

По материалам конференции
«ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ»
им. академика А.М. Самарина – 2022

Materials of the Conference
«PHYSICO-CHEMICAL FOUNDATIONS
OF METALLURGICAL PROCESSES»
named after Academician A.M. Samarin – 2022



УДК 669.1: 620.186.8:620.192.43

DOI 10.17073/0368-0797-2023-1-105-111



Оригинальная статья
Original article

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ ТОНКОГО СЛЯБА И ПРОИЗВЕДЕННОГО ИЗ НЕГО ПРОКАТА

Е. Л. Ворожева¹, К. С. Сметанин¹, В. В. Кислица¹, Д. В. Кудашов^{1,2}

¹ АО «Выксунский металлургический завод» (Россия, 607060, Нижегородская обл., Выкса, ул. Бр. Баташевых, 45)

² Выксунский филиал НИТУ «МИСиС» (Россия, 607060, Нижегородская обл., Выксунский район, п.г.т. Шиморское, ул. Калинина, 206)

✉ vorozheva_el@vsw.ru

Аннотация. Определен уровень зональных и дендритных сегрегаций в слябах, разлитых по тонкослябовой технологии. Рассчитанные коэффициенты вариации содержания основных и примесных химических элементов по сечению слябов не превышают 10 %, зональные сегрегации невысокие. Содержание марганца, измеренное по площади, занимаемой дендритными осями и междендритными промежутками, показало уровень дендритной сегрегации. Концентрация марганца изменяется от 0,6 до 1,1 % соответственно. Установлено, что использование динамического мягкого обжатия в процессе затвердевания позволяет измельчить первичную дендритную структуру для образования дополнительных центров при фазовом превращении δ -феррита в аустенит. Размеры исходных аустенитных зерен, сформированных с учетом первичной дендритной структуры, в тонком слябе в 3 раза меньше, чем в слябе толщиной более 200 мм. Преобразования дендритной структуры в ходе обжатий показывают высокую прорабатываемость, необходимую для формирования равномерных аустенитных зерен в подкате перед чистовой прокаткой. Исследованием не подтверждена гипотеза о том, что бейнит грубой морфологии в микроструктуре горячекатаного проката образуется в сегрегационных участках. Выявлено наследственное влияние первичной дендритной структуры на структурообразование в ходе прокатки. Концентрация марганца изменяется между бейнитом и «соседней» структурой от 0,68 до 1,01 % подобно уровню исходной дендритной сегрегации. Различия в содержании химических элементов влияет на процессы рекристаллизации аустенитных зерен в ходе высокотемпературной черновой прокатки. Бейнит сформировался в рамках химически «обедненных» крупных аустенитных зерен, устойчивых при фазовом превращении.

Ключевые слова: сляб, сегрегация, дендритная структура, прокат, микроструктура, бейнит

Для цитирования: Ворожева Е.Л., Сметанин К.С., Кислица В.В., Кудашов Д.В. Metallographic analysis of peculiarities of structure of thin slab and rolled products manufactured thereof. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023; 66(1): 105–111.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-105-111>

METALLOGRAPHIC ANALYSIS OF STRUCTURAL PECULIARITIES OF THIN SLAB AND ROLLED PRODUCTS MANUFACTURED THEREOF

E. L. Vorozheva¹, K. S. Smetanin¹, V. V. Kislitsa¹, D. V. Kudashov^{1,2}

¹ JSC “Vyksa Metallurgical Plant” (45 Br. Batashevychk Str., Vyksa, Nizhny Novgorod Region 607060, Russian Federation)

² Vyksa Branch of the National University of Science and Technology “MISIS” (206 Kalinina Str., Shimorskoe, Vyksa District, Nizhny Novgorod Region 607060, Russian Federation)

✉ vorozheva_el@vsw.ru

Abstract. The article describes the determination of level of zonal and dendritic segregations in slabs cast by thin slab technology. The calculated coefficients of variation of content of main and impurity chemical elements over slab cross-section do not exceed 10 %, while the zonal segregation are moderate. The content of manganese measured by the surface area occupied by dendritic axes and interdendritic spaces determines the level of dendritic segregation. The manganese concentration varies from 0.6 to 1.1 %, respectively. It was established that the dynamic soft reduction during solidification allows the primary dendritic structure to be refined, in order to form additional centers upon phase transformation of δ ferrite into austenite. The sizes of initial austenite grains formed accounting for the primary dendritic structure are 3 times lower in a thin slab than in a slab with the thickness of more than 200 mm.

Transformations of dendritic structure during reductions demonstrate the high level of conditioning required for the formation of uniform austenite grains in semifinished rolled stock before finish rolling. The studies did not confirm the hypothesis that bainite of coarse morphology in the microstructure of hot rolled products is formed in segregation sites. The inherited influence of the primary dendritic structure on structure formation during rolling was detected. The manganese concentration varies between bainite and neighboring structure from 0.68% to 1.01% similarly to the level in initial dendritic segregation. The difference in the content of chemical elements influences on recrystallization of austenite grains during high temperature roughing. Bainite was formed in the frames of chemically depleted coarse austenite grains steady upon phase transformation.

Keywords: slab, segregation, dendritic structure, rolled, microstructure, bainite

For citation: Vorozheva E.L., Smetanin K.S., Kisliitsa V.V., Kudashov D.V. Metallographic analysis of structural peculiarities of thin slab and rolled products manufactured thereof. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023; 66(1): 105–111. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-105-111>

ВВЕДЕНИЕ

На литейно-прокатном комплексе (ЛПК) АО «Выксунский металлургический завод» (ВМЗ) освоена технология производства проката различных марок стали, в том числе хладостойкого и коррозионностойкого исполнения. Процесс постоянного улучшения качества продукции позволяет непрерывно совершенствовать характеристики горячекатаного проката [1 – 5], при этом увеличение толщины сляба с 90 до 105 мм привело к повышению производительности комплекса [6]. В тонкослябовой технологии без перекристаллизации аустенитных зерен перед прокаткой и ограниченной суммарной деформацией исходная литая структура оказывает наследственное влияние на формирование конечной микроструктуры проката [7]. Аустенитная структура сляба перед началом прокатки определяется раннее сформировавшейся в процессе кристаллизации литой структурой металла. Границы исходных литых зерен распространяются по междендритным пространствам, а форма и размеры этого зерна зависят от условий затвердевания. От поверхности к середине толщины слябов дисперсность литой структуры изменяется: последовательно формируются зоны мелких кристаллов, ориентированных столбчатых кристаллов и кристаллов равноосной формы. По оценкам исследователей [8 – 12] расстояния между дендритными осями второго порядка увеличиваются от поверхности к центру соответственно от 20 до 180 – 250 мкм в тонких слябах. Этот параметр в дендритной структуре классического толстого сляба выше: у поверхности 50 мкм, в середине толщины 350 мкм.

Экспериментально установлено, что в условиях ЛПК при томлении сляба из микролегированной стали в туннельной печи при 1150 – 1170 °С растворяется около 60 % дисперсных частиц, размер исходного зерна аустенита в слябе изменяется незначительно [4]. Поэтому для достижения высоких свойств в прокате необходимо получение возможно более дисперсной исходной литой структуры перед прокаткой сляба за счет контроля процесса затвердевания металла [13]. Помимо размеров литых зерен, на формирование микроструктуры в ходе прокатки могут повлиять химические сегрегации, обусловленные условиями нахождения расплава в жидко-твердой двухфазной области. При затвердевании происходит разделение элементов на макроуровне, образуя зональные сегрегации. Дендритный характер процесса затвердевания приводит

к микросегрегациям. Как правило, основным последствием сегрегаций может быть образование структурной неоднородности в прокатанном металле, негативно влияющей на механические свойства [14]. Задачей данного исследования являлось изучение внутренних химических и структурных характеристик, сформированных на этапах затвердевания тонкого сляба и в результате $\delta \rightarrow \gamma$ превращения, и определения их влияния на формирование микроструктуры в ходе горячей деформации.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для исследования служил массив из десяти промышленных тонких слябов низкоуглеродистых микролегированных марок стали класса прочности K52 и соответственно произведенный из них прокат.

Зональную химическую сегрегацию определяли по содержанию химических элементов по толщине слябов методом атомно-эмиссионного спектрального анализа [15]. На каждом исследуемом участке выполнено 5 – 7 измерений, не менее 30 прожигов по толщине каждого сляба. Для оценки рассеивания химических элементов по сечению сляба использовали коэффициент вариации, рассчитанный как отношение стандартного отклонения в массиве данных к среднему значению [11]. Распределение химических элементов по осям дендритов и межосным пространствам оценивали по содержанию марганца [16, 17]. Литую структуру изучали на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer.Dlm на металлографических шлифах, изготовленных из быстро охлажденных проб от слябов. Диаметр бывших зерен аустенита, выделенных ферритом, измеряли в сечениях, параллельных широким граням сляба. В этих сечениях зерна равноосной формы, поэтому было достаточно измерения диаметра без применения поправочных коэффициентов [18, 19]. Исследование микроструктуры проката выполняли с использованием метода дифракции обратнорассеянных электронов (ДОЭ) с помощью электронного микроскопа Ultra 55, оснащенного системой анализа HKL Channel 5. Карты ДОЭ строили на 1/4 толщины проката при увеличениях 125 и 500 с шагом сканирования 0,5 и 0,1 мкм соответственно. На полученных картах малоугловые границы (МУГ) проводили при углах разориентировки решеток от 2 до 15°, а большеугловые границы (БУГ) – при углах разориентировки более 15°.

Коэффициенты вариации

Table 1. Variation coefficients

Коэффициент вариации (отношение стандартного отклонения к среднему значению), %						
C	Mn	Si	P	S	V	Nb
5,6 – 6,6	0,5 – 0,8	0,6 – 1,0	5,2 – 9,4	2,6 – 3,4	0,8	3,7 – 5,1

Размеры зерна оценивали по размерам участков, ограниченных БУГ [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Рассчитанные коэффициенты вариации массивов с данными спектрального анализа (табл. 1) показывают, что рассеивание химических элементов по сечению слэбов незначительное: коэффициенты вариации основных и примесных элементов меньше 10 %. По сравнению с этими результатами в классическом слэбе толщиной 250 мм идентичной химической композиции коэффициент вариации углерода достигает 25,7 %, рассеивание остальных элементов такое же, как и в тонком слэбе. Следовательно, условия разливки тонких слэбов позволяют получить металл, близкий к химически однородному, зональные сегрегации – незначительные.

Изучение дендритной сегрегации показало, что содержание марганца по площади, занимаемой дендритными осями и междендритными промежутками, изменяется от 0,6 до 1,1 %. Карта распределения марганца отображает первичное затвердевшее состояние и дендритную

сегрегацию в слэбе из низкоуглеродистой стали (рис. 1). Видно, что классическое древовидное строение в тонком слэбе низкоуглеродистой стали нарушено. Одной из причин разрушения дендритной структуры является использование динамического мягкого обжатия в процессе затвердевания, которое приводит к обламыванию и измельчению растущих дендритов. Образуются дополнительные центры для зарождения зерен аустенита при фазовом превращении $\delta \rightarrow \gamma$ [13], обеспечивая дисперсность структуры перед горячей прокаткой.

Размер исходных аустенитных зерен, сформированных с учетом первичной дендритной структуры, находится в диапазоне от 0,5 до 1,5 мм. Для сравнения в классическом слэбе толщиной более 200 мм до предпрокатного нагрева размер зерен вблизи поверхности составляет 1,5 мм и увеличивается до 4,5 мм в середине толщины. Вид зерен, выделенных ферритом, в сечениях, параллельных широким граням слэбов толщинами 90 и 105 мм, приведен на рис. 2.

В ходе термомеханической обработки структурная неоднородность минимизируется за счет правильно подобранного микролегирования и значительных обжатий слэба в черновой группе клетей [1 – 5]. Кривая распределения деформации, построенная по относительному изменению дендритной структуры [21] в слэбе при черновой прокатке, показала, что фактические обжатия в черновой группе клетей ЛПК обеспечивают равномерные местные деформации (рис. 3), необходимые для получения однородной мелкозернистой структуры аустенита перед черновой прокаткой.

Карты границ зерен и микроструктура конечного горячекатаного проката в виде карт контрастов картин Кикучи приведены на рис. 4. Видно, что структура состоит преимущественно из полигонального феррита (рис. 4, а), в матрице которого присутствуют бейнитные области с преобладанием зернистой морфологии (рис. 4, б) и, в меньшей степени, реечной. В структуре зернистого бейнита в большей степени присутствуют большеугольные границы [20], что хорошо видно на картах границ зерен.

Для более наглядной демонстрации размеров зерна в структуре исследуемых образцов построены карты (рис. 5), на которых каждый участок, ограниченный БУГ, окрашен в палитре от синего к красному. Синему цвету соответствуют наиболее мелкие зерна, красным цветом обозначены самые крупные участки. Хорошо

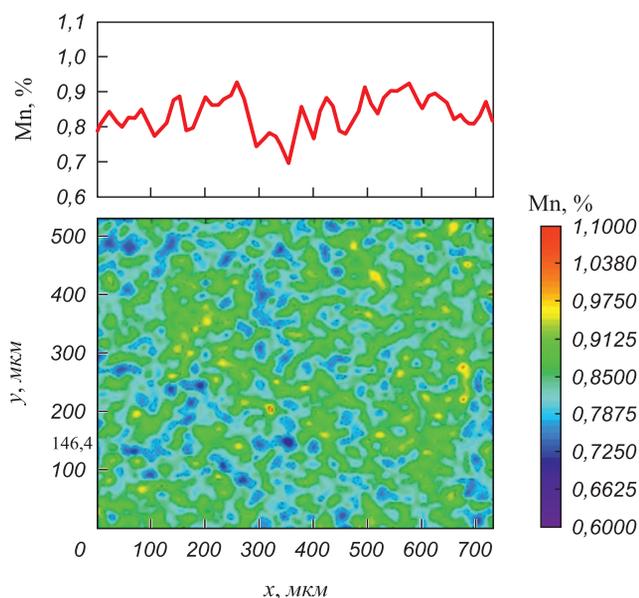


Рис. 1. Карта распределения марганца по сечению дендритов и междендритных пространств

Fig. 1. Map of manganese distribution over the cross section of dendrites and inter-dendritic spaces

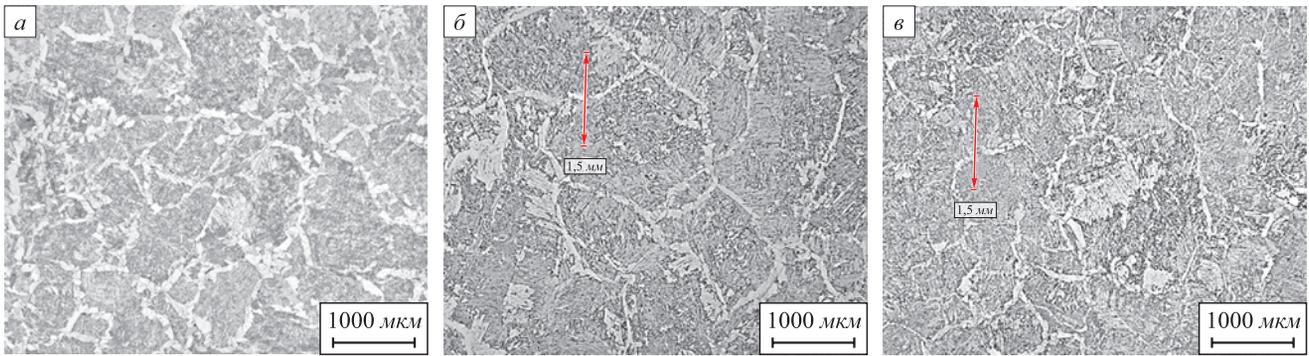


Рис. 2. Вид зерен в плоскостях, параллельных широкой грани тонких слябов:

a – 5 мм от поверхности, $d_{cp} = 0,5$ мм; *б* – четверть толщины сляба, $d_{cp} = 1,5$ мм; *в* – середина толщины сляба, $d_{cp} = 1,0$ мм

Fig. 2. View of grains in the planes parallel to the wide face of thin slabs:

a – 5 mm from the surface, $d_{av} = 0.5$ mm; *б* – quarter of slab thickness, $d_{av} = 1.5$ mm; *в* – middle of the slab thickness, $d_{av} = 1.0$ mm

видно, что структура преимущественно однородная по размерам зерна.

Результаты измерения зерен приведены в табл. 2. Доля крупных участков бейнита низкотемпературной модификации реечной морфологии с МУГ, сформированного в рамках исходных зерен аустенита, не превышает 10 %.

Карта распределения марганца по площади бейнита не подтверждает гипотезу о том, что бейнит грубой морфологии образуется в сегрегационных участках (рис. 6). Данный рисунок демонстрирует тождественность с дендритной сегрегацией. Содержание марганца по площади, занимаемой бейнитом и «соседней» структурой, изменяется от 0,68 до 1,01 % соответственно. Бейнит с МУГ сформировался в рамках аустенитных зерен, устойчивых при фазовом превращении [22].

Различие в содержании химических элементов между остовами дендритов и в междендритных прост-

ранствах может повлиять на процессы рекристаллизации аустенитных зерен в ходе высокотемпературной черновой прокатки. По месту химически «чистых» участков барьерное действие для предотвращения

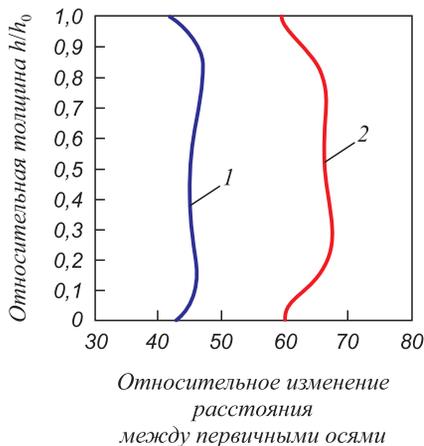


Рис. 3. Влияние деформации на трансформацию дендритов по толщине слябов:

1 – 45 – 50 %; 2 – 65 – 70 %

Fig. 3. Influence of deformation on dendrite transformation along the slabs thickness:

1 – 45 – 50 %; 2 – 65 – 70 %

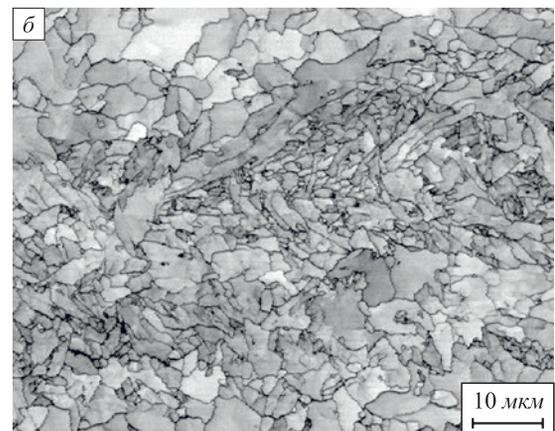
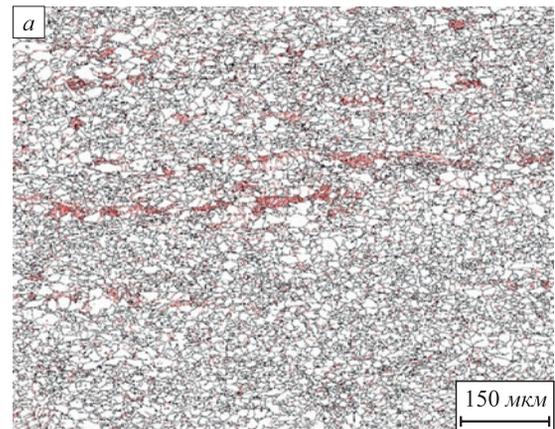


Рис. 4. Микроструктура горячекатаного проката: *a* – сетка большеугловых (черные) и малоугловых (красные) границ; *б* – структура бейнитных участков

Fig. 4. Microstructure of hot rolled products: *a* – grid of large-angle (black) and small-angle (red) borders; *б* – structure of bainite areas

Результаты оценки размеров зерна на основе ДОЭ-карт

Table 2. Grain size estimation based on the maps of reflected electron diffraction

Средневзвешенный диаметр зерна, мкм	Максимальный диаметр зерна, мкм	Максимальная площадь зерна, мкм ²	Коэффициент разносторонности
13,4	48,7	1864	5,4

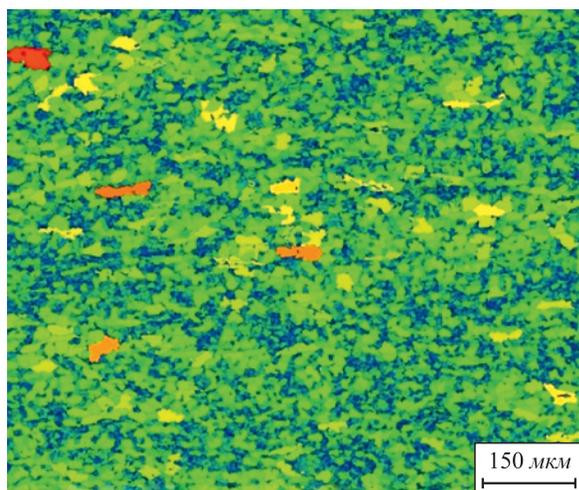


Рис. 5. Карты размеров зерна

Fig. 5. Grain size maps

роста рекристаллизованных зерен аустенита является ослабленным по сравнению с химически обогащенными пространствами. Установленная закономерность указывает, что минимизация доли бейнита грубой морфологии в прокате возможна за счет уменьшения исходной дендритной сегрегации в ходе затвердевания жидкой стали. Исследованиями установлено, что уменьшение расстояния между дендритными осями второго порядка в среднем на 30 мкм приводит к снижению дендритной сегрегации на 20 % [23]. Дисперсная первичная дендритная структура является предпосылкой для формирования равномерной рекристаллизованной аустенитной структуры в ходе прокатки в черновой группе клетей.

Выводы

Оценка зональных сегрегаций показала, что рассеивание химических элементов по сечению тонких слэбов из низкоуглеродистой микролегированной стали незначительное: коэффициенты вариации меньше 10 %. По сравнению с этими результатами в слэбе толщиной более 200 мм коэффициент вариации углерода достигает 25,7 %.

Дендритная сегрегация, отображенная картой распределения марганца, показала первичное затвердевшее состояние низкоуглеродистой стали с нарушенным

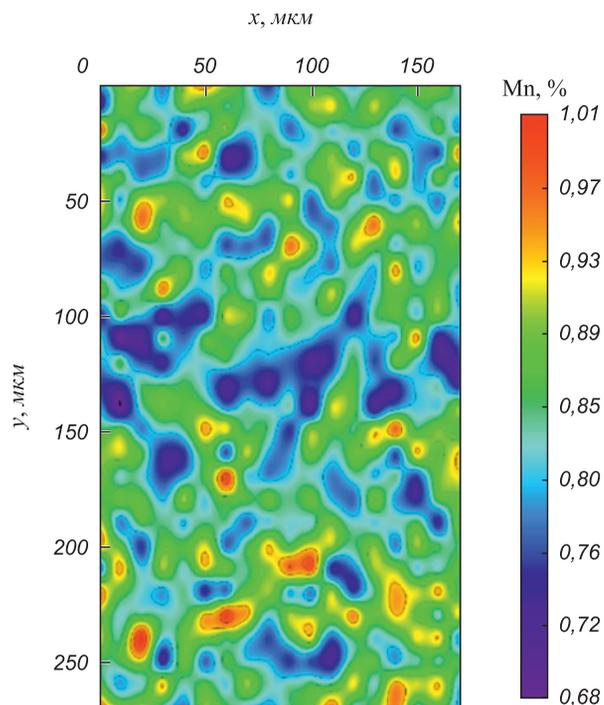


Рис. 6. Содержание Mn по месту бейнита и «соседних» участков микроструктуры

Fig. 6. Mn content at the site of bainite and “neighboring” microstructure areas

строением дендритной структуры. Измельчение растущих дендритов в ходе затвердевания динамическим мягким обжатием слэба обеспечило дополнительные центры для зарождения зерен аустенита при фазовом превращении $\delta \rightarrow \gamma$. Размеры исходных аустенитных зерен в литой структуре тонкого слэба в 3 раза меньше, чем в слэбе толщиной более 200 мм.

Расчет относительных изменений размеров дендритной структуры при черновой прокатке показал равномерные структурные преобразования, необходимые для получения однородного зерна аустенита перед входом в чистовую группу клетей.

Установлено, что природа образования бейнита с повышенной плотностью малоугловых границ в конечной микроструктуре проката обусловлена наследственным влиянием дендритной сегрегации в ходе прокатки. Снижение дендритной сегрегации является предпосылкой для формирования равномерной рекристаллизованной аустенитной структуры в ходе черновой прокатки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Мунтин А.В., Частухин А.В., Червонный А.В., Науменко В.В., Эфрон Л.И., Рингинен Д.А. Разработка технологии производства рулонного проката трубного назначения класса прочности К60 в условиях литейно-прокатного комплекса. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2016; (3): 17–25.
Muntin A.V., Chastukhin A.V., Chervonnyi A.V., Naumenko V.V., Efron L.I., Ringinen D.A. Development of technology for production of rolled products of K60 strength class in conditions of casting and rolling complex. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2016; (3): 17–25. (In Russ.).
2. Мунтин А.В. Передовые технологии совмещенного процесса непрерывного литья тонких слябов и горячей прокатки. *Металлург*. 2018; (9): 43–51.
Muntin A.V. Advanced technologies of combined process of thin slabs continuous casting and hot strip rolling. *Metallurgist*. 2019; 62(9-10): 900–910.
<https://doi.org/10.1007/s11015-019-00747-5>
3. Червонный А.В., Рингинен Д.А., Частухин А.В., Эфрон Л.И., Мунтин А.В., Науменко В.В., Багмет О.А. Формирование структуры и свойств рулонного проката трубного назначения при производстве в условиях литейно-прокатного комплекса. *Металлург*. 2018; (10): 40–47.
Chervonnyi A.V., Ringinen D.A., Chastukhin A.V., Efron L.I., Muntin A.V., Naumenko V.V., Bagmet O.A. Structure and property formation for pipe coiled rolled product during manufacture under casting and rolling complex conditions. *Metallurgist*. 2019; 62(9-10): 1012–1021.
<https://doi.org/10.1007/s11015-019-00748-4>
4. Червонный А.В. Разработка составов микролегированных сталей для электросварных труб классов прочности К56-К60 и режимов их контролируемой прокатки в условиях литейно-прокатного комплекса: Автореферат диссертации ... кандидата технических наук. Москва; 2021: 16.
Chervonnyi A.V. *Development of microalloyed steel compositions for electro-welded pipes of strength classes K56-K60 and their controlled rolling modes in the conditions of casting and rolling complex: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.* Moscow; 2021: 16. (In Russ.).
5. Барыков А.М., Степанов П.П. Развитие технологий производства стали, проката и труб на выксунской производственной площадке: Сборник трудов. Под общ. ред. А.М. Барыкова. Москва: Металлургиздат; 2016: 203.
Barykov A.M., Stepanov P.P. *Development of Technologies for the Production of Steel, Rolled Products and Pipes at the Yuxsa Production Site: Coll. of Papers*. Barykov A.M. ed. Moscow: Metallurgizdat; 2016: 203. (In Russ.).
6. Кислица В.В., Максаев Е.Н., Бойко А.С., Ворожева Е.Л., Сметанин К.С. Оценка качественных показателей сляба и проката при повышении толщины непрерывнолитой заготовки. *Сталь*. 2021; (8): 17–21.
Kislitsa V.V., Maksaev E.N., Boiko A.S., Vorozheva E.L., Smetanin K.S. Evaluation of quality indices of slabs and rolled products with an increase in thickness of continuously cast billets. *Steel in Translation*. 2021; 51(8): 548–553.
<https://doi.org/10.3103/S0967091221080076>
7. Эфрон Л.И. *Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали*. Москва: Металлургиздат; 2012: 696.
Efron L.I. *Metal Science in “Big” Metallurgy. Pipe Steels*. Moscow: Metallurgizdat; 2012: 696. (In Russ.).
8. Ruiz-Aparicio A. *Evolution of Microstructure in Nb-Bearing Microalloyed Steels Produced by the Compact Strip Production Process: Master’s Thesis*. University of Pittsburg; 2004: 162.
9. Garcia C.I., Ruiz-Aparicio A., Cho K., Ma Y.P., Graham C., Vazquez M., Ruiz-Aparicio L., DeArdo A.J. Microstructural characterization of the solidification and equilibrated microstructures of Nb-bearing microalloyed steels produced by the compact strip processing. *Int. Symp. on Thin Slab Casting and Rolling (TSCR’2002), December 3–5, 2002, Guangzhou, China*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/304900786>
10. Garcia C.I., Torkaz C., Graham C., DeArdo A.J. Physical metallurgy of high strength low alloy strip steel production using compact strip processing. *Ironmaking and Steelmaking*. 2005; 32(4): 314–318.
<https://doi.org/10.1179/174328105X48052>
11. Ворожева Е.Л., Кудашов Д.В., Хлыбов А.А., Сметанин К.С. Методы изучения структурного состояния непрерывнолитых слябов и горячекатаного металла, произведенного на литейно-прокатном комплексе. *Металлы*. 2022; (3): 40–48.
Vorozheva E.L., Kudashov D.V., Khlybov A.A., Smetanin K.S. Methods for studying the structural state of continuously cast slabs and the hot-rolled metal produced at the casting and rolling complex. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2022; (5): 496–494. <http://doi.org/10.1134/S003602952205010X>
12. Khlybov A., Vorozheva E. Studying on the internal quality of steel at various stages of production: Slab-rolled metall. *Materials Science Forum*. 2022; 1052: 377–383.
<https://doi.org/10.4028/p-0skw5n>
13. Zhou T., O’Malley R.J., Zurob H.S., Subramanian M., Cho S.-H., Zhang P. Control of upstream austenite grain coarsening during the thin-slab cast direct-rolling (TSCDR) process. *Metals*. 2019; 9(158): 1–18.
<https://doi.org/10.3390/met9020158>
14. Verhoven J.D. A review of microsegregation induced banding phenomena in steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2000; 9(3): 286–296.
<https://doi.org/10.1361/105994900770345935>
15. ГОСТ Р 54153-2010 «Сталь. Метод атомно-эмиссионного спектрального анализа». Москва: Стандартинформ; 2012: 28.
GOST R 54153-2010. Steel. The method of atomic emission spectral analysis. Moscow: Standartinform; 2012: 28.
16. Presslinger H., Mayr M., Tragl E., Bernhard C. Assessment of the primary structure of slabs and the influence on hot- and cold-rolled strip structure. *Steel Research International*. 2006; 77(2): 107–115.
<https://doi.org/10.1002/srin.200606362>
17. Yan C., Ju X., Meng Y., Shi X. Quantification of manganese dendritic segregation in 380CL steel billet by electron probe microanalysis. *SN Applied Sciences*. 2019; 1: 623.
<https://doi.org/10.1007/s42452-019-0612-3>

18. Bernhard C., Reiter J., Presslinger H. A model for predicting the austenite grain size at the surface of continuously-cast slabs. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2008; 39(6): 885–895. <https://doi.org/10.1007/s11663-008-9197-8>
19. ГОСТ 5639-82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна». Москва: ИПК «Издательство стандартов»; 2003: 16.
GOST 5639-82. Steels and alloys. Methods of detection and determination of grain size. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov; 2003: 16.
20. Эфрон Л.И., Степанов П.П., Воркачев К.Г., Кантор М.М., Боженов В.А., Сметанин К.С. К вопросу о влиянии морфологии бейнита на ударную вязкость низкоуглеродистых сталей. *Сталь*. 2021; (9): 45–50.
Efron L.I., Stepanov P.P., Vorkachev K.G., Kantor M.M., Bozhenov V.A., Smetanin K.S. Questioning the effect of bainite morphology on the impact viscosity of low-carbon steels. *Steel in Translation*. 2021; 51(9): 670–676. <https://doi.org/10.3103/S0967091221090035>
21. Левченко Г.В., Воробей С.А., Демина Е.Г., Дементьева Ж.А. Развитие метода оценки прорабатываемости структуры конструкционной стали в процессе горячей деформации. VIII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Москва. 19–22 ноября 2019 г.: Сборник материалов. Москва: ИМЕТ РАН; 2019: 42–43.
Levchenko G.V., Vorobei S.A., Demina E.G., Dement'eva Zh.A. Development of a method for assessing the workability of structural steel structure during hot deformation. In: *VIII Int. Conf. "Deformation and Destruction of Materials and Nanomaterials"*. Moscow. November 19–22, 2019: *Coll. of Papers*. Moscow: IMET RAS; 2019: 42–43.
22. Jayanti S. *Austenitic grain size of steel*. *Engineering Notes*. URL: <https://www.engineeringenotes.com/metallurgy/steel/austenitic-grain-size-of-steel-metallurgy/25901>
23. Ворожева Е.Л., Кудашов Д.В., Хлыбов А.А., Сметанин К.С. Особенности формирования структуры тонких слябов, разлитых с разными скоростями, их влияние на структуру и свойства горячекатаного проката. *Черные металлы*. 2022; (7): 27–34. <https://doi.org/10.17580/chm.2022.07.05>
Vorozheva E.L., Kudashov D.V., Khlybov A.A., Smetanin K.S. Features of formation of the structure of thin slabs cast at different speeds, their influence on the structure and properties of hot-rolled steel. *Chernye metally*. 2022; (7): 27–34. <https://doi.org/10.17580/chm.2022.07.05>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Евгения Львовна Ворожева, главный специалист, АО «Выксунский металлургический завод»
E-mail: vorozheva_el@vsw.ru

Кирилл Сергеевич Сметанин, главный специалист по электронной микроскопии и рентгенографии лаборатории металловедения, АО «Выксунский металлургический завод»
E-mail: smetanin_ks@vsw.ru

Вячеслав Владимирович Кислица, к.т.н., начальник управления по металлургическим процессам, АО «Выксунский металлургический завод»
E-mail: kislica_vv@vsw.ru

Дмитрий Викторович Кудашов, к.т.н., главный специалист по инновациям, АО «Выксунский металлургический завод»; директор, Выксунский филиал НИТУ «МИСиС»
E-mail: kudashov_dv@vsw.ru

Evgeniya L. Vorozheva, Chief Specialist, JSC "Vyksa Metallurgical Plant"
E-mail: vorozheva_el@vsw.ru

Kirill S. Smetanin, Chief Specialist on Electron Microscopy and Radiography of the Laboratory of Metal Science, JSC "Vyksa Metallurgical Plant"
E-mail: smetanin_ks@vsw.ru

Vyacheslav V. Kislitsa, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Metallurgical Processes, JSC "Vyksa Metallurgical Plant"
E-mail: kislica_vv@vsw.ru

Dmitrii V. Kudashov, Cand. Sci. (Eng.), Chief Innovation Specialist, JSC "Vyksa Metallurgical Plant"; Director, Vyksa Branch of the National University of Science and Technology "MISIS"
E-mail: kudashov_dv@vsw.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Е. Л. Ворожева – обзор литературных данных, планирование исследования, подготовка и травление образцов, металлографическое исследование с применением оптической микроскопии, анализ полученных результатов, подготовка текста, формирование выводов.

К. С. Сметанин – металлографическое исследование с применением электронной микроскопии, выполнение расчетов.

В. В. Кислица – формирование основной концепции, цели и задачи исследования, утверждение последней версии статьи.

Д. В. Кудашов – научное руководство, анализ результатов исследований, редактирование текста, корректировка выводов.

E. L. Vorozheva – review of literary data, research planning, preparation and etching of the samples, metallographic research using optical microscopy, analysis of the research results, writing the text, formation of the conclusions.

K. S. Smetanin – metallographic research using electron microscopy, calculations.

V. V. Kislitsa – formation of the main concept, goals and objectives of the study; approval of the article final version.

D. V. Kudashov – scientific guidance, analysis of the research results, editing the text, correction of the conclusions.

Поступила в редакцию 25.11.2022
После доработки 02.12.2022
Принята к публикации 30.12.2022

Received 25.11.2022
Revised 02.12.2022
Accepted 30.12.2022