ПОСЛЕДСТВИЯ МИКРОФИЗИЧЕСКОЙ ЛИКВАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СВАРОЧНЫХ СТАЛЯХ

*В. А. БИГЕЕВ, д-р техн. наук, профессор кафедры металлургии и химических технологий;
А. Б. СЫЧКОВ, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры литейного производства и материаловедения,
absychkov@mail.ru; М. В. ПОТАПОВА, канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии и химических
технологий; Г. Я. КАМАЛОВА, аспирант кафедры литейного производства и материаловедения
(Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия, г. Магнитогорск)*

Аннотация. Дефекты стали металлургического происхождения (подкорковые пузыри, загрязнения, макро- и микроликвация химических элементов, неметаллические включения) во многом определяют дефектность металлопроката. Значимое влияние на его качество оказывают процессы ликвации химических элементов в макро- и микрообъемах стали. Рассмотрены причины возникновения микрофизической дендритной ликвации в сталях сварочного назначения типа Св-09Г2С и Св-08ГНМ. Исследован механизм формирования дендритов и степень ликвации химических элементов по поперечному сечению непрерывнолитой заготовки (НЛЗ). Для оценки степени ликвации использован критерий — коэффициент ликвации, определяемый как отношение массовых долей химических элементов в различных микрообластях (дендриты, междендритные промежутки) поперечного сечения НЛЗ к содержанию этих элементов по ковшовому анализу плавки или друг к другу в разных микрообластях. Исследована наследственность передачи ликвации от НЛЗ к готовой катанке из сталей Св-08Г2С и Св-08ГНМ. Установлено, что снижение количества бейнитно-мартенситных участков в результате уменьшения дендритной ликвации химических элементов обеспечивается путем минимизации в пределах марочного химического состава содержания как основных, так и примесных легирующих элементов, а также дополнительным легированием стали бором из расчета отношения бора к азоту на уровне $B/N = 0,8 \pm 0,15$. Показано, что для снижения междендритной ликвации необходимо разработать и внедрить эффективные режимы модифицирования стали кальцием, редкоземельными металлами, а также электромагнитного перемешивания стали при непрерывной разливке.

Ключевые слова: непрерывнолитая заготовка, микрофизическая ликвация, механизм формирования дендритов, коэффициент ликвации, микролегирование, модифицирование, электромагнитное перемешивание.

Ссылка для цитирования. Бигеев В.А., Сычков А.Б., Потапова М.В., Камалова Г.Я. Последствия микрофизической ликвации химических элементов в сварочных сталях // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 2. С. 206–213.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-2-206-213

CONSEQUENCES OF MICROPHYSICAL SEGREGATION OF CHEMICAL ELEMENTS IN WELDED STEELS

*V. A. BIGEEV, HD (Tech), Prof., Dpt "Metallurgy and chemical technologies";
A. B. SYCHKOV, HD (Tech), Prof. Ass., Dpt "Foundry production and metal science", absychkov@mail.ru;
M. V. POTAPOVA, PhD (Tech), Prof. Ass., Dpt "Metallurgy and chemical technologies";
G. YA. KAMALOVA, postgraduate, Dpt "Foundry production and metal science"
(Magnitogorsk State Technical University after G.I. Nosov, Russia, Magnitogorsk)*

Abstract. Defects of metallurgy-originated steel (sub-cored bubbles, impurities, macro- and micro-segregations of chemical elements, nonmetallic inclusions) to a large extent determines the faultiness of metal rolled products. The processes of chemical elements segregation in steel macro- and micro volumes considerably influence its quality. Reasons of microphysical dendrite segregation originating in steels of welding purpose of Св-09Г2С and Св-08ГНМ type considered. Mechanism of dendrites formation studied as well as the segregation degree of chemical elements along the continuously casted billet cross section. To estimate the segregation degree a criteria was used — the segregation coefficient, determined as relation of chemical elements mass shares in different micro-areas (dendrites, inter-dendrite gaps) of continuously casted billet cross section to those elements content by a ladle analysis of a heat or one another in different micro-areas. A heredity of segregation transfer from CC billet to finished wire rod of Св-08Г2С and Св-08ГНМ steels studied. It was determined, that decrease of the number of bainite-martensite areas as a result of decrease of dendrite segregation of chemical elements takes place by minimization within grade chemical composition of both main alloying element and impurities ones. Besides an additional alloying of steel by boron takes place based on boron to nitrogen

relation at the level of $B/N = 0,8 \pm 0,15$. It was shown that to decrease the inter-dendrite segregation it is necessary to elaborate and implement effective steel modifying by calcium and REMs regimes as well as electro-magnetic stirring during continuous casting.

Key words: continuously casted billet, microphysical segregation, dendrite forming mechanism, segregation coefficient, micro-alloying, modifying, electromagnetic stirring.

For citation. Bigeev V.A., Sychkov A.B., Potapova M.V., Kamalova G.Ya. Consequences of microphysical segregation of chemical elements in welded steels. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 2, pp. 206–213. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-2-206-213

Дефекты стали металлургического происхождения (подкорковые пузыри, загрязнения, макро- и микроликвация химических элементов, неметаллические включения) во многом определяют дефектность проката, проволоки в процессе переработки стальной продукции. Значимое влияние на качество металлопродукции в этом случае оказывают процессы ликвации химических элементов в макро- и микрообъемах стали. Ниже приведен пример влияния такой ликвационной неоднородности в сталях сварочного назначения Св-08Г2С и Св-08ГНМ на их дальнейшую переработку.

Роль микрофизической дендритной неоднородности в литом металле и ее влияние на свойства металлопроката и стальных изделий хорошо известны [1–3]. В участках структуры с повышенной ликвацией, как правило, впоследствии формируются нежелательные закалочные структуры: бейнит, мартенсит, выделяются избыточные карбиды. Наличие в структуре продуктов мартенситного и бейнитного превращений снижает деформируемость, повышает обрывность катанки при волочении в проволоку и требует использования начального и/или промежуточного рекристаллизационного отжига.

Поэтому исследование распределения химических элементов в дендритах и междендритных участках непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) и изготовленной из нее катанки в сталях Св-08Г2С и Св-08ГНМ, предназначенных для производства сварочной проволоки, является актуальным [4–6].

Изучение распределения химических элементов проводили на растровом электронном микроскопе TS 5130 MM фирмы TESCAN, Чехия, с приставкой для микроанализа, включающей энергодисперсионный и волновой рентгеновские спектрометры фирмы Oxford Instruments Analytical, Великобритания. Коэффициенты ликвации химических элементов в различных зонах макроструктуры НЛЗ определяли расчетным методом.

Для подтверждения ликвационной природы повышенного содержания бейнитно-мартенситных участков (БМУ) в сердцевине катанки было проведено исследование распределения углерода, марганца и кремния в катанке diam. 5,5 мм из стали Св-08Г2С, содержащей 0,06 % С; 1,80 % Мн; 0,82 % Si; 0,058 % Cr. Результаты исследования распределения БМУ в поперечном сечении катанки при помощи оптического микро-

скопа приведены на рис. 1. Максимальное количество БМУ (до 27 %) наблюдается в центре сечения катанки, затем их количество постепенно уменьшается и в поверхностных слоях катанки БМУ отсутствуют.

Рис. 1. Распределение БМУ по сечению катанки diam. 5,5 мм из стали Св-08Г2С

Fig. 1. Distribution of bainite-martensitic areas along cross section of the 5.5 mm diameter wire rod of steel Св-08Г2С

После микроанализа, проведенного на энергодисперсионном рентгеновском спектрометре INCA Energy 300, расчеты показали, что концентрация марганца в БМУ составляет $2,7 \pm 0,15$ %, а в феррите — $1,72 \pm 0,03$ %, т. е. коэффициент ликвации $k_{\text{ликв. Мн}}$, определяемый как отношение концентраций химического элемента в БМУ и феррите, составляет до 1,68, а по сравнению с ковшовым анализом — до 1,58.

Наследственность ликвации от НЛЗ до готовой катанки проследили также на стали Св-08ГНМ. Изучили распределение химических элементов в дендритах и междендритных участках НЛЗ и в дальнейшем в катанке, изготовленной из той же заготовки.

Схема отбора проб для определения ликвации в НЛЗ представлена на рис. 2, результаты исследования — в табл. 1. Выявление дендритной структуры производили травлением в кипящем растворе пикрата натрия (рис. 3). После выявления структуры вдоль дендритных стволов с помощью индентора микротвердомера наносили метки (рис. 4). Далее с целью снятия поверхностных искажений, вызванных химическим воздействием травителя, осуществлялась повторная переполровка и в отмеченных участках проводили анализ состава.

Рис. 2. Схема подготовки испытательных образцов (а) и проведения измерений (б) дендритной ликвации в НЛЗ:
МДУ — междендритные участки; К — корковая зона; ЗСК — зона столбчатых кристаллов;
ЗРК — зона равноосных кристаллов; ДВ1 — дендритная ветвь 1-го порядка

Fig. 2. Diagram of test samples preparation (a) and dendrite segregation measuring (б) in CC billet:
МДУ — inter-dendrite areas; К — shell zone; ЗСК — columnar crystals zone; ЗРК — equiaxed crystals zone;
ДВ1 — dendrite branch of 1st order

ТАБЛИЦА 1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В НЛЗ

TABLE 1. DISTRIBUTION OF CHEMICAL ELEMENTS IN A CC BILLET

Место исследования	Параметр	Исследуемый химический элемент ± доверительный интервал			
		Si ± 0,008	Mo ± 0,018	Mn ± 0,011	Ni ± 0,007
Корковая зона	Минимальное значение	0,214	0,846	0,699	0,470
	Максимальное значение	0,269	1,032	0,780	0,572
	Среднее значение	0,224	0,859	0,712	0,513
	Ковш. значение	0,260	0,930	0,670	0,540
	$k_{л-к/ковш-ср}$	0,862	0,934	1,063	0,950
	$k_{л\Sigma-к/ковш}$	0,813			
Оси дендритов первого порядка	Минимальное значение	0,181	0,769	0,663	0,470
	Максимальное значение	0,224	0,952	0,751	0,527
	Среднее значение	0,205	0,853	0,713	0,514
	$k_{л-ДВ1/ковш-ср}$	0,789	0,917	1,064	0,952
	$k_{л\Sigma-ДВ1/ковш}$	0,733			
Междендритные участки	Минимальное значение	0,214	0,846	0,699	0,470
	Максимальное значение	0,269	1,032	0,780	0,572
	Среднее значение	0,239	0,938	0,738	0,556
	$k_{л-МДУ/ковш-ср}$	0,919	1,009	1,102	1,030
	$k_{л\Sigma-МДУ/ковш}$	1,053			
Корка – дендритный ствол	$k_{л-к/ДВ1-ср}$	1,093	1,007	0,999	0,998
	$k_{л\Sigma-к/ДВ1}$	1,097			
Корка – междендритный участок	$k_{л-к/МДУ-ср}$	0,937	0,915	0,965	0,923
	$k_{л\Sigma-к/МДУ}$	0,764			
Дендритный ствол – междендритный участок	$k_{л-ДВ1/МДУ-ср}$	0,858	0,909	0,966	0,925
	$k_{л\Sigma-ДВ1/МДУ}$	0,697			

$k_{л\Sigma-к/ДВ1/МДУ} = 0,584/1,712$.

Примечание. $k_{л-к/ковш-ср}$, $k_{л-ДВ1/ковш-ср}$, $k_{л-к/МДУ-ср}$, $k_{л-ДВ1/МДУ-ср}$ — коэффициенты ликвации химических элементов в корковой зоне по сравнению со средним содержанием элементов в ковшовой пробе, в дендритном стволе и средним содержанием элементов в ковшовой пробе, корковой зоне и средним содержанием элементов в междендритных участках, дендритном стволе и средним содержанием элементов в междендритных участках соответственно; $k_{л\Sigma-к/ковш}$, $k_{л\Sigma-ДВ1/ковш}$, $k_{л\Sigma-к/МДУ}$, $k_{л\Sigma-ДВ1/МДУ}$ — суммарный коэффициент ликвации химических элементов в сравниваемых зонах НЛЗ, рассчитываемый как произведение частных коэффициентов ликвации по каждому химическому элементу соответственно.

Рис. 3. Дендритное строение НЛЗ, выявленное специальным микротравлением (щелочной раствор пикрата натрия), $\times 50$: а — корковая зона; б — зона столбчатых кристаллов; в — зона стыка столбчатых кристаллов по углу НЛЗ; г — осевая зона (зона равноосных кристаллов). Светлые полосы — оси дендритов, темные участки — междендритные промежутки

Fig. 3. Dendrite structure of a CC billet, revealed by a special micro-etching (alkaline solution of sodium picrate), $\times 50$: а — shell zone; б — columnar crystals zone; в — zone of columnar crystals junction by CC billet angle; г — axial zone (equiaxed crystals zone). Bright strips — dendrite axes, dark areas — inter-dendrite spaces

Рис. 4. Междендритные участки, отмеченные с помощью отпечатков индентора микротвердомера (травление удалено полировкой), $\times 500$

Fig. 4. Inter-dendrite areas, marked by imprint of micro-hardness gauge indenter (etching removed by polishing), $\times 500$

Химический состав соответствующих участков сечения НЛЗ определялся по современной

методике локального химического микроанализа, заключающегося в совместном использовании как энергодисперсионного спектрометра (ЭДС), так и волнового спектрометра (ВС) [5–7]. Это позволяет использовать преимущества быстрого анализа на ЭДС с возможностями более медленного, но с высокой разрешающей способностью анализа на ВС.

На исследуемом участке сначала проводился элементный (качественный) анализ на ЭДС, а затем — количественный анализ на ВС с использованием стандартных образцов фирмы МАС, Великобритания, соответственно по зависимостям интенсивности импульсов (имп/с) от энергии (кэВ) и длины волны (ангстрем).

Анализ результатов исследований показывает, что для низкоуглеродистой легированной стали Св-08ГНМ основными ликвидирующими элементами являются марганец, кремний, никель и молибден. Марочный химический состав стали и массовые доли химических элементов конкретной исследовательской плавки представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СТАЛИ Св-08ГНМ

TABLE 2. CHEMICAL COMPOSITION OF Св-08ГНМ STEEL

Химический состав	Массовая доля химических элементов, %								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
Требования нормативного документа (НД)	$\leq 0,07$	0,55–0,77	0,15–0,30	$\leq 0,020$	$\leq 0,015$	$\leq 0,10$	0,52–0,75	$\leq 0,20$	0,87–0,95
По ковшовой пробе	0,05	0,67	0,26	0,010	0,007	0,04	0,54	0,15	0,93

Данные табл. 2 показывают, что для стали Св-08ГНМ с вышеуказанным химическим составом в результате дендритной ликвации НЛЗ наблюдается следующее:

- по кремнию — отрицательная ликвация во всех зонах НЛЗ (корковой, в дендритах и междендритных участках) по сравнению с ковшовым анализом, а также в корковой зоне по сравнению с междендритными участками и в дендритах по сравнению с междендритными участками; положительная ликвация — в корковой зоне по сравнению с дендритным стволом;

- по молибдену — отрицательная ликвация относительно корковой зоны и стволом дендрита, корковым и междендритным участками (МДУ), стволом дендрита (ДВ1 — дендритная ветвь 1-й степени) и МДУ — ковш, положительная ликвация (незначительная) — МДУ — ковш, корка — ДВ1;

- по марганцу — положительная ликвация — корка — ковш, МДУ — ковш и отрицательная ликвация — корка — ДВ 1, корка — МДУ и ДВ1 — МДУ;

- по никелю — все отношения имеют отрицательную ликвацию, кроме МДУ — ковш;

- суммарные коэффициенты ликвации четырех химических элементов, рассчитанные как произведения частных коэффициентов ликвации отдельных элементов, относительно невысоки — 0,697–1,097 (их обратные значения — 1,435–0,912), что существенно меньше, чем у стали Св-08Г2С [8, 9], $k_{\Sigma} \approx 3,4$ (по углероду, марганцу и кремнию).

Наблюдающаяся в структуре катанки из исследуемой стали полосчатость возникает в результате микроликвации элементов, которые входят в ее состав. Проведенный микрорентгено-спектральный анализ (МРСА) показал, что распределение элементов по сечению специально выбранных участков структуры, включающих структурные полосы и феррито-перлитные участки, характеризуются существенно меньшим отклонением, чем для стали Св-08Г2С.

Снижение содержания в стали упрочняющих элементов, таких как углерод, марганец, кремний, никель, молибден, ванадий, до минимальных марочных значений, а также добавки регламентированного содержания бора в соответствии с содержанием в стали азота ($B/N = 0,8$) позволили снизить развитие ликвационных процессов как в НЛЗ, так и в катанке и уменьшить развитие структурной полосчатости. Это привело к повышению деформируемости катанки на метизном переделе. Физический смысл отношения бора к азоту в вышеуказанном отношении, близком к стехиометрическому отношению бора и азота в нитриде бора BN, сводится к тому, что бор и азот, находясь во взаимосвязанном состоянии друг с другом, нейтрализуют негативное воздействие каждого из элементов на свойства стали и в первую

очередь на деформационную способность катанки при волочении. Эти негативные воздействия проявляются следующим образом. С одной стороны, избыток бора (выше стехиометрического соотношения) обуславливает повышенную прокаливаемость металла — увеличивает количество БМУ, что приводит к повышенной обрывности катанки и проволоки. С другой стороны, превышение массовой доли азота более вышенного отношения этих элементов вызывает проявление процесса старения стали, что повышает сопротивление металла деформации, и его дополнительное упрочнение за счет размещения атомов “свободного” азота в позициях внедрения в кристаллической решетке железа. Последнее также способствует росту количества БМУ в стали. Из опыта получен допустимый интервал отношения бора к азоту на уровне $B/N = 0,8 \pm 0,15$.

Образование БМУ приводит к снижению деформируемости катанки и повышению обрывности при волочении, что обуславливает неспособность ее к безотжиговому волочению. Одной из причин формирования БМУ являются ликвационные процессы, развивающиеся при непрерывной разливке стали и фазовых превращениях при охлаждении.

В катанке из стали Св-08Г2С с бором, как показал МРСА, распределение марганца между структурными составляющими является более равномерным. Содержание марганца в БМУ составляет $2,4 \pm 0,12$ %, в феррите — $1,82 \pm 0,03$ %, что соответствует $k_{\text{ликв. Mn}} = 1,32$. В связи с этим можно предположить, что повышенная пластичность катанки из стали Св-08Г2С с бором по сравнению с катанкой из стали Св-08Г2С без бора обусловлена влиянием бора, способствующим снижению ликвации и более равномерному распределению легирующих элементов по сечению НЛЗ, а затем и катанки [9–15]. Ликвационное повышение содержания марганца по сечению приводит к росту количества БМУ в центральных областях катанки и снижению пластичности. Кроме того, в результате связывания атомов азота в боронитридные соединения мартенсит в структуре катанки из стали Св-08Г2С менее пересыщен азотом и имеет большую склонность к деформационному формоизменению, чем мартенсит в двухфазной структуре катанки из этой стали без бора.

Для частичного подавления дендритной ликвации необходимы уменьшение C_s , Mn_s , в основном за счет снижения содержания углерода, марганца и кремния, и рациональное микролегирование стали бором в соотношении $B/N \approx 0,8$. Это подтверждается результатами исследования распределения легирующих элементов марганца и кремния между структурными составляющими катанки из стали Св-08Г2С. Как видно из табл. 3, в катанке из борсодержащей стали разработан-

ного химического состава ($C = 0,09\%$; $Mn_s = 2,21\%$; $C_s = 0,60\%$; $B = 0,005\%$, $B/N = 1,17$) также наблюдается проявление дендритной ликвации, выражающейся в образовании в катанке БМУ с повышенной концентрацией марганца и кремния. Содержание марганца и кремния в БМУ по среднему значению в 1,24–1,31 и 1,16–1,24 раза превышает их содержание в феррите и перлите соответственно. Максимальный уровень ликвации указанных элементов составляет для марганца 1,77 (БМУ — феррит) и 1,43 (БМУ — перлит),

для кремния — 1,82 и 1,63 соответственно. Однако для катанки без бора развитие ликвационных процессов более значительно, чем для стали с микродобавками бора в количестве, близком к рекомендуемому уровню ($B/N = 0,8 \pm 0,15$). Коэффициенты ликвации отдельных химических элементов в катанке из стали без бора $k_{ликв}$ по C , Mn , Si равны 2,0; 2,7; 1,8 соответственно, что превышает уровень ликвации этих же элементов в стали с бором в 1,2; 1,9 и 1,3 раза соответственно.

ТАБЛИЦА 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕЖДУ СТРУКТУРНЫМИ СОСТАВЛЯЮЩИМИ В КАТАНКЕ ДИАМ. 5,5 мм ИЗ СТАЛИ Св-08Г2С*¹ С БОРОМ

TABLE 3. DISTRIBUTION OF MAIN ALLOYING ELEMENTS BETWEEN STRUCTURE COMPONENTS IN 5.5 mm DIAMETER WIRE ROD, STEEL Св-08Г2С*¹ WITH BORON

Исследуемый участок	Параметр	Химический состав по элементам, % (мас.)	
		Mn	Si
Феррит	Минимальное значение	1,44	0,57
	Максимальное значение	2,05	0,82
	Среднее значение	1,80	0,72
	Δ * ²	1,33–2,17	0,50–0,90
	$k_{ликв}$ * ³	0,72–1,18	0,63–1,13
Перлит	Минимальное значение	1,79	0,64
	Максимальное значение	2,09	0,84
	Среднее значение	1,93	0,76
	Δ	1,66–2,23	0,55–0,92
	$k_{ликв}$	0,90–1,21	0,69–1,16
Бейнитно-мартенситные участки	Минимальное значение	2,02	0,83
	Максимальное значение	2,55	1,04
	Среднее значение	2,24	0,94
	Δ	1,90–2,68	0,75–1,12
	$k_{ликв}$	1,03–1,45	0,94–1,41
$k_{\Sigma} = 1,62$	$k_{ликв. БМУ-Ф ср.}$	1,24	1,31
$k_{\Sigma} = 1,44$	$k_{ликв. БМУ-П ср.}$	1,16	1,24

*¹ Химический состав стали катанки по ковшовой пробе, %: 0,09 C; 1,843 Mn; 0,795 Si.
*² Δ — интервал изменения.
*³ $k_{ликв} = C_{ковш}/C_{струк}$, где $C_{ковш}$ — содержание химического элемента в ковшовой пробе; $C_{струк}$ — содержание химического элемента в структурной составляющей.

Ввиду невозможности количественного определения углерода была выполнена качественная оценка содержания этого элемента в анализируемых фазах. Интенсивность эмитируемого характеристического рентгеновского излучения элементов, содержащихся на анализируемом

участке, является мерой их концентрации, поэтому в качестве критерия содержания углерода было выбрано значение интенсивности рентгеновского излучения. Полученные данные свидетельствуют о значительном обогащении БМУ углеродом (табл. 4).

**ТАБЛИЦА 4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛЕРОДА В СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ
СТАЛИ Св-08Г2С С БОРОМ**

TABLE 4. DISTRIBUTION OF CARBON IN STRUCTURE COMPONENTS OF STEEL Св-08Г2С WITH BORON

Структурные составляющие	Среднее значение интенсивности пика углерода, имп·с/нА (С)	К _{ликв}
Феррит	62,9	1,5–1,8
БМУ	93,8–113,2	
Примечание. К _{ликв} = С _{БМУ} /С _{феррита} , в среднем — 1,65; максимальная степень микроликвации углерода, марганца и кремния в стали Св-08Г2С составляет, в среднем, 3,37 (2,00–6,89).		

Таким образом, различие содержания углерода, кремния и марганца в микрообъемах стали приводит к формированию различных продуктов распада переохлажденного аустенита. Повышение деформируемости за счет минимизации количества БМУ в микроструктуре катанки из стали Св-08Г2С обеспечивается прежде всего снижением степени общего легирования стали — уменьшением содержания углерода, марганца и

кремния в допускаемых НД и заказчиками пределах и нормированным микролегированием стали бором. Аналогичная картина наблюдается и для стали Св-08ГНМ — в этой стали также необходимо снизить количество упрочняюще-прокаливающих элементов (С, Мn, Si, Ni, Мо) до минимального уровня, допускаемого НД для марочного состава, и обеспечить отношение бора к азоту на уровне $0,8 \pm 0,15$.

Выводы

1. В сталях обеих анализируемых марок стали с бором по сравнению со сталью без бора наблюдается снижение суммарного коэффициента ликвации химических элементов (для марки Св-08Г2С — по углероду, марганцу и кремнию, для марки Св-08ГНМ — по углероду, марганцу, кремнию, никелю и молибдену) примерно в 3 раза.

2. В катанке из стали Св-08Г2С дендритная ликвация марганца, кремния и углерода, характеризующаяся средними коэффициентами 1,45; 1,41 и 1,65 соответственно, способствует образованию в структуре БМУ. Суммарный коэффициент ликвации указанных элементов в стали Св-08Г2С достигает 2–6,89 при среднем значении 3,37. Уменьшение количества БМУ в результате снижения дендритной ликвации указанных элементов обеспечивается путем снижения в пределах марочного химического

состава содержания как основных, так и примесных легирующих элементов, а также дополнительным легированием бором из расчета $B/N = 0,8 \pm 0,15$.

3. В катанке из стали Св-08Г2С коэффициенты ликвации по элементам составили (в среднем): марганца — 1,10; кремния — 1,27; никеля — 1,08; молибдена — 1,10. Суммарный коэффициент ликвации по указанным элементам достигает 1,66; принимая коэффициент ликвации углерода равным 1,65 (по аналогии с маркой Св-08Г2С), общий коэффициент ликвации составит 2,74.

4. Для снижения междендритной ликвации необходимо разработать эффективные режимы модифицирования стали кальцием, редкоземельными металлами, а также электромагнитного перемешивания стали при непрерывной разливке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ершов Г.С., Позняк Л.А. Микронеоднородность металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1985. — 214 с.
2. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. — М.: Металлургия, 1976. — 407 с.
3. Голиков И.Н. Дендритная ликвация в стали. — М.: Металлургиздат, 1958. — 206 с.
4. Батырев В.А. Рентгеноспектральный электроннозондовый микроанализ. — М.: Металлургия, 1982. — 152 с.
5. Основы аналитической электронной микроскопии / Под ред. Дж.Дж. Грена, Дж.И. Гольдштейна, Д.К. Джея, А.Д. Роминга; пер. с англ. под ред. М.П. Усикова. — М.: Металлургия, 1990. — 584 с.
6. Кальнер В.Д., Зильберман А.Г. Практика микронзондовых методов исследования металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1981. — 216 с.
7. Избранные методы исследования в металловедении / Под ред. Г.И. Хунгера, пер. с англ. — М.: Металлургия, 1985. — 416 с.
8. Структура и свойства катанки для изготовления электродов и сварочной проволоки / А.Б. Сычков, В.В. Парусов, А.М. Нестеренко и др. — Бендеры: Полиграфист, 2009. — 608 с.
9. Парусов В.В., Сычков А.Б., Жукова С.Ю. Химическая и структурная неоднородность в катанке из непрерывнолитой электростали Св-08Г2С // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. трудов. — Днепропетровск: ПГАСА, 2007. Вып. 41. Ч. 2. С. 30–33.

10. Майер Л., Штрасбургер Х., Шнайдер Х. Микролегирование ниобием, ванадием, титаном, цирконием и бором и его влияние на свойства современных сталей для автомобилестроения // Автостали: Сб. — М.: Машиностроение, 1988. С. 63–84.
11. Нестеренко А.М., Сычков А.Б. Размерно-геометрические аспекты легирования стали бором и медью // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. научных трудов. — Днепропетровск: Визин. 2004. Вып. 7. С. 181–183.
12. Малиночка Я.Н., Ковальчук Г.З., Ярмош В.Н. Структура и свойства низколегированной углеродистой стали, легированной бором и медью // Металловедение и термическая обработка металлов. 1981. № 11. С. 10–14.
13. Парусов В.В., Сычков А.Б., Деревянченко И.В. и др. Катанка повышенной деформируемости из стали Св-08Г2С // Металлург. 2007. № 2. С. 64–70.
14. Парусов В.В., Жукова С.Ю., Сычков А.Б. Кинетика фазовых превращений в катанке из непрерывнолитой электростали Св-08Г2С при непрерывном охлаждении // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. научн. трудов. — Днепропетровск: Визин, 2004. Вып. 9. С. 191–198.
15. Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. — М.: Металлургия, 1986. — 272 с.

Поступила 20 ноября 2018 г.

REFERENCES

1. Ershov G.S., Poznyak L.A. *Mikroneodnorodnost' metallov i splavov* [Microheterogeneity of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 214 p. (In Russ.).
2. Lakhtin Yu.M. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal science and heat treatment of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 407 p. (In Russ.).
3. Golikov I.N. *Dendritnaya likvatsiya v stali* [Dendritic segregation in steel]. Moscow: Metallurgizdat, 1958, 206 p. (In Russ.).
4. Batyrev V.A. *Rentgenospektral'nyi elektronnozonodovyi mikroanaliz* [X-ray electron probe microanalysis]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 152 p. (In Russ.).
5. *Osnovy analiticheskoi elektronnoi mikroskopii* [Fundamentals of analytical electron microscopy]. Gren D.D., Gol'dshtein D.I., Dzhei D.K., Roming A.D. ed. Moscow: Metallurgiya, 1990, 584 p. (In Russ.).
6. Kal'ner V.D., Zil'berman A.G. *Praktika mikrozonodovykh metodov issledovaniya metallov i splavov* [The practice of microprobe methods for the study of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1981, 216 p. (In Russ.).
7. *Izbrannye metody issledovaniya v metallovedenii* [Selected Research Methods in Metallurgy]. Khunger G.I. ed. Moscow: Metallurgiya, 1985, 416 p. (In Russ.).
8. Sychkov A.B., Parusov V.V., Nesterenko A.M., Zhukova S.Yu., Zhigarev M.A., Perchatkin A.V., Peregudov A.V., Chuiko I.N. *Struktura i svoystva kataniki dlya izgotovleniya elektrodov i svarochnoi provoloki* [Structure and properties of wire rod for the manufacture of electrodes and welding wire]. Bendery: Poligrafist, 2009, 608 p. (In Russ.).
9. Parusov V.V., Sychkov A.B., Zhukova S.Yu. *Khimicheskaya i strukturnaya neodnorodnost' v katanke iz nepreryvnolitoi elektrostali Sv-08G2S* [Chemical and structural heterogeneity in wire rod from continuously cast electric steel Sv-08G2S]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie: sb. nauchn. trudov* [Construction, materials science, mechanical engineering: Sat. scientific works]. Dnepropetrovsk: PGASA, 2007, no. 41, part 2, pp. 30–33. (In Russ.).
10. Maier L., Shtstrasburger Kh., Shnaider Kh. *Mikrolegirovanie niobiem, vanadiem, titanom, tsirkoniem i borom i ego vliyanie na svoystva sovremennykh staley dlya avtomobilestroeniya* [Microalloying with niobium, vanadium, titanium, zirconium and boron and its influence on the properties of modern steels for the automotive industry]. *Avtostali: Sb.* [Automobile steels: Sat.]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, pp. 63–84. (In Russ.).
11. Nesterenko A.M., Sychkov A.B. *Razmerno-geometricheskie aspekty legirovaniya stali borom i med'yu* [Dimensional-geometric aspects of boron and copper steel doping]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metallurgii: sb. nauchnykh trudov* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy: Sat. scientific works]. Dnepropetrovsk: Vizion, 2004, no. 7, pp. 181–183. (In Russ.).
12. Malinochka Ya.N., Koval'chuk G.Z., Yarmosh V.N. Structure and properties of low-alloyed carbon-alloyed steel alloyed with boron and copper. *Metallavedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1981, no. 11, pp. 10–14. (In Russ.).
13. Parusov V.V., Sychkov A.B., Derevyanchenko I.V., Zhukova S.Yu., Kucherenko O.L., Zhigarev M.A. Rods of increased deformability from steel Sv-08G2S. *Metallurg*, 2007, no. 2, pp. 64–70. (In Russ.).
14. Parusov V.V., Zhukova S.Yu., Sychkov A.B. *Kinetika fazovykh prevrashchenii v katanke iz nepreryvnolitoi elektrostali Sv-08G2S pri nepreryvnom okhlazhdenii* [Kinetics of phase transformations in wire rod of continuous electric steel Sv-08G2S with continuous cooling]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metallurgii: sb. nauchnykh trudov* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy: Sat. scientific works]. Dnepropetrovsk: Vizion, 2004, no. 9, pp. 191–198. (In Russ.).
15. Gol'dshtein Ya.E., Mizin V.G. *Modifitsirovanie i mikrolegirovanie chuguna i stali* [Modification and microalloying of iron and steel]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 272 p. (In Russ.).

Received November 20, 2018