

УДК 669.1.017:669.141.232:669.786:669.781

**Э. В. Парусов, А. Б. Сычков, И. Н. Чуйко,
Л. В. Сагура, А. И. Сивак, Т. Н. Голубенко**

**ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТАЛИ НА ОБРАЗОВАНИЕ
БЕЙНИТО-МАРТЕНСИТНЫХ УЧАСТКОВ В СТРУКТУРЕ БУНТОВОГО
ПРОКАТА СВАРОЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

ПАРУСОВ Эдуард Владимирович – к-т техн. наук, заведующий отделом, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова, г. Днепр, пл. Ак. Стародубова, 1, Украина, р.т. +38056 776 82 28; **СЫЧКОВ Александр Борисович** – д-р техн. наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, Россия, р.т.+7 919 348 66 84; **ЧУЙКО Игорь Николаевич** – к-т техн. наук, старший научный сотрудник, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова, г. Днепр, пл. Ак. Стародубова, 1, Украина, р.т.+38056 776 82 28, м.т. 050595859 7; e-mail: ichuyko@mail.ru; **САГУРА Людмила Владимировна** – к-т техн. наук, старший научный сотрудник, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова, г. Днепр, пл. Ак. Стародубова, 1, Украина, р.т. +38056 776 82 28, e-mail: slv_metal@mail.ru; **СИВАК Анна Ивановна** – научный сотрудник, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова, г. Днепр, пл. Ак. Стародубова, 1, Украина, р.т. +38056 776 82 28; **ГОЛУБЕНКО Татьяна Николаевна** – к-т техн. наук, старший научный сотрудник, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова, г. Днепр, пл. Ак. Стародубова, 1, Украина, р.т. +38056 776 82 28, e-mail: sumer@i.ua.

Показано, что основными принципами повышения технологической пластичности бунтового проката сварочного назначения являются: уменьшение общей степени легирования твердого раствора за счет снижения (в рамках требований нормативной документации) содержания в стали углерода, марганца и кремния; снижение микродеформации кристаллической решетки феррита и плотности дислокаций за счет уменьшения в твердом растворе количества атомов внедрения – азота, что достигается связыванием азота бором в мелкодисперсный нитрид бора при соотношении содержания бора и азота, близком к стехиометрическому.

***Ключевые слова:** бунтовой прокат, микроструктура, углеродный эквивалент*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует несколько технологических способов производства сварочной проволоки из горячедеформированного бунтового проката низкоуглеродистых кремнемарганцевых сталей Св-08Г2С, Св-08ГС (по ГОСТ 2246-70) и SG1, SG2, SG3 (по DIN 8559) [1]. При подготовке металла к холодной деформации (волочению) традиционная технология предусматривает удаление поверхностной окалины химическим способом и последующую переработку бунтового проката диаметром 5,5 мм в проволоку диаметром 2,0...0,8 мм с использованием дополнительной термической обработки – отжига. Однако такая технологическая схема производства сварочной проволоки является неэффективной и энергозатратной, имеет значительную продолжительность технологического цикла, требует использования большого количества энергоресурсов, вспомогательного оборудования, производственных площадей, повышения численности обслуживающего персонала, а также

является экологически небезопасной в виду необходимости утилизации травильных растворов.

Современная прогрессивная технологическая схема подразумевает использование механического удаления окалины с поверхности проката, последующей деформацией по схеме прямого волочения (без проведения отжига), совмещенного с электрохимическим омеднением поверхности проволоки готового профилеразмера диаметром 1,6...0,8 мм. Преимущества такой технологической схемы производства сварочной проволоки очевидны – сокращение затрат при отказе от кислотных растворов, снижение энергетических затрат за счет исключения термической обработки промежуточной заготовки, улучшение экологической чистоты производственного процесса.

Использование современной технологической схемы производства сварочной проволоки предъявляет более жесткие требования к качественным показателям исходного сырья (бунтового проката). Как известно, низкоуглеродистая кремнемарганцевая сталь сварочного назначения относится к мультифазным сталям и имеет феррито-бейнито-мартенситную структуру [2]. Наличие бейнито-мартенситных участков (БМУ) в структуре проката оказывает существенное влияние на его технологическую пластичность – способность к практически безобрывному волочению в проволоку диаметром до 0,8 мм с суммарным относительным обжатием до 98 %. Формирование однородной феррито-перлитной структуры стали, содержащей в минимальном количестве БМУ, является главной отличительной особенностью такого бунтового проката.

Для понимания особенностей процессов структурообразования в стали марки Св-08Г2С следует руководствоваться направленностью влияния базовых и примесных химических элементов на особенности распада аустенита при непрерывном охлаждении проката.

Низкоуглеродистая кремнемарганцевая сталь является сложным по химическому составу сплавом. Кроме основы – железа, в ней присутствуют химические элементы, содержание которых обусловлено технологическими особенностями производства и потребительскими свойствами (углерод, марганец, кремний), невозможностью их полного удаления (сера, фосфор, кислород, водород, азот), сопутствующими примесями, переходящими в сталь из шихтовых материалов (никель, хром, медь).

Углерод оказывает наиболее сильное воздействие на сталь, поэтому при незначительном содержании других элементов именно он является основным элементом, обеспечивающим формирование свойств металла. Увеличение содержания углерода вызывает повышение прочностных и снижение пластических показателей металла. Марганец занимает одно из лидирующих положений среди других химических элементов стали по влиянию на повышение устойчивости аустенита, в виду того, что уменьшает скорость роста зародышей феррита и снижает критическую скорость закалки [3]. Кремний используется для раскисления стали и в этом его влияние аналогично марганцу. Кремний структурно не обнаруживается из-за того, что полностью растворим в ферритной матрице. Он незначительно повышает устойчивость переохлажденного аустенита за счет уменьшения коэффициента диффузии углерода в γ - и α -железе [3].

К постоянным примесям относят фосфор, серу и газы (кислород, водород, азот), которые присутствуют в различном количестве, в зависимости от способа выплавки стали. Газы могут находиться в стали в различных агрегатных состояниях: в несплошностях (газообразное состояние), в ферритной матрице, а также

образовывать различные соединения (оксиды, нитриды). Повышенное содержание оксидных и нитридных включений в значительной степени снижает технологическую пластичность бунтового проката при волочении. Азот является вредной примесью для сталей, подвергаемых холодной пластической деформации с высокими степенями. Уменьшение растворимости азота в стали во время превращения γ - в α -железо является основной причиной негативного влияния азота на свойства стали. В результате этого образуется пересыщенный азотом твердый раствор, характеризующийся повышенным искажением (микродеформацией) кристаллической решетки. В дальнейшем азот концентрируется вблизи дислокаций, затрудняя их передвижение в процессе деформации металла («старение» стали), вызывая снижение пластических показателей [4]. Немаловажным фактором влияния на устойчивость аустенита исследуемой стали является также концентрация бора в твердом растворе. Соединение BN (α -модификация) образуется при обычном давлении и используется в виде высокотемпературной смазки для подшипников [5]. Ввод микролегирующих добавок бора в сталь открывает новые возможности для получения экономнолегированных марок сталей, эксплуатационные характеристики которых не только не уступают, а в некоторых случаях и превосходят комплекс свойств сталей, получаемых с использованием обычных систем легирования.

При микролегировании стали бором возможна реализация следующих механизмов связывания азота [4]:

- отношение содержаний бор-азот ($B+N$) $< 0,8$ свидетельствует о недостатке бора для связывания азота и обуславливает упрочняющее действие свободного азота на ферритную матрицу;
- отношение $B+N \approx 0,8$ свидетельствует о практически полном связывании бора и азота в пластичное соединение BN;
- отношение $B+N > 0,8$ свидетельствует о полном связывании азота и дополнительном присутствии бора в твердом растворе.

Результаты многочисленных исследований авторов настоящей работы показали, что бор, находящийся в твердом растворе, повышает прокаливаемость бунтового проката. Это обусловлено тем, что бор, являясь горофильным элементом, уменьшает свободную энергию границ до уровня, достаточного для предотвращения образования на границах зерен феррита и бейнита [6]. Атомы бора, имеющие несколько больший атомный радиус, чем углерод, концентрируются в дефектах кристаллической решетки железа. Поскольку дефекты имеют меньшие размеры, чем атомы железа, концентрация бора в дефектах кристаллической решетки не увеличивает, а уменьшает ее искаженность, понижая энергию решетки и вероятность зарождения новых фаз, вследствие чего увеличивается время (инкубационный период) до начала выделения феррита [7].

Ввиду изложенного представляло интерес провести исследование влияния химического состава стали на образование и изменение количества БМУ в структуре бунтового проката стали Св-08Г2С.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом для исследований служил бунтовой прокат диаметром 5,5 мм борсодержащей стали Св-08Г2С, химический состав которой приведен в табл. 1.

В качестве интегрального показателя химического состава стали был принят углеродный эквивалент ($C_э$), а для оценки влияния микролегирования –

отношение содержаний бора к азоту (B÷N). Анализ проводился на основании данных о химическом составе горячедеформированного проката и результатов металлографических исследований. Объем анализируемой выборки составил

Таблица 1

Химический состав исследуемых плавков стали Св-08Г2С

Вид анализа	Массовая доля элементов ¹ , %					
	C	Si	Mn	S	P	N
	Не более или в пределах					
ГП ²	0,08	0,68...0,92	1,65...1,95	0,015	0,020	0,008

Примечание: ¹ – массовые доли хрома, никеля, меди соответствовали нормам, установленным для стали марки Св-08Г2С по ГОСТ 2246-70, а их суммарное содержание в стали не превышало 0,35 %; ² – горячедеформированный прокат

257 плавков. Определение взаимосвязи между $C_э$, B÷N и количеством БМУ проводили методом многокритериальной оптимизации [8]. Изменение количества БМУ в структуре бунтового проката от химического состава стали определяли стандартными методами статистической обработки результатов исследований. Металлографический анализ выполняли на световом оптическом «Olympus BX51M» и растровом электронном «VEGA TS5130MM» микроскопах.

Результаты исследований и их обсуждение

Характеристики исходного массива данных для проведения анализа представлены в табл. 2.

Результаты обработки массива исследуемых данных с использованием метода многокритериальной оптимизации представлены в виде трехмерной поверхности отклика, спроецированной на плоскость (картограммы), рис. 1.

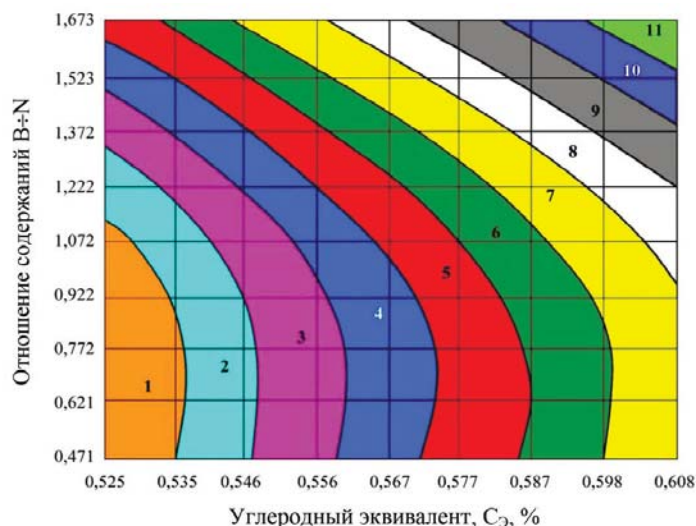


Рис. 1. Влияние $C_э$ и B÷N на изменение $Q_{БМУ}$ в структуре бунтового проката из стали Св-08Г2С. 1 – 0 %; 2 – 2,3 %; 3 – 4,5 %; 4 – 6,8 %; 5 – 9,1 %; 6 – 11,3 %; 7 – 13,6 %; 8 – 15,9 %; 9 – 18,2 %; 10 – 20,4 %; 11 – 22,7 %

Полученные результаты свидетельствуют о том, что количество БМУ в структуре проката возрастает как с ростом $C_э$, так и при повышении B÷N, а минимальное количество БМУ сохраняется при больших значениях $C_э$ в интервале B÷N = 0,47...0,77, чем при B÷N > 0,77.

Таблиця 2

Значения комплексных показателей исследуемых плавок бунтового проката из стали Св-08Г2С

Показатель	Параметры ¹			
	X _{min}	X _{max}	X _{ср}	n
C _э	0,474	0,608	0,559	257
B÷N	0,04	2,67	0,99	
Q _{БМУ}	0	35	8,36	

Примечание: ¹ – C_э – углеродный эквивалент, % (C_э = C + Mn÷5 + Si÷7 + (Cr + Ni + Cu)÷12); B÷N – отношение содержаний бора к азоту в стали; Q_{БМУ} – количество БМУ в структуре проката, %; X_{min} – минимальное значение; X_{max} – максимальное значение; X_{ср} – среднее значение; n – количество плавок в выборке

В результате регрессионного анализа массива данных получено эмпирическое выражение (функция отклика), позволяющее прогнозировать количество БМУ в структуре бунтового проката при заданных параметрах режима деформационно-термической обработки (ДТО):

$$Q_{\text{БМУ}} = -76,88 + 149,55 \cdot C_{\text{э}} + 3,12 \cdot B \div N$$

Знак «+» при числовых коэффициентах указывает на повышение показателя, а знак «-» на его снижение.

Эмпирическое выражение подвергли проверке на предмет адекватности и значимости коэффициентов.

Ввиду того, что расчетные значения критерия Фишера и критерия Стьюдента больше табличных при заданном уровне значимости ($\alpha = 0,05$) и доверительной вероятности ($p = 0,95$), то представленная зависимость является адекватной и между исследуемыми факторами существует взаимосвязь.

Данные картографического анализа подтверждают правильность обобщения результатов исследований: при повышении C_э и B÷N количество БМУ в структуре стали возрастает. При определении вклада каждого из значимых факторов установлено, что на образование и повышение количества БМУ в бунтовом прокате стали Св-08Г2С наиболее значимое влияние оказывает C_э (вклад интегрального показателя 86,5 %), а вклад отношения B÷N составляет 13,5 %.

Металлографический анализ, проведенный на продольных шлифах, показал, что в местах обрывов наблюдаются слабдеформируемые БМУ, которые и являются главной причиной преждевременного разрушения металла в процессе волочения. Это объясняется различием значений микротвердости: от 310 HV (стальная матрица) до 470 HV (вблизи зоны разрушения). Исследования, выполненные на растровом электронном микроскопе, оснащенный рентгеновскими энергодисперсионным и волновым спектрометрами, позволили установить распределение базовых легирующих элементов в структурных составляющих бунтового проката (табл. 3).

Таблиця 3

Распределение химических элементов в структурных составляющих бунтового проката из стали Св-08Г2С

Исследуемая структура	Содержание элемента, % масс. ¹			
	Si		Mn	
	X _{min}	X _{max}	X _{min}	X _{max}
Феррит	0,58	0,76	1,52	1,90
Перлит	0,57	0,78	1,49	1,89
БМУ	0,68	0,94	1,87	2,62

Примечание: ¹ – см. примечание к табл. 2

Данные табл. 3 свидетельствуют о том, что образование БМУ обусловлено ликвацией кремния и марганца. Коэффициент ликвации рассматриваемых элементов для исследуемых зон составил: $k_{\text{лSi}} = 1,19 \dots 1,24$, $k_{\text{лMn}} = 1,26 \dots 1,38$. Анализ локальных участков мест разрушения проволоки показал, что микронадрывы, расположенные вблизи БМУ, приводящие к преждевременному разрушению металла при волочении, находятся преимущественно в осевой зоне продольного сечения проволоки, а микротвердость таких участков составляет до 750 HV. По нашему мнению, ликвация химических элементов может быть вызвана малой степенью деформационной проработки при горячей прокатке заготовки сечением 125×125 мм [9, 10].

В процессе волочения проволоки БМУ, имея более высокую твердость в сравнении с ферритной матрицей, выступают в роли естественных структурных концентраторов напряжений (рис. 2) и способствуют возникновению трещин в металле и его повышенной обрывности в процессе холодной пластической деформации.

Следовательно, главной причиной повышения обрывности бунтового проката стали Св-08Г2С при волочении с высокими степенями деформации является наличие слабдеформируемых БМУ, которые вызывают образование макро- и микротрещин на границе раздела с ферритной матрицей.

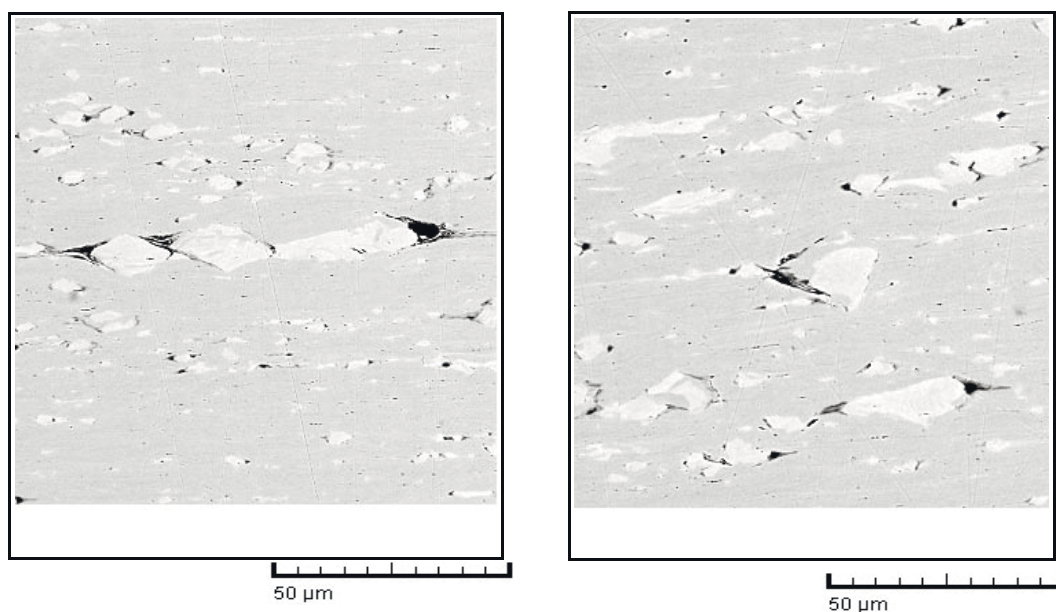


Рис. 2. Образование трещин в структуре проволоки из стали Св-08Г2С вблизи бейнито-мартенситных участков

ВЫВОДЫ

Результаты исследований свидетельствуют о том, что для повышения технологической пластичности бунтового проката стали Св-08Г2С необходимо стремиться: к уменьшению степени легирования твердого раствора за счет снижения содержания в стали углерода, марганца и кремния (в рамках требований нормативной документации); к снижению микродеформации кристаллической решетки феррита и плотности дислокаций за счет уменьшения в твердом растворе количества атомов внедрения – азота, что обеспечивается путем связывания его бором в мелкодисперсное

пластичное соединение нитрид бора с соотношением B÷N, близким к стехиометрическому (~ 0,8).

Показано, що основними принципами підвищення технологічної пластичності катанки зварювального призначення є: зменшення загального ступеня легування твердого розчину за рахунок зниження (в рамках вимог нормативної документації) вмісту в сталі вуглецю, марганцю та кремнію; зниження мікрODEФОРМАЦІЇ кристалічної решітки фериту та щільності дислокацій за рахунок зменшення в твердому розчині кількості атомів впровадження – азоту, що досягається за рахунок зв'язування азоту бором в дрібнодисперсний нітрид бору при співвідношенні вмісту бору й азоту, близькому до стехіометричного.

Ключові слова: бунтовий прокат, мікроструктура, вуглецевий еквівалент

It is shown that the main principles of increasing the technological plasticity of the welding wire rods are: reduction the doping general degree of the solid solution by diminishing the manganese and silicon contents in carbon steel (in the framework of the requirements of the normative documentation); reduction of microdeformation of the crystal lattice of ferrite and density of dislocations by reducing the number of atoms of nitrogen in the solid solution, which is achieved by binding nitrogen with boron into finely dispersed boron nitride at a ratio of the content of boron and nitrogen, close to stoichiometric.

Keywords: Wire rod, microstructure, carbon equivalent

1. Парусов В. В. Металлургические факторы, определяющие технологическую пластичность при волочении катанки из кремнемарганцевых сталей / В. В. Парусов, А. Б. Сычков, С. Ю. Жукова [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : Сб. научных трудов ИЧМ НАНУ. – Днепропетровск: Візiон. – 2004. – Вып. 7. – С. 322–330.
2. Парусов В. В. Кинетика фазовых превращений в катанке из непрерывно-литой электро-стали Св-08Г2С при непрерывном охлаждении/ В. В. Парусов, С. Ю. Жукова, М. Ф. Евсюков [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : Сб. научных трудов ИЧМ НАНУ. – Днепропетровск : Візiон. – 2004. – Вып. 9. – С. 191–197.
3. Гудремон Э. Специальные стали: В 2 т. / Э. Гудремон // Пер. с немецкого. – М. : Металлургиздат, 1960, – 1638 с.
4. Парусов В. В. Влияние химического состава на структуру, свойства и технологическую пластичность катанки сварочного назначения из стали Св-08ГНМ / В. В. Парусов, А. Б. Сычков, И. Н. Чуйко [и др.] // Теория и практика металлургии. – 2009. – № 1–2. – С. 98–102.
5. Лахтин Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов / Лахтин Ю. М. – М.: Металлургия, 1984. – 360 с.
6. Лякишев Н. П. Борсодержащие стали и сплавы / Н. П. Лякишев, Ю. Л. Плинер, С. И. Лаппо. – М. : Металлургия, 1986. – 192 с.
7. Качанов Н. Н. Прокаливаемость стали. 2-е изд. / Н. Н. Качанов. – М. : Металлургия, 1978. – 192 с.
8. Можаренко Е. Н. Методика анализа и прогнозирования механических свойств конструкционных сталей с учетом влияния неконтролируемых легирующих элементов / Е. Н. Можаренко, Д. Н. Тогобицкая // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. труд. – К. : Наукова Думка, 1999. – Вып. 3. – С. 116–119.
9. Парусов В. В. Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки / Парусов В. В., Сычков А. Б., Парусов Э. В. – Дн-ск. : АРТ-ПРЕСС. – 2012. – 376 с.
10. Сычков А. Б. Структура и свойства катанки для изготовления электродов и сварочной проволоки / А. Б. Сычков, В. В. Парусов, А. М. Нестеренко [и др.]. – Бендеры : Полиграфист. – 2009. – 607 с.