



УДК 669.15

Поступила 26.12.2016

ВЛИЯНИЕ МАКРОСТРУКТУРЫ НА ЛИКВАЦИЮ В СТАЛЬНОМ СЛИТКЕ INFLUENCE OF THE MACROSTRUCTURE ON SEGREGATION OF THE STEEL INGOT

*О. С. КОМАРОВ, Е. В. РОЗЕНБЕРГ, Н. И. УРБАНОВИЧ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: komarov_metolit@tut.by,
К. Э. БАРАНОВСКИЙ, ГП «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник», г. Минск, Беларусь, Я. Коласа, 24*

*O. S. KOMAROV, E. V. ROZENBERG, N. I. URBANOVICH, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: komarov_metolit@tut.by,
K. E. BARANOWSKI, Scientific and Technological Park of the BNTU «Polytechnic», Minsk, Belarus, 24, Kolasa str.*

Проведен теоретический анализ влияния содержания углерода в стали и характера макроструктуры на ликвацию примесей в процессе кристаллизации. Показано, что с увеличением содержания углерода и при образовании транскристаллитной макроструктуры растет степень сегрегации. Проведено сравнение ликвации серы в слитке с равноосной и транскристаллитной структурой, подтвердившее теоретические положения.

A theoretical analysis of the influence of carbon content in the steel and nature of macrostructure on segregation of impurities in the crystallization process were made. It is shown that increase of carbon content and transgranular macrostructure creation degree of segregation is being increased. A comparison of sulfur segregation in the ingot with equiaxial and transgranular structure was carried out and the theoretical points were confirmed.

Ключевые слова. Модифицирование стали, внепечная обработка, транскристаллитная структура, равноосная структура, ликвация примесей, сера, кристаллизация.

Keywords. Modification of steel, ladle treatment, transgranular structure, equiaxial structure, segregation of impurities, sulfur, crystallization.

В практике производства стальных слитков и крупных отливок часто сталкиваются с явлением транскристаллизации, при котором дендриты растут направленно: от поверхности к термическому центру. На ширину зоны столбчатых кристаллов влияют скорость теплоотвода, природа и химический состав, а также модифицирование стали. При установленном технологическом процессе производства и фиксированном составе стали основным фактором ликвидации транскристаллизации и измельчения первичной структуры служит модифицирование. Разработано большое количество комбинаций различных элементов, способствующих измельчению размеров дендритов. В работе [1] наблюдали резкое уменьшение размеров дендритов при совместной добавке кальция и бария. При этом происходило увеличение содержания серы в их центральных частях, т. е. наблюдалось уменьшение сегрегации серы на поверхность дендритов. Аналогичная картина наблюдается и при модифицировании стали редкоземельными элементами [2]. Авторы считают, что эти элементы, связывая часть серы в прочные тугоплавкие соединения, снижают ее концентрацию перед фронтом кристаллизации.

Особенно эффективно устраняется транскристаллизация при использовании комплексного модификатора, в состав которого входят химически активные элементы (Ca, Al), поверхностно-активный висмут и карбидообразующий бор [3, 4]. Совместное действие различных по своим свойствам элементов усиливает эффект, получаемый при введении в сталь каждого из них в отдельности. В то время как химически-активные и карбидообразующие элементы создают подложки для образования центров кристаллизации, поверхностно-активный компонент, замедляя их рост в зоне концентрационного переохлаждения, и тем самым, увеличивая переохлаждение, способствует зарождению новых центров.

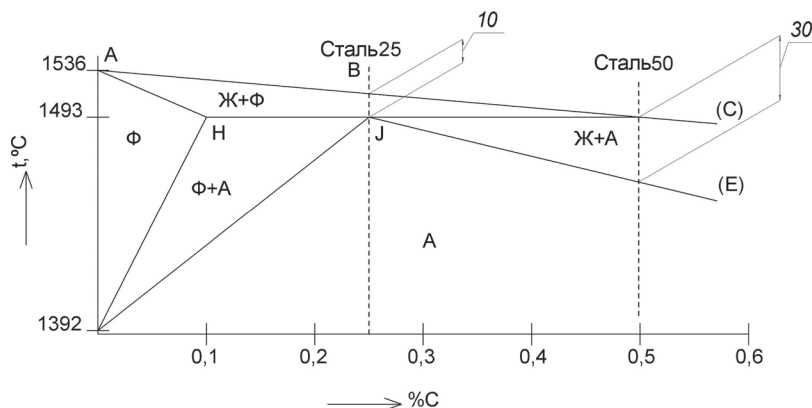


Рис. 1. Часть диаграммы Fe-C

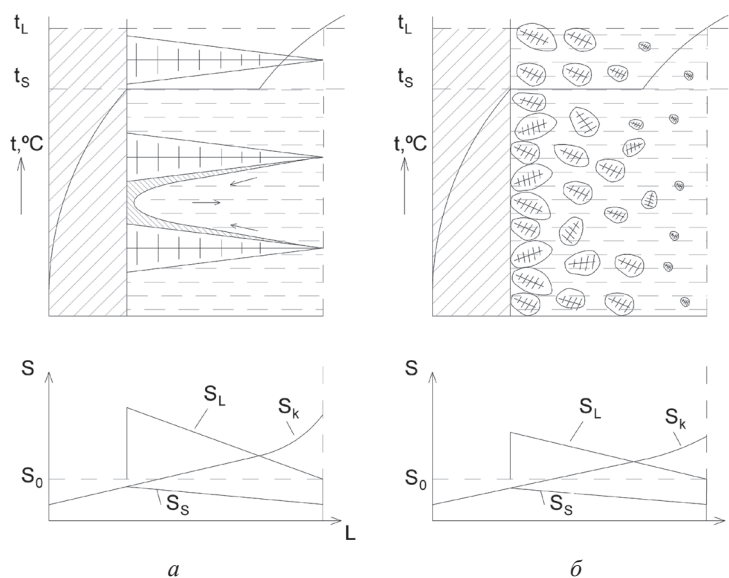


Рис. 2. Схема образования ликвации в стали 25: а – транскристаллитная; б – равноосная структура

Изменяя характер кристаллизации, модифицирование не может не влиять на сегрегацию в слитке примесей (S, P, N и др.). Причиной же сегрегации, в конечном итоге, является перераспределение примесей между твердой и жидкой фракцией в процессе роста кристаллов.

По данным [5], коэффициент распределения в железе в процессе кристаллизации составляет по сере 0,425, углероду – 0,455 и фосфору – 0,078. По другим данным [6], коэффициенты несколько отличаются: по сере – 0,05, фосфору – 0,07 и углероду – 0,13.

В жидком состоянии сера, фосфор и углерод растворимы в больших количествах, но в процессе кристаллизации происходит их оттеснение в центральную часть слитка, в результате в тепловом центре слитка или отливки содержание углерода может быть в 1,5–5,0 раз, серы в 3–4 и фосфора в 1,5–2,0 раза выше, чем вблизи поверхности [7]. Вследствие сегрегации примесей свойства стали существенно различаются в разных частях слитка. Углерод и фосфор влияют на качество стали путем изменения свойств металлической матрицы. Сера вызывает загрязнение межзеренных зон сульфидной фазой, нарушая сплошность структуры.

В процессе кристаллизации слитка можно выделить три характерные зоны: затвердевший металл, переходная двухфазная зона и жидкий расплав [8]. Ширина двухфазной зоны зависит от интервала кристаллизаций сплава и скорости охлаждения слитка. В этой зоне растут дендриты и происходит перемещение примесей под действием градиента температур, сил капиллярного давления и разности концентраций ликвирующих примесей.

В связи с тем что макроструктура слитка может быть равноосной и транскристаллитной, характер протекания ликвационных процессов в двухфазной зоне может быть разным.

На рис. 1 показана верхняя часть диаграммы Fe-C и в качестве объектов для рассмотрения выбраны две стали с различным содержанием углерода (0,25 и 0,5%). Схематично кристаллизация стали 25 в условиях формирования транскристаллитной (а) и равноосной макроструктуры (б) показана на рис. 2. При

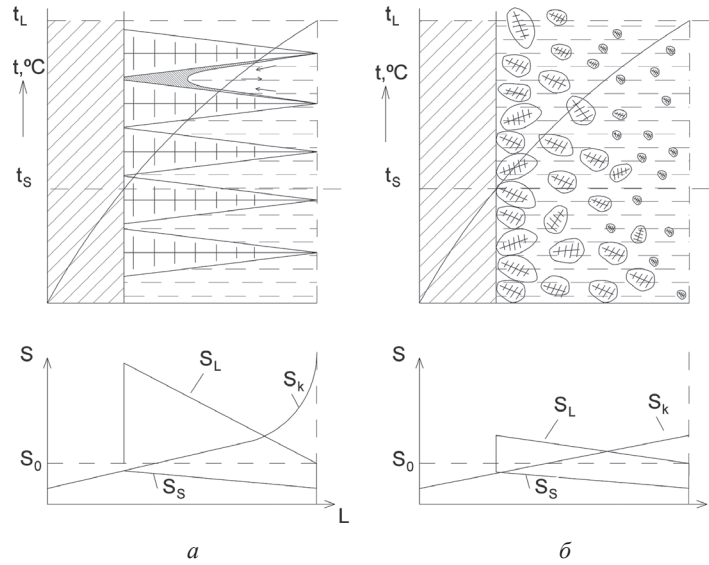
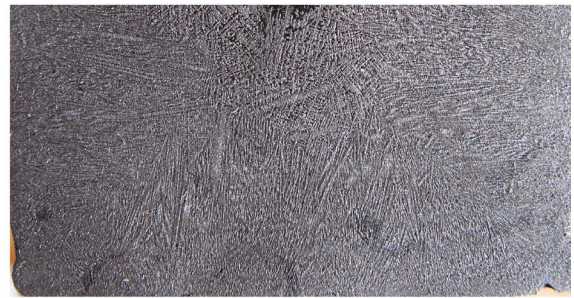
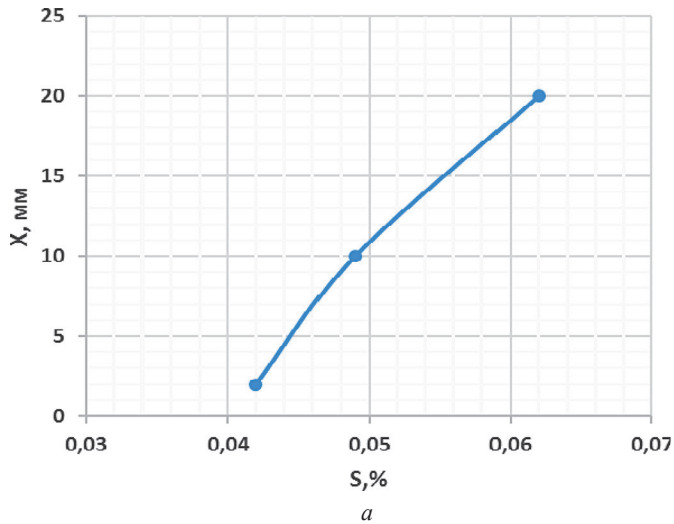
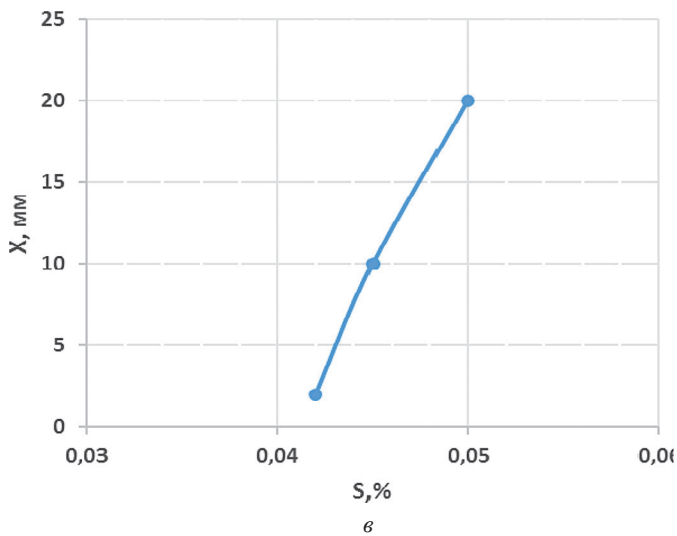


Рис. 3. Схема образования ликвации в стали 45: а – транскристаллитная; б – равноосная структура



б



в

Рис. 4. Макроструктура и распределение серы по сечению слитка с транскристаллитной (а, б) и равноосной структурой (в, г)

образовании транскристаллитной структуры в двухфазной зоне в интервале температур между линиями *AB* и *HJ* происходит направленный рост дендритов феррита (см. рис. 1). На изолидусе к моменту достижения температуры линии *HJ* в равновесии в соотношении примерно 50×50 находятся дендриты феррита и жидкость. Параллельно с протеканием перитектического превращения происходит утолще-

ние дендритов и оттеснение примесей в вертикальном направлении. Перед фронтом твердой фазы за счет его перемещения по горизонтали также скапливаются примеси, которые оттесняются к центру слитка по мере его затвердевания. Стрелками показана фильтрация расплава в двухфазной зоне. Внизу рис. 2, *a* схематически показано распределение серы в жидкости двухфазной зоны (S_c) и в твердой фазе в рассматриваемый момент (S_s) и к концу затвердевания (S_k).

На рис. 2, *б* приведена схема роста дендритов в двухфазной зоне при условии формирования равноосной макроструктуры.

Так как большая часть расплава затвердевает в двухфазной зоне, сегрегация примесей происходит в основном за счет их оттеснения в расплав хаотично ориентированными дендритами, в связи с чем концентрация примеси на фронте твердой фазы невелика. Оттеснение примеси в горизонтальном направлении происходит в меньшей степени, чем в случае транскристаллизации, в связи с чем в слитках с равноосной структурой зональная ликвация происходит менее выражено, чем в слитке с транскристаллитной структурой.

Сталь 50 кристаллизуется в широком интервале температур (см. рис. 1), что обуславливает внутрикристаллическую ликвацию и большую концентрацию углерода и серы на фронте кристаллизации. На рис. 3 показана схема сегрегации примесей для случая формирования транскристаллитной и равноосной макроструктуры. Как и для стали 25, формирование равноосной структуры способствует более равномерному распределению ликвирующих примесей.

Как следует из рисунка, при прочих равных условиях склонность к сегрегации зависит от содержания углерода в стали и характера макроструктуры. Сегрегация растет по мере увеличения содержания в стали углерода и при образовании транскристаллитной структуры. Как следствие, модифицирование стали, устраняющее транскристаллизацию в слитке, должно способствовать уменьшению сегрегации. С целью проверки этого положения проведен эксперимент, в ходе которого в чугунную изложницу заливали немодифицированную сталь 25 и модифицированную комплексом 0,04% Al + 0,05% Ca + 0,006% В + 0,002% Вi. На рис. 4, *б*, *з* приведены макроструктуры исходного и модифицированного слитка, а на рис. 4, *а*, *в* – распределение серы по сечениям до середины слитка, которое подтверждает положение о том, что устранение транскристаллизации способствует снижению сегрегации примесей.

Выводы

1. Для снижения степени сегрегации стали необходимо применять эффективное модифицирование стали с целью устранения транскристаллизации.

2. По мере роста содержания углерода в стали увеличивается склонность к сегрегации примесей.

Литература

1. Влияние металлического кальция и бария на дендритную структуру и неметаллические включения стали 20Л / С. В. Коваленко, В. И. Кучин, В. С. Коваленко // Изв. вузов. 1990. № 5. С. 15–21.
2. Влияние редкоземельных элементов на кристаллизацию стали / В. Б. Бессонов, В. А. Буклан, В. А. Ефимов // Проблемы сталеного слитка. 1976. С. 25–29.
3. Комаров О. С. Комплексное модифицирование стали / О. С. Комаров, В. И. Волосатиков // МИТОМ. 2013. № 3. С. 48–51.
4. Модификатор для стали: Пат. РБ. № 15497 от 14.11.2011.
5. Затвердевание и разливка стали под жидкой средой / А. М. Мадянов, Р. В. Чуднер, В. Е. Пермитин. М.: Металлургия, 1965. 215 с.
6. Гуляев Б. Б. Затвердевание и неоднородность стали. М.: Металлургия, 1958. 392 с.
7. Хворинин Н. Н. Кристаллизация и неоднородность слитка / Пер. с чеш. М.: Металлургия, 1958. 392 с.
8. Ефимов В. А. Влияние условий затвердевания на образование и распределение неметаллических включений в стали // Процессы раскисления и образования неметаллических включений в стали. М.: Наука, 1977. С. 136–197.

References

1. Kovalenko S. V., Kuchin V. I., Kovalenko V. S. Vlijanie metallichesкого kal'cija i barija na dendritnuju strukturu i nemetallicheskie vkljucheniya stali 20L [Influence of metallic calcium and barium in the dendritic structure and non-metallic inclusions steel 20L]. *Izvestiya vuzov = News of fligner Educational Institutions*, 1990, no. 5, pp. 15–21.
2. Bessonov V. B., Buklan V. A., Efimov V. A. Vlijanie redkozemel'nyh jelementov na kristallizaciju stali [Effect of rare earth elements on the crystallization of steel]. *Problemy stal'nogo slitka = Problems of steel ingots*, 1976, pp. 25–29.
3. Komarov O. S., Volosatikov V. I. Kompleksnoe modifitsirovanie stali [Comprehensive modification of steel]. *MITOM*, 2013, no. 3, pp. 48–51.
4. Modifikator dlja stali [The modifier for steel]. Patent RB, no. 15497, 2011.

5. Madjanov A. M., Chudner R. V., Permitin V. E. *Zatverdevanie i razlivka stali pod zhidkoj sredoj* [The solidification and casting of steel under the liquid medium]. Moscow, Metallurgija Publ., 1965. 215 p.
6. Guljaev B. B. *Zatverdevanie i neobnorodnost' stali* [Solidification and neobnorodnost steel]. Moscow, Metallurgija Publ., 1958, 392 p.
7. Hovorin N. N. *Kristallizacija i neodnorodnost' slitka* [Crystallization and heterogeneity of the ingot.]. Moscow, Metallurgija Publ., 1958, 392 p.
8. Efimov V. A. Vlijanie uslovij zatverdevanija na obrazovanie i raspredelenie nemetallicheskih vključenij v stali [Influence of curing conditions on the formation and distribution of non-metallic inclusions in steel deoxidation]. *Processy raskislenija i obrazovanija nemetallicheskih vključenij v stali = Problems of deoxidation and formation of non-metallic inclusions in steel*. Moscow, Nauka Publ., 1977, pp. 136–197.



РЕСПУБЛИКАНСКАЯ НАУЧНО–ТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА ПРЕДЛАГАЕТ СПЕЦИАЛИСТАМ ОЗНАКОМИТЬСЯ С НОВЫМИ ИЗДАНИЯМИ

Балакин, Юрий Александрович. Термодинамика начала процессов гомогенной и гетерогенной кристаллизации при внешнем модифицирующем воздействии на расплавы металлов / Ю. А. Балакин, С. Н. Жеребцов, М. И. Гладков // Электрометаллургия. – 2015. – № 2. – С. 15–20. – (Теория металлургических процессов). – Библиогр.: с. 20 (18 назв.).

Рассмотрена термодинамика гомогенной и гетерогенной кристаллизации при внешнем модифицирующем воздействии на расплавы металлов. Проведен поиск экстремумов характеристических функций, входящих в термодинамические модели разных вариантов влияния модификатора на кристаллизацию расплавов. Получены оригинальные выражения параметров указанных выше процессов. Сравнение параметров показало, что модификатор изменяет параметры состояния процесса кристаллизации, его ход и результат. Структура литого металла становится более мелкозернистой, что повышает качество слитков и отливок.

Влияние микролегирования и температуры выплавки на свойства сплавов ЧС70 и ЧС88 в жидком и твердом состояниях / А. Г. Тягунов [и др.] // Электрометаллургия. – 2015. – № 6. – С. 15–19. – (Теория металлургических процессов). – Библиогр.: с. 19 (6 назв.).

В результате комплексного исследования физических свойств жидких жаропрочных никелевых сплавов определены температурные интервалы структурных превращений, связанные с переводом расплава в гомогенное и микрооднородное состояние. Установлено влияние микролегирования на температуры перехода расплава. Установлена взаимосвязь между состоянием расплава, процессом кристаллизации, структурой и свойствами твердого металла.

Получение железоксидного пигмента из пыли металлургического производства для использования в строительстве / Е. Н. Федосеева [и др.] // Металлург. – 2015. – № 5. – С. 31–35. – (Энерго- и ресурсосбережение). – Библиогр.: с. 35 (10 назв.).

Предложена нетрудоёмкая технология получения красного железоксидного пигмента из пылевидных железосодержащих отходов металлургической промышленности. Проведен анализ сырьевой базы и рентабельности его производства. Исследованы химические и красящие свойства пигмента, а также представлены некоторые свойства силикатного кирпича и бетонов, окрашенных этим пигментом.

Разработка нового способа термического упрочнения для решения экологических задач металлургического производства / Ю. Г. Ярошенко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. – № 4. – С. 221–225. – (Ресурсосбережение в черной металлургии). – Библиогр.: с. 224 (9 назв.).

Охлаждение в объеме масла тел сложной формы с разномассивными элементами является пожароопасным, дорогостоящим и неуправляемым процессом с точки зрения отвода тепла от разномассивных элементов. Одним из таких изделий несимметричной конфигурации, для которых применяется такой вид термической обработки, является рельсовая накладка. В ОАО «ВНИИМТ» впервые предложена экологичная технология, а также разработано устройство водяного регулируемого охлаждения рельсовых накладок. Благодаря использованию воды в качестве охлаждающего агента полностью исключается образование вредных выбросов в атмосферу, отсутствует необходимость в постоянных затратах на покупку масла, его замену и утилизацию. Стендовые эксперименты на опытно-промышленном агрегате определили условия получения уровня механических свойств накладок, удовлетворяющие требованиям нормативной документации. Прямолинейность готового изделия обеспечивается раздельной подачей воды на каждый коллектор каждой секции устройства. Представленные результаты стендовых экспериментов послужили основой выбора режимов работы промышленного устройства при освоении рассматриваемой технологии в условиях производства, которая может с успехом заменить традиционную – закалку в объеме масла.

Сизяков, Виктор Михайлович. Активизация инновационной деятельности при образовании кластера металлургических предприятий Красноярского края / В. М. Сизяков, А. А. Власов, В. Ю. Бажин // Металлург. – 2015. – № 5. – С. 11–14. – (Экономика. Менеджмент).

Обоснована кластеризация металлургических предприятий на примере металлургических предприятий Красноярского края. Рассмотрены способы активизации инновационной активности при интеграции науки и производства. Предложено объединение алюминиевых предприятий с созданием центра переработки и утилизации их эксплуатационных техногенных отходов.

Симонов, В. К. Низкотемпературная металлизация магнетитового концентрата путем интенсифицирующих воздействий / В. К. Симонов, А. М. Гришин // Электрометаллургия. – 2015. – № 4. – С. 22–24. – (Производство черных металлов). – Библиогр.: с. 24 (6 назв.).

Представлены результаты экспериментальных исследований низкотемпературной энергосберегающей металлизации тонкодисперсного магнетитового концентрата глубокого обогащения в псевдооживленном слое. Реализация процесса в присутствии 1% (мас.) каталитических добавок и повышенном до 0,4 МПа давлении водорода позволила полностью металлизировать шихту при 873–923 К в течение менее получаса. Развита представления о механизме интенсифицирующего влияния примененного комплекса воздействий на реагирующую систему.