

## **ВЗАИМОСВЯЗЬ МАКРОСТРУКТУРЫ СЛИТКОВ И СВОЙСТВ СТАЛИ**

**О.С. КОМАРОВ**, д-р техн. наук, **К.Э. БАРАНОВСКИЙ**, канд. техн. наук,  
**Е.В. РОЗЕНБЕРГ**

Белорусский национальный технический университет

*Исследовано влияние комплексного модификатора, в состав которого входят химически активные компоненты (Ba, Sr, Ca, Mg и др.), поверхностно-активный элемент (ПАЭ) (Bi) и карбидообразующий элемент (B) на макроструктуре слитка, ликвацию серы в нем и механические свойства стали. Установлено, что для устранения транскристаллизации и связанной с ней ликвации в состав модификатора должен входить ПАЭ. Его наличие в составе модификатора не снижает механических свойств стали 45.*

**Ключевые слова:** комплексный модификатор, химически активные элементы, поверхностно-активный и карбидообразующий элемент, макроструктура слитка.

## **THE RELATIONSHIP OF MACROSTRUCTURE OF INGOTS AND THE PROPERTIES OF STEEL**

**O.S. KOMAROV**, Dr. of Engineering Sciences, **K.E. BARANOUSKY**,  
Ph. D in Technical Sciences, **E.V. ROZENBERG**

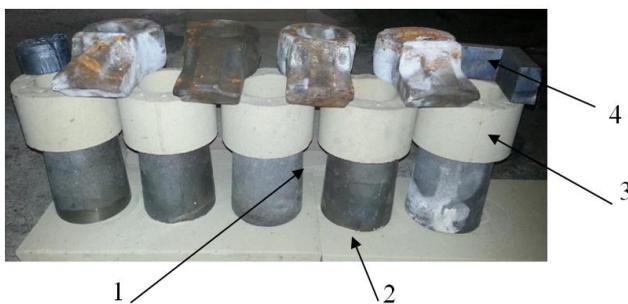
Belarusian National Technical University

*The influence of the complex modifier, which includes chemically active components (Ba, Sr, Ca, Mg, etc.), the surface-active element (Bi) and the carbide-forming element (B) on the macrostructure of the ingot, the segregation of sulfur in it and the mechanical properties of steel. It was established that to eliminate transcrystallization and associated segregation, the modifier should include a surface-active element. Its presence in the modifier does not reduce the mechanical properties of steel 45.*

**Keywords:** complex modifier, reactive elements, surface-active and carbide-forming element, ingot macrostructure.

Ранее установлено, что комплексное модифицирование стали добавками, в состав которых входят химически активные компоненты (Ca, Sr, Ba и др.), карбидообразующие (Ti, V, Nb и др.), а также поверхностно-активные (Bi, Sb, Te и др.), позволяет устранить транскристаллизацию в слитках и толстостенных отливках [1]. Наличие в составе комплексного модификатора поверхностно-активного элемента (ПАЭ), нерастворимого в твердой фазе, неизбежно должно приводить к его накоплению на фронте кристаллизации, что может нарушить связь между дендритами аустенита и привести, в конечном счете, к снижению свойств стали.

С целью проверки влияния комплексного модифицирования на макроструктуру стали и ее свойства проведена серия экспериментов, в ходе которой изложницы (1) (рисунок 1), окрашенные внутри краской на основе дистен-силлиманита и алюмината натрия, устанавливали на поддон (2), изготовленный из холодно-твердеющей смеси (ХТС). На изложницы устанавливали прибыльные надставки (3), также изготовленные из ХТС. Сверху собранные формы нагружали грузами (4).



1 – изложница; 2 – поддон; 3 – прибыльная подставка; 4 – груз

Рисунок 1 – Формы в сборе для отливки слитков

Плавки стали 45 осуществляли в индукционной печи ИТП-60 емкостью 60 кг с кислой футеровкой. При достижении расплавом температуры 1620 °С его раскисляли алюминием (0,3 % от массы металла).

Расплав порциями по 50 кг модифицировали в ковше различными добавками:

- 1) без модифицирования;
- 2) 0,1 % SiCa + 0,005 % Bi + 0,005 % B;
- 3) 0,005 % Bi + 0,006 % B;
- 4) 0,1 % SiCa;
- 5) 0,1 % SiCa + 0,005 % Bi.

Из слитков в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2, вырезали образцы: темплеты (1) для травления на макроструктуру и определения ликвации и образцы для определения механических свойств (2).

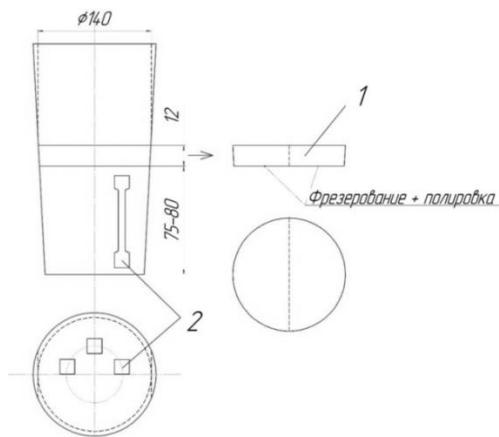


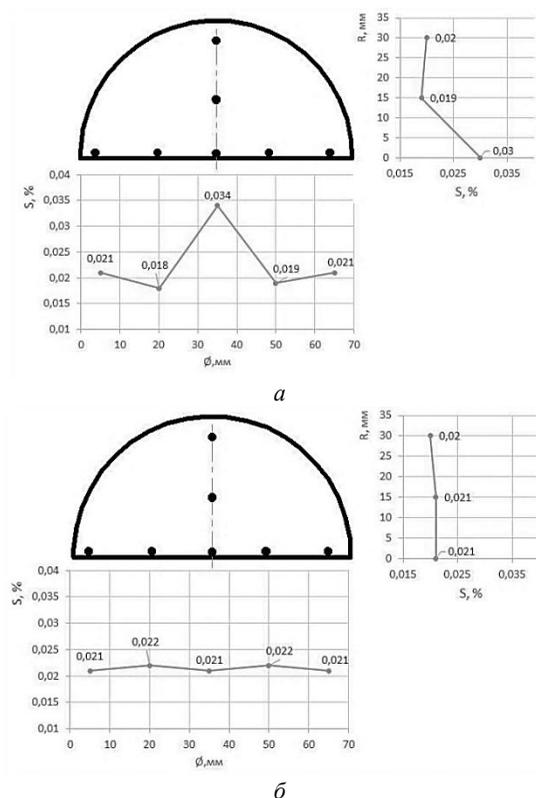
Рисунок. 2 – Схема вырезания темплетов для травления и определения химического состава

На рисунке 3 представлены фото темплета с расположением точек определения химического состава.



Рисунок 3 – Темплеты для изучения макроструктуры

Результаты исследования химического состава (содержания серы) по сечению темплета представлены на рисунке 4 для образца стали немодифицированного (*a*) и модифицированного комплексом 2 (0,1 % SiCa + 0,005 % Bi + 0,005 % B) (*б*).



*a* – без модифицирования; *б*. – модифицированный

Рисунок 4 – Распределение серы по сечению

Модифицирование стали оказало существенное влияние на макроструктуру слитков. В качестве примера на рисунке 5 приведены фотографии темплетов после глубинного травления с целью выявления макроструктуры. Слиток немодифицированной стали (*a*) имел сквозную транскристаллизацию, а модифицированный (*б*) мелкую равноосную.



*a*



*б*

*a* – макроструктура слитка немодифицированной стали;  
*б* – после модифицирования комплексом 2

Рисунок 5 – Макроструктура стальных слитков после глубинного травления

Эксперименты показали, что между макроструктурой и ликвацией серы наблюдается определенная связь. В тех слитках, в которых модифицирование устраняло транскристаллизацию (комплексы 1 и 5), ликвация отсутствует. Комплекс 3 и SiCa (4) не повлияли на макроструктуру, в связи с чем распределение серы по сечению слитка было аналогичным тому, которое наблюдали в немодифицированном слитке.

С целью проверки влияния характера макроструктуры на механические свойства стали в соответствие со схемой, приведенной на рисунке 2, из слитков после их нормализации при температуре 880 °С в течение 4 ч вырезали образцы для определения механических свойств, которые проводили в центральной заводской лаборатории ОАО «МТЗ» в соответствии с ГОСТ 1497-84. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Как следует из таблицы 1, несмотря на наличие  $V_i$  в составе комплексного модификатора, не наблюдалось снижение механических свойств, а относительное сужение и предел текучести даже

возросли (образцы 2 и 4). При отсутствии химически активных компонентов введение в расплав ПАЭ (образец 3) приводит к некоторому снижению всего комплекса свойств.

Таблица 1 – Механические свойства стали

Номер образца	Модифицирование, %	Твердость, НВ	$\zeta_v$ МПа	$\zeta_T$ МПа	$\delta$ %	$\psi$ %
1	0	229	760	577	24	16,7
2	SiCa – 0,1 B – 0,005 Bi – 0,005	217	745	616	22	18,3
3	B – 0,005 Bi – 0,005	229	690	557	18	15,7
4	SiCa – 0,1 Bi – 0,005	229	750	610	22	20,3

Следует отметить, что испытания проводили после термической обработки, которая в значительной степени нивелирует роль первичной (литой) структуры.

Более тщательная проверка влияния модифицирования на прочностные характеристики стали в отливках и ее жидкотекучесть проведена в условиях сталелитейного цеха ОАО «МТЗ», для чего осуществлена серия плавок стали в печи ДСП-5М с кислой футеровкой. Модифицирование проводили при переливе металла из раздаточного в заливочный ковш, заполненный на 25–30 %. Температуру замеряли при выпуске металла из печи. Она находилась в пределах 1620–1640 °С. Смесевой модификатор вводили в количестве 0,2 % от массы стали в ковше. В качестве химически активной составляющей комплексного модификатора использовали смесь модификатор РСК-2, разработанный в БНТУ, а в качестве ПАЭ – висмут в количестве 0,002 %. Состав смесевых модификаторов РСК-2 (% по массе): 30 Al; 15 SiBa; 15 FeSiMg; 10 SiCa и 30 Lcast720z. В свою очередь в состав последнего входило (% по массе): 60–70 Si, 8–12 Ba, 5–7 Ca, 2,5–4,0 Sr, остальное – Fe.

Модифицированной сталью заливали спиральные пробы на жидкотекучесть и трещины, часть из которых использовали для изготов-

ления шлифов, а часть в соответствии с заводской технологией подвергали термической обработке – нормализации. Для определения жидкотекучести изготавливали пробы в виде спиралей. Заливка металла в пробу осуществлялась через чашу, расположенную около стояка, которая позволяла исключить влияние высоты заливки на результаты измерения.

Образцы для определения прочностных свойств стали 45 вырезали из треновидных заготовок, отливаемых в стержневую форму в соответствии с ГОСТ 977-88. После охлаждения заготовок из них вырезали образцы для оценки структуры в литом состоянии, а сами заготовки подвергали нормализации по принятой на заводе технологии, после чего из них вырезали образцы для определения механических свойств, Усредненные результаты испытаний из нескольких замеров приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерений

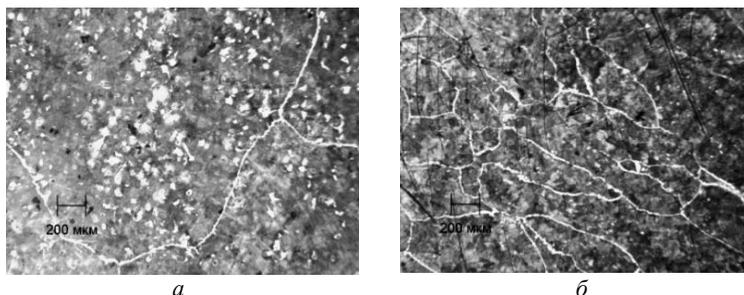
Модификатор	Свойство			
	Жидкотекучесть, мм	$\zeta_v$ МПа	$\zeta_T$ МПа	$\delta$ %
–	407	336	683	18
смесевой	605	454	730	25
смесевой + Вi	610	452	720	24

Сравнение результатов, приведенных в таблицах 1 и 2, показало, что показатели прочности и пластичности, полученные в ходе производственных испытаний комплексного модификатора, в целом совпадают с лабораторными и свидетельствуют о том, что введение в состав эффективных модификаторов небольших количеств ПАЭ не ухудшает комплекс механических свойств.

Модифицирование измельчает первичное зерно стали. На рисунке 6 показана макроструктура немодифицированного (а) и модифицированного РКС-2 с добавкой ПАЭ образца (б) до термической обработки.

Уменьшение размера зерна связано с присутствием в модификаторах щелочноземельных металлов, таких как барий, кальций и стронций, которые, взаимодействуя с серой (основным источником неметаллических включений), образуют шпинели, выступающие в

роли подложек для зарождения кристаллов и тем самым увеличивающие их количество и уменьшающие размер. Поверхностно активные вещества адсорбируются на поверхности растущих кристаллов, замедляя их рост, и тем самым уменьшают размер зерна.



*а* – без модифицирования; *б* – смеси модификатор РКС-2 с добавкой ПАЭ

Рисунок 6 – Микроструктура стали в литом состоянии

Проведение термической обработки (нормализации) нивелирует разницу в первичной структуре, в связи с чем микроструктура у немодифицированного и модифицированного образцов практически одинакова.

Таким образом, установлено, что устранение транскристаллизации за счет комплексного модифицирования снижает ликвацию серы. Также можно говорить об уменьшении ликвации углерода и фосфора в отливках большего сечения и слитках и снижения риска появления дефектов, носящих ликвационный характер (ликвационный квадрат, трещины и др.). По данным исследований [2] коэффициент распределения в железе в процессе кристаллизации составляет 0,425 по сере, 0,455 по углероду и 0,078 по фосфору.

Включение в состав комплексного модификатора ПАЭ является эффективным средством по устранению транскристаллизации. Использование комплекса, состоящего только из химически активных компонентов (Ca, Ba, Sr, Mg и др.) для модифицирования стали, позволяет существенно повысить жидкотекучесть и механические свойства, но не устраняет транскристаллизации.

Присутствие в составе комплексного модификатора ПАЭ (Vi) не ухудшает свойств стали.

## Список литературы

1. **Влияние** макроструктуры на ликвацию в стальном слитке / Комаров О.С. [и др.] // *Литье и металлургия* – 2017. – № 1. – С. 45–50.
2. **Мадянов, А.М.** Затвердевание и разливка стали под жидкой средой / А.М. Мадянов, Р.В. Чуднер, В.Е. Пермитин – М.: Металлургия, 1965. – 215 с.

## References

1. **Vliyanie makrostruktury na likvaciyu v stal'nom slitke** [Effect of macrostructure on segregation in steel ingot] / Komarov O.S. [et al.] // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2017. – No. 1. – P. 45–50.
2. **Madyanov, A.M.** *Zatverdevanie i razlivka stali pod zhidkoj sredoj* [Solidification and pouring of steel under a liquid medium] / A.M. Madyanov, R.V. CHudner, V.E. Permitin. – Moscow: Metallurgiya Publ., 1965. – 215 p.

*Поступила 12.08.2020*

*Received 12.08.2020*