

Г. В. Левченко, д-р техн. наук, проф., зав. лаб.

Т. В. Балаханова, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

А. Ю. Борисенко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: asbor@ua.fm

В. В. Мосьпан*, зам. ген. дир.

Ю. Г. Антонов*, нач. техн. упр.

Г. А. Мединский*, зам. нач. техн. отд. техн. упр.

Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, Днепр

*ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат», Каменское

Наследственное влияние дендритной структуры на размер зерна непрерывнолитых заготовок из среднеуглеродистой стали

Показана наследственная связь дендритной и зеренной структуры непрерывнолитых заготовок из среднеуглеродистой стали разных способов производства. Установлено, что от размера дендритов зависит размер зерен аустенита. Неоднородность химического состава аустенита, вызванная дендритной кристаллизацией стали, обуславливает его разные реологические свойства, определяющие способность к фрагментации на зерна под действием внутренних напряжений.

Ключевые слова: сталь, непрерывнолитая заготовка, микроструктура, наследственность.

Актуальность и состояние вопроса исследования. Необходимость изучения наследственного влияния процессов кристаллизации на конечную микроструктуру и свойства литой, горячедеформированной и термически обработанной стали обусловлена постоянно существующей актуальностью повышения ее качества и снижения затрат на производство. Эффективность решения этой задачи зависит от понимания принципов и знания закономерностей осуществления металлургической наследственности, частный случай которой – структурная наследственность в стали [1, 2].

Оставшийся нерешенным вопрос формирования первичного зерна в литой стали и его связи с дендритной структурой, активно изучавшийся в середине XX века [3–6], «наследственно перешел» от проблемы качества слитка к проблеме качества непрерывнолитых заготовок (НЛЗ) [7], производство которых доминирует в современной черной металлургии. Актуальность этого вопроса показывают данные работы [8]. Наблюдая изменение дисперсности и плотности дендритной структуры по сечению непрерывнолитого сляба сечением 250×1200 мм из стали марки 15, ее авторы констатируют, что «...металлографического соответствия между дендритной и литой зеренной структурой нет...». Из этого можно сделать вывод, что дендритная структура НЛЗ не влияет на размер зерна в стали, а следовательно, и ее свойства. Однако практика производства НЛЗ из стали одинакового состава, но по разным технологиям, воздействующим на дендритную структуру, показывает ее значительное влияние на конечную микроструктуру и свойства металлопродукции.

Заготовки из среднеуглеродистой осевой стали марки «ОС» и трубной стали марки «Дтр» имеют практически одинаковый химический состав, но из-за требований к размеру зерна и равномерности перлитно-ферритной микроструктуры, предъявляемых к железнодорожным осям, качество осевых НЛЗ выше, чем трубных. Выполнение этих требований обеспечивается технологией производства стали, которая должна влиять на первичную дендритную и зеренную структуру. Однако данные, наглядно иллюстрирующие связь дендритной и зеренной структуры, отсутствуют.

Цель работы – установление закономерностей наследственной связи дендритной и зеренной структуры в зависимости от технологии производства НЛЗ из среднеуглеродистой стали и объяснение наблюдаемых явлений.

Материал и методика исследования. Исследования выполнены на образцах НЛЗ из среднеуглеродистой стали разных производителей. Условные обозначения исследуемых НЛЗ, их характеристики, завод-производитель и химический состав стали приведены в таблице. Анализ дендритной структуры выполнен на образцах, отобранных от поверхностных зон, 1/4 толщин (диаметра) и центральных участков НЛЗ.

Микроструктуру выявляли традиционным методом травления шлифов в 4%-ном растворе азотной кислоты в этаноле (нитале), а также в горячем растворе пикрата натрия (пикрат), позволяющем по цветовой окраске окисной пленки видеть химическую неоднородность стали, вызванную дендритной ликвацией. Применение двух разных по принципу действия металлографических методов выявления микроструктуры позволило не только сопоставить

Условные обозначения, характеристики и химический состав стали исследуемых НЛЗ

Условное обозначение НЛЗ	Сечение НЛЗ; марка стали; завод-производитель	Площадь сечения НЛЗ, см ²	Содержание химических элементов, %мас.				
			C	Mn	Si	S	P
«А»	∅ 400 мм; осевая «ОС»; ЗАО «Азовэлектросталь»	1256	0,45	0,68	0,22	0,009	0,010
«В»	335×400 мм; осевая «ОС»; ПАО «ДМК»	1340	0,47	0,69	0,29	0,015	0,020
«С»	335×400 мм; трубная «Дтр»; ПАО «ДМК»	1340	0,46	0,71	0,23	0,009	0,280
«D»	350×500 мм; трубная «Дтр»; ПАО «ДМК»	1750	0,48	0,78	0,27	0,019	0,020
«Е»	300×1000 мм; сталь 45; ПАО «АМК»	3000	0,47	0,81	0,29	0,004	0,012

особенности дендритного и зеренного строения стали НЛЗ, но и качественно связать их с дендритной ликвиацией.

Количественный анализ параметров микроструктуры выполнен с помощью системы автоматического анализа изображений «Axio Vision» компании Карл Цейс. Размер дендритов определяли методом случайных секущих при рассеянии не менее 400 элементов дендритной структуры, наблюдаемой при 50-кратном увеличении. Зернами в стали после превращений аустенита считали перлитные участки, окантованные доэвтектоидным ферритом, в предположении, что их размер и форма соответствуют размеру и форме зерен аустенита, вдоль всех границ которого образуется феррит, хотя это условие выполняется не всегда [9]. Средний размер зерен определяли методом случайных секущих 400–500 зерен при 500-кратном увеличении. Количество перлита находили методом площадей. Степень разнотерности стали определяли по отношению среднеквадратичного отклонения к среднему значению размеров зерен.

Результаты исследований и их обсуждение. Исследования показали, что дендритная структура по сечениям НЛЗ «А» и «В» состоит из: мелких неориентированных дендритов – в поверхностных зонах, крупных ориентированных дендритов – на расстояниях 1/4 от поверхностей и крупных неориентированных дендритов – в центральных зонах. В соответствующих участках сечений НЛЗ «С», «D» и «Е» образуются мелкие ориентированные дендриты, крупные ориентированные дендриты и крупные разориентированные дендриты. На рис. 1 приведены микроструктуры НЛЗ «В» и «Е», показывающие типичные случаи дендритного строения по сечениям исследованных НЛЗ. Зависимость размеров дендритов по сечениям НЛЗ приведена на рис. 2, из которого видно, что увеличение сечения НЛЗ от «А» к «D» способствует увеличению размеров дендритов во всех структурных зонах. Наименьший размер дендритов в поперечном сечении наблюдается от поверхности широкой грани к горизонтальной оси слябовой НЛЗ «Е».

На первый взгляд это закономерно, так как скорость кристаллизации стали слябовой НЛЗ с наименьшей толщиной должна быть наиболее интенсивной относительно других НЛЗ. Однако, если сопоставить соотношения размеров сечений НЛЗ «А» – «D» и «Е» с размерами их дендритов, то оказывается, что влияние размера сечения НЛЗ на размер дендри-

тов неоднозначно. Например, наибольшая относительная разница в площадях сечений наблюдается между НЛЗ «Е» и НЛЗ «А» – 58 %. При этом относительная разница между размерами дендритов этих НЛЗ наименьшая и составляет 28, 105 и 12 % соответственно для поверхностной зоны, 1/4 толщины и центральной зоны. Если же сравнить НЛЗ «Е» и «D», то относительная разница между их толщинами равна 17 %, тогда как между размерами дендритов она равна 88, 225 и 126 % для поверхностной зоны, 1/4 толщины и центральной зоны соответственно, являясь наибольшей (см. рис. 2). Неоднозначное влияние размера сечения НЛЗ на размер дендритов видно и из сопоставления НЛЗ «В» и «С», толщины которых одинаковы, а дендритная структура, хотя и незначительно, но отличается. Из этого можно заключить, что на размер дендритов в стали оказывает влияние не сам по себе размер сечения НЛЗ (толщина, диаметр или площадь), а комплекс факторов, среди которых имеют большое значение геометрия НЛЗ, способ производства и условия разлива стали. Последние влияют на конвективные тепловые и гидродинамические потоки жидкой стали, ответственные за образование дендритной структуры. Наименьшая разница в размере дендритов для большинства НЛЗ наблюдается в их поверхностных зонах. Это свидетельствует о близких условиях формирования дендритов в этих случаях.

Визуальная оценка микроструктуры стали показала, что направление роста дендритов, их форма и размер определяют форму и размер зерен по сечениям НЛЗ. В общем случае относительно равноосные зерна окружают равноосные и разориентированные дендриты, а ориентированные («столбчатые») зерна образуются вокруг и вдоль ориентированных дендритов; большему размеру дендритов соответствует больший размер зерен и наоборот.

Поскольку размер зерна и разнотерность аустенита оказывают влияние на конечную микроструктуру и свойства стали, а также в связи с наблюдаемой зависимостью ее дендритного и зеренного строения от способа производства и размера сечения НЛЗ (рис. 2), представляло важным установить влияние размеров дендритов исследуемых НЛЗ на конечную микроструктуру среднеуглеродистой стали, основные характеристики которой – размер зерна и количественное соотношение феррит/перлит. С этой целью и для устранения влияния внешних факторов

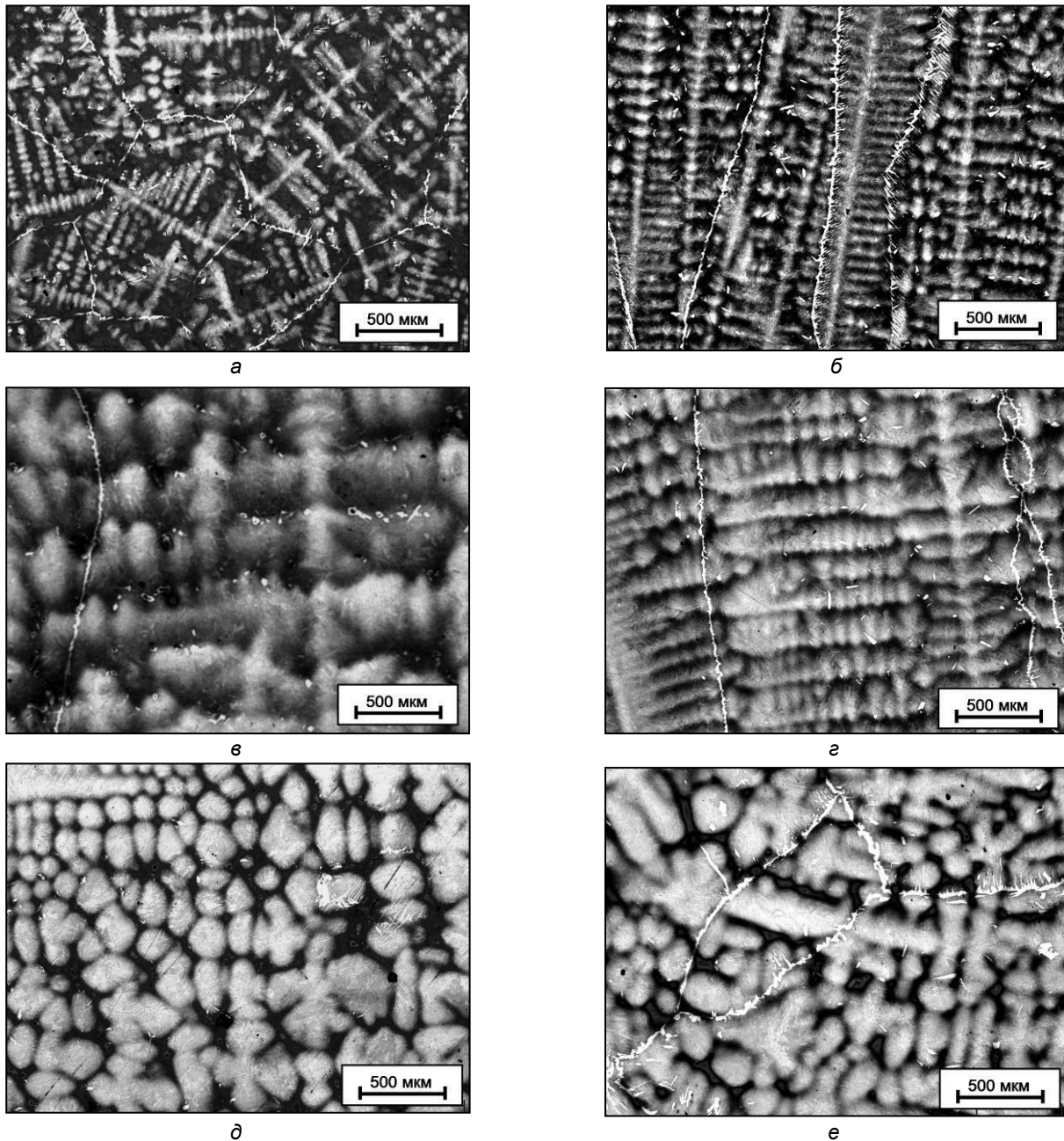


Рис. 1. Дендритное строение НЛЗ «В» (а, в, д) и «Е» (б, г, е) из среднеуглеродистой стали: а, б – поверхностная зона; в, г – на расстоянии 1/4 от краев меньших граней; д, е – центральная зона (травлено пикратом)

на результаты эксперимента были отобраны образцы на расстоянии 1/4 от поверхностей исследуемых НЛЗ. Образцы в одинаковых условиях нагревали до 1200 °С и замедленно охлаждали с печью после выдержки 15 минут. Такой режим термической обработки должен был при одинаковых температурно-временных условиях эксперимента проявить влияние дендритной структуры стали на образование зернового строения аустенита и его влияние на конечную микроструктуру. Использование образцов, отобранных от 1/4 сечений исследуемых НЛЗ, обусловлено отчетливой разницей в размере дендритов, их явной связи с зерненным строением и отсутствием макродефектов в этих зонах.

Анализ микроструктуры полученных образцов показал, что в них после термической обработки формируется полиэдрическое зерненное строение, определяемое по ферритной сетке вдоль бывших границ

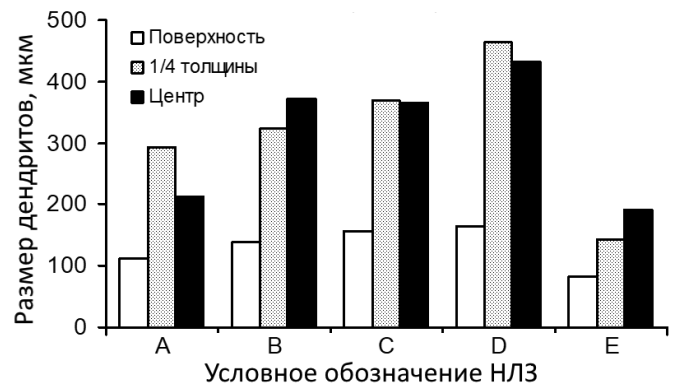


Рис. 2. Размер дендритов среднеуглеродистой стали по сечению НЛЗ

зерен аустенита, внутри которых образуется перлит (рис. 3).

Имеющиеся в литой структуре ориентированные зерна после термической обработки не наблюдаются. Микроструктура образцов разных НЛЗ отличается размером зерен и морфологией доэвтектоидного феррита, которая считается типичной для среднеуглеродистой стали. Причины образования феррита с разной морфологией в среднеуглеродистых сталях одинакового состава и при одинаковых условиях термической обработки в литературе, однако, не обсуждаются [10]. Наибольшее отличие имела микроструктура стали НЛЗ «С» (рис. 3, в), заключающееся в том, что в ней наблюдается максимальное количество феррита (22 % вместо 11–13 %) в виде массивных и часто коротких пластинообразных участков, распространяющихся от границ вглубь зерен. Это существенно искажает очертания границ зерен и не позволило достоверно определить их размер по ферритной сетке. В связи с этим образец НЛЗ «С»

был исключен из сравнения дендритной и зеренной структуры относительно образцов других НЛЗ, но его микроструктура интересна и рассмотрена далее, так как образование существенно большего количества феррита со специфической морфологией свидетельствует о наследственном влиянии на структурообразование стали технологии ее производства.

Результаты измерения размеров зерен и их сопоставления с размерами дендритов показывают тесную корреляционную связь ($r = 0,96$) между собой (рис. 4, а). Можно сделать вывод – от размера дендритов зависит размер зерен аустенита, вдоль границ которых образуется доэвтектоидный феррит, а внутри зерен – перлит. Большему размеру дендритов соответствует больший размер зерна аустенита, меньшая удельная поверхность границ и, как правило, меньшее количество доэвтектоидного феррита (рис. 4, б). Степень разноразмерности НЛЗ «А», «В»,

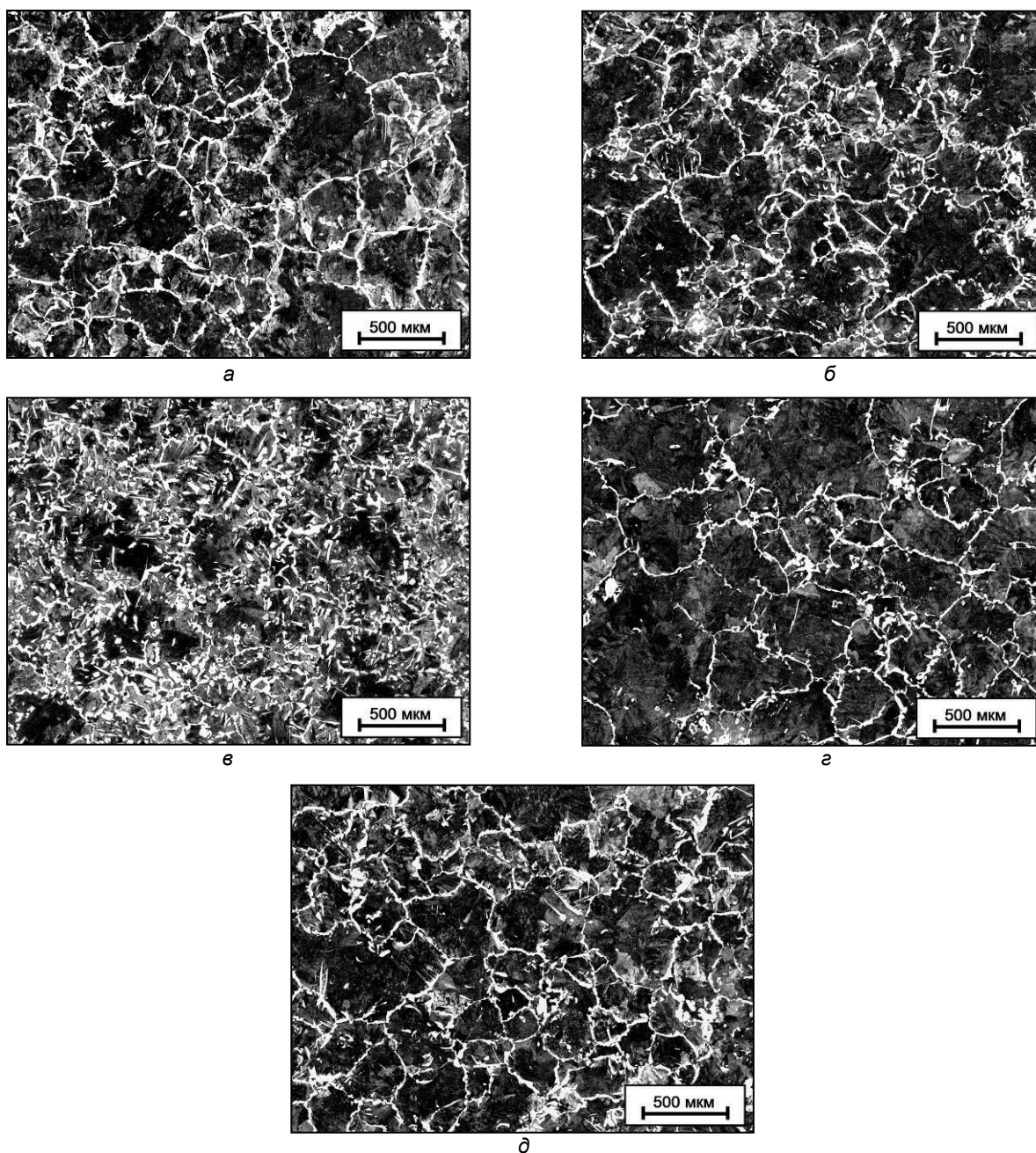


Рис. 3. Микроструктура среднеуглеродистой стали в 1/4 сечения НЛЗ: «А» (а), «В» (б), «С» (в), «D» (д) и «Е» (е) после нагрева до 1200 °С, выдержки и замедленного охлаждения (травлено ниталем)

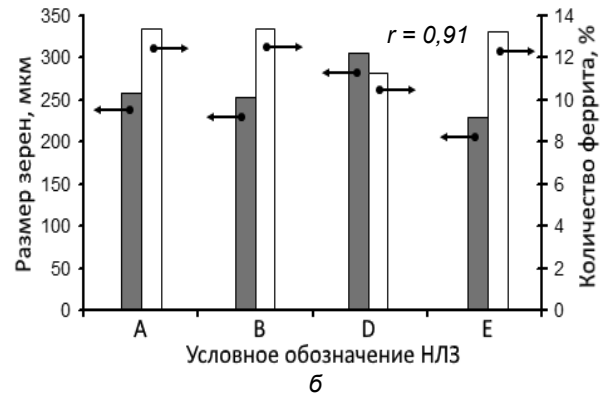
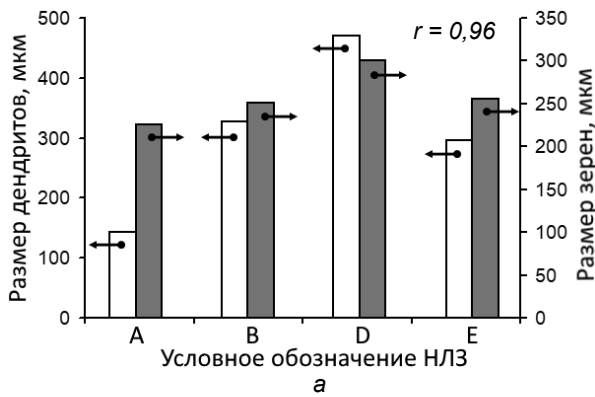


Рис. 4. Зависимость влияния размера дендритов на размер зерен (а) и размера зерен на количество доэвтектоидного феррита (б) в НЛЗ из среднеуглеродистой стали

«D» и «E» соответственно составила: 0,60; 0,59; 0,64 и 0,60.

Причины возникновения наблюдаемых структурных связей следует искать в механизмах образования зерен аустенита в литой стали, а также строении и свойствах границ зерен.

В работе [11] процесс образования зерен в литой стали рассматривается как результат высокотемпературной микропластической деформации первичных твердых растворов δ - или γ -Fe под действием внутренних напряжений, расчетная величина которых близка к пределу прочности и, например, для затвердевающей оболочки прямоугольного непрерывнолитого слитка, по данным работы [12], составляет ≈ 3 МПа. Химическая микронеоднородность δ -феррита или аустенита, связанная с составом и особенностями дендритной кристаллизации стали, обуславливает различия в реологических свойствах осевых и междендритных участков. Поэтому высокотемпературная микропластическая деформация стали приводит к их неодинаковой фрагментации на зерна после кристаллизации. Размер, количество и морфология зерен зависят от кристаллохимической и реологической гетерогенности первичных твердых растворов железа, а также от уровня и равномерности распределения внутренних напряжений. Форма, размер и химический состав дендритов стали при определенных условиях существования внутренне напряженного состояния определяют форму, размер и равномерность образования зерен в объеме отливки, слитка или НЛЗ. Большое значение имеет строение межкристаллитных границ литых металлов и сплавов [6].

На рис. 5, а показана схема, иллюстрирующая гипотетическое распределение дислокаций при образовании межкристаллитной границы в аустените

в зависимости от направления расположения ликвационных участков дендритной структуры. Изменение направления расположения ликвационных участков, затрудняющих скольжение дислокаций, способствует изменению направления образования границы зерна. Разная способность к фрагментации аустенита во внутريدендритных и междендритных ликвационных зонах приводит в дальнейшем к образованию разного количества, формы и состава феррита (рис. 5, б).

Роль напряжений и их равномерности, необходимых для однородной фрагментации разных участков дендритной структуры, показана в ранее выполненных исследованиях влияния горячей пластической деформации (ГПД) на образование зеренной структуры среднеуглеродистых сталей [13, 14]. Установлено, что измельчение зерна в литой стали с 0,59 % С при повышении степени ГПД от 0 до 40...50 % сопровождается выравниванием количества доэвтектоидного феррита, образующегося в междендритных и осевых участках дендритов, при распаде аустенита [13]. Объясняется это тем, что сопротивление деформации осевых участков меньше, чем междендритных из-за большего содержания в последних С, Si, Mn и P. Поэтому деформация до 30 % приводит к фрагментации в первую очередь осевых участков дендритов, в которых образуется больше феррита, чем в междендритных. Увеличение степени деформации способствует росту напряжений, необходимых для фрагментации более прочных ликвационных зон и образования в них феррита, повышая равномерность микроструктуры стали. Однако неравномерная ГПД может отрицательно сказаться на размере зерна и разнотекстурности стали, нивелируя возможность реализации положительного наследственного влияния мелкодендритной структуры. И, наоборот, – равномерная ГПД относительно крупнодендритной

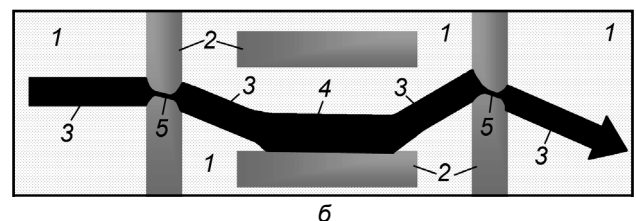
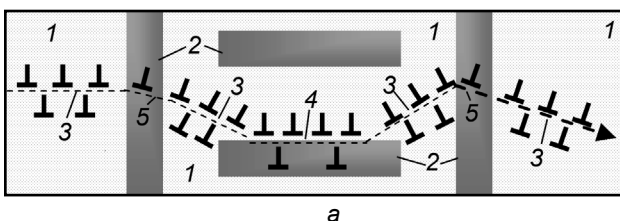


Рис. 5. Схема распространения дислокаций относительно ликвационных участков дендритной структуры при образовании границы зерна аустенита (а) и ее влияние на толщину сетки доэвтектоидного феррита (б): 1 – внутريدендритные участки; 2 – ликвационные междендритные участки; 3–5 – граница зерна с разной морфологией феррита

структуры может способствовать формированию равномерного мелкозернистого строения стали. Подтверждают сказанное данные работы [14], в которой показано, что неравномерность ГПД, обусловленная геометрией НЛЗ «Е», несмотря на исходно благоприятное дендритное строение для формирования равномерной мелкозернистой структуры стали, приводит к значительной неравномерности микроструктуры осевых заготовок, наследственно передающейся железнодорожным осям. В то время как в осевых заготовках и железнодорожных осях из квадратной НЛЗ «В» с более крупной дендритной структурой формируется относительно равномерная микроструктура.

Представленная на рис. 5 схема образования зерна в литой стали позволяет объяснить результаты выполненных исследований. Формирование разориентированных равноосных дендритов предопределяет образование равноосных зерен (рис. 1, а), а образование ориентированных дендритов с протяженными осями первого порядка – зерен, направленных вдоль этих осей (рис. 1, б; рис. 6, а). Связано это с тем, что изменение ориентации дендритов при имеющемся напряженном состоянии меняет направление образования границ зерен в первом случае, а во втором нет. Размер же зерен зависит не только от размеров дендритов, но и от величины и равномерности микропластической деформации под действием релаксирующих напряжений. Поэтому после термической обработки образцов исследованных НЛЗ, которая обеспечила одинаковые условия формирования температурно-напряженного состояния при нагреве, выдержке и охлаждении, четко проявилось

наследственное влияние особенностей дендритной кристаллизации на конечную микроструктуру стали. Образование зерен при одинаковых условиях эксперимента полностью зависело от размеров и формы дендритных ветвей (рис. 6, б).

При посткристаллизационных температурах микропластическая деформация должна быть очень чувствительна к свойствам среды, в которой она осуществляется. В этой связи становится понятным влияние технологии производства стали, обеспечивающей ее разную чистоту по содержанию газов (О, N, H), серы, фосфора, кремния и других химических элементов, которые увеличивают хрупкость железа в твердом состоянии. Важно еще то, что эти элементы влияют на образование как самих дендритов посредством воздействия на свойства жидкой стали, например, вязкость, так и неметаллических включений. Строение межфазной границы между неметаллическими включениями и аустенитом часто стает причиной образования возле них феррита. Поэтому степень чистоты стали по примесям, способ ее раскисления, дегазации и чистота по неметаллическим включениям наследственно влияют на формирование ее первичной и конечной микроструктуры.

Осевая сталь марки «ОС» – это сталь более ответственного назначения, чем трубная сталь марки «Дтр» при фактически одном и том же химическом составе. Поэтому небольшие различия в предельных содержаниях некоторых химических элементов, вакуумирование и особенности раскисления стали марки «ОС» при прочих равных условиях более благоприятно влияют на ее конечную микроструктуру и свой-

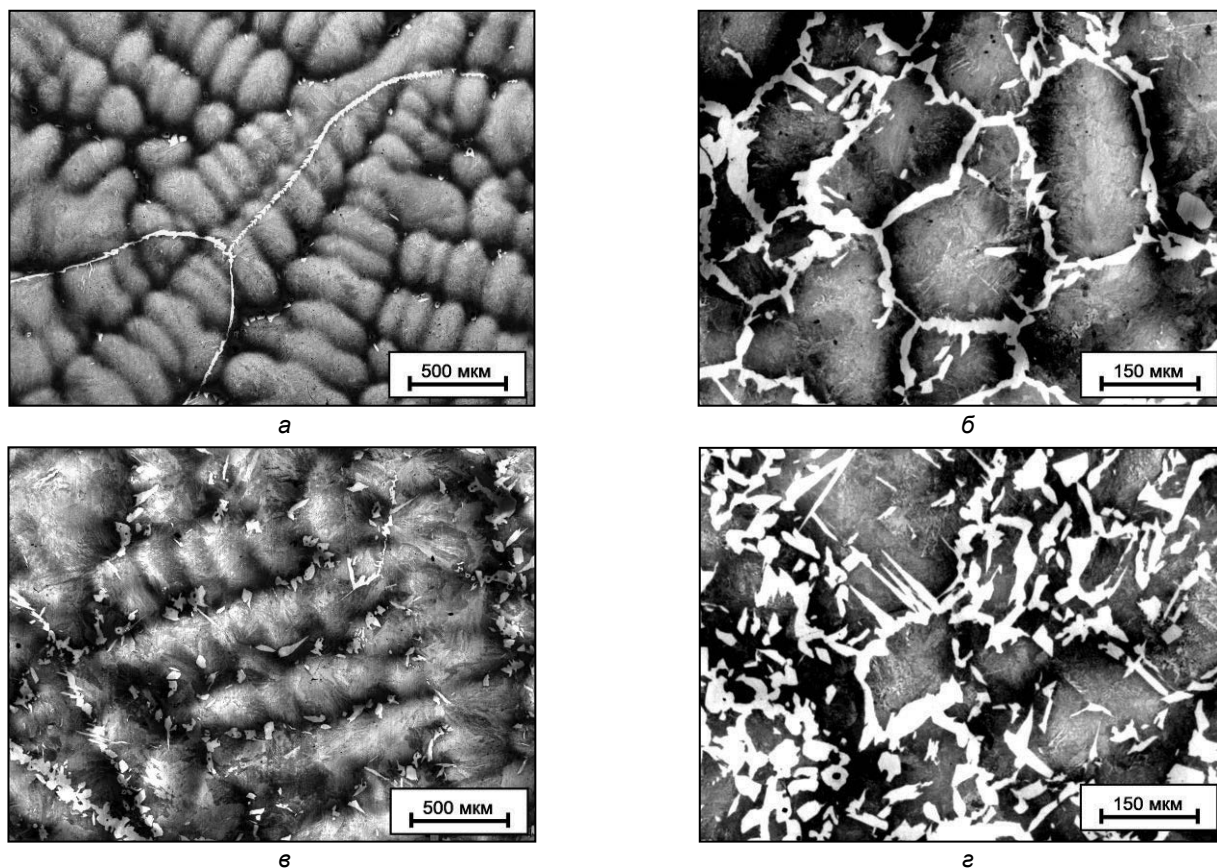


Рис. 6. Микроструктура НЛЗ «А» (а, б) и «С» (в, г) из среднеуглеродистой стали в литом (а, в) и термически обработанном (б, г) состоянии (травлено пикратом)

ства относительно стали марки «Дтр». Вероятно, это и послужило причиной того, что после термической обработки, обеспечивающей одинаковое температурно-напряженное состояние аустенита и условия его превращений, микроструктура образца НЛЗ «С» значительно отличалась от НЛЗ «В». Теоретически, большее содержание газов в стали марки «Дтр», концентрирующихся преимущественно в ликвационных междендритных участках, сильнее их охрупчивают, чем в стали марки «ОС». В результате этого аустенит в междендритных участках стали марки «Дтр» уже в литом состоянии чаще фрагментируется с образованием межкристаллитных границ, от которых образуется большее количество феррита, чем в стали марки «ОС» (рис. 6, а, в). Термическая обработка усилила этот процесс. Повышенная хрупкость ликвационных участков стали марки «Дтр» привела к образованию в них развитой сети межкристаллитных границ, от которых образовалось значительно больше феррита (рис. 6, г). Это же стало причиной повышенной разнотерности стали марки «Дтр». За счет образования мелких зерен в междендритных участках образца НЛЗ «С» степень его разнотерности была наибольшей и составила 0,74. При этом больший размер сечения НЛЗ «D» из той же стали марки «Дтр» благоприятно повлиял на разнотерность, снизив ее до 0,64. Однако тенденция к формированию большей разнотерности в стали марки «Дтр» по сравнению со сталью марки «ОС» сохранилась.

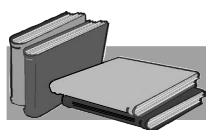
Результаты выполненных исследований косвенно показывают, что вакуумирование – более предпочтительный процесс воздействия на качество стали, чем специальные способы раскисления, необходимые для реализации наследственной связи процессов получения расплава, его дендритной кристаллизации, образования зерен аустенита, превращений в твердом состоянии и формирования конечной ми-

кроструктуры, определяющей свойства. Они также позволяют объяснить данные работы [7], в которой не была установлена видимая связь дендритной и зеренной структуры в непрерывнолитой стали марки 15. Причина этого заключается в выборе для исследования низкоуглеродистой марки стали, малое содержание углерода в которой хуже раскисляет жидкую сталь и упрочняет железо, чем большее содержание углерода в рассмотренных среднеуглеродистых сталях. Следствие этого – естественная значительная фрагментация аустенита литой низкоуглеродистой стали с образованием большого количества феррита, скрывающего действительную картину связи ее дендритной и зеренной структуры, которая, по мнению авторов статьи, должна быть.

Выводы

Форма, размер и химический состав дендритов стали определяют форму, размер и равномерность образования зеренной структуры НЛЗ. Между размером дендритов и размером зерен в НЛЗ из среднеуглеродистой стали разных способов производства существует тесная корреляционная связь ($r = 0,96$).

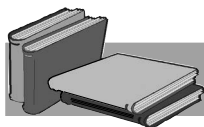
При выборе геометрии и размера сечения непрерывнолитых заготовок для формирования равномерной зеренной структуры стали необходимо учитывать способ ее производства и технологию дальнейшей переработки применительно к конкретному виду металлопродукции.



ЛИТЕРАТУРА

1. Садовский В. Д. Структурная наследственность в стали. – М.: Металлургия, 1973. – 208 с.
2. Кондратюк С. Є. Структуроутворення, спадковість і властивості литої сталі. – К.: Наукова думка, 2010. – 177 с.
3. Бельинский С. В. Исследование литой и ковальной стали. – М.-Свердловск: Машгиз, 1952. – 211 с.
4. Хворинин Н. И. Кристаллизация и неоднородность стали. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностр. лит-ры, 1958. – 392 с.
5. Бутаков Д. К. Технологические основы повышения качества легированной стали для отливок. – М.-Свердловск: Машгиз, 1963. – 192 с.
6. Мовчан Б. А. Границы кристаллитов в литых металлах и сплавах. – К.: Техніка, 1970. – 212 с.
7. Пронов А. П. Кристаллизация стального слитка. – М.: АН СССР, 1960. – 150 с.
8. Казаков А. А., Пахомова О. В., Казакова Е. И. Исследование литой структуры промышленного сляба феррито-перлитной стали // Черные металлы. – 2012. – № 11. – С. 9–15.
9. Малышев К. А., Трубин И. Б. Выявление границ зерен аустенита нагревом в вакууме // Исследования по проблеме зерна стали. Труды Института физики металлов. – 1946. – № 10. – С. 39–43.
10. Металлография железа. Том II. «Структура сталей» (с атласом микрофотографий) / Под. ред. Ф. Н. Тавадзе. – М.: Металлургия, 1972. – 284 с.
11. Борисенко А. Ю. Формирование структурных зон в стальных отливках // Металознавство та термічна обробка металів. – 2014. – № 2. – С. 39–50.
12. Теория непрерывной разливки / Рутес В. С., Аскольдов В. И., Евтеев Д. П. и др. – М.: Металлургия, 1971. – 296 с.

13. Влияние горячей пластической деформации и термической обработки на структуру и механические свойства сталей для железнодорожных колес / Бабаченко А. И., Кононенко А. А., Борисенко А. Ю. и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2012. – Вып. 25. – С. 177–186.
14. Левченко Г. В., Грицай Т. В. Формирование структуры железнодорожных осей, изготовленных из непрерывнолитых заготовок различного сечения // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2012. – Вып. 26. – С. 218–227.



REFERENCES

1. Sadovskii V. D. (1973). Strukturnaia nasledstvennost' v stali [*Structural heredity in steel*]. Moscow: Metallurgiiia, 208 p. [in Russian].
2. Kondratyuk S. Ye. (2010). Strukturoutvorennia, spadkovist' i vlastyvoli lytoi stali [*Structure formation, heredity and properties of cast steel*]. Kiev: Naukova dumka, 177 p. [in Ukrainian].
3. Belinskii S. V. (1952). Issledovanie litoi i kovanoi stali [*Investigation of cast and forged steel*]. Moscow-Sverdlovsk: Mashgiz, 211 p. [in Russian].
4. Khvorinov N. I. (1958). Kristallizatsiia i neodnorodnost' stali [*Crystallization and heterogeneity of steel*]. Moscow: Gos. nauch. – tekhn. izd-vo mashinostr. lit-ry, 392 p. [in Russian].
5. Butakov D. K. (1963). Tekhnologicheskie osnovy povysheniia kachestva legirovanoi stali dlia otlivok [*Technological fundamentals of quality improvement for alloyed steel used for castings*]. Moscow-Sverdlovsk: Mashgiz, 192 p. [in Russian].
6. Movchan B. A. (1970). Granitsy kristallitov v litykh metallakh i splavakh [*Boundaries of crystallites in cast metals and alloys*]. Kiev: Tekhnika, 212 p. [in Russian].
7. Pronov A. P. (1960). Kristallizatsiia stal'nogo slika [*Crystallization of a steel ingot*]. Moscow: AN SSSR, 150 p. [in Russian].
8. Kazakov A. A., Pakhomova O. V., Kazakova E. I. (2012). Issledovanie litoi struktury promyshlennogo sliaba ferrito-perlitnoi stali [*Investigation of cast structure of an industrial ferritic-pearlitic steel slab*]. Chernye metally, no. 11, pp. 9–15 [in Russian].
9. Malyshev K. A., Trubin I. B. (1946). Vyavlenie granits zeren austenita nagrevom v vakuume. Issledovaniia po probleme zerna stali [*Detection of austenite grain boundaries by heating in vacuum*]. Trudy Instituta fiziki metallov, no. 10, pp. 39–43 [in Russian].
10. Metallografiia zheleza. Tom II. "Struktura stali" (s atlasom mikrografii) (1972). [*Metallography of iron. Vol. II. "Structure of steels" (with atlas of microphotographs)*] Ed. by F. N. Tavazde. Moscow: Metallurgiiia. 284 p. [in Russian].
11. Borisenko A. Yu. (2014). Formirovanie strukturnykh zon v stal'nykh otlivkakh [*Formation of structural zones in steel castings*]. Metaloznavstvo ta termichna obrabotka metaliv, no. 2, pp. 39–50 [in Russian].
12. Rutes V. S., Askol'dov V. I., Yevteev D. P. et al. (1971). Teoriia nepreryvnoi razlivki [*Theory of continuous casting*]. Moscow: Metallurgiiia, 296 p. [in Russian].
13. Babachenko A. I., Kononenko A. A., Borisenko A. Yu. et al. (2012). Vliianie goriachei plasticheskoi deformatsii i termicheskoi obrabotki na strukturu i mekhanicheskie svoistva stali dlia zheleznodorozhnykh kolos [*Effect of hot plastic deformation and heat treatment on the structure and mechanical properties of steels for railway wheels*]. Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metallurgii, no. 25, pp. 177–186 [in Russian].
14. Levchenko G. V., Gritsai T. V. (2012). Formirovanie struktury zheleznodorozhnykh osei, izgotovlennykh iz nepreryvno litnykh zagotovok razlichnogo secheniia [*Formation of the structure of railway axes made of continuously cast billets of different cross-sections*]. Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metallurgii, no. 26, pp. 218–227 [in Russian].

Анотація

Левченко Г. В., Балаханова Т. В., Борисенко А. Ю., Мосьпан В. В., Антонов Ю. Г., Мединський Г. О.

Спадковий вплив дендритної структури на розмір зерна безперервнолитих заготовок із середньовуглецевої сталі

Показано спадковий зв'язок дендритної та зеренної структури безперервнолитих заготовок із середньовуглецевої сталі різних способів виробництва. Встановлено, що від розміру дендритів залежить розмір зерен аустеніту. Неоднорідність хімічного складу аустеніту, що викликана дендритною кристалізацією сталі, обумовлює його різні реологічні властивості, які визначають здатність до фрагментації на зерна під дією внутрішніх напружень.

Ключові слова

Сталь, безперервнолита заготовка, мікроструктура, спадковість.

Summary

Levchenko G., Balakhanova T., Borisenko A., Mos'pan V., Antonov Yu., Medinskiy G.
Hereditary relationship of dendritic and grain structure of continuously cast billets made of medium-carbon steel

Hereditary relationship of dendritic and grain structure of continuously cast billets made of medium-carbon steel of different production methods was demonstrated. It was established that sizes of austenite grains depend on the sizes of dendrites. Heterogeneity of chemical composition of austenite, caused by the dendritic crystallization of steel, conditions its different rheological properties, which determine the ability to fragmentation into grains under internal stresses.

Keywords

Steel, continuously cast billet, microstructure, heredity.

Поступила 08.01.18