

Е.Г.Демина, Л.Г.Тубольцев, Г.В.Левченко, С.А.Воробей

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ

Проанализированы основные факторы, снижающие качество исходных заготовок и готового проката, предложены мероприятия по их устранению. Рассмотрены вопросы, связанные с дальнейшим развитием металлургической отрасли Украины.

Перспективы металлургии определяются тенденциями развития мировой экономики в целом. Анализ развития ведущих отраслей промышленности показывает, что сталь была, есть и в обозримой перспективе останется основным конструкционным материалом [1, 2].



Рис. 1. Мировое производство стали (1950-2007 гг)

Качество в металлургии в широком смысле – сложное и относительное понятие. К числу главных требований, предъявляемых к качеству стали, относятся химическая и физическая однородность, минимальное содержание вредных примесей и неметаллических включений, высокое качество поверхности и плотность структуры металла [3]. Качество металлопродукции – характеристика многомерная. Уровень качества металлопродукции определяется, прежде всего, точностью размеров и формы, химическим составом, физико-механическими свойствами и состоянием поверхности. Кроме этого, в понятие качества проката входят требования, обусловленные технологией производства и эксплуатации изготовленных из него изделий и конструкций, – штампуемость, свариваемость, прокаливаемость, хладостойкость, коррозионная стойкость, стойкость к старению

и многие другие. Качество металлопроката определяют также требования к его товарному виду – упаковке и маркировке. Прокат оказывается непригодным, если не выполняется лишь одна из многих норм, установленных стандартами. Выполнение почти каждой из них зависит не только от одного агрегата или режима, а требует анализа и совершенствования технологии на всех этапах металлургического производства.

Качество металлопродукции и экономические показатели сталеплавильного производства определяют процессы передела жидкой стали в слитки и заготовки. Несовершенство отдельных элементов технологии выплавки, разливки и кристаллизации стали приводят к образованию дефектов металла, а отсутствие достаточно полных знаний о природе возникновения некоторых из них весьма усложняет разработку оптимальных технологий производства [4,5]. Потому одной из важнейших задач, стоящих перед отечественными металлургами сегодня в условиях рыночной экономики и жёсткой конкуренции, является обеспечение потребителей прокатом по качеству, не уступающему зарубежным аналогам, а основным направлением развития металлургии Украины сегодня следует считать ввод новых мощностей и совершенствование технологии производства, позволяющих существенно повысить качество металлопродукции.

Рассмотрим причины образования основных дефектов исходного металла и возможные мероприятия по их устранению.

Для потребителя важным показателем качества проката являются его конечные механические, технологические и эксплуатационные свойства, удовлетворяющие установленным требованиям. Обеспечение этих требований определяется двумя основными факторами – состоянием исходного металла и технологией его обработки в прокатных цехах.

Качество готового проката в значительной степени зависит от исходного состояния слитка или непрерывнолитой заготовки (НЛЗ), в структуре которых должны отсутствовать или быть минимальными следующие основные виды дефектов:

- несплошности строения (различные виды трещин, поры, рыхлости, пустоты и т.п.);
- неоднородность состава на макро– и микроуровне (зональная и дендритная ликвация);
- состав, размер, форма и неравномерность распределения неметаллических включений.

Изучение трещин в литых заготовках показало [6], что наружные и внутренние трещины имеют одинаковую природу. Они относятся к горячим (кристаллизационным) трещинам (рис. 2), располагаются в междендритных участках и возникают в «эффективном» интервале кристаллизации, когда механические свойства отливки низкие и неоднородны по сечению [7, 8].

Этот наиболее распространённый дефект литой заготовки появляется при отклонениях от установленного технологического режима разливки

стали, в частности при недостаточно обоснованных режимах интенсификации разливки в изложницы, а также при отработке новых технологических процессов. Непрерывная разливка стали отличается от разливки в изложницы более интенсивным охлаждением затвердевающего слитка, что в сочетании со специфическими требованиями к его профилю и размерам (например, необходимостью отливки слитков с 10–кратным отношением широких граней к узким) сделали горячие трещины таким опасным дефектом.

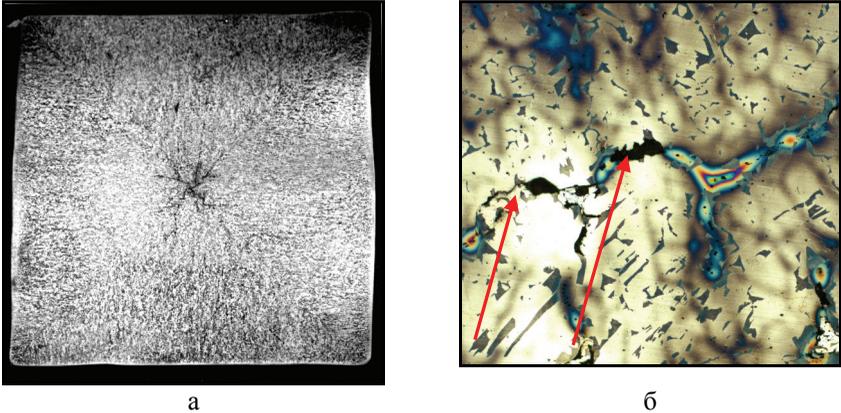


Рис. 2. Трещины в непрерывнолитых заготовках:
 а – 125 × 125 мм, сталь 1005 (0,03%С), × 0,4; б – 335 × 400 мм, сталь 09Г2С (центр), × 100

Трещиноустойчивость стали зависит от технологии выплавки, разливки и механизма кристаллизации. Основными факторами, вызывающими образование горячих трещин в НЛЗ являются: скорость и температура литья; конструкция (конусность) кристаллизатора; режимы вторичного охлаждения; химический состав стали (% С, S, Mn) [9]. Каждый из них в определённой степени вызывает появление разного рода напряжений: усадочных, термических, а также напряжений, возникающих при механическом воздействии на не полностью затвердевший слиток и в результате фазовых превращений. В общем случае трещина может образоваться, когда действующие напряжения окажутся выше прочностных и пластических характеристик металла.

Для предотвращения образования горячих трещин скорость и температура литья, конусность кристаллизатора и режимы вторичного охлаждения должны выбираться в определённом соответствии с учётом технологических особенностей машины непрерывного литья, химического состава стали, величины усадки заготовки и т.п., чтобы при затвердевании заготовки создать условия, которые обеспечат формирование равномер-

ной растущей оболочки по периметру слитка и сведут к минимуму образование растягивающих напряжений по его сечению (применение мягкого режима вторичного охлаждения в конце затвердевания и исключение возможности разогрева поверхности слитка; использование жёсткой системы поддерживающих устройств).

Оптимизация химического состава стали – самый доступный, не требующий кардинальных изменений в технологии непрерывной разливки, способ получения качественного слитка и заготовки. Склонность непрерывнолитой заготовки к образованию данного вида дефекта в первую очередь определяется содержанием углерода, серы и марганца.

Известно, что стали с содержанием углерода 0,10–0,18 % в виду особенностей механизма перитектической $\delta\text{-Fe} + \text{Ж} \rightarrow \gamma$ кристаллизации являются наиболее чувствительными к образованию данного дефекта. Структура аустенита в этих сталях образуется, в основном, в результате высокотемпературного полиморфного $\delta \rightarrow \gamma$ превращения, которое начинается в области твёрдо–жидкого состояния и сопровождается резким уменьшением объёма стали. В момент окончания затвердевания происходит увеличение усадки, дополнительно к усадке затвердевания и, таким образом, создаются особенно благоприятные условия для образования трещин [7]. За счёт того, что температурный интервал кристаллизации в этих сталях узкий, остаточной жидкости мало. Её кинематическая вязкость велика, что не даёт ей возможности быстро передвигаться и «залечивать» микроразрывы, пустоты и поры [10, 11]. При увеличении содержания углерода (0,18–0,50 %) в перитектической области последний этап кристаллизации $\text{Ж}_{\text{ост.}} \rightarrow \gamma$ является преобладающим в формировании структуры аустенита. Риск резкого возрастания усадки, обусловленной $\delta \rightarrow \gamma$ превращением, снижается. Количество $\text{Ж}_{\text{ост.}}$, образующей непрерывные плёнки вокруг дендритных ветвей и обогащённой легирующими и примесными элементами, повышается, а её кинематическая вязкость понижается [11]. К моменту срастания кристаллического каркаса жидкий расплав и ячейки скелета имеют хорошее сообщение между собой, и, если образуется микроразрыв, то оставшаяся жидкость способна быстро его залечить. Поэтому, чтобы чувствительность к образованию данного дефекта была невысокой, нужно выбирать состав стали по углероду, находящийся по возможности дальше от точки I (диаграмма Fe–C) или уменьшить количество δ -феррита в данной стали увеличением содержания γ -стабилизирующего элемента, например марганца [12].

На поражённость слитков горячими трещинами, кроме углерода, значительное влияние оказывает сера. Её вредное влияние объясняется возможностью продолжительного существования жидких прослоек в структуре стали, которое значительно увеличивается, если образуются какие-либо легкоплавкие соединения, понижающие пластичность и температуру реального солидуса. Образовавшиеся в этих прослойках сульфиды располагаются строчками (рис. 3, а). Это негативно отражается на трещино-

устойчивости стали [6, 7, 13–15]. Для получения качественных слитков необходимо иметь сталь с низким содержанием серы или создавать в процессе выплавки стали условия для образования на ранних стадиях затвердевания сульфидов в виде тугоплавких глобулярных неметаллических включений.

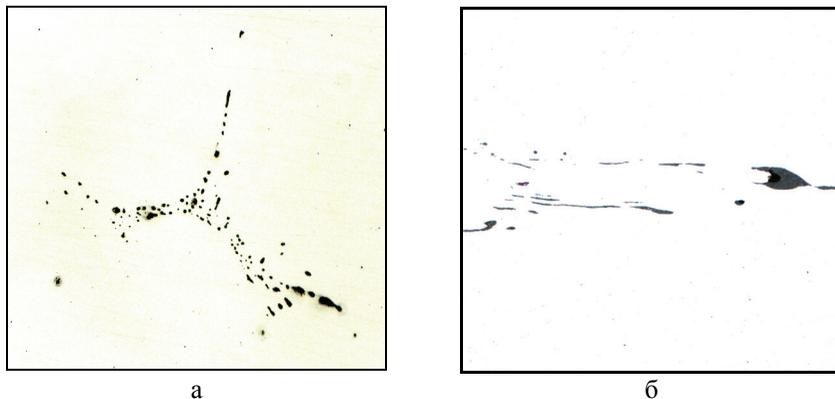


Рис. 3. Неметаллические включения в НЛЗ 335 × 400 мм (а) и в трубной заготовке Ø 180 мм (б) из стали 09Г2С, × 500

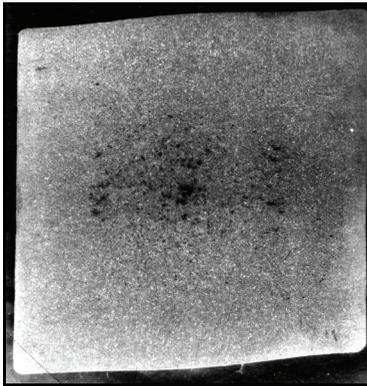
В работах [16–19] показано, что поставленные требования можно выполнить введением в сталь редкоземельных элементов или увеличением содержания остаточного алюминия до 0,15 % масс. Однако данные мероприятия не могут быть рекомендованы для широкого применения из-за трудностей в процессе разливки (образования корки на зеркале металла в кристаллизаторе, интенсивного затягивания стакана, частых прожиганий, нарушений организации струи) и плохой поверхности литых слябов (с заворотами и большим количеством шлаковых включений). Кроме того, отмечается большой угар дорогих редкоземельных элементов.

В то же время, чем больше марганца при определённом содержании серы, тем больше доля тугоплавкого сульфида марганца $MnS \cdot FeS$ в сульфидных включениях. При отливке в изложницы слитков листовой стали склонность к образованию трещин возрастает при отношении Mn/S ниже 24 [20]. Для разливки металла непрерывным способом в широкие слябы отношение Mn/S должно быть выше 21–28 [21–23].

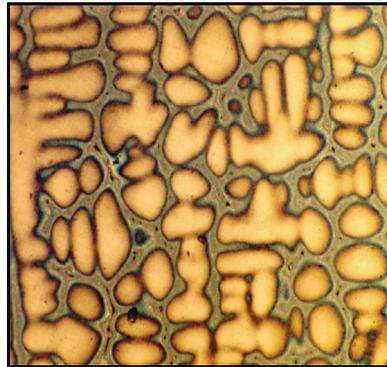
При исследовании влияния технологии выплавки стали с повышенным содержанием марганца (0,20–0,30 %) в мартеновской печи в период чистого кипения и в конверторе было установлено [24], что количество трещин было наименьшим у слитков из кислородно-конвертерной стали, выплавленной на марганцовистом чугуна. Продольных наружных трещин в слитках данных плавок было в 3,5 раза меньше, чем в плавках, выплав-

ленных на маломарганцовистом чугуне, и в 2,5 раза меньше, чем у слитков из мартеновских плавов, проведенных при низком содержании марганца по ходу кипения и раскиленных малым количеством алюминия. Таким образом, увеличение содержания марганца по ходу плавки и к концу периода чистого кипения оказывает положительное влияние на устойчивость стали против образования горячих трещин при температурах в районе солидуса, не требует значительных изменений в технологии выплавки, не повышает её стоимости и не портит поверхности.

Зональная ликвация (рис. 4, а) зависит от химического состава стали, скорости затвердевания и направления теплоотвода при кристаллизации (размеров, формы слитков или НЛЗ) и достигает иногда больших значений [17]. Её развитие приводит к структурной неоднородности не только в горячекатаном, но и в термообработанном прокате [25]. Это может существенно отразиться на свойствах проката в состоянии поставки и понизить служебную надёжность изготовленных из него изделий. Для снижения уровня зональной ликвации **на сталеплавильном переделе** применяются различные способы. В частности, для предотвращения осевой ликвации серы наиболее эффективно введение в сталь кальция или редкоземельных элементов (РЗМ), а также электромагнитное перемешивание при непрерывной разливке.



а



б

Рис. 4. Зональная ликвация (а, $\times 0,4$) и дендритная ликвация (б, $\times 100$) в стали 65

Главные факторы, определяющие величину дендритной ликвации (рис. 4, б) – скорость фронта кристаллизации и градиент температуры на этом фронте. От поверхности к оси слитка градиент температуры убывает и расстояние между осями дендритов (λ) растёт. Чем меньше дендриты, тем короче путь диффузионного перераспределения примеси, тем меньше неоднородность состава [26–29]. Дендритная неоднородность сохраняется

и в прокате, в структуре которого она представляет собой полосы с различным содержанием легирующих элементов. Это создаёт разницу в критической скорости охлаждения аустенита, отчего при охлаждении проката с постоянной скоростью может образоваться полосчатая структура. В наиболее широко производимых углеродистых и низколегированных сталях это феррито–перлитная полосчатость, которая приводит к анизотропии пластичности, вязкости стали и недопустимому снижению эксплуатационных или технологических свойств проката.

Как показали исследования [30–32], реальные температурно–временные условия нагрева слитков и заготовок перед прокаткой не позволяют в достаточной мере гомогенизировать сталь и устранить полосчатость структуры проката. Гомогенизирующий отжиг слитков дорог и обычно малоэффективен. Поэтому уменьшение полосчатости структуры и анизотропии свойств проката можно достичь только снижением степени дендритной ликвации, начиная с расплава, т.е. с изменения его состояния перед кристаллизацией: введением малых частиц твёрдых примесей (модифицированием) создать новые центры кристаллизации или, увеличив скорость кристаллизации (уменьшив сечение НЛЗ), измельчить дендриты.

Неметаллические включения – составляющие структуры, во многом определяющие качество проката, которое зависит не столько от общего количества включений, сколько от их размера, формы и однородности расположения в прокате [33–35]. Они ухудшают многие свойства готового проката, особенно технологические и эксплуатационные, поскольку неметаллические включения разрушаются легче, чем основной металл или разрушение происходит по поверхности раздела металл / включение [34]. Особенно вредна вытянутость включений (силикатов и сульфидов) в прокате (рис. 3, б). Строчечные включения понижают пластичность в поперечных образцах и делают сталь анизотропной.

В реальных производственных условиях снизить негативное влияние неметаллических включений на свойства проката и обеспечить его качество на требуемом стандартами уровне можно в основном на стадии сталеплавильного передела двумя путями: снижением общего содержания серы либо модифицированием стали для глобуляризации включений и устранения их строчечности.

Таким образом, исходное состояние материала, которое определяется особенностями строения и спецификой кристаллизации слитка, должно обеспечить минимальную отбраковку металлопродукции и максимальный выход годного.

Структура готового проката, кроме исходного состояния, в значительной мере определяется технологией его производства на последующих переделах. Свойства массовых видов проката из углеродистых и низколегированных сталей зависят от следующих параметров микроструктуры: размера зерна, типа и распределения дисперсных упрочняющих частиц карбонитридов, морфологии, распределения неметаллических вклю-

чений и структурных составляющих. Получить готовый прокат, соответствующий требованиям, предъявляемым стандартами и техническими условиями, на данной стадии производства позволит только строгое соблюдение режимов деформационных, деформационно–термических и термических обработок (в зависимости от вида и назначения продукции).

В дополнение к этому более половины всех претензий потребителей к качеству металлопродукции связаны с явными или скрытыми дефектами поверхности, формирование которой происходит на всех металлургических переделах, включающих выплавку стали, её разливку в изложницы или на МНЛЗ, кристаллизацию, нагрев и деформацию, охлаждение, термообработку и др. (рис. 5) [36].

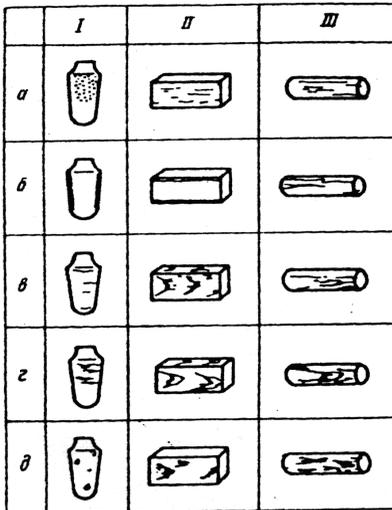


Рис. 5. Схематическое изображение некоторых поверхностных дефектов на слитке (I), блюме (II) и сортовом прокате (III): а – газовые пузыри, б – трещины напряжения продольные, в – трещины напряжения поперечные, г – корочка, д – экзогенные неметаллические включения

При этом основными источниками образования различных дефектов поверхности проката являются сталеплавильное и прокатное производство металлургического предприятия. Качество поверхности проката, полученного из слитков непрерывной разливки, по мнению большинства исследователей, не уступает качеству проката, полученного из обычных слитков, а во многих случаях и превосходит его [37]. Однако, поверхностные дефекты снижают качество поверхности проката, а в некоторых случаях приводят к его отбраковке. Поэтому их удаляют зачисткой в технологическом потоке на всех стадиях его производства. Несмотря на значительный объём зачистки металла, некоторые дефекты поверхности проката (слиточная пленка, раскатанный пузырь, расслоение и др.) исправлению не подлежат [38].

Качество макроструктуры проката, как отмечено выше, зависит от степени развития в ней усадочных пороков и осевой ликвации, а также

внутренних горячих трещин. На рис. 6 показано изменение внешнего вида кристаллизационной трещины в процессе прокатки.

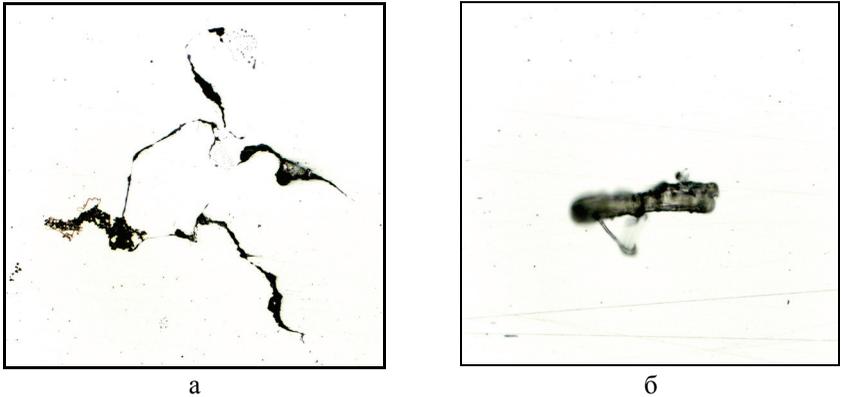


Рис. 6. Внутренние трещины в НЛЗ 335 × 400 мм (а, – × 100) и в трубной заготовке Ø 180 мм (б – × 250) из стали 09Г2С.

Для полного заваривания осевой пористости и внутренних горячих трещин в слитках квадратного и близких к нему профилей слитков из углеродистой и легированной конструкционной стали достаточно коэффициента вытяжки 4–5 [39,40]. При выполнении указанных требований механические свойства проката из слитков непрерывной разливки либо такие же, либо несколько превосходят механические свойства металла, прокатанного из обычных слитков. Но в отдельных случаях при значительном развитии ликвационных явлений и осевой пористости в металле наблюдается снижение усталостных характеристик [37].

Подводя черту под вышесказанным, отметим, что высокое качество проката наиболее эффективно обеспечивается мерами предупредительно-го характера в условиях конкретного металлургического предприятия, а не применением различных способов исправления существующих дефектов. Поэтому для получения конкурентоспособной металлопродукции необходимым условием является определение оптимальных параметров выплавки, разливки и кристаллизации с целью улучшения строения исходной заготовки.

Из анализа рассмотренных выше вопросов вытекают два основных вывода:

1. Научный. Изучение процессов, происходящих на стадии сталеплавильного производства, т.е. в строении жидкой стали и при её кристаллизации, позволит определить главное звено в цепи наследственной связи между литой (дендритной) структурой и структурой готового проката. Данный вывод подтверждается в работах Баума Б.А. и Шпака А. П. («Свойства металлических материалов в твёрдом состоянии во многом

определяются предысторией их получения из жидкого состояния», [41,42]). Это позволит расширить теоретическую базу по вопросам структурообразования чёрных металлов и повысить качество металлопродукции.

2. Практический. Для того, чтобы металлургическая промышленность Украины смогла избежать кризиса и в обозримой перспективе прочно заняла свою нишу на мировом рынке, политика металлургических предприятий должна быть сориентирована не только на получение и повышение прибыли имеющимися производственными мощностями, но и на их будущее развитие, внедрение передовых технологий и научных разработок.

1. *Хоугарди Х.П.* Будущее развитие стали // Чёрные металлы. – 1999, август. – С. 51–57.
2. *Кольб Ю.* Сталь завтрашнего дня // Чёрные металлы. – 2002, август. – С. 46–54.
3. *Процессы* разливки стали и качество слитка: // Сб. науч. тр. АН УССР. – Ин-т проблем литья. – Киев, 1989. – 192 с.
4. *Сталь* на рубеже столетий. Колл. авторов под научной редакцией Ю.С. Карабасова. – М.: МИСИС, 2001. – 664 с.
5. *Сучасні проблеми металургії* // Матеріали науково–практичної конференції «Проблеми і перспективи одержання конкурентноздатної продукції в гірничо–металургійному комплексі України» (24–25.10.2000 р.). Том 3 – Дніпропетровськ: «Системні технології», 2001. – 544 с.
6. *Лапотышкин Н.М., Лейтес А.В.* Трещины в стальных слитках. – М.: Металлургия, 1969. – 110 с.
7. *Рыжиков А.А.* Теоретические основы литейного производства. – Москва–Свердловск: Государственное научно–техническое издательство машиностроительной литературы, 1961. – 446 с.
8. *Куклев А.В.* Изучение структурных механизмов образования трещин в непрерывнолитых слябах // Сталь. – 2004. – № 10. – С. 70–75.
9. *Яух Р.* Качество непрерывнолитых заготовок // Чёрные металлы. – 1978. – № 6–7. – С. 20–30.
10. *Арсентьев П.П., Филиппов С.И.* Вязкостная активность примесей в жидком железе // Проблемы стального слитка. – М.: Металлургия, 1974. – С. 245–255.
11. *Арсентьев П.П., Коледов Л.А.* Металлические расплавы и их свойства. – М.: Металлургия, 1976. – 286 с.
12. *Дёмина Е.Г., Левченко Г.В., Грицай Т.В.* Влияние углерода, кремния и марганца на морфологию дендритной структуры конструкционных сталей перитектического типа // Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии. – Днепропетровск: ИЧМ. – 2005. – Вып. 10. – С. 223–231.
13. *Бидуля П.Н.* Технология литейного производства. – М.: Металлургиздат, 1956. – 614 с.
14. *Горшков А.А.* Уральское отделение научного инженерно–технического общества литейщиков. – М.: Машгиз, 1950. – 36 с.

15. *Андерсон С. и др.* // Проблемы современной металлургии. – 1955. – № 2. – С. 117.
16. *Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г.* Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. – М.: Металлургия, 1986. – 272 с.
17. *Ефимов В.А.* Стальной слиток. – М.: Металлургиздат, 1961. – 356 с.
18. *Кейз С.Л., Ван-Горн К.Р.* Аллюминий в чугуне и стали. М.: Металлургиздат, 1959.
19. *Гольдштейн Я.Е.* Микролегирование чугуна и стали. – Москва–Свердловск: Государственное научно–техническое издательство машиностроительной литературы, 1959. – 197 с.
20. *Ефимов В.А.* Теоретические основы разливки стали. – К.: АН УССР, 1960. – 179 с.
21. *Морозенский Л.И., Митенев О.А., Крутиков В.К.* К вопросу о горячих продольных трещинах на непрерывных литых слабах // Сталь. – 1965. – № 4. – С. 312–317.
22. *Мдчедлишвили В.А., Любимова Г.А., Самарин А.М.* Роль марганца в устранении вредного влияния серы на качество стали. – М.: Металлургиздат, 1960. – С. 25–34.
23. *Ray S.Kr., Patwari K, Ray A.Kr.* Influence of Mn/S ratio casting speed on off-corner cracking of billet // Steel Times International. – 2006. – April. – P. 20–21.
24. *Генкин В.Я., Рутес В.С., Эпитейн Э.Д.* // Бюлл. ЦИИИ ЧМ. – 1965. – № 24. – С. 11.
25. *Бернштейн М.Л., Займовский В.А., Капусткина Л.М.* Термомеханическая обработка стали. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.
26. *Флемингс М.* Процессы затвердевания. – М.: Мир, 1977. – 424 с.
27. *Малиночка Я.Н., Духин А.И., Русин Е.Н.* Влияние скорости охлаждения и переохлаждения расплава на разветвлённость образующихся дендритов // Чёрная металлургия. Наука–технология–производство. – М.: Металлургия, 1970. – Вып. 8. – С. 131–135.
28. *Siziki A, Nagaoka J.* Морфология дендритов и расстояния между ветвями дендритов в сталях // J. Jap.I Met. – 1969. – vol. 23. – № 6. – P. 1523–1532.
29. *Кондратюк С.С., Стоянова О.М.* Структуроутворення сталі в залежності від умов кристалізації виливків // Металознавство та обробка металів. – 1999. – № 1–2. – С. 3–10.
30. *Голиков И.Н., Масленков О.Б.* Дендритная ликвация в сталях и сплавах. – М.: Металлургия, 1977. – 224 с.
31. *Еришов Г.С., Позняк Л.А.* Микронеоднородность металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1985. – 213 с.
32. *Левченко Г.В., Дьоміна К.Г., Грушко П.Д.* Вплив умов кристалізації на спадкоємну концентраційну мікро неоднорідність і механічні властивості гарячекатаного прокату // Металознавство та обробка металів. – 2005. – № 1. – С. 9–14.
33. *Бельченко Г.И., Губенко С.И.* Неметаллические включения и качество стали. – К.: Техника, 1980. – 168 с.
34. *Губенко С.И.* Особенности процессов локального разрушения вблизи неметаллических включений // Новини науки Придніпров'я. – 2002. – № 1–2. – С. 75–84.
35. *Губенко С.И., Парусов В.В., Деревянченко В.И.* Неметаллические включения в стали. – Днепрпетровск: АРТ–ПРЕСС, 2005. – 536 с.

36. *Дефекты стальных слитков и проката: справочное издание* // В.В.Правосудович, В.П.Сокуренок, В.Н.Данченко и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. 384 с.
37. *Сладкоштитев В.Т., Ахтырский В.И., Потанин Р.В.* Качество стали при непрерывной разливке. – М.: Metallurgy, 1964. – 174 с.
38. *Повышение качества поверхности металла.* / А.М.Строганов, Г.А. Хасин, А.Н. Черненко и др. – М.: Metallurgy, 1985. – 128 с.
39. *Бойченко М.С., Рутес В.С., Фульмайт В.В.* Непрерывная разливка стали. – М.: Metallurgizdat, 1957. – 238 с.
40. *Рутес В.С., Николаев Н.А., Ахтырский В.И.* Образование внутренних дефектов в квадратных слитках при непрерывной разливке // *Сталь*. – 1960. – № 3. – С. 212–215.
41. *Жидкая сталь.* / Б.А.Баум, Г.А.Хасин, Г.В.Тягунов и др. – М.: Metallurgy, 1984. – 208 с.
42. *Шпак А.П., Мельник А.Б.* Микронеоднородное строение неупорядоченных металлических систем. – К.: Академперодика, 2005. – 324 с.

Статья рекомендована к печати канд.техн.наук В.С.Лучкиным