

УДК 620.22:669.18.012.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ЛИТОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ФЕРРИТО-ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ

А. А. КАЗАКОВ, О. В. ПАХОМОВА, Е. И. КАЗАКОВА*

В статье представлены исследования эволюции литой структуры феррито-перлитной стали в ходе ее термомеханической обработки. С помощью многофункционального исследовательского комплекса Gleeble 3800 проведена имитация контролируемой прокатки образцов, вырезанных из различных структурных зон промышленного непрерывнолитого сляба. Установлены закономерности эволюции различных структурных зон литой заготовки при деформации, имитирующей контролируемую прокатку. Металлографическими методами и методами микрорентгеноспектрального анализа вскрыта взаимосвязь отдельных элементов деформированной структуры с точки зрения наследования характерных элементов литой структуры.

Ключевые слова: микроструктура, литая структура, дендритная структура, химическая и структурная неоднородность, непрерывнолитой сляб, термомеханическая обработка, микрорентгеноспектральный анализ.

Качество и потребительские свойства стального проката определяются не только режимами его термомеханической обработки, но и качеством литой структуры сляба, формирующейся на всех этапах его получения — от выплавки и внепечной обработки до разлива на установке непрерывной разливки стали (УНРС) и нагреве под прокатку. Очевидно, что невозможно получить структурно-однородный штрипс, если сляб имеет значительную химическую и структурную неоднородность.

Ранее на примере стали марки 15 было показано, что по сечению сляба дисперсность и плотность разных структурных зон сляба различаются в два и три раза соответственно, при этом четкого визуального соответствия между дендритной и литой зеренной структурой в этой стали не обнаружено [1]. Первичные и вторичные оси дендритов расположены безотносительно границы или тела литого зерна: несколько дендритных осей могут пересекать одно или несколько литых зерен. Установлено, что феррит образуется на самых «грязных» участках междендритного пространства, затвердевшего последним. Далее по телу зерна расположен чистый по сегрегациям видманштеттов феррит, образованный из осей дендритов, а границы литого зерна декорированы аллотриоморфным ферритом, образованным междендритным пространством между осями второго порядка с умеренным содержанием сегрегаций [1].

* Докт. техн. наук А. А. Казаков, заведующий кафедрой; О. В. Пахомова, инженер; Е. И. Казакова, вед. инженер, кафедра «Металлургические технологии», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия; kazakov@thixomet.ru

На эту структурную и химическую неоднородность литого сляба накладывается неравномерность температурно-деформационного воздействия при контролируемой прокатке.

Исследование механизма деформации непрерывнолитых заготовок с точки зрения изменения дендритной структуры проводили авторы работы [2], был введен термин «прорабатываемость», т. е. степень раздробления дендритной структуры в процессе деформации исходного слитка, которая характеризуется изменением плотности дендритной структуры.

В работе [3] показано, что объемные доли дендритных ветвей и междендритных пространств после деформации практически не изменяются, изменяется их форма и количество на единицу площади. При этом от поверхности к центру деформированного металла размеры дендритных ветвей и междендритных пространств увеличиваются, наследуя этот характер от зоны столбчатых кристаллов к центральной зоне равноосных кристаллов в слябе.

Таким образом, структурная неоднородность, наблюдаемая по толщине листового проката, является прямым следствием наследуемой неоднородности литого сляба, отягощенной неравномерностью температурно-деформационного воздействия при контролируемой прокатке.

Целью данной работы является исследование взаимосвязанных процессов формирования структурной и химической неоднородности в металле после термомеханической обработки (ТМО) с учетом наследственного влияния литой структуры сляба.

Материалы и методика исследования

Исследования проводили на образцах стали 15 следующего химического состава, %: 0,15 С; 0,21 Si;

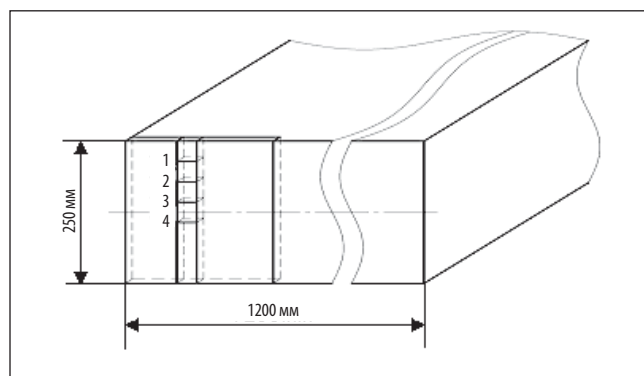


Рис. 1. Схема вырезки образцов из промышленного сляба

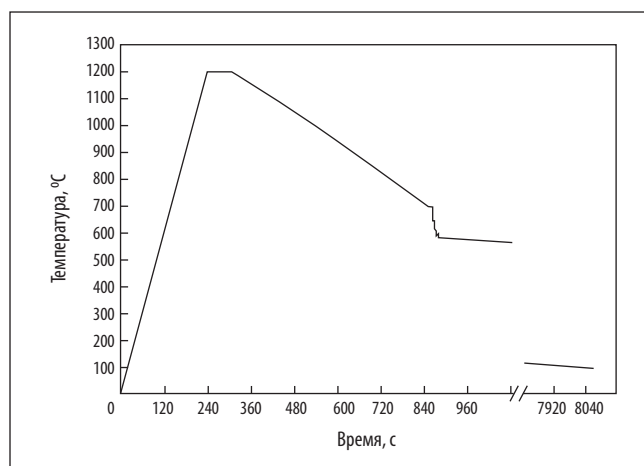


Рис. 2. Схема проведения термомеханической обработки с ускоренным охлаждением на комплексе Gleeble 3800

0,53 Mn; 0,011 V; 0,016 P; 0,012 S; ост. Fe (как и в работе [1]) из разных структурных зон промышленного непрерывнолитого сляба сечением 250×1200 мм (рис. 1), а именно: 1 — зоны столбчатых кристаллов (зоны транскристаллизации); 2, 3 — переходной зоны, где имеются смешанные зоны направленных и равноосных кристаллов и 4 — центральной зоны крупных равноосных кристаллов.

Шлифы изготавливали на оборудовании для подготовки проб компании Buehler Ltd., металлографические исследования проводили на моторизованном микроскопе Zeiss Axiovert 200 MAT, оснащенный анализатором изображения Thixomet Pro. Микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) выполняли на электронном микроскопе Zeiss Supra 55VP с приставкой Inca.

Физическое моделирование процесса контролируемой прокатки проводили на многофункциональном исследовательском комплексе Gleeble 3800*.

* Эксперименты на комплексе Gleeble 3800 проведены в Лаборатории исследования структуры и свойств материалов ФГБОУ ВПО СПбГПУ под руководством проф. Н. Г. Колбасникова.

Пластическую деформацию, имитирующую контролируемую прокатку на стане 5000, проводили на модуле «гидромолот». Образцы до испытаний имели цилиндрическую форму диаметром 8 мм и высотой 25 мм, а после испытаний — диаметром 20 мм и высотой 3 мм.

Модель контролируемой прокатки включала в себя следующие этапы: нагрев под прокатку до 1200 °C с выдержкой при этой температуре 60 с, деформацию при температуре 1100–1000 °C (черновая прокатка), подстуживание до 840 °C, деформацию при температуре 840–700 °C (чистовая прокатка), ускоренное охлаждение с 700 до 580 °C и дальнейшее медленное охлаждение (рис. 2). Степень деформации составляла 88 %.

Результаты исследования и их обсуждение

Термомеханическая обработка образцов стали 15 привела к образованию полосчатой феррито-перлитной структуры разной степени дисперсности с ферритными зернами разной величины и морфологии (рис. 3).

Феррито-перлитная полосчатость, образующаяся при деформировании дендритов и междендритных пространств с сегрегациями [4, 5], отличается степенью дисперсности для разных структурных зон сляба. Образец из зоны столбчатых кристаллов сляба характеризуется наиболее дисперсной полосчатой структурой, расположенной практически по всей площади образца (рис. 4, а), а в образце из центральной зоны сляба полосчатая структура после ТМО обнаружена только в центре образца и представляет собой чередующиеся с перлитом массивные ферритные полосы толщиной до 20 мкм (рис. 4, б).

Для выявления закономерностей формирования деформированной структуры после ТМО исследованы сегрегации легирующих и примесных элементов стали. Определены содержания Mn, Si, V, S, и P для характерных структурных составляющих после имитации контролируемой прокатки так же, как это сделали ранее для литой дендритной структуры (рис. 5) [1].

Сопоставляя данные микрорентгеноспектрального анализа составляющих дендритной структуры образцов сляба [1] и деформированной структуры тех же образцов после ТМО (табл. 1), можно проследить, как происходит эволюция литой структуры в деформированную.

Высокое, по сравнению со средним по плавке, содержание P, Si, V и S в массивных ферритных областях с включениями сульфидов указывает на соответствие этих областей сохранившимся после термомеханической обработки сегрегациям из междендритного пространства. Как и в случае образцов литого металла, сульфидные включения MnS в деформированной

структуре являются реперными точками, позволяющими однозначно идентифицировать междендритное пространство, образованное при «захлопывании» дендритной ячейки в конце затвердевания. Именно в этих самых «грязных» участках после ТМО образуются крупные ферритные зерна.

Согласно данным табл. 2, содержание марганца в массивных ферритных областях с сульфидными включениями в полтора раза меньше, чем в среднем по плавке. Это связано с тем, что часть марганца израсходовалась на образование сульфидов MnS . Чтобы определить реальное содержание марганца в этих областях, был проведен расчет его баланса в рамках этой области (табл. 2).

Так как марганец в массивных ферритных областях находится в твердом растворе α -железа и в сульфиде MnS , то реальная средняя концентрация марганца в этих участках составляет 1,12 %, что в два раза превышает его среднее плавочное содержание, равное 0,53 %.

Абсолютно противоположная картина наблюдается в крупных ферритных зернах без сульфидных включений, где, согласно данным МРСА, практически отсутствуют примесные элементы S и P, а также V, при этом содержание Mn и Si соответствует их содержанию в осях дендритов [1]. Такое распределение элементов в данной структурной составляющей указывает на ее принадлежность к остовам дендритов, унаследованным от литого состояния.

Важной особенностью микроструктуры образцов после термомеханической обработки является сетка, образованная мелкими ферритными зернами (см. рис. 5, в и рис. 6). В литературе описаны различные гипотезы ее появления. Так, авторы работы [6] называют ее дифтовой структурой (DIFT — deformation induced ferrite transformation, т. е. ферритное превращение, спровоцированное пластической деформацией). Это понятие подразумевает взрывное образование мелкого зерна в момент деформирования в двухфазной области.

В других источниках [7] образование такой сетки объясняется неоднородным распределением сегрегаций, наследуемым от литой дендритной структуры исходного сляба. Формирующиеся в междендритном пространстве карбонитриды являются местом зарождения границ ферритного зерна при охлаждении после ТМО. Соответственно, чем выше будет сегрегация карбидообразующих элементов (C, N), обусловленная неоднородностью литой дендритной структуры, тем больше будет объемная доля дисперс-

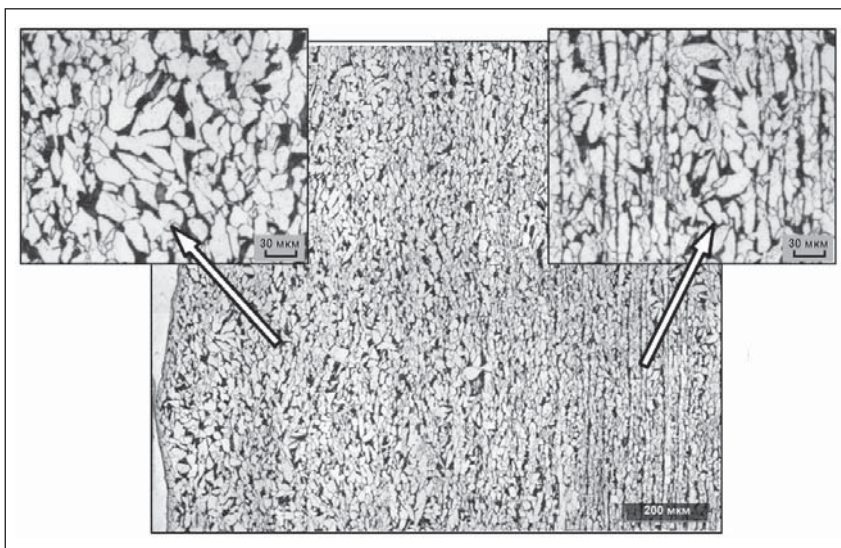


Рис. 3. Пример микроструктуры у поверхности и в центре образца после термомеханической обработки

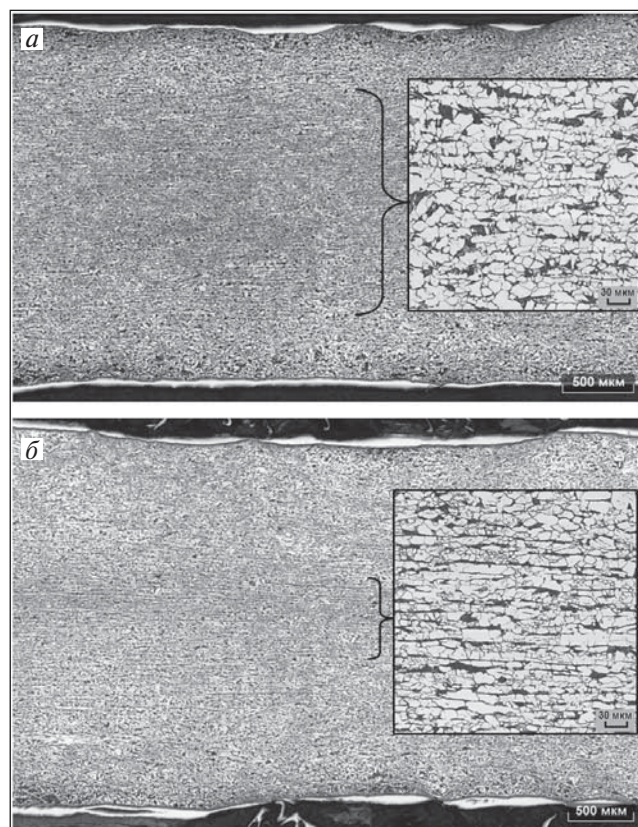


Рис. 4. Структура образцов после термомеханической обработки:

a — зона столбчатых кристаллов, *б* — центр сляба

ных карбонитридных выделений, и тем более мелкое зерно феррита будет наблюдаться в структуре после ТМО (рис. 7).

Высокое содержание ванадия (0,045 %), обнаруженное в данных областях, позволяет утверждать, что причина образования мелких ферритных зерен

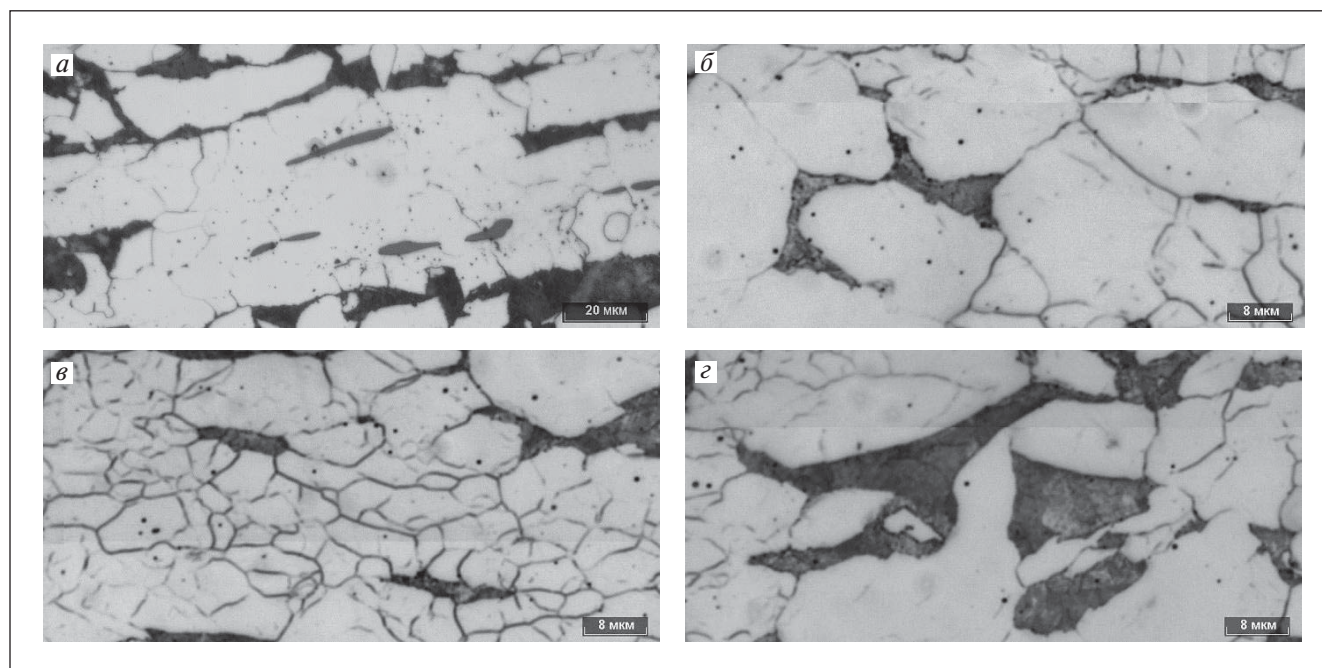


Рис. 5. Структурные составляющие стали 15 после термомеханической обработки:
a — массивные ферритные области с сульфидными включениями; *б* — крупные ферритные зерна без сульфидных включений; *в* — мелкие ферритные зерна, образующие сетку, без сульфидных включений; *г* — перлит

Таблица 1.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа деформированного образца

Структурные составляющие после ТМО	Среднее значение содержания химических элементов в структурных составляющих, %					
	Mn	Si	V	S	P	Fe
Массивные ферритные области с сульфидными включениями	0,34	0,29	0,031	0,031	0,16	Ост.
Крупные ферритные зерна без сульфидов	0,54	0,22	*	*	*	
Мелкие ферритные зерна, образующие сетку, без сульфидных включений	0,53	0,19	0,045	0,014	0,013	
Перлит	0,61	0,22	*	*	0,016	
Интегральный состав по данным спектрального анализа	0,53	0,21	0,011	0,012	0,016	

* Содержание элемента сравнимо с ошибкой измерения прибора.

Таблица 2.

Расчет баланса марганца в массивных ферритных областях с сульфидными включениями

Структурные составляющие	Объем, занимаемый структурной составляющей, см ³	Плотность структурной составляющей, г/см ³	Расчетная масса структурной составляющей, г	Mn, % (МРСА)	Mn, г	Mn _{общ} , %
Феррит с сульфидами	16,7	7,82	130,6	0,34	0,44	1,12
Сульфид (MnS)	0,6	3,3	1,98	53	1,05	
Феррит без сульфидов	59,4	7,82	464,5	0,54	2,51	0,54

в данном случае заключается, согласно работе [7], в формировании границ, соединяющих многочисленные карбонитриды ванадия. По содержанию примесных элементов можно отметить, что состав сетки мелких ферритных зерен унаследован от междендритного пространства с умеренным содержанием сегрегаций предположительно между осями второго порядка.

Справедливость такого предположения подтверждается измерением среднего размера видимых на изображении ячеек сетки, оцененного расстоянием между центрами областей мелких ферритных зерен в направлении приложения нагрузки. При пересчете этого размера с учетом деформации при ТМО [8] можно получить среднее расстояние между осями дендритов второго порядка в соот-

ветствующей структурной зоне непрерывнолитого сляба:

$$D_{II} = \frac{d}{100 - \varepsilon} \cdot 100,$$

где D_{II} — расстояние между осями дендритов второго порядка, мкм; d — размер ячейки сетки из мелких ферритных зерен, мкм; ε — степень деформации при ТМО, %.

Результаты оценки расстояния между осями дендритов второго порядка, рассчитанные в деформированных образцах по данному уравнению, и результаты прямых измерений этих же расстояний на литой структуре [1] в соответствующих зонах, приведены на рис. 8. Образец после ТМО из транскристаллитной зоны в измерениях не участвовал, так как полученные для него данные нельзя сравнить с параметрами исходной литой дендритной структуры, в которой оси дендритов второго порядка вырождены из-за высокой плотности осей первого порядка, образовавшихся в условиях высокого градиента.

Расстояния между осями дендритов второго порядка, полученные пересчетом из деформированной структуры (см. рис. 8, а), и прямыми измерениями на литой структуре (см. рис. 8, б) практически совпадают и правильно описывают закономерности их изменения при движении от поверхности к центру сляба. Таким образом, гипотеза о наследовании сетки мелких ферритных зерен от междендритного пространства осей второго порядка доказана.

Анализ химического состава перлитных областей не позволяет однозначно судить об их принадлежности к определенным элементам дендритной структуры сляба, однако очевидно, что во время ускоренного охлаждения цементитные и ферритные пластинки образуются в последнюю очередь в местах, где после деформирования в двухфазной области ($\gamma + \alpha$) остался нераспавшийся аустенит [5].

Выводы

1. На примере стали 15 установлены некоторые закономерности эволюции литой дендритной структуры различных структурных зон промышленного непрерывнолитого сляба при деформации, имитирующей контролируруемую прокатку.

2. Установлено, что сочетание высокой дисперсности и плотности дендритной структуры в зоне столбчатых кристаллов непрерывнолитого сляба обеспечивает образование более однородной и дисперсной структуры после прокатки по сравнению с центральной зоной равноосных кристаллов.

3. Показана природа отдельных структурных составляющих после ТМО с точки зрения наследования элементов литой дендритной структуры. Струк-

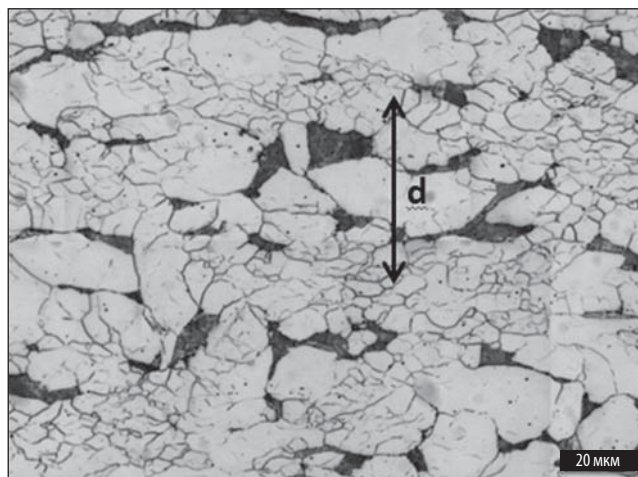


Рис. 6. Сетка из мелких ферритных зерен

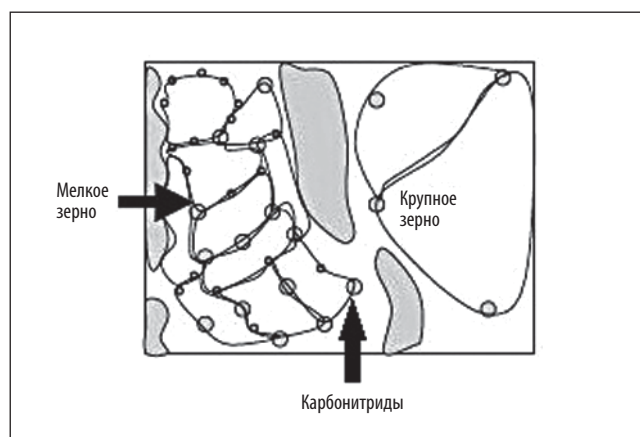


Рис. 7. Формирование бимодальной зеренной структуры [8]

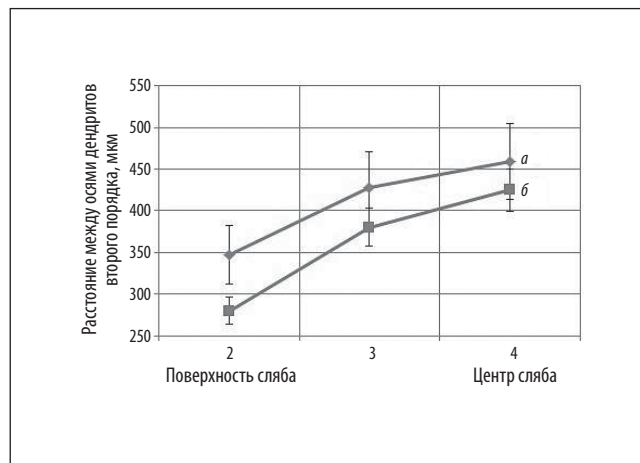


Рис. 8. Расстояния между осями дендритов второго порядка, полученные пересчетом из деформированной структуры (а) и прямыми измерениями на литой структуре (б)

турная неоднородность по толщине листового проката связана с металлургической наследственностью, под которой понимается характер распределения сегрегаций в литом слябе.

ЧМ

Библиографический список

1. Казаков А. А., Пахомова О. В., Казакова Е. И. Исследование литой структуры промышленного сляба феррито-перлитной стали // Черные металлы. 2012, № 11. С. 9–15.

2. Лебедев В. Н., Троицкий В. П., Антощенко Ю. М. и др. Определение степени прорабатываемости металла при деформировании // Известия вузов. Черная металлургия. 1977. № 3. С. 109–111.

3. Левченко Г. В., Демина Е. Г., Воробей С. А. и др. Оценка деформированного состояния металла по изменению параметров дендритной структуры // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2009, № 5. С. 71–75.

4. Лившиц Б. Г. Металлография. — М. : Металлургия, 1990. — 236 с.

5. Металлография железа (с атласом микрофотографий). Том II /под ред. Ф. Н. Тавадзе. — М. : Металлургия, 1972.

6. John D. Verhoeven. A review of microsegregation induced banding phenomena in steels // Journal of materials engineering and performance, 2000, volume 9(3), June.

7. Chakrabarti D., Davis C. L., Strangwood M. The effect of precipitate distributions on HSLA grain structures // International Symposium of Research Students on Material Science and Engineering December 20–22, 2004, Chennai, India.

8. Семенов Е. И. Ковка и горячая штамповка : учебник. — М. : МГИУ, 2011. — 414 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

STUDY OF EVOLUTION OF CAST STRUCTURE IN PLASTIC DEFORMATION OF FERRITE-PEARLITE STEEL

Kazakov A. A.¹, Head of the chair, Dr. Eng., Prof.

Pakhomova O. V.¹, Leading engineer

Kazakova E. I.¹, Leading engineer

¹ Chair "Metallurgical technologies", St. Petersburg State Polytechnical University (St. Petersburg, Russia)

E-mail: kazakov@thixomet.ru

Abstract: The paper presents study of evolution of cast structure of ferrite-pearlite steel during its thermomechanical processing. Imitation of controlled rolling of specimens cut from different structural areas of industrial continuously cast slab has been conducted using "Gleeble 3800" multi-functional research complex. Investigations have been conducted on the specimens of steel 15, taken from continuously cast slab with cross section 250×1,200 mm. Regularities of evolution of different structural areas of cast billet are established in the process of deformation simulating controlled rolling. It is shown that structural heterogeneity along thickness of sheet metal is connected with metallurgical inheritance, i.e. features of segregation distribution in cast slab. Relationship between different components of deformed structure has been examined from the point of view of inheritance of typical elements of cast structure, using metallographic methods and micro-X-ray spectral analysis. Obtained data testified that Mn content in the massive ferrite areas with sulfide inclusions is less by 1.5 times than in average for the batch, because part of manganese has been used to form MnS sulfides. It was established that combination of high dispersity and density of dendrite structure in the area of columnar grains of continuously cast slab provides forming of more homogene-

ous and dispersed structure after rolling, comparing with the central area of equiaxial grains.

Key words: microstructure, cast structure, dendrite structure, chemical and structural heterogeneity, continuously cast slab, thermomechanical processing, micro-X-ray spectral analysis.

References:

1. Kazakov A. A., Pakhomova O. V., Kazakova E. I. Chernye Metally — Ferrous metals. 2012. No. 11. pp. 9–15.
2. Lebedev V. N., Troitskiy V. P., Antoshchenkov Yu. M. et al. Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya — Steel in Translation. 1977. No. 3. pp. 109–111.
3. Levchenko G. V., Demina E. G., Vorobey S. A. et al. Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost — Metallurgical and Mining Industry. 2009. No. 5. pp. 71–75.
4. Livshits B. G. Metallografiya (Metallography). Moscow : Metallurgiya, 1990. 236 p.
5. Metallografiya zheleza (s atlasom mikrofotoGRAFIY). Tom II (Metallography of iron (with atlas of photomicrographs)). Volume II). Under the editorship of F. N. Tavazde. Moscow : Metallurgiya, 1972.
6. John D. Verhoeven. A review of microsegregation induced banding phenomena in steels. Journal of materials engineering and performance. 2000. Vol. 9 (3), June.
7. Chakrabarti D., Davis C. L. Strangwood, M. The effect of precipitate distributions on HSLA grain structures. International Symposium of Research Students on Material Science and Engineering. December 20–22, 2004. Chennai, India.
8. Semenov E. I. Kovka i goryachaya shtampovka: uchebnik (Forging and drop stamping: tutorial). Moscow : Moscow State Industrial University, 2011. 414 p.