балл включений не превышает 3,0, то в слитке встречаются единичные крупные включения и загрязнённость неметаллическими включениями в отдельных полях зрения достигает 4,5 балла.

Таблица 3

Результаты оценки загрязнённости микроструктуры образцов слитка и НЛЗ неметаллическими включениями (ГОСТ 1778) / The non-metallic inclusions content in the microstructure of the samples of the ingot and continuous cast billets (ГОСТ 1778)

Марка стали	Литой металл, Ø, мм	Образец	Максимальный балл включений (метод Ш)	Объёмный процент включений (метод П), %	Средний объёмный процент включений, %
2	Слиток Ø 485	П	2,0	0,0083	0,0140
		1/2 R	4,5	0,0165	
		Ц	3,0	0,0173	
	НЛЗ Ø 470	П	0,5	0,0018	0,0036
		1/2 R	1,0	0,0042	
		Ц	1,5	0,0048	
	НЛЗ Ø 450	П	1,0	0,0027	0,0053
		1/2 R	1,5	0,0039	
		Ц	2,0	0,0092	
ER 7	НЛЗ Ø 450 № 1	П	1,0	0,0015	0,0075
		1/2 R	2,0	0,0075	
		Ц	3,0	0,0137	
	НЛЗ Ø 450 № 2	П	0,25	0,0005	0,0020
		1/2 R	1,0	0,0017	
		Ц	1,5	0,0038	
	НЛЗ Ø 450 № 3	П	0,5	0,0010	0,0016
		1/2 R	1,0	0,0016	
		Ц	1,0	0,0020	
32Г2С	НЛЗ Ø 290	П	0,5	0,0084	0,0146
		1/2 R	1,0	0,0141	
		Ц	1,5	0,0213	
09Г2С	НЛЗ Ø 150	П	0,5	0,0004	0,0006
		1/2 R	0,5	0,0007	
		Ц	1,5	0,0008	

Подсчёт количества и объёмного процента включений выполнен по методу П (ГОСТ 1778). Определено, что металл НЛЗ Ø 470 и 450 мм из стали марки 2 и ER 7 (электросталеплавильный процесс получения стали) по содержанию неметаллических включений более чист, чем металл слитка Ø 485 мм (мартеновский процесс получения стали). Содержание неметаллических включений в непрерывнолитых заготовках из стали марки 2 и ER 7, выплавленных в электродуговой печи, в 3,3 и 5,8 раза меньше, чем в слитке мартеновской плавки стали марки 2.

Металл НЛЗ Ø 290 и 150 мм из сталей 32Г2С и 09Г2С соответственно используют для производства труб. Поэтому сравнительный анализ загрязнённости неметаллическими включениями металла трубных и колёсных заготовок не выполнялся. Однако общая закономерность – ускоренное охлаждение в кристаллизаторе и в зоне вторичного охлаждения способствует уменьшению размеров неметаллических включений – характерна для обеих

НЛЗ. Максимальный балл включений в образцах, вырезанных из центральных слоёв заготовок, не превышает 1,5 балла. Для установления причин высокой загрязнённости металла НЛЗ Ø 290 мм необходимо провести анализ технологического процесса получения стали 32Г2С, что не являлось задачей исследования и в рамках данной работы не рассматривалось.

Таким образом, металл НЛЗ Ø 470 и 450 мм из стали марки 2 и ER 7 (электросталеплавильный процесс получения стали) по содержанию неметаллических включений более чистый, чем металл слитка Ø 485 мм (мартеновский процесс получения стали). Содержание неметаллических включений в непрерывнолитых заготовках из сталей марки 2 и ER 7, выплавленных в электродуговой печи, в 3,3 и 5,8 раза меньше, чем в слитке мартеновской плавки стали марки 2.

Научная новизна и практическая значимость

Установлено, что при затвердевании непрерывнолитых заготовок содержание углерода в стали, наряду с ускоренным охлаждением, является один из главных факторов, определяющих параметры микроструктуры.

Коренное изменение технологии производства стали и замена слитка непрерывнолитой заготовкой позволят существенно повысить качество исходной заготовки и, следовательно, готовой металлопродукции.

Выводы

1. Исследованы особенности формирования зёрен аустенита, феррито-перлитной структуры углеродистых сталей в процессе охлаждения слитка сифонной разливки и непрерывнолитых заготовок.

2. В результате сравнительного анализа слитка сифонной разливки Ø 485 мм и непрерывнолитых заготовок Ø 470 и 450 мм установлено, что при практически одинаковом диаметре и химическом составе металл непрерывнолитой заготовки отличается меньшими размерами аустенитных зёрен, более равномерным распределением и тонкой окантовкой доэвтектоидного феррита по границам «бывших» аустенитных зёрен.

3. Определено, что как по сечению слитка, так и по сечению непрерывнолитых заготовок, средний размер зёрен аустенита изменяется в 2 раза.

4. Установлено, что основное влияние на формирование зёрновой структуры аустенита и количество доэвтектоидного феррита в микроструктуре НЛЗ Ø 450 мм из углеродистых сталей марки 2 (0,57 % С) и ER 7 (0,48 % С) оказывает режим ускоренного охлаждения. При одинаковых условиях охлаждения НЛЗ Ø 450 мм влияние содержания углерода проявляется только на толщине выделений доэвтектоидного феррита. С повышением содержания углерода на 0,1 % толщина доэвтектоидного феррита, выделившегося по границам «бывших» аустенитных зёрен, уменьшается на 25,0 %.

5. Определено, что с уменьшением диаметра НЛЗ на 36 % размер зёрен аустенита уменьшился, в среднем по сечению заготовок, в 1,8 раза, а толщина доэвтектоидного феррита в 1,5 и 2,0 раза меньше по сравнению с микроструктурой НЛЗ Ø 450 мм из стали марки 2 и ER 7 соответственно.

6. Показано, что содержание углерода в стали влияет на измельчение структуры зёрен аустенита даже в большей мере, чем скорость охлаждения. С увеличением его содержания на 0,3 % средний размер зёрен аустенита уменьшается в 2 раза, а толщина выделений доэвтектоидного феррита – практически на порядок.

7. Выполнена оценка загрязнённости неметаллическими включениями металла слитка и НЛЗ для производства железнодорожных колёс. Определено, что металл НЛЗ Ø 470 и 450 мм из стали марки 2 и ER 7 (электросталеплавильный процесс получения стали) по содержанию неметаллических включений более чистый, чем металл слитка Ø 485 мм (мартеновский процесс получения стали). Содержание неметаллических включений в непрерывнолитых заготовках из стали марки 2 и ER 7, выплавленных в электродуговой печи, в 3,3 и 5,8 раза меньше, чем в слитке мартеновской плавки стали марки 2.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Металлография / К. П. Бунин, А. А. Баранов А. А.– М.: Металлургия, 1970. – 254 с.
Bunin K. P., Baranov A. A. Metallografiya [Metallography]. Moscow, Metallurgy Publ., 1970. 254 p.
2. Непрерывная разливка стали / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
Smirnov A. N., Kuberskiy S. V., Shtepan E. V. Nepreryvnaya razlivka stali [Continuous casting of steel]. Donetsk, DonNTU Publ., 2011. 482 p.
3. Кристаллизация и неоднородность стали / Н. И. Хворонов – М.: Машгиз, 1958. – 392 с.
Khvoronov N. I. Kristallizatsiya i neodnorodnost' stali [Crystallization and heterogeneity of steel]. Moscow, Mashgiz. Publ., 1958. 392 p.
4. Matsumura K. Effect of carbon concentration and cooling rate on the grain size of peritectic solidified carbon steels / K. Matsumura, K. Masubara, J. Jto, T. Azuma, R. Matsuki // Transaction of ISI Jap. – 1987. – Vol. 27. – № 11. – P. 274.
5. Ueshima J. Analysis of solute redistribution in dendrites by $\delta \rightarrow \gamma$ transformation in solidification process / J. Ueshima // Tetsu to Hagane. – 1985. – Vol. 71. – № 4. – P. 160.

Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. В. В. Парусовым (Украина); д-ром техн. наук, проф. Г. В. Левченко (Украина)

Статья поступила в редколлегию 24.03.2015 г.