

УДК 620.19

ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЧИНЫ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТА МАКРОСТРУКТУРЫ «СВЕТЛАЯ ПОЛОСА (КОНТУР)»

Н. А. Глазунова, Л. И. Шаповалова, С. В. Стефанович,
И. А. Ковалёва, И. О. Писаренко

ОАО «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга
«Белорусская металлургическая компания» (г. Жлобин, Республика Беларусь)

С вводом в действие ГОСТ 4543–2016 ужесточились требования к наличию дефекта макроструктуры «светлая полоса (контур)» для легированной стали. ГОСТ 4543–71 допускал наличие дефекта в особовысококачественной стали не более балла 3 в соответствии со шкалами ГОСТ 10243. На горячекатаной качественной и высококачественной стали светлая полоса не регламентировалась. При контроле макроструктуры такой стали в лаборатории металлургии ОАО «БМЗ» – управляющая компания холдинга периодически выявляется дефект «светлая полоса (контур)». Для определения причин образования данного вида дефекта в высококачественной горячекатаной заготовке проведено исследование образцов разного сортамента. Описаны исследования темплетов с дефектом макроструктуры «светлая полоса» и работы, проводимые электросталеплавленным лехом и техническим управлением по корректировке электромагнитного перемешивания при разливе стали с целью предотвращения образования дефекта.

Ключевые слова: качество, дефект, светлая полоса (контур), макроструктура, темплет, легированная качественная и высококачественная сталь, заготовка, исследование, электромагнитное перемешивание.

С вводом в действие ГОСТ 4543–2016 «Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия» ужесточились требования к наличию дефекта макроструктуры светлая полоса (контур) в легированной стали. ГОСТ 4543 выпуска 1971 г. допускал наличие дефекта в особовысококачественной стали не более балла 3 в соответствии со шкалами ГОСТ 10243. В качественной и высококачественной стали светлая полоса не контролировалась.

Светлая полоса (контур) – узкая полоска пониженной травимости (обратной ликвации) вблизи поверхности или в промежуточной зоне круга и бляха, как следствие оттока жидкого раствора из микрообъемов за счет механического воздействия (например, встряски) на продвигающийся фронт дендритов [1]. ГОСТ 4543–2016 по светлой полосе к непрерывнолитой стали предъявляет следующие требования: качественные стали – не более балла 1 по ГОСТ Р 58228–2018 [1], в высококачественной и особовысококачественной стали светлая полоса не допускается.

Периодически при контроле макроструктуры сталей в ОАО «БМЗ» – управляющая компания холдинга «БМК» встречаются плавки со светлой полосой (рис. 1). Для исследования микроstructures в зоне светлого контура, от образцов с наиболее ярко выраженным дефектом макроструктуры были вырезаны и подготовлены микрошлифы. Исследование микроstructures проводили на инвертируемом металлографическом микроскопе Olympus GX51 после травления в реактиве «Nital 4 %».

Микроstructure образца стали 42CrMo4 представляет собой ферритно-бейнитную структуру с обедненными углеродом участками в зоне светлого контура (рис. 2). В образцах сталей 20MnV6, 20Г, 40, С45 различий содержания ферритно-перлитных составляющих не выявлено. На рис. 3 представлены изображе-

ния микроstructures в зоне светлого контура и в зоне структуры основного металла образца стали 20MnV6.

При исследовании механических характеристик с помощью прибора измеряли микротвердость в соответствии с ISO 6507-1 «Материалы металлические. Испытание на твердость по Виккерсу» в зоне светлого контура и основной структуры. Результаты приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, твердость в зоне светлой полосы ниже твердости основной структуры, но в пределах требований ГОСТ для горячекатаного состояния. Различная травимость участков металла может быть обусловлена химической неоднородностью. Основные ликвирующие элементы – это углерод, сера, фосфор,

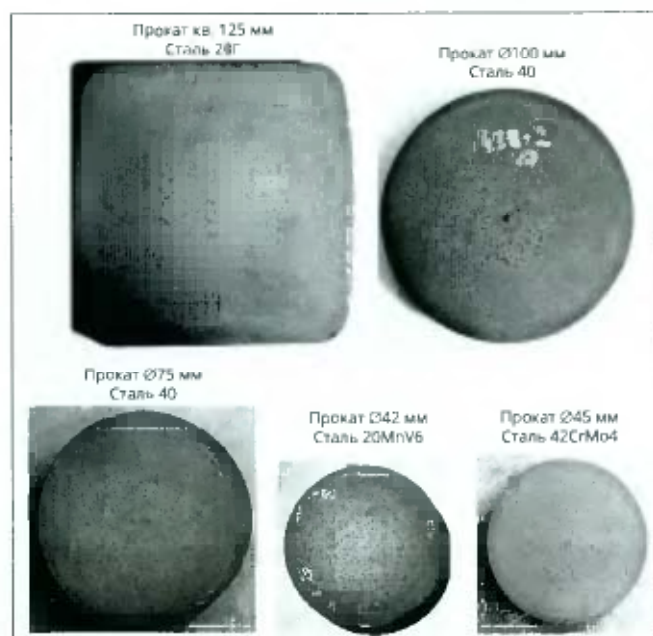


Рис. 1. Макроструктура поперечного сечения горячекатаной заготовки с ярко выраженной светлой полосой (контуром)

Таблица 1. Результаты измерения микротвердости в зонах основная структура/светлый контур

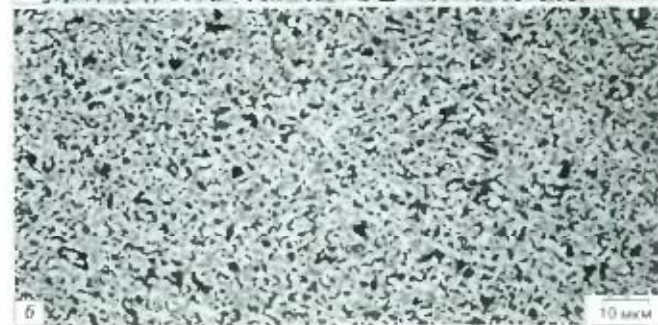
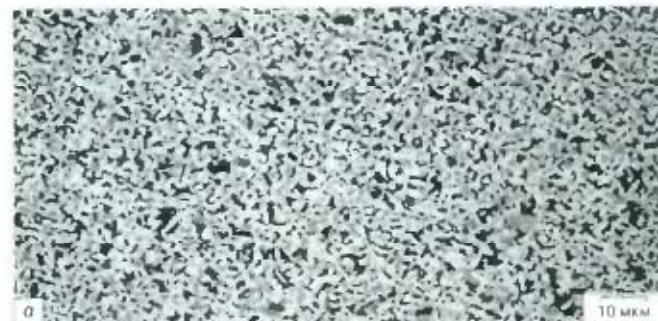
Образцы стали	Значение твердости $HV_{0,05} \sim (HB)$	Требования
40 diam. 75 мм	196,8–198,7 (186–187) 185,6–187,2 (176–178)	ГОСТ 1050 Не более HB 217
C45 diam. 110 мм	213,8–214,7 (202–203) 208,1–208,5 (198)	После ТО
42CrMo4 diam. 45 мм	308,2–308,6 (293) 266,8–268,1 (254–255)	После ТО
40ХН2МА diam. 140 мм	235,0–236,4 (223–224) 215,3–219,9 (204–204)	ГОСТ 4543 Не более HB 269
20MnV6 diam. 42 мм	218,0–223,4 (213–214) 198,2–213,0 (188–202)	—
20Г квадрат 125 мм	199,2–199,7 (188–189) 184,3–186,4 (175–177)	После ТО

Таблица 2. Результаты химического анализа образцов

Наименование	Массовая доля элементов, %				
	C	Mn	P	S	Cr
Сталь 20Г кв. 125 мм					
Светлый контур	0,163	0,89	0,009	0,0093	0,053
Основной металл	0,192	0,91	0,011	0,0105	0,054
Готовый сорт	0,188	0,92	0,0096	0,0087	0,056
ГОСТ 4543	0,17–0,24	0,70–1,00	Не более 0,035	Не более 0,035	Не более 0,30
Сталь 40 diam. 110 мм					
Светлый контур	0,355	0,567	0,0103	0,0226	0,095
Основной металл	0,397	0,584	0,0123	0,0274	0,106
Готовый сорт	0,393	0,556	0,0129	0,028	0,096
ГОСТ 1050	0,37–0,45	0,50–0,80	Не более 0,035	Не более 0,04	Не более 0,25

Рис. 2. Микроструктура образца круга diam. 45 мм стали 42CrMo4: а – основная структура; б – светлый контур. $\times 1000$

хром и марганец. Толщина светлой полосы составляет 0,5–3 мм, поэтому есть трудности с определением отбора материала для определения его химического состава. Для сравнения массовой доли ликвирующих

Рис. 3. Микроструктура образца круга diam. 75 мм стали 40: а – основная структура; б – светлый контур. $\times 100$

элементов основной структуры и светлой полосы исследовали темплеты с наиболее ярко выраженным дефектом. В зоне светлой полосы для получения стружки использовали сверло diam. 2 и 3 мм. Место отбора

Таблица 3. Режимы электромагнитного перемешивания согласно инструкции

Содержание С, %	Режим	Сечение НЛЗ, мм	
		250×300	300×400
Менее 0,3	Частота, Гц	2	2
	Сила тока, А	450	450
0,3-0,5	Частота, Гц	2	2
	Сила тока, А	500	500
	Крутящий момент, Н·см	180-220	115-145

Таблица 4. Режимы электромагнитного перемешивания (ток, А/частота, Гц) согласно плану работ

С ≤ 0,25 %, С = 0,25-0,50 %				
№ варианта	Сечение 250×300 мм	Скорость разливки, м/мин	Сечение 300×400 мм	Скорость разливки, м/мин
1	350/1,5	0,85	400/1,5	0,55
2	350/2,0	0,85	400/2,0	0,55
3	400/1,5	0,85	450/1,5	0,55
4	400/2,0	0,85	450/2,0	0,55
5	450/2,5	0,7	500/2,0	0,5

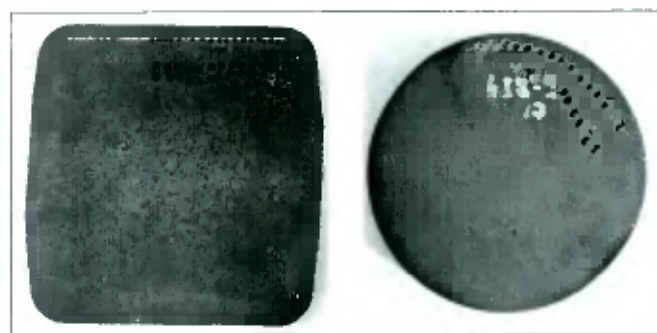


Рис. 4. Точки отбора стружки для химического анализа

стружки в зоне светлого контура и основной структуры в зоне столбчатых кристаллов показано на рис. 4.

Химический анализ проводили на анализаторе углерода и серы CS230 методом инфракрасной спектроскопии. Метод основан на сжигании навески пробы в токе кислорода при температуре 1350-1700 °С и определении количества образовавшегося диоксида углерода и двуокиси серы путем измерения поглощенной им инфракрасной радиации.

Как видно из табл. 2, содержание всех ликвирующих элементов в зоне светлого контура снижено по сравнению с основным металлом. Содержание углерода в светлой полосе образцов ниже требований стандартов. Значения микротвердости светлой полосы и основного металла также подтверждают наличие химической неоднородности. Следует отметить, что чем более ярко выражена светлая полоса на макротемплете, тем более низкие значения твердости получены по сравнению с основной структурой. Требуемое стандартами определение твердости в основном проводится на образцах после термообработки (нормализация-отпуск или отжиг).

Важный фактор в образовании химической неоднородности – перераспределение ликватов, концентрация их в локальных зонах вследствие процессов массопереноса, вынужденного и естественного движения

металла. Интенсивность развития гидродинамических и конвективных потоков, сил капиллярного массопереноса, движения металла, вызванного механическим воздействием на оболочку слитка, определяют степень развития ликвации. Весьма сильное воздействие, определяющее затвердевание и химическую неоднородность слитка в кристаллизаторе, оказывают интенсивные струйно-циркуляционные потоки, вызванные гидродинамическим воздействием струи металла из промежуточного ковша. Мощные потоки жидкого металла омывают фронт затвердевания, препятствуя образованию жидкотвердой составляющей двухфазной зоны, тормозя рост твердой оболочки и смывая обогащенный примесями расплав из междендритного пространства. При этом чем больше скорость и концентрация потоков, тем больше неравномерность фронта затвердевания и эффективность вымывания примесей. Вследствие влияния вынужденных потоков в поверхностном слое заготовки формируется зона отрицательной ликвации [2].

Для установления причин получения светлого контура провели статистический анализ результатов оценки макроструктуры в период 2017 – 2018 гг. После анализа был разработан план работ по улучшению качества выпускаемой продукции. Планом работ на первом этапе предусматривалось провести разливку плавов по разным режимам работы катушек электромагнитного перемешивания (ЭМП). Дополнительно перед разливкой опытных плавов провели калибровку и настройку оборудования МНЛЗ-3. Особое внимание уделялось таким узлам, как катушки ЭМП, а также распылению форсунок в зоне вторичного охлаждения (ЗВО), исправности столов качания кристаллизатора, состоянию роликов ПТМ. Установка измененных параметров катушек ЭМП проводилась в течение одной плавки на одном из работающих ручьев. С опытного ручья, а также с любого другого работающего ручья отбирали по одной пробе для сравнительной оценки макроструктуры. Изменение параметров разливки

проводилось только при соблюдении температурно-скоростных режимов разливки [3]. В табл. 3 указаны режимы работы катушек ЭМП, используемые согласно технологической инструкции для стали с разным содержанием углерода.

В табл. 4 приведены режимы работы катушек и скорости разливки согласно плану работ.

Оценка макроструктуры экспериментальных заготовок показала, что изменение работы катушек ЭМП позволило снизить балл светлого контура. Одновременно со снижением балла светлого контура на некоторых пробах произошло увеличение балла подусадочной ликвации. Лучшие результаты получены при использовании варианта № 3. Для накопления статистической информации и исключения влияния вторичных факторов на результаты экспериментов проведение экспериментальной работы продолжается.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования позволили определить химическую неоднородность стали в образцах с

дефектом макроструктуры «светлая полоса». В месте расположения дефекта на некоторых пробах содержание углерода было ниже требуемых значений.

2. Разница значений твердости углеродистой качественной стали в зоне светлой полосы и основного металла составила *НВ* 10, легированной высококачественной – *НВ* 20.

3. Для исключения дефекта макроструктуры «светлая полоса (контур)» проведены экспериментальные исследования по изменению параметров режимов работы катушек ЭМП.

4. Для накопления статистической информации и исключения влияния вторичных факторов на результаты экспериментов решено продолжить работу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 58228–2018. Заготовка стальная непрерывнолитая. Методы контроля и оценки макроструктуры.
2. Микронеоднородность металлов и сплавов «Дендритная ликвация в сталях и сплавах» Электронный ресурс www.metal-archive.ru.

Статья поступила 22.12.2020

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Журнал «Сталь» публикует статьи о новых технологиях и оборудовании, а также о совершенствовании уже применяемых в черной металлургии, о передовом опыте улучшения качества и повышения конкурентоспособности продукции, путях достижения рентабельности производства, уменьшении вредного воздействия на окружающую среду и о других важных для отрасли вопросах.

В статье следует сообщить цель проведения работы, привести фактические данные, их анализ и дать заключение (выводы). Текст статьи объемом не более 12 страниц должен быть дополнен **кратким рефератом** (3 – 5 предложений) и **ключевыми словами на русском и английском языках**, указанием УДК, а также списком подписей к рисункам. Библиографический список следует оформлять в соответствии с ГОСТ 7.1–2003; на труднодоступные источники просьба не ссылаться. Рисунки (рекомендуемая норма – до 5) должны быть четкими, упрощенными и не загроможденными надписями, без масштабной сетки (за исключением номограмм).

К статье должен быть приложен список авторов с указанием ФИО полностью, места работы каждого, телефона и электронного адреса.

Число авторов от 1 – 2 организаций не должно превышать 5 человек. Если статья представлена от большого числа организаций, то допускается в среднем по два человека от каждой организации.

Все материалы статьи редакция просит представлять в электронном виде (текст – в программе Word (Times New Roman, размер шрифта 12, междустрочный интервал 1,5)), рисунки – отдельным файлом в форматах TIFF или JPEG, диаграммы – в формате EXCEL).