

УДК.669.154.002.61

Иванов Г.А.<sup>1</sup>, Скребцов А.М.<sup>2</sup>, Кузьмин Ю.Д.<sup>3</sup>, Раханская А.И.<sup>4</sup>, Тодуркин А.Е.<sup>5</sup>

**УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ ПРИ ВВОДЕ В  
МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ РАСПЛАВ ДОБАВОК МЕЛКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ШИХТЫ**

*В производственных условиях разработана технология, которая при помощи механизмов металлургической структурной наследственности шихты позволяет заметно улучшить физико-механические свойства металлопродукции без каких-либо дополнительных затрат. Разработан метод количественной оценки микроструктуры стали ферритно-перлитного класса с применением компьютерной техники.*

Давно известно влияние природы шихты при выплавке металла на качество готовой металлопродукции [1]. Суть этого способа заключается в следующем. Например, исходная шихта плавки обладает определенной структурой металла, – (мелкокристаллической, крупнокристаллической или промежуточной и т.п.). После ее расплавления и не слишком высокого перегрева над линией ликвидуса затвердевший металл приобретает исходную структуру шихты (явление «наследственности») [2, 3]. Однако, в литературе известны также пока не полностью объяснимые, случаи «отрицательной» наследственности, когда исходная мелкокристаллическая шихта приводит к крупному зерну в отливке и наоборот [4].

Наследственностью шихты в разное время занимались многие ученые, – Ю.А. Нехензи, Н.Г. Гиршович, В.И. Никитин и др [1, 2].

Исследователей и производителей интересуют вопросы механизма передачи свойств в цепи: исходная шихта – расплав – готовая металлопродукция [2, 3]. Кроме этого, часто, в производстве, при исходной крупнокристаллической шихте структуру готовой металлопродукции улучшают путем ввода в расплав перед выпуском его из плавильной печи небольших добавок специально изготовленной мелкокристаллической шихты (по терминологии Б.Ф. Трахтенберга «модификаторы III рода») [1].

В производстве при легировании металла во время его плавки часто используют чушки лигатур с традиционной крупнокристаллической структурой [5]; последнее может привести к наследственно крупному зерну в отливке. Для его измельчения существуют различные способы, например, термическая обработка отливок, ввод в расплавленный металл, перед выпуском, некоторого количества мелкокристаллической шихты и т.д. Поэтому в работе [3] среди других была сформулирована актуальная задача по «определению оптимальных доз мелкокристаллических модификаторов» [1], которые бы обеспечили образование мелкого зерна в отливке.

В работе [6] отмечается, что «чем мельче зерно, тем лучше механические свойства металлов и сплавов, больше предел упругости, предел прочности и ударная вязкость».

В настоящей работе была поставлена задача, - на примере выплавки одной из марок стали 20ГЛ (ГОСТ 917-88) изучить влияние малой добавки мелкокристаллической шихты в расплав на улучшение качества легированной стали.

---

<sup>1</sup>ПГТУ, аспирант

<sup>2</sup>ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

<sup>3</sup>ОАО «МЗТМ» инж.

<sup>4</sup>ОАО «МЗТМ» инж.

<sup>5</sup>ОАО «МЗТМ» инж.

Описание методики опытно-промышленных плавов

Опыты по выплавке стали 20ГЛ провели в дуговой сталеплавильной печи ДСП-3 с основной футеровкой и массой садки 5 т. Перед каждой плавкой откосы заправляли доломитовой крошкой. В качестве шихты использовали отходы собственного производства в виде высечки листового проката, литников, прибылей, фрагментов отработавшего оборудования, а также стружки. Соотношение долей проката и литья в шихте составляло преимущественно 3:1.

В конце плавки в ее восстановительный период в два, три приема наводили и скачивали шлак для уменьшения содержания серы и фосфора в металле. За 5 – 7 минут до выпуска металла из печи, на основании данных химического анализа, для легирования металла в ванну вводили расчетное количество ферромарганца и, в случае необходимости, ферросилиция. Известно, что ферросплавы, как правило, имеют крупнокристаллическую структуру и не способствуют измельчению зерна в отливке.

С целью улучшения микроструктуры металла в соответствии с изобретением [7], за 10 – 15 минут перед выпуском металла из печи, в расплав вводили 0,5 % мелкокристаллической деформированной шихты в виде проката конструкционной листовой стали толщиной 10 – 20 мм.

Разливку металла производили из пятитонного стопорного ковша со стаканчиком диаметром 50 мм. Ковш разогревали до температуры 600 – 700 °С. На дно ковша загружали Al и FeTi для раскисления металла.

Температуру металла контролировали погружной одноразовой ПП термопарой. При температуре 1640 – 1660 С металл выпускали в ковш. Перед началом его разливки проводили еще одно измерение температуры, к этому времени она снижалась примерно на 10 градусов. В середине заливки от струи из стопорного отверстия отбирали пробу для анализа на химический состав металла, затем заливали треновидные пробы и продолжали разливку.

Все предыдущие и последующие действия персонала цеха при выплавке как опытных, так и серийных плавках ничем не отличались. При этом отливали дополнительную треновидную пробу для изготовления микрошлифов.

Таблица – Результаты механических испытаний пятикратных образцов вырезанных из треновидных проб стали 20ГЛ.

Опытные плавки						Обычные плавки					
Код плавки	Предел текучести, $\sigma_t$ , МПа	Предел прочности, $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta\%$	Относительное сужение, $\psi\%$	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>	Код плавки	Предел текучести, $\sigma_t$ , МПа	Предел прочности, $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta\%$	Относительное сужение, $\psi\%$	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>
1	310	540	28	67	79	7	355	580	22,0	46,0	57
2	320	540	31	49	101	8	335	570	20,0	64,0	57
3	340	540	24	64	74	9	385	600	22,0	44,0	65
4	320	540	28	58	91	10	355	600	25,0	59,0	82
5	310	540	28	67	79	11	310	520	23,0	40,0	40
6	350	580	25	48	75	12	330	580	23,0	58,0	55
ГОСТ 977-88							275	540	18	25	50
$\bar{M}$	325	547	27	59	83	$\bar{M}$	345	575	23	52	59
$\sigma$	1350	1333	31	375	565	$\sigma$	3350	4350	14	473	949
$\sqrt{\sigma}$	6,1	6,1	0,9	3,2	4,0	$\sqrt{\sigma}$	9,6	11,0	0,6	3,6	5,1

### Обработка и анализ результатов экспериментов

Механические испытания проводили в заводской лаборатории по методике в соответствии с ГОСТ 977-88. Результаты испытаний приведены в таблице.

В столбцах 1 – 6 представлены данные по механическим испытаниям металла плавки проведенных по обычной технологии с внесенными нами некоторыми изменениями, столбцы 7 – 12 содержат аналогичную информацию по механическим испытаниям обычных плавки на той же печи.

Математическая обработка результатов включает в себя вычисление математического ожидания  $\bar{M}$ , и среднеквадратического отклонения от математического ожидания  $\sqrt{\sigma} = \sqrt{\sum(\bar{M} - X_i)}$ , а также промежуточную величину  $\sigma = \sum(\bar{M} - X_i)$ , характеризующую суммарное отклонение результатов измерений от математического ожидания по каждому столбцу.

Анализируя результаты таблицы, можно утверждать, что характер изменения величин свойств металла – уменьшение статических и увеличение ударной вязкости соответствует измельчению микроструктуры.

Кроме величины зерна, такое влияние могло оказать выпадение дисперсных фаз, отсутствие флокенов и другие причины. Мы выполнили металлографический анализ для установления причины увеличения ударной вязкости.

Образцы для изучения микроструктуры изготавливали на осевых шлифах малых треновидных проб, дополнительно отлитых при проведении экспериментальных плавки. Травление осуществляли в 5 % водном растворе фторводорода. Фотографировали шлифы на металлографическом микроскопе МИМ-1 при увеличении  $\times 100$ . Результаты представлены на рис. 1.

Макрошлифы вырезали таким же самым образом и проводили горячее травление в 30 % водном растворе соляной кислоты.

Сталь 20ГЛ является низколегированной конструкционной сталью ферритно-перлитного класса. На рис. 1 светлые области – феррит, а темные – перлит.

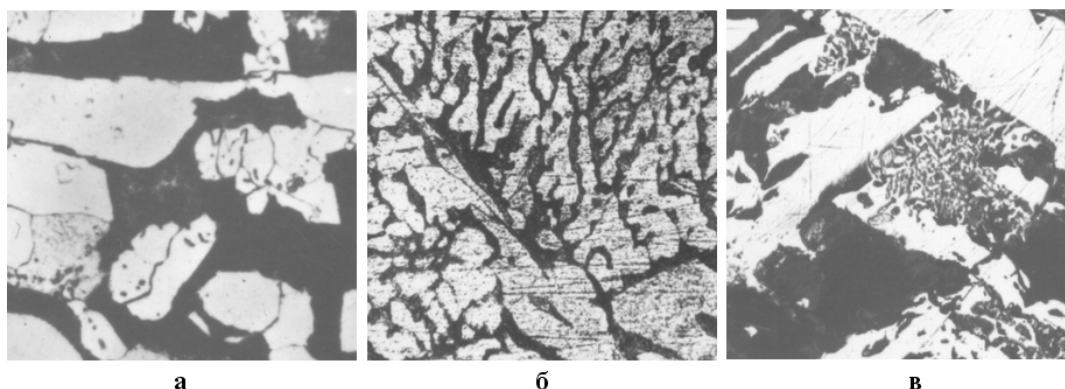
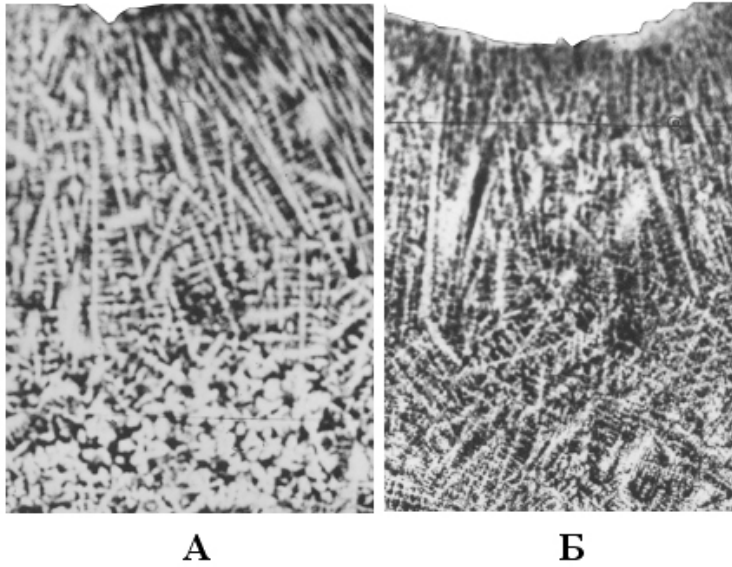


Рис. 1 – Микроструктура стали 20ГЛ при увеличении 100х:

- литой без ввода мелкокристаллической деформированной шихты;
- литой с вводом шихты;
- микроструктура ферромарганца вводимого в качестве лигатуры.

Из рис. 1 видно подобие между микроструктурой литого образца без ввода мелкокристаллических модификаторов (а) и пробой ферромарганца (в), вводимого за 5 – 10 минут перед выпуском металла в ковш. Темной фазой на фотографиях микроструктуры стали 20ГЛ является перлит, а у ферромарганца – раствор марганца в железе. В тоже время у фотографий (а) и (в) по сравнению с фотографией (б) видно качественное отличие – структура раздроблена, протяжен-



ность структурных элементов существенно увеличилась, а подобие со структурой ферромарганца отсутствует.

При анализе фотографий макроструктуры, представленных на рис. 2, обнаружили повышение ее плотности. Образец с вводом микрокристаллического модификатора (Б) характеризуется более тонкими дендритами и большим их количеством. Они имеют более правильную форму и, что особо важно, металл центральной области треновидной пробы менее рыхлый. В то же время на фотографии (А) оси и ветви ден-

дритов гораздо толще, кристаллы в центральной области трены размазаны.

Микроструктуру рис. 1, с помощью компьютерной техники, обработали следующим образом. Использовали метод параллельных случайных секущих в комбинации с линейным методом С.А. Салтыкова [9]. На рис. 3 представлена гистограмма доли случайных секущих (%) от общего числа их пересечений с перлитной фазой в зависимости от ее ширины в элементах структуры для стали 20ГЛ (см. рис. 1).

Метод модифицирован нами в связи со спецификой применения компьютерной техники – случайные секущие заменены линиями раstra. Фотографии микроструктур заносились в память ЭВМ, программа сканирует растр в декартовой системе координатах и фиксирует в массиве, организованном в памяти компьютера, длины сечений перлитной фазы у 20ГЛ, а у ферромарганца – раствора марганца в железе. Результаты представлены как табличная функция процента сечений каждого линейного размера структуры и общего количества сечений в зависимости от

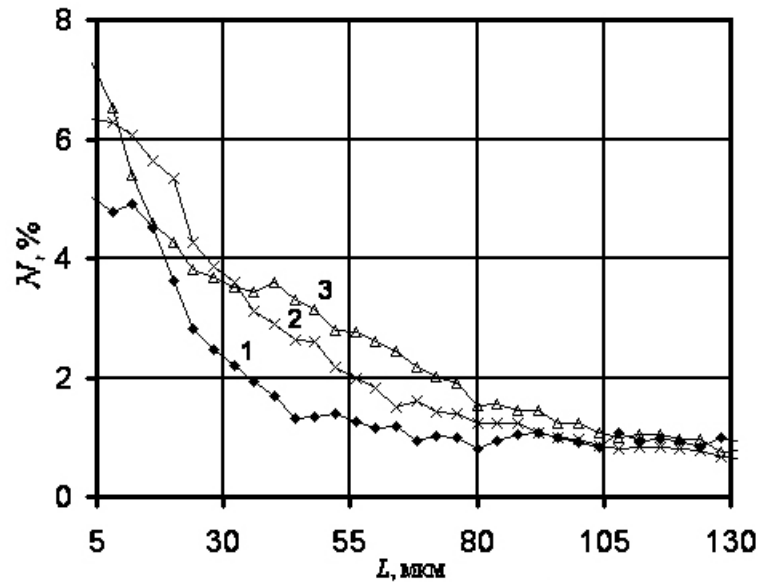


Рис. 3 – Гистограммы доли случайных секущих (%) от общего числа пересечений с перлитной фазой в зависимости от ее ширины на образцах стали 20ГЛ (см. рис. 2) по их ширине:

- 1 (♦) – 20ГЛ без ввода модификатора;
- 2 (×) – Ферромарганец;
- 3 (Δ) – 20ГЛ с вводом модификатора.

того выше распределение (рис. 3). По вертикали отложены количества сечений, а по горизонтали их линейный размер. Этот график наглядно иллюстрирует разницу между микроструктурами образцов. Чем больше значения величин в левой части графика, тем больше мелких элементов микроструктуры и тем выше балл зерна. Выше всех кривых на гистограмме в области тонких сечений перлита (30 – 105 мкм) расположена кривая для стали 20ГЛ (линия 3), выплавленная по опытной технологии. Среднее положение на гистограмме занимает линия 1 для ферромарганца, его структуру наследует сталь как опытных так и обычных плавов.

линейных размеров элемента строения металла (перлита). Окончательно результаты обрабатывались с помощью табличного процессора

Рис. 2 – Макроструктура стали 20ГЛ (увеличение 10x) выплавленной по опытной технологии (А) и по обычной (Б).

Microsoft Excel, в котором построили упомянутое выше распределение (рис. 3). По вертикали отложены количества сечений, а по горизонтали их линейный размер. Этот график наглядно иллюстрирует разницу между микроструктурами образцов. Чем больше значения величин в левой части графика, тем больше мелких элементов микроструктуры и тем выше балл зерна. Выше всех кривых на гистограмме в области тонких сечений перлита (30 – 105 мкм) расположена кривая для стали 20ГЛ (линия 3), выплавленная по опытной технологии. Среднее положение на гистограмме занимает линия 1 для ферромарганца, его структуру наследует сталь как опытных так и обычных плавов.

### Вывод

Разработанная опытная технология выплавки стали 20ГЛ с добавкой мелкокристаллической шихты в жидкий расплав перед выпуском его из печи приводит к улучшению микро- и макроструктуры металла, а также его механических свойств, особенно ударной вязкости, которая повысилась с 59 до 83 Дж/см<sup>2</sup>.

### Перечень ссылок

1. *Трахтенберг Б.Ф.* Физическая модель «наследственности» по схеме модифицирования второго рода / *Б.Ф. Трахтенберг, В.И. Крестьянов* // Литейное производство. – 1999. – № 1 – С. 16 – 17.
2. *Никитин В.И.* Наследственность и технологии генной инженерии в литых сплавах / *В.И. Никитин* // Литейное производство. – 2002. – № 10. – С. 8 – 10.
3. *Никитин В.И.* Перспективы технологии генной инженерии в сплавах / *В.И. Никитин* // Литейное производство. – 1999. – № 1. – С. 5 – 9.
4. *Гаврилин И.В.* Что дают исследования строения жидких сплавов для практики литья? / *И.В. Гаврилин* // Литейное производство. – 1988. – № 9. – С. 3 – 4.
5. *Кандалова Е.Г.* Критерии качества модифицирующей лигатуры на основе алюминия / *Е.Г. Кандалова, В.И. Никитин, А.Г. Тюкилин* // Литейное производство. – 1999. – № 1. – С. 25 – 27.
6. *Мальцев М.В.* Модифицирование структуры металлов и сплавов / *М.В. Мальцев* – М.: Металлургия, 1964. – 214 с.
7. Патент 78938 Україна С22С 1/03. Спосіб легування металу / *О.М. Скребцов, Г.О. Иванов, Д.І. Петренко, Ю.Д. Кузьмін, О.О. Секачов, В.М. Білоконь, В.В. Бузівський*.
8. *Скребцов А.М.* Разные представления авторов об разупорядочении кластеров металлического расплава / *А.М. Скребцов* // Процессы литья. – 2005. – № 3. – С. 3 – 10.
9. *Салтыков С.А.* Стереометрическая металлография / *С.А. Салтыков* – М.: Металлургия, 1976. – 238 с.

Рецензент: А.В. Остроушко  
канд. техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 29.02.2008