

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИТОЙ СТРУКТУРЫ ПРОМЫШЛЕННОГО СЛЯБА ФЕРРИТНО-ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ

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

*Методом физических методов, в том числе методом микрорентгеноспектрального анализа исследованы дендритная структура, отражающая химическую неоднородность промышленного слэба из ферритно-перлитной стали. Установлены некоторые закономерности соответствия элементов дендритной структуры и литой зернистой структуры.*

*Ключевые слова:* непрерывнолитой слэб, микрорентгеноспектральный анализ, химическая неоднородность, дендритная структура, дисперсность, плотность.

Качество и потребительские свойства стального проката определяются не только режимами его термомеханической обработки, но и качеством литой структуры слэба, формирующейся на всех этапах его получения — от выплавки и внепечной обработки до разливки на УНРС и нагреве перед прокаткой. Очевидно, что невозможно получить структурно-однородный штрипс, если слэб имеет значительную химическую и структурную неоднородность.

Основной причиной образования структурной неоднородности непрерывнолитого слэба является его химическая неоднородность, формирующаяся при кристаллизации и затвердевании [1–3]. Химическая неоднородность или сегрегации образуются как в результате дендритной ликвации в микрообъемах, так и при зональной ликвации в макрообъемах. Зональные сегрегации образуются из ликватов, «вымываемых» из дендритных ячеек в жидкую часть затвердевающего слэба набегающими потоками расплава. Зональные сегрегации, как правило, сосредоточены в центре слэба и образуют известную осевую химическую неоднородность слэба, трансформирующуюся при прокатке в ликвационную полосу штрипса. Неоднородность, вызванная дендритной ликвацией, наследуется в полосчатой структуре листового проката и оказывает негативное влияние на работу разрушения штрипса [3].

При затвердевании слэба наряду с химической формируется и структурная неоднородность, связанная как с названными выше ликвационными процессами, так и с теплофизическими условиями затвердевания, заданными тепловой работой кристал-

лизатора и зоны вторичного охлаждения. Так, вслед за узкой зоной мелких равноосных кристаллов в корочке слэба, примыкающей к кристаллизатору, располагается протяженная зона транскристаллизации, которая, по мере снижения температурного градиента и появления концентрационного переохлаждения перед фронтом кристаллизации, трансформируется в зону крупных равноосных или разноориентированных кристаллов в центре слэба. Совершенно очевидно, что характер химической и структурной неоднородности металла этих зон абсолютно различный.

Цель настоящей работы — исследование взаимосвязи химической и структурной неоднородности по сечению промышленного слэба из ферритно-перлитной стали.

### Материалы и методика исследования

Исследовали образцы стали марки 15 следующего химического состава, %: 0,15 С; 0,21 Si; 0,53 Mn; 0,011 V; 0,016 P; 0,012 S; ост. Fe. Образцы вырезали из четырех структурных зон промышленного непрерывнолитого слэба сечением 250×1200 мм (рис. 1): 1 — зоны столбчатых кристаллов (зоны транскристаллизации); 2 и 3 — переходной зоны со смешан-

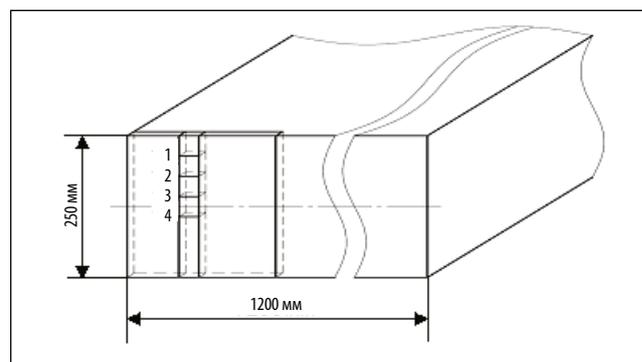


Рис. 1. Схема вырезки образцов из промышленного слэба

\* Докт. техн. наук А. А. Казаков, з.ведующий к.федрой; О. В. Пахомова, инженер; Е. И. Казакова, вед. инженер, к.федр ст ли и сп вов, Санкт-Петербургский государственный технический университет, Россия; kazakov@thixomet.ru

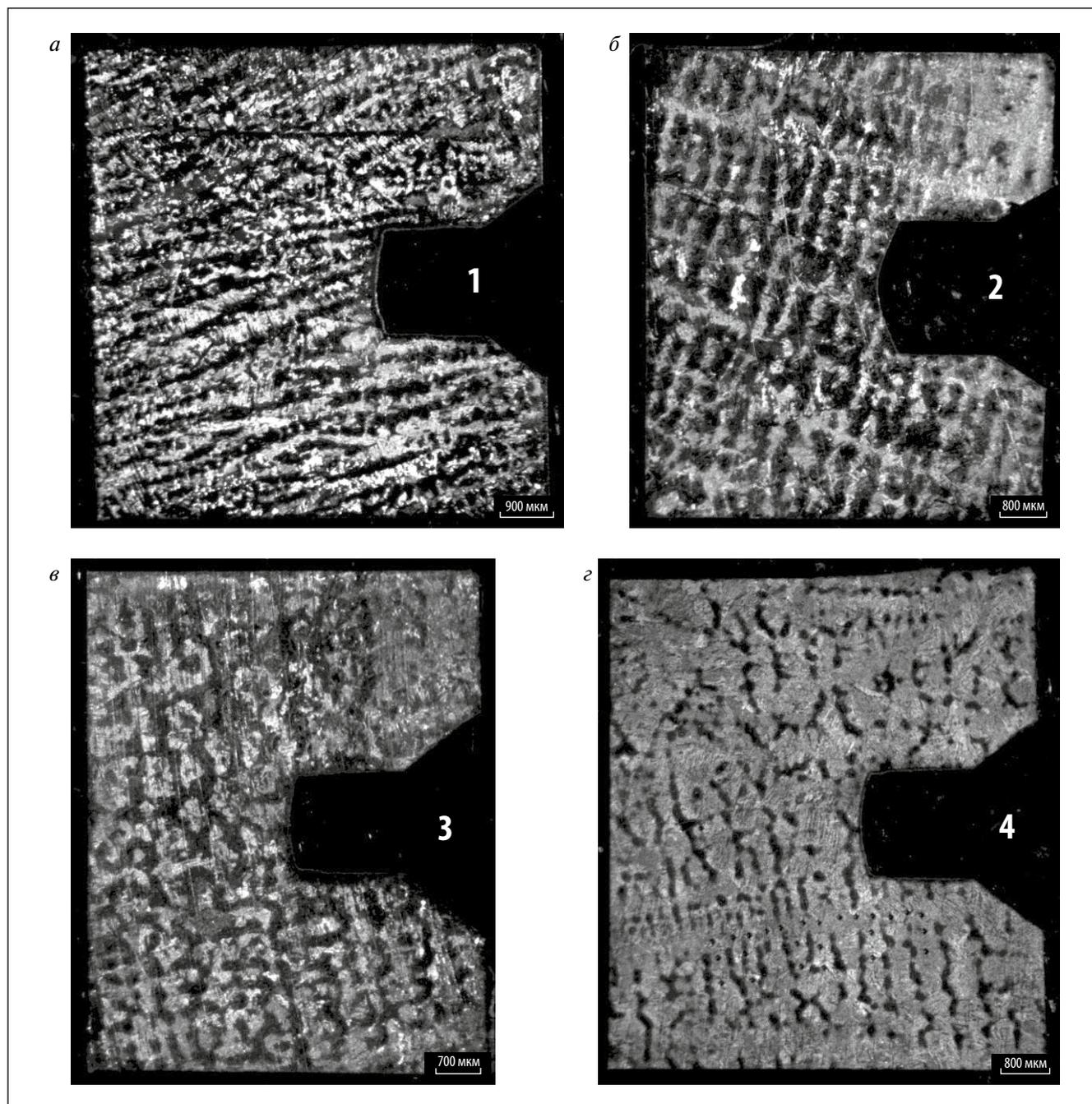


Рис. 2. Дендритная структура в зоне транскристаллизации — 1 (а), в переходной зоне — 2, 3 (б, в) и в центральной зоне крупных равноосных кристаллов — 4 (г) (стереомикроскоп,  $\times 10$ )

ными областями направленных и равноосных кристаллов; 4 — центральной зоны крупных равноосных кристаллов.

Шлифы изготавливали на оборудовании для подготовки проб компании Buehler Ltd., металлографические исследования проводили на стереомикроскопе Meiji EMZ-8TR и на моторизованном микроскопе Zeiss Axiovert 200 MAT, оснащенных анализатором изображения Thixomet Pro. Микро-рентгеноспектральный анализ (МРСА) выполняли на электронном микроскопе Zeiss Supra 55VP с приставкой Inca.

Для выявления литой зеренной микроструктуры применялось травление 3%-ным спиртовым раствором азотной кислоты, дендритной структуры — реактивом Обергоффера.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Для описания структуры сляба обычно выбирают зеренную структуру, которая, как известно, образуется с учетом ранее сформировавшейся дендритной структуры. На рис. 2 показана дендритная структура, выявленная с помощью реактива Обергоффера:

хорошо различимы светлые оси дендритов и темное междендритное пространство. При описании дендритной структуры обычно измеряют следующие ее характеристики [4]: расстояние между осями первого и второго порядка, толщину ветвей, плотность и дисперсность.

Дисперсность дендритной структуры оценивали величиной, обратной расстоянию между осями второго порядка [5]. В каждой структурной зоне непрерывнолитого сляба проводили по 40 измерений, начиная с переходной зоны № 2. В зоне транскристаллизации № 1 из-за высокого температурного градиента, обеспечивающего большую плотность осей первого порядка, оси дендритов второго порядка оказались вырождены, поэтому дисперсность дендритной структуры измерить было невозможно. По мере удаления от поверхности сляба к его центру дисперсность дендритной структуры уменьшается (рис. 3) в соответствии со снижением скорости охлаждения и градиента температуры перед движущимся фронтом кристаллизации [1].

Другой количественной характеристикой дендритной структуры является ее плотность, которая определяется отношением объемных долей осей дендритов и междендритного пространства вокруг этих осей [4]. С помощью анализатора изображений путем выделения этих областей по уровню серого проводили измерение площади или объемной доли областей, занимаемых собственно осями и междендритным пространством. Характер изменения плотности дендритной структуры для всех структурных зон сляба последовательно от поверхности к центру представлен на рис. 4.

Плотность дендритной структуры уменьшается с 1,48 в транскристаллитной зоне у поверхности сляба до 0,52 в переходной зоне на 2/3 его полутолщины. В центральной зоне крупных равноосных кристаллов на процессы формирования дендритов накладываются процессы их огрубления [1] по остальдовскому механизму. В связи с этим плотность дендритных остовов в этой зоне увеличивается, а на графике изменения плотности дендритной структуры по сечению сляба наблюдается минимум. Считается [6], что огрубление дендритов изменяет параметры дендритной структуры, нивелируя зависимость от скорости охлаждения; при этом плотность дендритов зависит только от состава сплава.

Процесс затвердевания сопровождается перераспределением элементов между жидкой и твердой частями дендритных ячеек [7]. Наиболее значительно ликвируют сера, углерод, фосфор и титан [1]. Здесь и далее изображение дендритной структуры получено с помощью инвертированного микроскопа, поэтому оси дендритов, отмеченные на рис. 5 отпечатками микротвердости, темные, а междендритное пространство светлые.

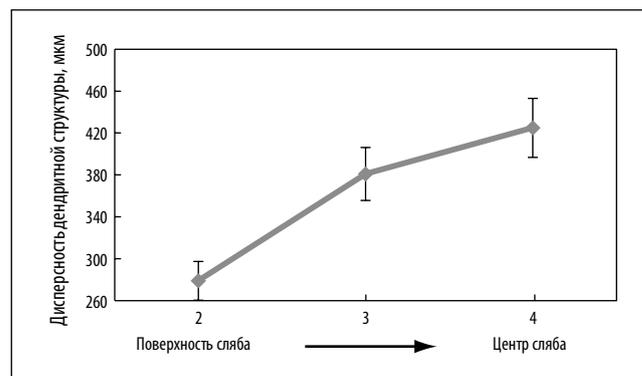


Рис. 3. Изменение дисперсности дендритной структуры по сечению сляба

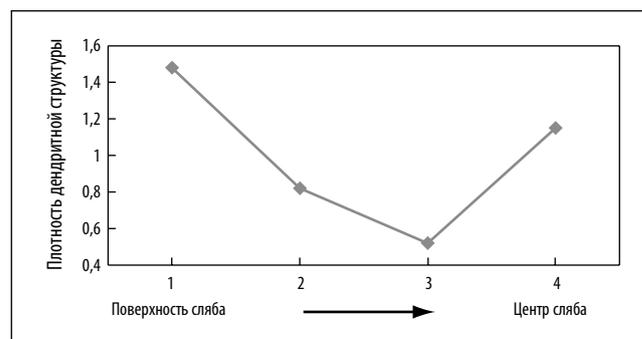


Рис. 4. Изменение плотности дендритной структуры по сечению сляба

В отличие от осей дендритов первого и второго порядков (1 и 2), в междендритном пространстве (3) обнаружено повышенное содержание фосфора (до 0,25 %) и кремния (до 0,63 %). Ванадий практически не ликвирует. Таким образом, дендритная структура абсолютно точно отражает образовавшуюся при затвердевании стали химическую неоднородность. Исследование дендритной структуры позволяет судить о характере распределения сегрегаций.

В электронном микроскопе оси дендритов выглядят рельефно, а междендритное пространство остается абсолютно плоским (рис. 6). Ячеистый механизм роста дендритных остовов, который удалось зафиксировать в данной работе, подтверждает высказанную ранее и основанную на теории концентрационного переохлаждения гипотезу [1] о возможном механизме роста осей дендритов, субструктура которых должна состоять из ячеек.

При дальнейшем охлаждении сляба после полного затвердевания образуется первичная зеренная структура, которая выявляется при травлении 4%-ным раствором азотной кислоты в спирте. Эта структура представляет собой видманштеттов феррит, декорированный по границам литого зерна сеткой аллотриоморфного феррита (рис. 7). Видно, что характер зерен при движении от края слитка существенно меняется — от крупных вытянутых зерен зоны транскристаллизации, границы которых выхо-

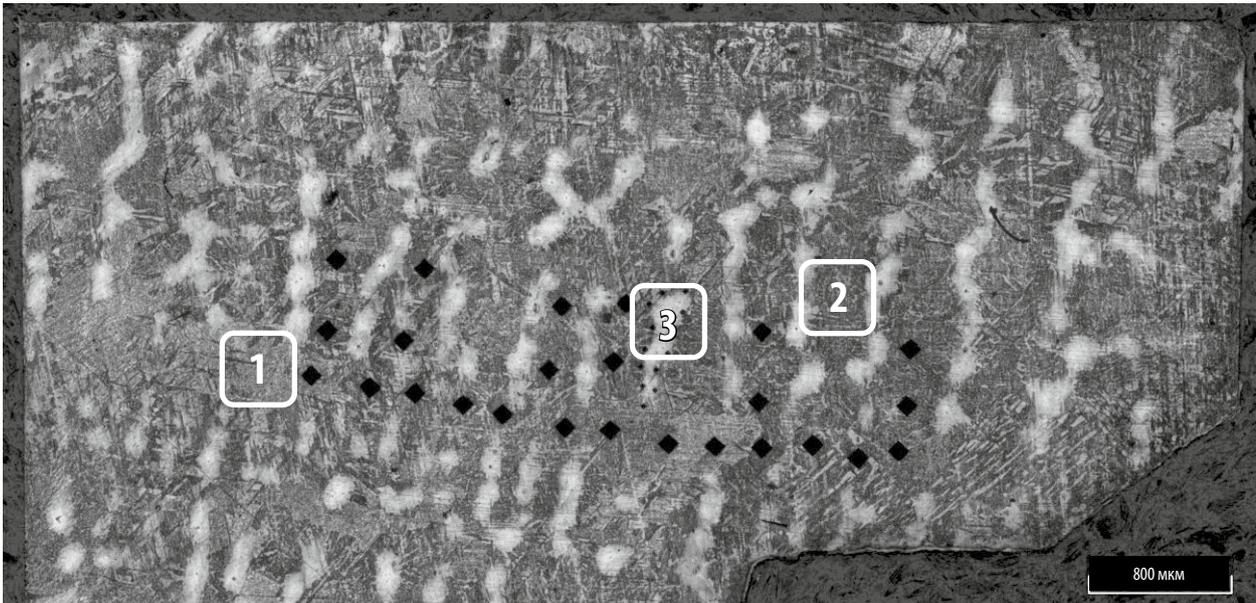


Рис. 5. Участок дендритной структуры литого образца:

1 — ось первого порядка; 2 — ось второго порядка; 3 — междендритное пространство между вторичными осями

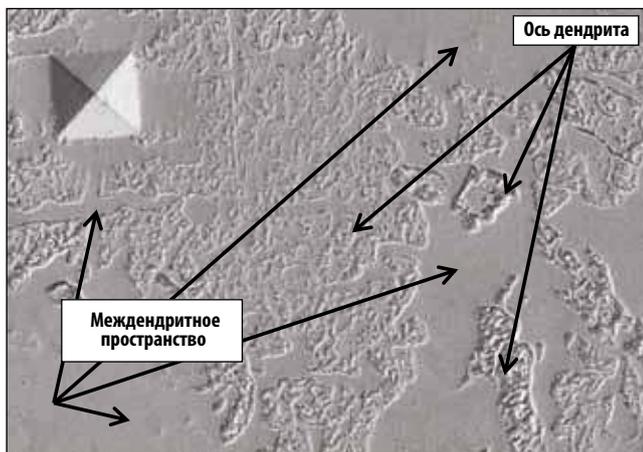


Рис. 6. Ячеистая структура осей дендритов (электронный микроскоп,  $\times 1190$ )

дят за пределы образца, до равноосных зерен диаметром 2–3 мм в центре сляба.

Известно [8, 9], что в низкоуглеродистых сталях с перитектикой характер взаимного расположения первичной зеренной и дендритной структуры является неоднозначным. Сопоставим два изображения одного и того же участка шлифа после травления на дендритную (рис. 8, а) и литую зеренную структуру (рис. 8, б). Скелет одного из дендритов с осями первого и второго порядка, выявленный и отмеченный отпечатками микротвердости на изображении с дендритной структурой, перенесен в то же положение на шлифе с изображением зеренной структуры.

Таким образом, металлографического соответствия между дендритной и литой зеренной структурой нет: оси дендритов равновероятно пересекают как границы, так и тело литого зерна.

Для выявления некоторых закономерностей формирования зеренной структуры исследовали сегрегации легирующих и примесных элементов стали. Определяли, как и для дендритной структуры, содержания Mn, Si, V, S, и P для характерных структурных элементов литой зеренной структуры (рис. 9).

В центре массивных ферритных областей всегда расположены крупные сульфиды марганца MnS, окруженные зоной обеднения, содержащей 0,32 % марганца при среднем плавочном содержании 0,52 %. Эта зона в электронном микроскопе хорошо видна в виде рельефа и отличается высоким содержанием фосфора (0,32 %), серы (0,09 %) и повышенной концентрацией кремния до 0,38–0,41 % (см. рис. 9, обл. 1). По мере удаления от центра к периферии этих ферритных областей (см. рис. 9, обл. 2) содержание Mn увеличивается до среднего значения по плавке, а содержание фосфора снижается до 0,2 %, оставаясь в 10 раз больше, чем среднее плавочное. Процесс образования и роста сульфидных включений приводит к образованию зоны обеднения по марганцу [10]. Пониженные концентрации аустенит-стабилизирующего марганца способствуют образованию феррита, который формируется на сульфидах как на подложках [11]. Иными словами, феррит образовался в наиболее «загрязненном» примесями междендритном пространстве, образованном при «захлопывании» дендритной ячейки в конце затвердевания.

В иглах видманштеттова феррита (см. рис. 9, обл. 4 и 5), расположенных в теле литого зерна, содержание Mn и Si практически соответствует среднему по плавке, а фосфор отсутствует, поэтому можно утверждать, что они образовались из остовов дендритов.

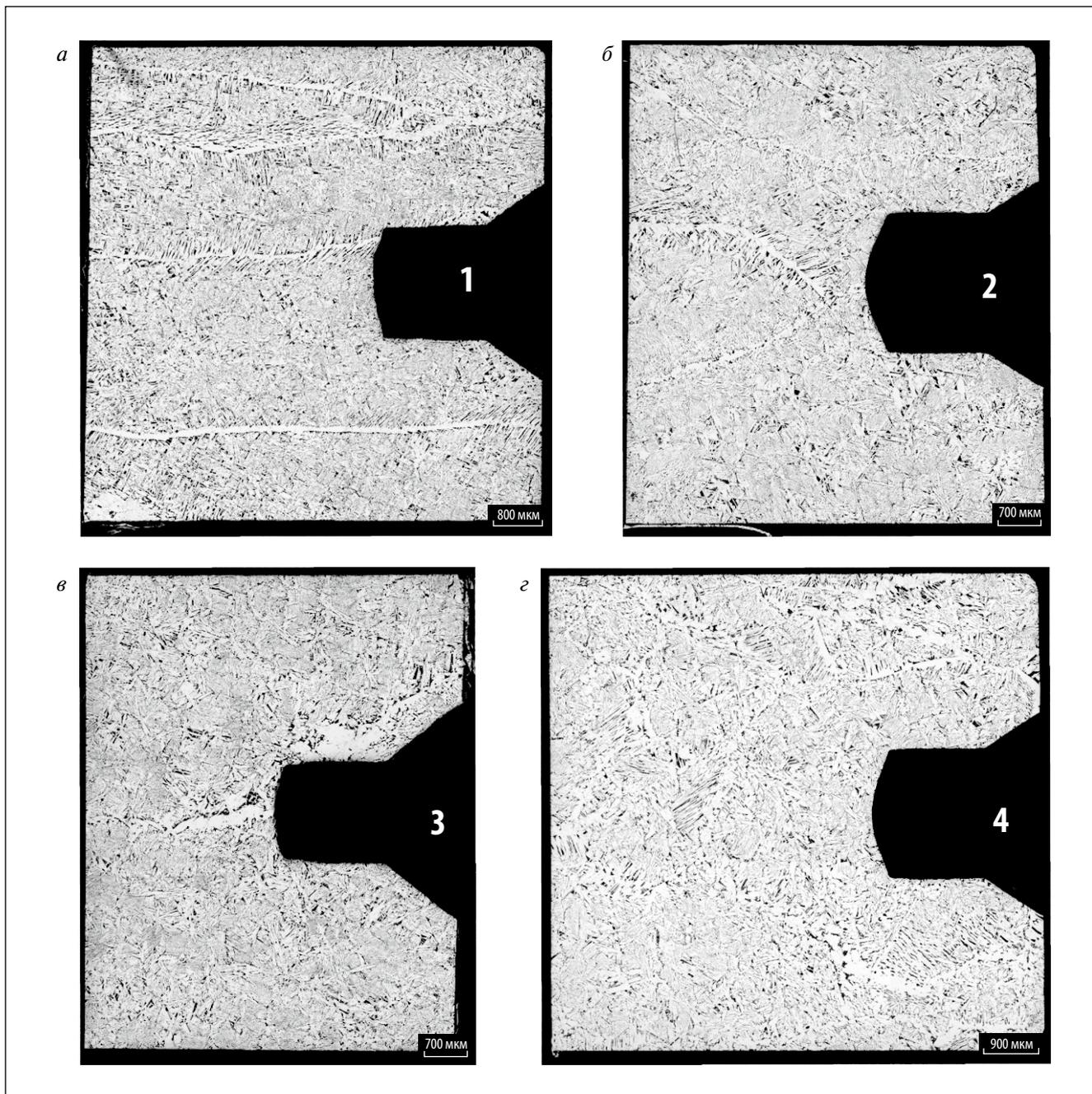


Рис. 7. Литая зеренная структура в зоне транскристаллизации — 1 (а), в переходной зоне — 2, 3 (б, в) и в центральной зоне крупных равноосных кристаллов — 4 (г) (стереомикроскоп,  $\times 10$ )

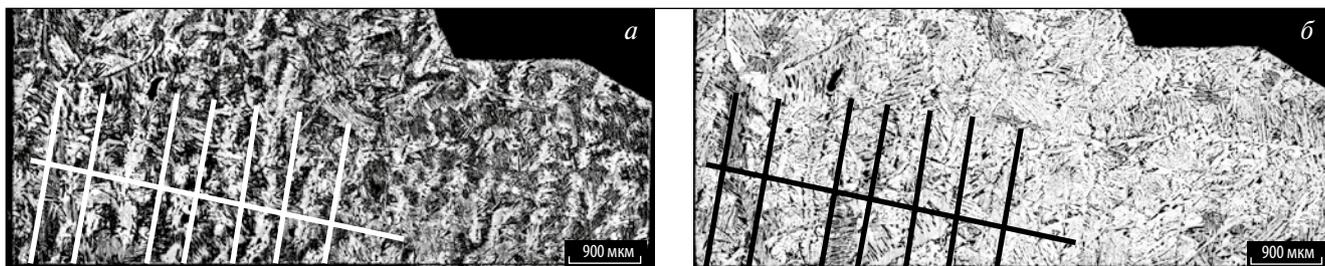


Рис. 8. Взаимное расположение элементов дендритной (а) и литой зеренной (б) структуры на образцах, вырезанных из промышленного сляба

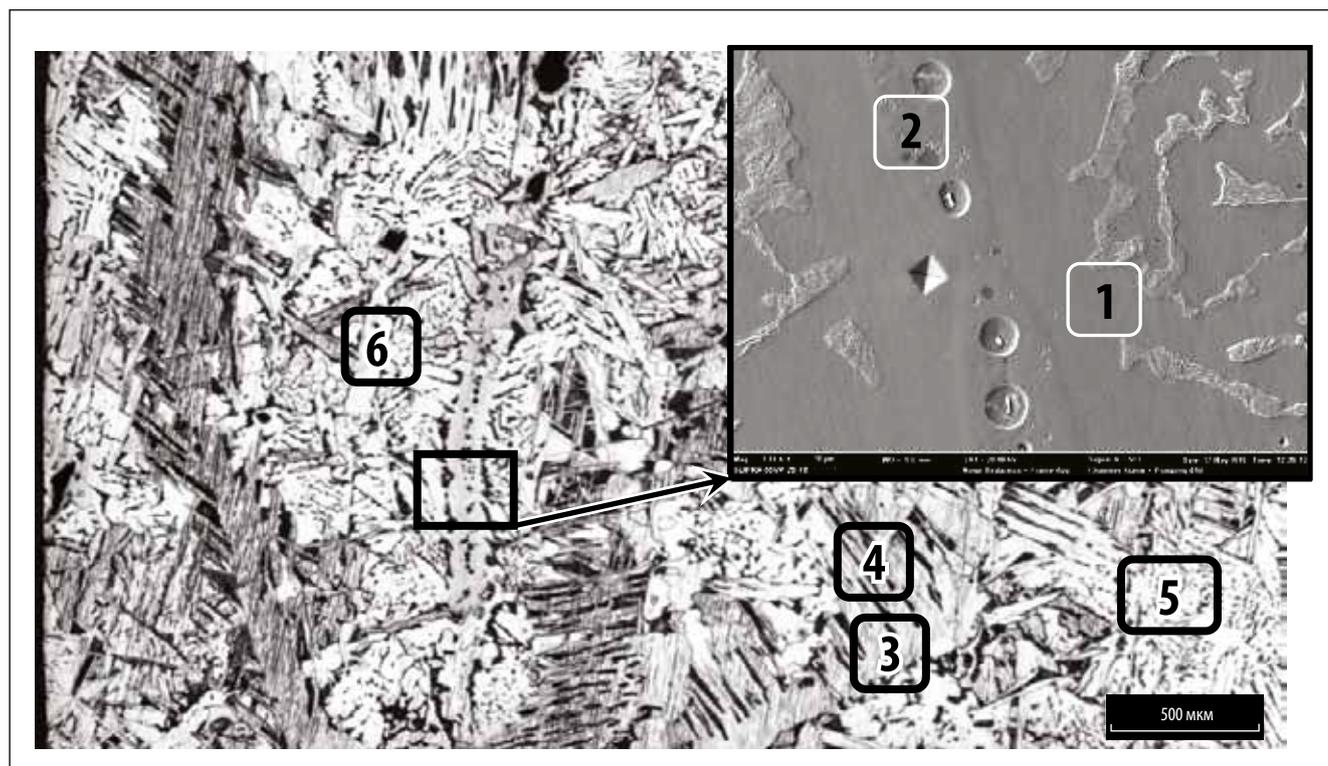


Рис. 9. Участок литой зеренной структуры:

1, 2 — центр и периферия массивных ферритных областей с включениями крупных сульфидов (увеличенное изображение областей 1 и 2 получено на электронном микроскопе); 3 — аллотриоморфный феррит по границам литого зерна; 4 — иглы видманштеттова феррита в продольном сечении; 5 — иглы видманштеттова феррита в поперечном сечении; 6 — ферритные иглы

Границы первичного аустенитного зерна, декорированные аллотриоморфным ферритом, содержат мелкие сульфиды марганца, фосфор (до 0,14 %) и кремний (0,34 %), поэтому они также образовались в междендритном пространстве, но сформированном на более ранних этапах затвердевания, видимо, из междендритного пространства второго порядка.

### Выводы

1. Методами количественной металлографии исследована дисперсность и плотность дендритной структуры промышленного непрерывнолитого сляба из стали марки 15. Показано, что дисперсность и плотность разных структурных зон сляба различаются в два и три раза соответственно. Неоднородность дендритной структуры отражает соответствующую ей химическую неоднородность по сечению сляба.

2. Показано отсутствие четкого визуального соответствия между дендритной и литой зеренной структурой. Первичные и вторичные оси дендритов расположены безотносительно границы или тела литого зерна: несколько дендритных осей могут пересекать одно или несколько литых зерен.

3. 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 с умеренным содержанием сегрегаций. Последние сформированы из междендритного пространства более раннего этапа затвердевания, предположительно между осями второго порядка.

4. Установлено, что оси дендритов образованы по механизму ячеистого роста, поэтому неоднородны по структуре. ЧМ

### Библиографический список

1. Флемингс М. Процессы затвердевания / пер. с англ. под ред. А. А. Жукова и Б. В. Рабиновича — М. : Мир, 1977. — 424 с.

2. Ruiz-Aparicio A. MS Evolution in Nb-bearing microalloyed steels produced by the compact strip production process. — University of Pittsburgh, 2004.

3. Кудря А. В., Соколовск я Э. А., Водопьянов Е. А. и др. Совместное влияние разномасштабных структур на колебание качества металлопродукции // Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов. — М. : МИСиС, 2006.

4. Формирование стального слитка : сб. науч. тр. / Академия наук УССР, Институт проблем литья. — М. : Metallurgia, 1986. — 88 с.
5. Хворинов Н. И. Кристаллизация и неоднородность стали. — М. : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1958. — 392 с.
6. Костылев Л. В., Гбельченко Н. И., Ильинский В. А. Исследования факторов, определяющих дисперсность дендритных структур сталей // Металлы. 2008. № 5.
7. Металлография железа. Том III. Кристаллизация и деформация сталей (с атласом микрофотографий) / пер. изд-ва «Металлургия». — М. : 1972. — 236 с.
8. К з ков А. А., Чигинцев Л. С., К з ков Е. И. и др. Методика оценки ликвационной полосы листового проката // Черные металлы. 2009. № 12.
9. Ан ст си ди Г. П., Сильников М. В. Неоднородность и работоспособность стали. — СПб. : ООО «Издательство «Полигон», 2002. — 624 с.
10. Kiessling R. Non-metallic inclusions in steel, Part V. — London. The metals society, 1978. P. 173–177.
11. Лившиц Б. Г. Металлография. — М. : Metallurgizdat, 1963. — 422 с.