УДК 621.771.252.01 DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-3-55-70

ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СВАРОЧНОЙ КАТАНКИ*

Кижнер М.[1], Сычков А.Б.[2], Шекшеев М.А.[2], Малашкин С.О.[2], Камалова Г.Я.[2]

[1] ХОД-АССАФ Металс Лтд. – завод в Кирьят-Гате, Ашкелон, Израиль
[2] Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация
Постановка задачи: микроструктура металла в основном определяет комплекс механических и эксплуатационных свойств металлопродукции, способность металлических изделий к последующей переработке и конечному применению. В технической и патентной литературе рассмотрено влияние металлургического качества исходной непрерывно-литой заготовки, а также параметров технологии производства и термической обработки на структуру и свойства катанки сварочного назначения. Однако в ряде случаев имеются противоречия в выборе эффективных технологических режимов по формированию однородной ферритной структуры с полным или частичным исключением негативных бейнитно-мартенситных участков в низкоуглеродистой легированной катанке. Повышение пластичности катанки в настоящей статье решается на стадии производства стали и термической обработки катанки, а не переносится традиционно на метизный передел. **Целью работы** является анализ влияния металлургических факторов и термической обработки на структуру катанки для изготовления сварочных электродов и омедненной проволоки для полу- и автоматической сварки и разработка эффективной сквозной технологии производства стали, ее внепечной обработки, непрерывной разливки, прокатки катанки и ее поточной термической обработки на линии двустадийного охлаждения Stelmor, обеспечивающей высокую технологичность безотжигового волочения катанки в проволоку и получение требуемого комплекса эксплуатационных свойств вышеуказанных сварочных материалов. **Используемые методы:** химический состав стали определялся на типовых спектрометрах. Металлографические исследования проводились методами оптической и электронной растровой и просвечивающей микроскопии. Микроликвация химических элементов, а также химический состав неметаллических включений определялись на энергодисперсионном и волновом рентгеновских спектрометрах в составе растрового (сканирующего) электронного микроскопа методом микрорентгеноспектрального анализа (МРСА). Измерение микротвёрдости структурных составляющих производили на микротвердомерах при различных нагрузках. Катанка испытывалась на разрывных машинах на растяжение. Термокинетическая диаграмма была построена дилатометрическим методом. **Новизна** заключается в разработке научно обоснованных решений по рационализации химического состава низкоуглеродистой стали, легированной марганцем, хромом, никелем, молибденом, ванадием в различных составах и концентрациях, определении условий эффективного микролегирования стали бором в соотношении с содержанием в металле азота, выбору эффективного диапазона температуры аустенитизации низкоуглеродистой легированной катанки для обеспечения на воздушной стадии эффективной скорости квазиизотермического охлаждения, значения которой были получены при анализе построенной нами термокинетической диаграммы распада аустенита при непрерывном охлаждении. **Результат:** установлены следующие научно обоснованные закономерности: сталь микролегируют бором в отношении бора к азоту на уровне 0,8±0,15 для исключения вредного действия свободных бора и азота, заключающегося в том, что бор повышает закаливаемость стали, а азот упрочняет феррит и остаривает металл, при этом минимизируют содержание упрочняющих элементов в стали на уровне их минимального значения по марочному составу с использованием в качестве оценочного критерия расчет углеродного и/или марганцевого эквивалентов, значения которых должны быть не более 0,55 и 2,10% соответственно. Термическая обработка (ТО) стали типа Св-08Г2С и Св-08ХГ2СМФ заключается в аустенитизации при 950–980°С и охлаждении металла под теплоизолирующими крышками со скоростью 0,15–0,30°С/с с формированием структуры феррита с минимальным количеством (не более 5 и 15% соответственно) бейнитно-мартенситных участков в сечении катанки. Это обеспечило высокую технологичность катанки при волочении без применения смягчающих термических обработок. **Практическая значимость:** в итоге обеспечивается требуемый нормативной документацией (НД) и потребителями комплекс наилучших структуры и свойств катанки с высокой технологичностью ее переработки в проволоку. Так, для стали Св-08Г2С временное сопротивление разрыву катанки снизилось с 750 до 500 МПа, относительное сужение выросло с 35 до 75%, количество бейнитно-мартенситных участков уменьшилось в 8 раз (с 40 до 5%), исключены 2 промежуточных рекристаллизационных отжига при волочении катанки диаметром 5,5 мм в проволоку диаметром 0,8 мм.

* В работе принимали участие: Жигарев М.А. – к.т.н., нач. технического отдела ООО «Тулачермет-сталь», Тула; Столяров А.Ю. – к.т.н., гл. технолог ООО «Специальные технологии», Магнитогорск.

© Кижнер М., Сычков А.Б., Шекшеев М.А., Малашкин С.О., Камалова Г.Я., 2016

Ключевые слова: металлургические факторы, микролегирование, бор, катанка, линия Stelmor, термическая обработка, скорость охлаждения, структура, свойства, бейнитно-мартенситные участки.

Введение

Общеизвестно, что свойства металлопродукции определяются структурным состоянием сплава [1–5].

В настоящее время актуален вопрос обеспечения качественной катанкой метизные предприятия по производству проволоки для изготовления электродов и материала для полу- и автоматической сварки из низкоуглеродистой легированной стали типа Св-08Г2С, Св-08ХГ2СМФ и др. [6–26]. При этом первостепенным является комплекс качественных показателей катанки, наследственно формируемый уровнем качества непрерывно-литой заготовки (НЛЗ), а также технологией прокатного производства и термической обработки катанки. В связи с вышеуказанным, исследование степени влияния параметров сквозной технологии на конечные свойства катанки определяет эффективность ее переработки в проволоку диаметром 0,8 (0,6)–5,0 мм. На базе проведенных исследований, анализа полученных результатов разработан эффективный технологический процесс производства стали, НЛЗ и катанки для производства сварочных материалов.

Современный электрометаллургический комплекс для производства сортового проката описан в работах [27, 28] и включает в себя дуговую сталеплавильную печь (ДСП), установку печь-ковш (УКП), вакууматор типа VD/VOD или RH, машину непрерывной разливки заготовок (МНЛЗ), мелкосортно-проволочный или проволочный стан, линию двустадийного охлаждения типа Stelmor.

Ниже приводятся особенности структурообразования и формирования механических свойств в зависимости от металлургического качества стали и режимов термической обработки катанки.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является катанка диаметром 5,5–8,0 мм из низкоуглеродистой стали типа Св-08Г2С, Св-08ХГ2СМФ, комплексно легированной марганцем, хромом, никелем, молибденом, ванадием для изготовления сварочной проволоки.

Требования к химическому составу и механическим свойствам катанки исследуемых сталей указаны в **табл. 1**. Уточненный химический состав опытной стали будет приведен ниже по мере рассмотрения конкретной металлопродукции.

Катанку прокатывали на стане из НЛЗ малого сечения 125×125 мм с последующей термической обработкой на линии двухстадийного охлаждения Stelmor стана 320/150.

Таблица 1

Химический состав и механические свойства катанки широкого марочного состава до усовершенствования технологии

НД, марка стали, размер	Массовая доля химических элементов, %									Механические свойства		
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	N	$\sigma_в$, МПа	Ψ, %	δ_5, %
ГОСТ 2246 Св-08Г2С 5,5–6,5 мм	0,05–0,11	1,80–2,10	0,70–0,95	≤0,025	≤0,030	≤0,20	≤0,25	≤0,25	≤0,010	Нн, факт. ≤ 700	Нн факт. ≥ 35	Нн факт. ≥ 12
ГОСТ 2246 Св-08ХГ2СМФ, Св-08ХГСМФА 6,5–8,0 мм	0,06–0,10 Mo = 0,50–0,70	1,20–1,50	0,45–0,70	≤0,025	≤0,025	0,95–1,25	≤0,30	≤0,25	≤0,015	Нн, факт. ≤ 800	Нн факт. ≥ 20	Нн факт. ≥ 10

Примечание. Нн – не нормируется.

Поточную термообработку катанки проводили сначала на проектной проволочной линии стана с «короткой» линией Stelmor, а далее – на реконструированной линии с «длинным» Stelmor. Проектная короткая линия имела общую длину 75 м, 15 вентиляторов мощностью по 15 кВт под цепным транспортером витков, участок под теплоизолирующими крышками длинной 40 м, скорость транспортирования витков катанки цепным транспортером составляла 0,2–1,5 м/с. На такой линии можно было обеспечить скорость охлаждения витков катанки, разложенных виткообразователем на цепном транспортере витков, в диапазоне 1,7–10°С/с. Для обеспечения скоростей охлаждения катанки сварочного назначения на уровне 0,15–0,30°С/с, необходимых для формирования эффективной структуры металла и обеспечения безотжигового волочения катанки с высокой степенью деформации, была проведена модернизация линии Stelmor. После реконструкции линия «длинный» Stelmor состоит из роликового каскадного транспортера витков длинной 147 м, 6 вентиляторов – блоков струйного охлаждения мощностью 160 кВт, 4 вентиляторов мощностью 75 кВт, участка под теплоизолирующими крышками длинной 120 м. Скорость роликового транспортера изменяется в диапазоне 0,09–1,5 м/с.

Выполнение исследований, связанных с разработкой химического состава и ТО катанки повышенной деформируемости, обусловило необходимость и целесообразность проведения на различных стадиях технологического процесса производства химических анализов стали, катанки и проволоки, механических и технологических испытаний, изучения макро- и микроструктуры, состава неметаллических включений, определении массы окалины на поверхности катанки, а также распределения основных упрочняющих элементов и постоянных примесей по сечению катанки.

Металлографические исследования проводились методами оптической и электронной (просвечивающей и растровой) микроскопии. Распределение химических элементов по сечению катанки и проволоки, а также химический состав неметаллических включений определялись на энергодисперсионном и волновом рентгеновских спектрометрах. Измерение микротвёрдости структурных составляющих производили на микротвердомерах при различных нагрузках.

Катанка испытывалась на разрывных машинах на растяжение. Исследование механических и технологических свойств проволоки проводили на образцах, отобранных на характерных (после сухого и мокрого волочения) профилеразмерах.

Дилатометрические образцы диаметром 3,0 и 4,0 мм изготавливали из катанки диаметром 5,5 мм. Температуру при нагреве и охлаждении образцов контролировали хромель-алюмелевыми термопарами, приваренными к поверхности образцов, с диаметром электродов 0,3 мм. Аустенитизацию проводили при 950°С в течение 2–3 мин с последующей выдержкой 5 мин. Последующее охлаждение дилатометрических образцов осуществляли по программе в печах с различной тепловой инерцией, на спокойном воздухе, под вентилятором, в масле и воде. Температуры начала и конца фазовых превращений определяли по регистрируемым дилатограммам, среднюю скорость охлаждения образцов – по термограммам.

Теория, технико-технологические разработки, результаты и их обсуждение

Катанка из низкоуглеродистой легированной кремнемарганцевой стали для сварочной проволоки

Требования к низкоуглеродистой легированной стали марки Св-08Г2С нормируют ГОСТ 2246, ряд Технических условий и Соглашений с потребителями. Химический состав этой стали, механические свойства и структурные параметры катанки диаметром 5,5–6,5 мм представлены в **табл. 2**.

Основные особенности нового процесса производства катанки из стали Св-08Г2С заключаются в минимизации содержания упрочняющих элементов на нижнем марочном уровне с рациональным соотношением бора к азоту и откорректированной технологии воздушного охлаждения витков катанки на линии Stelmor: скорость транспортирования витков уменьшена до 0,09–0,12 м/с, что увеличило время выдержки катанки под теплоизолирующими крышками до 1000–1380 с и обеспечило скорость охлаждения металла на уровне 0,25–0,15°С/с. Последнее обусловлено необходимостью сведения к минимуму образование бейнитно-мартенситных участков (БМУ) в катанке сварочного назначения. Для этого также проведено ограничение содержания химических элементов на минимальном марочном уровне (и даже используя поле минусовых допусков); например, содержание углерода устанавливается в диапазоне 0,05–0,07%, марганца – 1,75–1,80%, кремния – 0,7–0,8%, $C_э = C + Mn/5 + Si/7 + (Cr+Ni+Cu)/12 \leq 0{,}55\%$, $Mn_э = Mn + (C+Si)/3 + Cr/5 + Cu/9 \leq 2{,}10\%$. Важно также обеспечить связывание азота и бора в нитрид бора в соотношении атомных весов этих элементов: $B/N = 0{,}8 \pm 0{,}15$. Пластифицирующее действие при этом обусловлено двойным действием. Во-первых, вывод азота из твердого раствора обеспечивает исключение искажения кристаллической решетки феррита, кроме того, связанный азот не вызывает старения

стали во времени и повышает ее деформируемость. Во-вторых, связывание бора в нитрид бора исключает закаливаемость стали, которая резко возрастает при нахождении бора в свободном – эффективном состоянии.

Таблица 2

Требования НД к металлу из стали Св-08Г2С до усовершенствования технологии

Массовая доля химических элементов, %					Механические свойства		
C/Mn	Si/P	S/Cr	Ni/Cu	N/$C_э$	$\sigma_в$, МПа	ψ, %	Структура
0,05–0,11±0,01	0,70–0,95±0,05/	≤ 0,025/ ≤ 0,20 +	≤ 0,25/	≤ 0,010/	640–750	28–35	Не допускаются закалочные структуры, фактически до 40% БМУ
1,8–2,1±0,05	≤ 0,030	0,02	≤0,20	0,55–0,72, ср. зн. – 0,64			

Примечание. As ≤ 0,08%, Ti ≤ 0,04;$C_э$= C + Mn/5 + Si/7 + (Cr +Ni + Cu)/12.

При производстве катанки диаметром 5,5 мм из стали Св-08Г2С из НЛЗ сечением 125×125 мм необходимо учитывать влияние микродендритной ликвации в стали [27]. В связи с этим для формирования качественной макроструктуры и минимизации ликвационных явлений в НЛЗ и катанке наиболее эффективны методы разливки стали с обеспечением максимального развития зоны равноосных кристаллов (ЗРК) и подавления образования столбчатых кристаллов. При этом наиболее эффективны ЭМП разливаемой стали; виброимпульсное воздействие на кристаллизующийся слиток; методы механического и термического обжатия НЛЗ; введение в кристаллизатор центральной затравки – проволоки из стали того же состава, что и разливаемый металл, с целью формирования второго направления кристаллизации и получения более равноосной структуры.

Проведенные нами исследования позволили установить закономерности структурообразования в анализируемом металле в зависимости от химического состава стали, режимов термической обработки. На **рис. 1–9** представлены термокинетическая диаграмма (ТКД), структурная диаграмма, микротвердость образцов в зависимости от скорости охлаждения, тонкая микроструктура, особенности формирования структуры металла при изотермической выдержке.

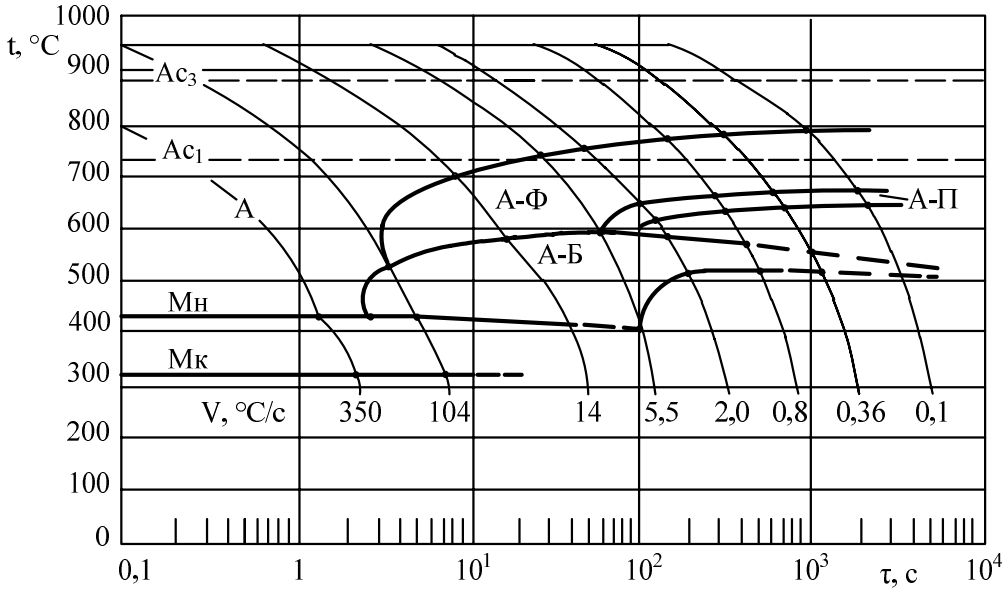


Рис. 1. Термокинетическая диаграмма превращений аустенита в электростали Св-08Г2С (C – 0,07%; Mn – 1,79%; Si – 0,78%; B – 0,0084%)

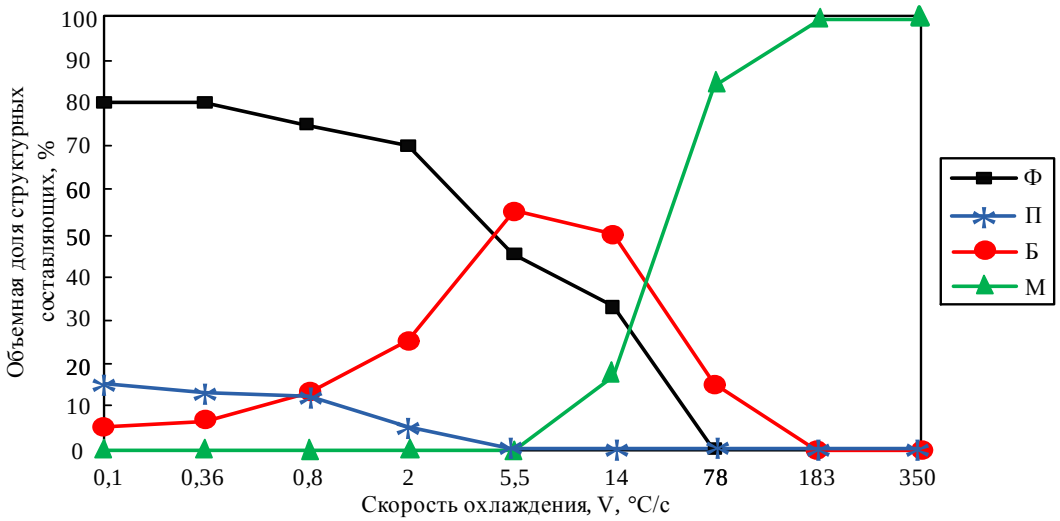


Рис. 2. Структурная диаграмма превращений аустенита в электростали Св-08Г2С (C – 0,07%; Mn – 1,79%; Si – 0,78%, B – 0,0084%)

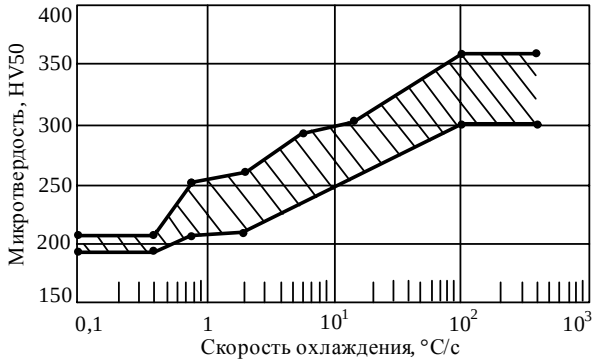
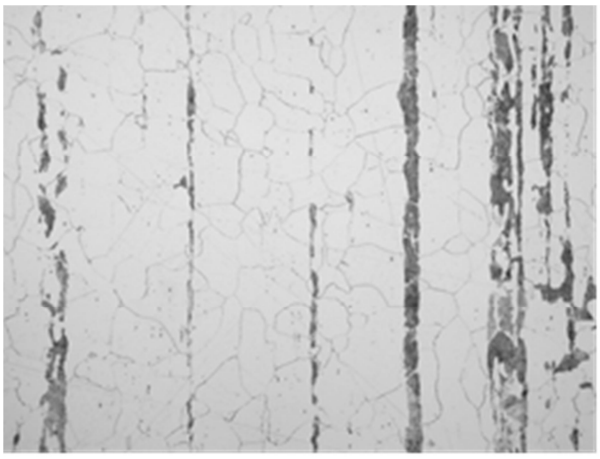


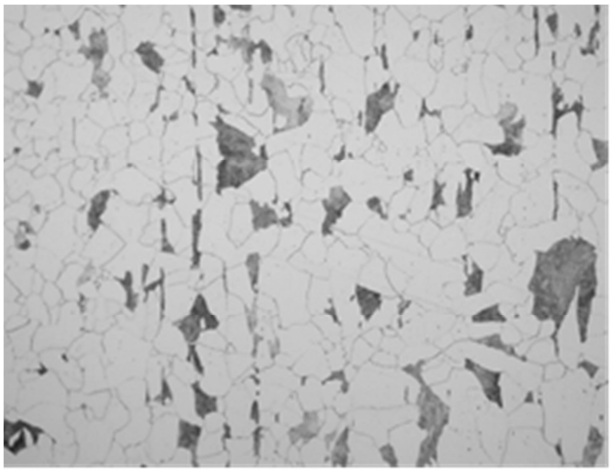
Рис. 3. Микротвердость дилатометрических образцов, охлажденных со скоростями 0,1; 0,36; 0,8; 2,0; 5,5; 14,0; 104,0; 350,0°C/c (верхняя кривая – максимальное, нижняя – минимальное значения)

Изучена работа системы ЭМП, в которой силовая катушка расположена непосредственно вокруг медной гильзы, что увеличивает ее эффективность по сравнению с системой ЭМП, у которой катушка располагается вокруг кристаллизатора. Результаты исследований показывают, что в НЛЗ и катанке имеются соответственно участки и остатки дендритного строения, что обусловливает наличие ликвационных полосок «шнуров» и структурной полосчатости **(рис. 10)** с участком БМУ, которые выявляются и в проволоке; основными ликвирующими элементами являются C, Mn и Si [28]; эффективность действия ЭМП снижается при увеличении степени перегрева металла над температурой ликвидус **(рис. 11)**.

Исследование проводилось в три этапа, характеристики и результаты которых представлены в **табл. 3**.



а



б

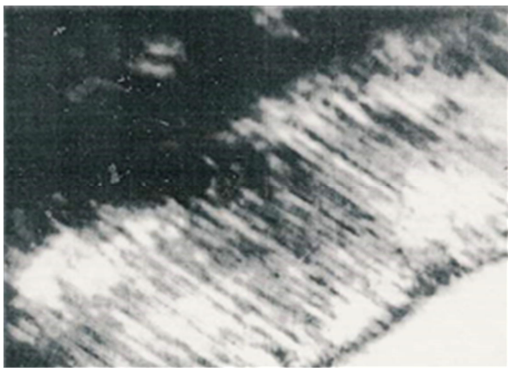
Рис. 4. Ферритно-перлитная полосчатость на продольном образце, ×500: а – центральная зона; б – поверхность

Таблица 3

Результаты экспериментальных исследований по этапам

Параметры	Этапы исследований			
	«Короткий» Stelmor		«Длинный» Stelmor	
	0	1	2	3
БМУ, %, не более	40	20	10	5
Временное сопротивление разрыву $\sigma_в$, МПа, не более	750	630	550	500
Относительное сужение, %, не менее	35	55	70	75
Минимальный диаметр бездефектной проволоки d_{min}, мм	4	2,2	1,8	0,8
Максимальная степень деформации при волочении, %	47	84	89	97,8

а



б

в

Рис. 5. Микроструктура (а –дислокационный мартенсит с пластинами и б – квазииглами), микродвойники в мартенсите и микроэлектронограмма (в) образцов участка структуры с микродвойниками. Исследование фольги (а, б) катанки из стали марки Св-08Г2С после обработки на линии Stelmor с «короткой» линией воздушного охлаждения: а, б – ×25000, ×50000 соответственно; в – микроэлектронограмма (см. табл. 3, 0-й этап исследования)

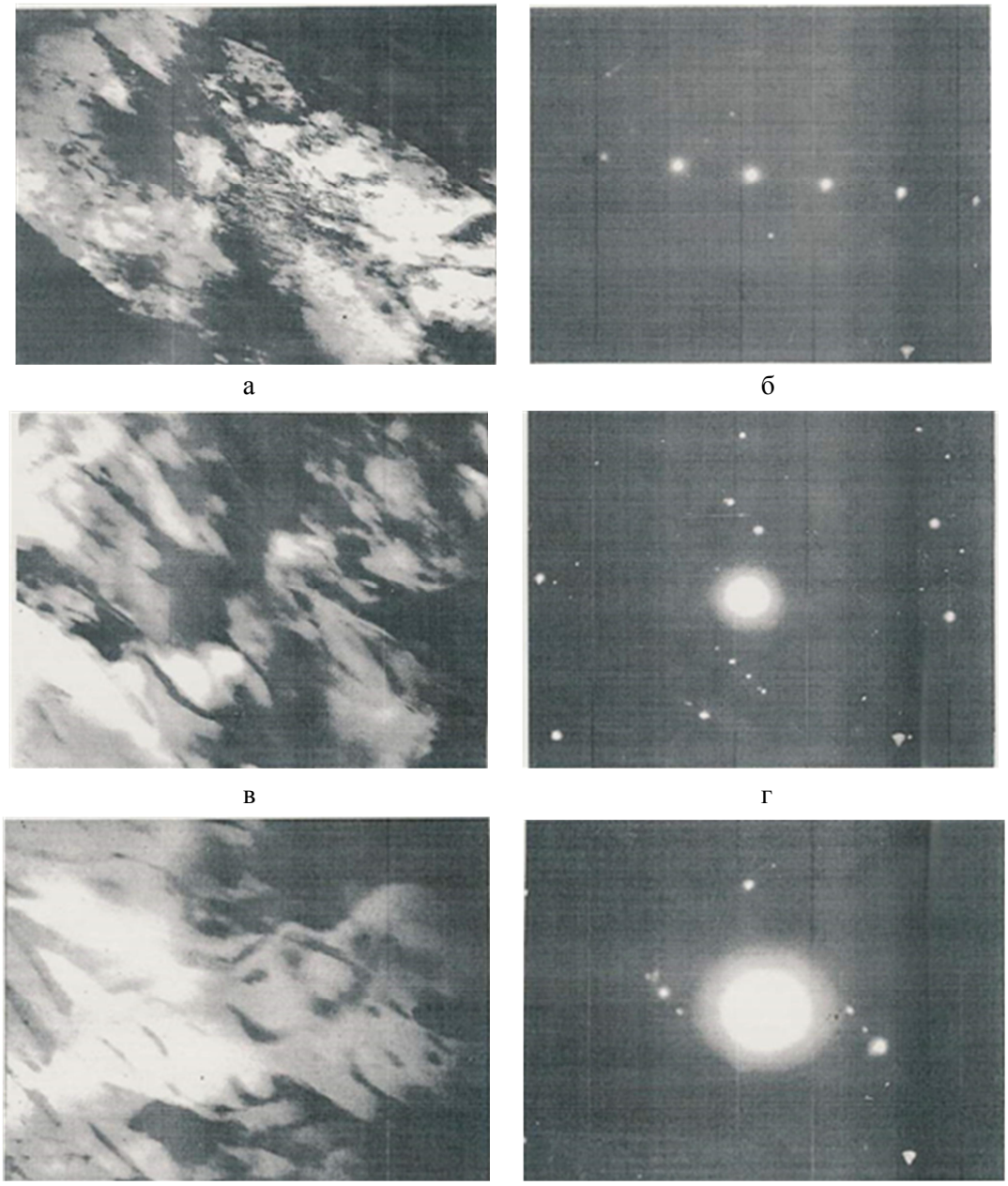


Рис. 6. Микроструктура (а, в, д) и микроэлектронограммы (б, г, е) – электронная дифракция образцов – фольги катанки из стали Св-08Г2С после обработки на линии Stelmor с «длинной» трассой воздушного охлаждения: а – дислокационный мартенсит (×42000); в – бейнит (×45000); д – перлит (×38000) см. по табл. 3, 2 и 3-й этапы исследования

Анализ данных, представленных в **табл. 3**, показывает следующее.

Под этапом, обозначенным в таблице цифрой «0», принят начальный уровень состояния оборудования и сквозной технологии производства сварочной катанки из стали Св-08Г2С. Этот уровень характеризуется тем, что химический состав стали полностью соответствует требованиям ГОСТ 2246 без каких-либо ограничений и селективного выбора массовой доли химических элементов, что обусловливает высокую прочность и низкую пластичность катанки из такой стали, обусловленные также высоким количеством БМУ из-за повышенной скорости охлаждения (2,0–3,6°С) проката на участке транспортирования витков по сетчатому транспортеру проектной линии «короткий» Stelmor. Сталь производится в ДСП и обрабатывается на УКП.

Этап «1» – осуществлены допустимые модернизации оборудования и усовершенствования тех-

нологии производства стали и катанки с использованием линии «короткий» Stelmor, заключающиеся в микролегировании стали бором в количестве 0,005–0,019% и герметизации теплового туннеля под теплоизолирующими крышками и снижении скорости охлаждения витков катанки до 1,7–1,9°С.

Этап «2» – обеспечение скорости воздушного охлаждения витков катанки на линии «длинный» Stelmor в диапазоне 0,36–0,62°С за счет увеличения времени квазиизотермической выдержки под теплоизолирующими крышками до 1200 с вместо максимум 400 с на линии «короткий» Stelmor.

Этап «3» – дополнительно к набору мероприятий, внедренных на этапе исследований «2», внепечнаяобработка стали после УКП на вакууматоре типа VD/VOD, непрерывная разливка стали на МНЛЗ с использованием ЭМП и полной защиты разливаемой струи от вторичного окисления; минимизация содержания упрочняющих элементов (C, Mn, Si, в первую очередь) до нижнего марочного значения с учетом минусовых допусков этих элементов в готовом прокате по ГОСТ 2246; нормирование отношения бора к азоту в диапазоне 0,8±0,15; ограничение значений химических элементов на уровне $C_э$ = =C + Mn/5 + Si/5 + (Cr + Ni + Cu)/12 ≤ 0,550%, $Mn_э$ = Mn + (C + Si)/3 + Cr/5 + Cu/9 ≤ 2,10% и массовой доля свободного азота – ≤ 0,007%, обеспечение скорости охлаждения витков на уровне 0,29–0,38°С/с за счет увеличения скорости термостатирования витков катанки под теплоизолирующими крышками до 1300 с и обеспечения температуры аустенитизации металла перед воздушным охлаждением витков – 950–1000°С.

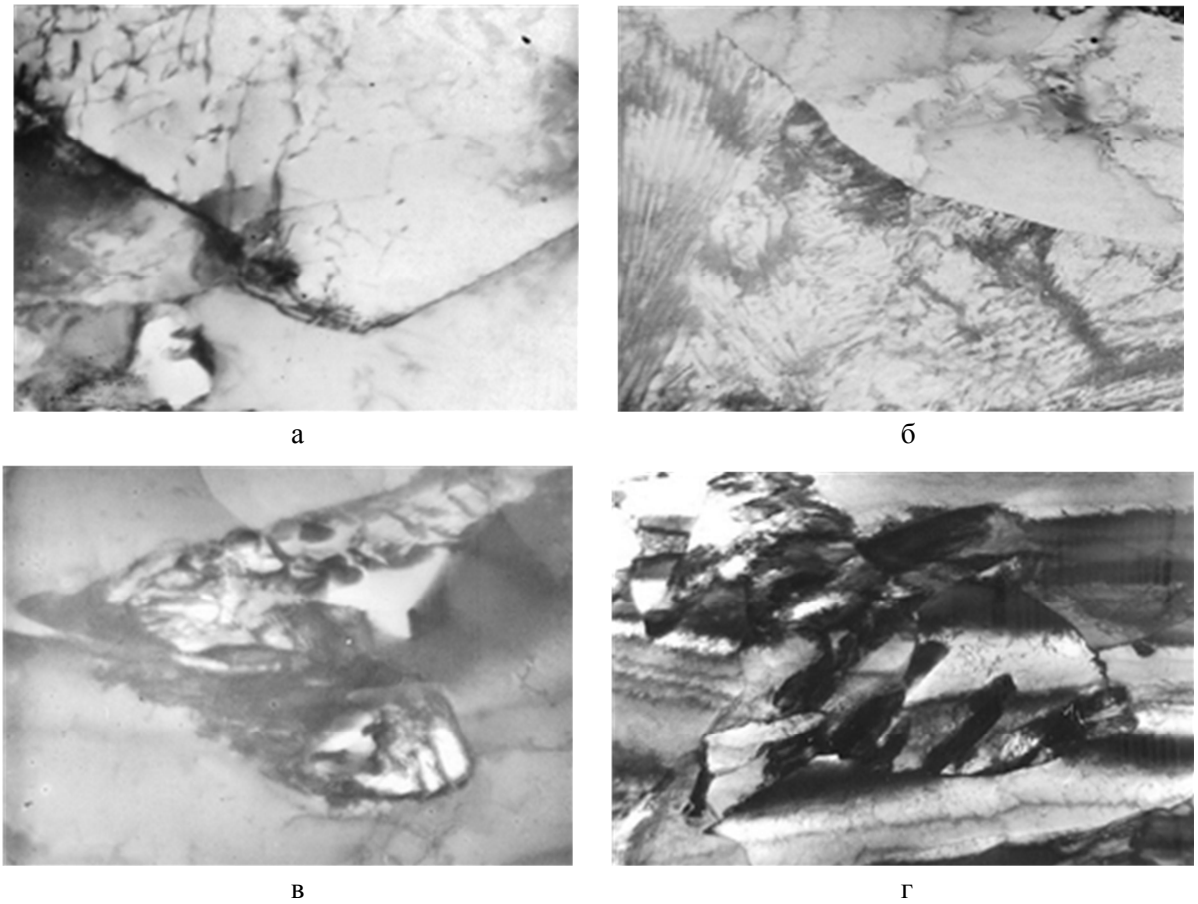
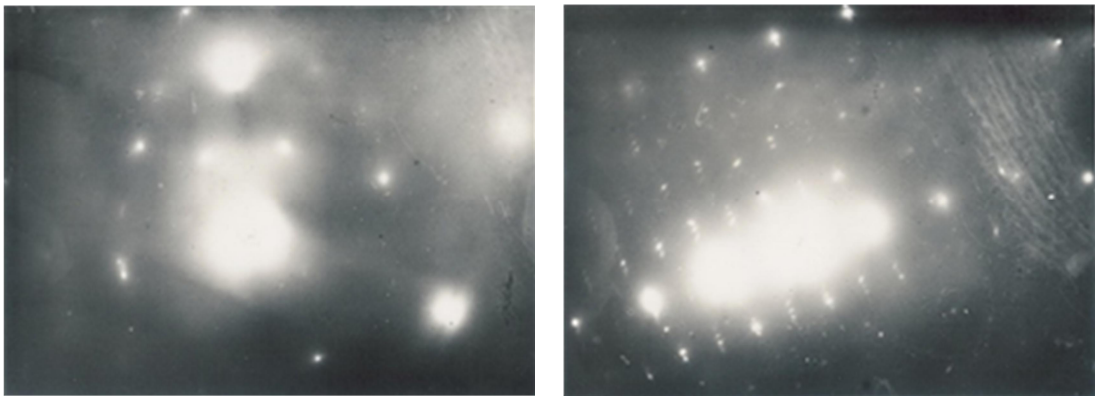


Рис. 7. Микроструктура катанки из стали Св-08Г2С, обработанной по режиму двустадийного охлаждения с $t_{в/у}$ = 950°С; $V_{тр}$= 0,09–0,12 м/с; $\tau_{кр}$= 1200 с; $V_{охл}$= 0,16–0,36°С/с, все БСО отключены, теплоизолирующие крышки закрыты: а – низкодислокационный феррит (×21200); б – феррит низкодислокационный и регулярный перлит (×14000); в – полурегулярный – вырожденный перлит и массивные пластины мартенсита (×10000); г – мартенсит (×4000) (см. табл. 3, 3-й – этап исследований)



а б

Рис. 8. Микроэлектроннограммы вырожденного перлита (а) и мартенсита (б) фрагмента структуры на рис. 7, в и г

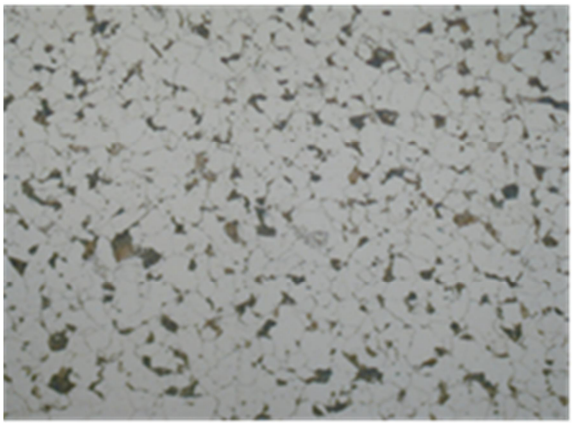


Рис. 9. Микроструктура образца стали Св-08Г2С – изотерма при 550°С в течение 20 мин, ×500

До настоящего времени технологическая пластичность катанки и проволоки из стали Св-08Г2С не обеспечивала волочение без смягчающих отжигов в проволоку диаметром 1 мм и менее (0,8–0,6 мм) из-за наличия в структуре БМУ, микротвердость которых достигает HV 250–350 при микротвердости матричной ферритной структуры в пределах HV 170–180. Возле БМУ в проволоке происходит образование трещин (см. **рис. 10**), вследствие чего резко снижается технологическая пластичность, и волочение проволоки сопровождается повышенной обрывностью. Полное исключение БМУ в стали Св-08Г2С возможно на базе анализа термокинетической диаграммы (ТКД), построенной нами [29, 30] (см. **рис. 1**), и результатов лабораторных и промышленных экспериментов. При полной изотермической выдержке при температуре 550–600°С в течение 1200–1380 с в катанке формируется однородная ферритно-перлитная структура (см. **рис. 9**) минимальной твердости (148–160 ед. HV). Обеспечение изотермической термообработки в потоке линии Stelmor возможно при проведении модернизации линии воздушного охлаждения (установка электронагревателей с циркуляционными вентиляторами). Путем длительной квазиизотермической выдержки ($V_{охл.}$ = =0,25–0,15°С/с) витков катанки на роликовом транспортере на действующей линии длинный Stelmor под теплоизолирующими крышками обеспечивается, в основном, ферритно-перлитная структура с небольшим количеством БМУ, не превышающем 5%. При этом сталь должна иметь в рамках марочного состава минимальное содержание упрочняющих и прокаливающих элементов, таких как C, Mn, Si, P, Cr, Ni, Cu [31–33]. Это обеспечивает уникальный уровень механических свойств катанки из легированной стали Св-08Г2С: $\sigma_в \leq$ 500 Н/мм^2; $\delta_5 \geq$ 35%; $\delta_{10} \geq$ 28%;$\Psi \geq$ 75%. Технологичность переработки катанки, произведенной по улучшенной технологии, высокая: при сухом – грубом волочении катанки в проволоку диаметром 2,2–1,8 мм обрывность составила не более 0,2 т$^{-1}$, на мокром – тонком волочении в проволоку диаметром 1,6–0,8 мм – не более 1,7 т$^{-1}$.

Таким образом, освоено производство катанки из стали Св-08Г2С высокой деформируемости сварочного назначения для волочения проволоки тонких диаметров без применения отжигов.

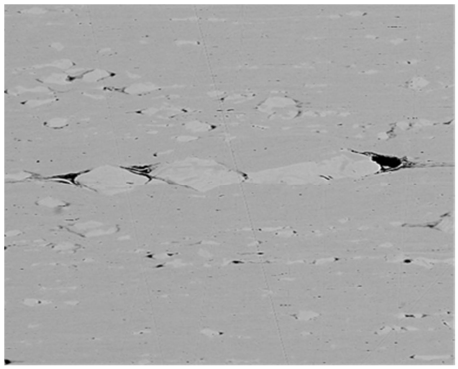


Рис. 10. Трещины у бейнитно-мартенситных участков в проволоке диаметром 1,0 мм из стали Св-08Г2С как инициаторы обрыва проволоки

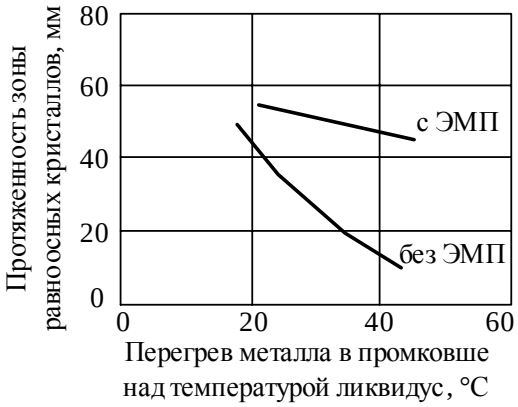


Рис. 11. Развитие ЗРК в зависимости от степени перегрева металла в промковше над температурой ликвидус

Катанка из легированной хромомолибденованадиевой стали марок типа Св-08ХГСМФА сварочного назначения

В **табл. 4** представлены нормы, предъявляемые к химическому составу и механическим свойствам катанки из анализируемой марки стали Св-08ХГСМФА [34, 35].

Основным легирующим элементам (C, Mn, Si, Ni, Cr, Cu, Mo, V) обеспечены целевые значения в соответствии с требованиями нормативной документации (НД) и заказчиков. Уровень примесных элементов (P, S, Sn, Pb, Zn, Co, Nb, Al, Ca, Ti) минимален и может характеризоваться как «следы».

Основным инновационным и эффективным технологическим приемом является микролегирование стали бором в соответствии с отношением B/N = 0,8±0,15. Это обусловливает наилучшее сочетание структурного состояния металла с максимально возможным исключением БМУ и пластификации свойств, способствующих перерабатываемости катанки в проволоку [31, 36]. Кроме вышеуказанного, как и для стали Св-08Г2С, минимизировали содержание упрочняющих химических элементов (C, Mn, Si, Cr, Mo, V) на нижнем пределе марочного состава. Химический состав стали и механические свойства катанки промышленной партии представлены в **табл. 5**.

Таблица 4

Нормы химического состава и механических характеристик легированной катанки сварочного назначения из стали Св-08ХГ2СМФ до усовершенствования технологии

Массовая доля элементов (не более или в пределах), %											Механические свойства	
C	Mn	Si	Mo	Ni	S	P	Cu	Cr	N	V	$\sigma_в$, Н/мм^2	ψ, %
0,04–0,08	1,00–1,40	0,20–0,40	0,50–0,70	≤ 0,20	≤ 0,020	≤ 0,020	≤ 0,15	0,70–1,00	≤ 0,015	0,15–0,30	≤ 800	≥ 20

Таблица 5

Химический состав стали и механические свойства катанки из стали Св-08ХГ2СМФ диаметром 5,5 мм

Массовая доля химических элементов, %						Механические свойства			
C/Mn	Si/P	S/Cr	Ni/Cu	N/B	B/N Mo	$\sigma_в$, Н/мм^2	$\sigma_т$, Н/мм^2	δ_5, %	Ψ, %
0,052/0,913	0,261/0,015	0,011/0,657	0,067/0,111	0,009/0,0069	0,77/0,454	491	246	39	74,8

Примечание. Содержание ванадия – 0,155%.

Макроструктура НЛЗ имеет достаточно плотную поверхностную корочку **(рис. 12)**, фактически без поверхностных дефектов (балл подкорковых пузырей по ГОСТ 10243-75 ПП – 0–0,5 при среднем значении 0,2). Остальные показатели макроструктуры по ОСТ 14-1-235-91 удовлетворительные за исключением осевых трещин – ОТ (балл: 3–3,5 и 3,2) которые, впрочем, в готовой катанке не наблюдаются по причине того, что были не окислены и в процессе деформации заварились. Кристаллическая структура поперечного сечения исследованных НЛЗ имеет прикорковую и центральные ЗРК и достаточно развитую ЗСК, которая обусловливает микродендритную ликвацию и наличие в готовой катанке **(рис. 13)** БМУ.

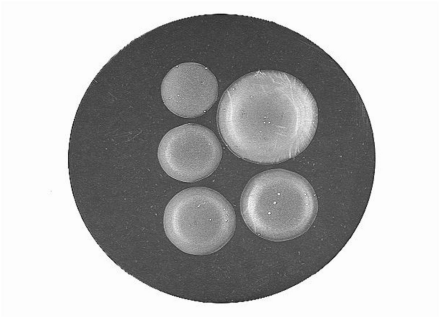
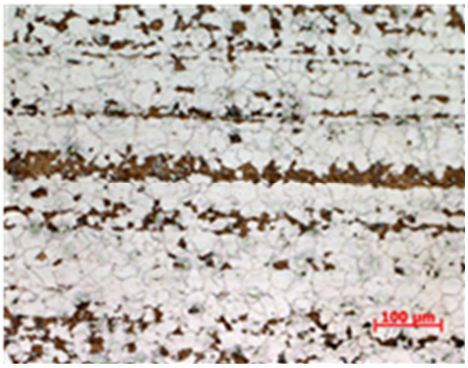
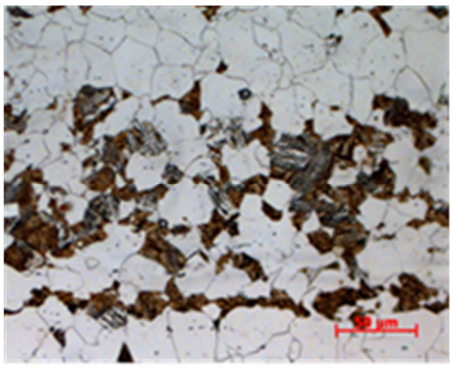


Рис. 12. Макроструктура катанки из стали Св-08ХГ2СМФ



а



б

Рис. 13. Микроструктура катанки диаметром 5,5 мм из стали Св-08ХГ2СМФ (средняя зона): а – ×150; б – ×300

Режим термической обработки также аналогичен режиму для катанки из стали Св-08Г2С. Выбор высокой температуры виткообразования (950–1000°С) обусловлен необходимостью получения крупного зерна аустенита и соответственно действительного зерна для обеспечения высокой деформируемости катанки и улучшенного удаления окалины механическим способом с поверхности легированной катанки перед волочением [29].

Для стандартной стали и технологии наблюдался следующий комплекс механических свойств и структурных параметров: $\sigma_в$ = 700–780 МПа, ψ = 20–25%, БМУ = 25–35%; после улучшения химического состава и усовершенствования технологии термической обработки соответственно $\sigma_в$= 450–480 МПа, ψ – не менее 75%, БМУ = 10–15%.

Зерно феррита имеет весьма мелкий размер (№ 9–12 по ГОСТ 5639). Наблюдается существенное уменьшение доли перлита за счет БМУ. Увеличение степени легирования металла, особенно Cr и V, обусловило твердорастворное упрочнение и дисперсионное твердение структуры. Для легированной катанки сварочного назначения актуальна задача повышения размера действительного зерна феррита до N = 8, 9 с целью увеличения деформационной пластичности.

Ликвационные процессы в катанке исследованы и на поперечных, и на продольных шлифах от образцов, отобранных от заднего участка витка с центральной её части (по движению витков на роликовом транспортере). Принципиально ликвационная картина близка к ликвации катанки из стали марки Св-08Г2С и соответствует степени легирования этих двух сравниваемых марок стали. Однако для марок Св-08ХГСМФА и Св-08ХГ2СМФ она несколько лучше: подусадочная ликвация (ПЛ) – 0 против 0–0,5 балла у Св-08Г2С. Кроме того, в ряде образцов в продольном сечении структурная ликвационная полосчатость вообще отсутствует, а в других образцах аналогична катанке из стали марки Св-08Г2С. В ликвационных полосах распределены БМУ, что подтверждается их микротвердостью 200–420 HV, микротвердость основного металла значительно ниже – 143–188 HV (первая цифра относится к ферриту, вторая – к перлиту). Ликвация в стали Св-08ХГСМФА выражена в гораздо меньшей степени, чем в Св-08Г2С, что доказывается и суммарным коэффициентом ликвации основных химических элементов (Mn, Si, Cr, Mo, V) $к_{л\Sigma}$ = 1,26 и 1,62 соответственно. Распределение ликватов в первой стали в матрице бо-

лее однородно и этим катанка из этой стали (Св-08ХГСМФА) в большей степени способна к деформированию при волочении. Это, видимо, обусловлено взаимодействием легирующих элементов (Mo, Si, V, Cr, Mn) в комплексе.

С целью повышения деформируемости катанки из стали типа Св-08ХГ2СМФ было проведено физическое моделирование условий изотермической выдержки в двух лабораторных муфельных печах по следующему режиму: в первой печи температура аустенитизации 950°С, выдержка в течение 5 мин, перенос во вторую печь с температурой в диапазоне 500–700°С через 50°С с выдержкой 20 и 30 мин при каждой температуре. Результаты эксперимента представлены на **рис. 14–15**, которые доказывают, что наилучшим режимом является температура изотермической выдержки в диапазоне 600–700°С, обеспечивающая минимальное количество БМУ не более 7%, максимальное количество феррита глобулярной формы не менее 93%, минимальную твердость 165–175 HV.

а

б

Рис. 14. Микроструктура по сечению катанки из стали Св-08ХГ2СМФ (t = 700°С, τ = 20 мин.), ×500: а – поверхностной зоны; б – основная структура

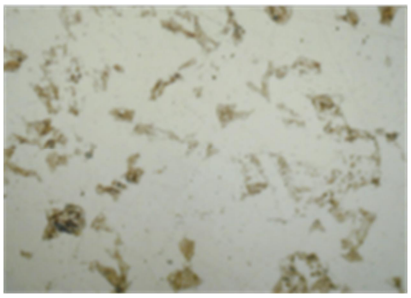


Рис. 15. Основная структура катанки из стали Св-08ХГ2СМФ (t =600°С, τ = 30 мин), ×500

Заключение

В статье рассмотрено влияние металлургических факторов (химический состав стали, макростроение НЛЗ, ликвация химического состава в макро- и микрообъемах литого металла и т.п.) и режимов термической обработки катанки на линии двустадийного охлаждения типа Stelmor (температуры аустенитизации металла, скорости охлаждения проката на обеих стадиях) на формирование микроструктуры и свойств металлоизделий.

Установлены следующие научно обоснованные закономерности по улучшению качественных параметров катанки сварочного назначения из стали марок Св-08Г2С и Св-08ХГ2СМФ. Эта сталь микролегирована бором в зависимости от содержания азота B/N = 0,8±0,15, то есть в соответствии со стехиометрическим отношением этих элементов по таблице Д.И. Менделеева. Определено, что взаимное связывание бора и азота в нитрид позволяет взаимно нейтрализовать вредное действие и бора, и азота, заключающееся в том, что бор в свободном состоянии повышает закаливаемость стали и упрочняет ее, а несвязанный азот обусловливает упрочнение твердого раствора кристаллической решетки феррита и способствует остариванию стали.

Термическая обработка низкоуглеродистой легированной стали Св-08Г2С, Св-08ХГ2СМФ в потоке линии Stelmor заключается в обеспечении температуры аустенитизации на уровне 950–1000°С, минимизации скорости охлаждения в диапазоне 0,10–0,30°С/с при снижении значений $C_э$ не более 0,55, $Mn_э$ не более 2,10% и формировании ферритной структуры с уменьшением количества БМУ в максимальной степени.

В итоге обеспечивается требуемый НД и потребителями комплекс наилучших структуры и свойств проволочной металлопродукции, что обусловливает высокую технологичность (деформационную способность) при переработке катанки на последующих переделах.

Список литературы

1. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Миронов О.А. Влияние химического состава на формирование структуры и свойств жароизносостойких чугунов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2007. № 3. С. 44–47.
2. Комплексно-легированные белые чугуны функционального назначения в литом и термообработанном состояниях / Ри Э.Х, Ри Хосен, Колокольцев В.М., Петроченко Е.В. и др. Владивосток: Дальнаука, 2006. 275 с.
3. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Молочков П.А. Структура и износостойкость хромованадиевых чугунов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2004. № 7. С. 25–28.
4. Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Воронков Б.Н. Комплексно-легированные белые износостойкие чугуны. Челябинск: Печатный салон «Издательство РЕКПОЛ», 2005. 178 с.
5. Специальные чугуны. Литье, термическая обработка, механические свойства: учеб. пособие / Колокольцев В.М., Петроченко Е.В., Соловьев В.П., Цыбров С.В.; под ред. Колокольцева В.М. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. 187 с.
6. Походня И.К. Сварочные материалы: состояние и тенденции развития // Автоматическая сварка. 2003. № 3. С. 9–20.
7. Грачева В.С. Низколегированные проволоки с улучшенными технологическими свойствами для сварки в защитных газах строительных металлоконструкций: дис. … канд. техн. наук: 05.23.01; 05.16.01. Макеевка, 1996. 202 с.
8. Влияние прокатки в двухфазной области на структуру и механические свойства катанки и проволоки из стали 08Г2С / В.А. Кулеша, В.Н. Дегтярев, Д.М. Хабибулин, В.Н. Урцев, Н.А. Клековкина, В.Д. Мирошниченко // БТИ. Черная металлургия. 2000. № 6. С. 69–73.
9. Анализ влияния температуры конца прокатки катанки на структуру и механические свойства проволоки / В.А. Кулеша, В.Н. Дегтярев, Д.М. Хабибулин и др. // БТИ Черметинформация: Черная металлургия, 2000. № 3, 4. С. 64–65.
10. Исследование влияния технологических параметров на кинетику распада аустенита стали 08Г2С / Л.Н. Дейнеко, А.П. Клименко, Ю.П. Гуль, А.И. Карнаух, О.А.Дудкина // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. Днепропетровск: ПГАСА, 2002. С. 106–111.
11. Сибата К. Поведение бора в стали и его влияние на структуру и свойства. Институт черной металлургии Японии. 2000.
12. Оптимизация прокаливаемости и состава термоулучшаемой борсодержащей стали / М. В. Бобылев, А. М. Ламухин, О. В. Кувшинников и др. // Сталь. 2002. № 7. С. 68–71.
13. Frank A. R., Kirkcaldy A. The effect of boron on the properties of electric arc-sourced plain carbon wiredrawing qualities// Wire Journal International. 1998. № 5. P. 100–113.
14. North Star Steel Texas′s experience with boron additions to low-carbon steel / B. Yalamanchili, J. Nelson, P. Power, D. Lanham // Wire Journal International. 2001. № 11. P. 90–94.
15. Анализ показателей качества сварочной проволоки методом статистической оценки стабильности ее химического состава / В.А. Медюшко, О.Н. Разоренов, В.И. Криворотов, Ю.В. Медюшко // Индустрия. 2005. № 1(39).
16. О возможности образованиятвердого раствора кремния в железе / В.В. Росихин, В.И. Большаков, Г.М. Воробьев и др. // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. Днепропетровск: ПГАСА, 2003. Вып. 22. С. 129–135.
17. Повышение качества сварочной проволоки из стали марки Св-08Г2С в условиях ОАО «ММК» и ОАО «ММК-МЕТИЗ» / А.С. Гульцин, А.А. Соколов, М.В. Зайцева, Д.Р. Бакаев // Горный журнал. 2012. № 3.
18. Стогний Ю.Д., Стовпченко А.П., Грищенко Ю.Н. Исследование особенностей получения стали с заданным уровнем механических свойств // Вісник Приазовського державного технічного університету. 2010. С. 10–13.
19. Стовпченко А.П. Проблема микролегирования стали применительно к получению сварочных проволок // Современные проблемы металлургии: сб. науч. тр. Вып. 1. Днепропетровск, 1999. С. 133–141.
20. Таранец М.А. Современные тенденции развития производства сварочной проволоки типа Св-08Г2С // Рынки сортового проката и метизов: сб. материалов 2-й ежегодной НТК. Алушта, 2004 (Металл-курьер). С. 83–85.
21. Проблемы производства сварочных материалов на ОАО «Межгосметиз-Мценск» / В.П. Костюченко, М.А. Таранец, З.А. Дегтяренко, С.А. Шамин, В.Д. Кузяков // Метизы. 2006. № 3 (12). С. 17–20.
22. Особенности производства сварочной омедненной проволоки на ОАО «Межгосметиз-Мценск» / В.П. Костюченко, М.А. Таранец, З.А. Дегтяренко, С.А. Шамин, В.Д. Кузяков // Сварщик в Белоруссии. 2005. № 1 (18). С. 12–15.
23. Емелюшин А.Н., Шекшеев М.А. Исследование влияния термических циклов на структуру основного металла при сварке стали категории прочности К56 // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2011. № 1. С. 150–153.
24. Особенности формирования структуры и свойств сварных соединений стали класса прочности К56 при дуговой сварке / Емелюшин А.Н., Сычков А.Б., Завалищин А.Н., Шекшеев М.А. // Черные металлы. 2013. № 8 (980). С. 18–22.
25. Емелюшин А.Н., Сычков А.Б., Шекшеев М.А. Исследование формирования структуры и свойств металла зоны термического влияния низколегированной трубной стали при различных режимах дуговой сварки // Черная металлургия. 2013. № 9 (1365). С. 50–52.
26. Емелюшин А.Н., Сычков А.Б., Шекшеев М.А. Исследование свариваемости высокопрочной трубной стали класса прочности К56 // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 3. С. 26–30.
27. Сычков А.Б., Завалищин А.Н., Перчаткин А.В. Структурообразование в катанке повышенной деформируемости из низкоуглеродистой легированной стали Св-08Г2С с микродобавками бора // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 2. С. 50–53.
28. Структура и свойства катанки для изготовления электродов и сварочной проволоки / А.Б. Сычков, В.В. Парусов, А.М. Нестеренко, С.Ю. Жукова, М.А. Жигарев, А.В. Перчаткин, А.В. Перегудов, И.Н. Чуйко. Бендеры: Полиграфист, 2009. 608 с.
29. Кинетика фазовых превращений в катанке из непрерывнолитой электростали Св-08Г2С при непрерывном охлаждении / В.В. Парусов, С.Ю. Жукова, М.Ф. Евсюков, А.Б. Сычков и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. науч. тр. Днепропетровск: ДрукарняВизион, 2004. Вып. 9. С. 191–197.
30. V.V. Parusov, A.B. Sychkov, I.V. Derevyanchenko, S.Yu. Zhukova, O.L. Kucherenko, M.A. Zhigarev. High-deformability wire rod made of steel Sv-08G2S // Metallurgist. Januar 2007. Vol. 51. Issue 1–2. P. 121–130.
31. Влияние химического состава и технологических параметров на механические характеристики катанки из стали Св-08Г2С / В.В. Парусов, А.Б. Сычков, С.Ю. Жукова, М.А. Жигарев // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2005. № 4. С. 68–71.
32. Fine microstructure of wire rods manufactured from Sv-08G2S high-plasticity steel / A.M. Nesterenko, A.B. Sychkov, S.Yu. Zhukova, V.I. Sukhomlin // Metallurgist. September

2008. Vol. 52. Iss. 9–10. P. 511–516.
33. Структура катанки из стали Св-08Г2С улучшенного химического состава / А.Б. Сычков, М.А. Шекшеев, С.О. Малашкин, Г.Я. Камалова // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. Т. 1: труды XII ВНПК с международным участием. Старый Оскол: Изд-во филиала МИСиС, 2015. С. 213–219.
34. Development of a producton process for rolled welding wire made from Sv-08KHGSMFA alloy / A.B. Sychkov, V.V. Parusov, M.A. Zhigarev, S.Yu. Zhukova, A.V. Perchatkin, A.V. Peregudov // Metallurgist. July2007. Vol. 51. Issue 7–8. P. 384–393.
35. Special features of rod from steel Sv-08KHG2SMF / A.M. Nesterenko, A.B. Sychkov, V.I. Sukhomlin, S.Yu. Zhukova, A.N. Moroz // Metal Science and Heat Treatment. Vol. 51. № 7–8. P. 372–374.
36. Новое применение бора в металлургии/В.В. Парусов, А.Б. Сычков, И.В. Деревянченко, М.А. Жигарев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета. 2005. № 1 (9).С. 15–17.

Материал поступил в редакцию 22.04.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-3-55-70

THE EFFECT OF METALLURGICAL FACTORS AND HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE OF WIRE ROD FOR WELDING APPLICATION

Mark Kizhner – Ph.D. (Eng.), Technical Manager
HOD-ASSAF Metals Ltd. - Kiriyat Gat Rolling Mill, Ashkelon, Israel. E-mail: mark@hodindustry.co.il

Alexander B. Sychkov – D.Sc. (Eng.), Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: absychkov@mail.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0886-1601

Maxim A. Sheksheyev – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: shecsheev@yandex.ru. ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4790-2821

Sergey O. Malashkin – Postgraduate Student
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: shtirlic21999@mail.ru

Gyuzel' Ya. Kamalova – Postgraduate Student
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: 174kamalova@mail.ru

Abstract
Problem Statement (Relevance): It is the metal microstructure that primarily determines what combination of mechanical and performance properties the final steel products will have, as well as their processability and applicability. The technical and patent literature looks at the relationship between the metallurgical quality of an as-cast billet and the process and heat treatment parameters and the structure and properties of the wire rod for welding. However, in a number of cases the choice of process conditions that would efficiently lead to the formation of a homogeneous ferritic structure with completely or partially excluded negative bainitic-martensitic areas in a low-carbon alloy wire rod is not a straightforward choice. This article looks at increasing the plasticity of wire rod at the steel-making stage and during the wire rod heat treatment process rather than during the actual wire rod production, which is the conventional approach. **Objectives:** The article aims to analyze the effect of metallurgical factors and heat treatment on the structure of the wire rod designed for the manufacture of welding electrodes and copper-coated wire for semi- and automatic welding, as well as to develop an efficient end-to-end process from steel production and refining to continuous casting, rolling and the Stelmor line heat treatment process, which would provide a high-performance annealing-free wire drawing operation with the above-mentioned welding products obtaining the desired performance characteristics. **Methods Applied:** The chemical composition of the steel was determined with the help of standard spectrometers. The metallographic tests were based on optical and scanning and transmission electron microscopy. The microsegregation of chemical elements and the chemical composition of non-metallic inclusions were studied with the help of energy and wavelength dispersive X-ray spectrometers within a scanning electron microscope by electron microanalysis. Micro hardness testers were applied for structural component microhardness measurements. Tensile tests were carried out for the wire rod. A CCT diagram was developed using a dilatometric technique. **Originality:** The authors have developed scientifically proven solutions for optimising the chemical composition of low-carbon steel alloyed with manganese, chromium, nickel, molybdenum and vanadium at different combinations and concentrations. The authors have defined the conditions for efficient microalloying of steel with boron correlated with the nitrogen concentration. The authors have also found an efficient temperature range for the low carbon alloy wire rod austenitization process ensuring an efficient quasi-isothermal cooling rate during the air phase. The rate values were determined when analysing a CCT diagram. **Findings:** The study helped establish the following scientifically sound relationships: The boron to nitrogen ratio of 0.8 +/-

0.15 should be used for boron microalloying to prevent the impacts of free boron and nitrogen, with free boron entailing an increased hardenability and free nitrogen leading to ferrite strengthening and the ageing effect while at the same time minimizing the hardening element concentration resulting in their minimum grade-determined concentration defined based on the equivalent carbon and/or manganese content (their values should be no greater than 0.55 and 2.10% respectively). Heat treatment of the Sv-08G2S and Sv-08KhG2SMF steels involves austenization at 950-980°C and cooling which takes place under insulation caps at the rate of 0.15 to 0.30°C/s and results in the ferrite structure formation with the minimum number (no more than 5% and 15% respectively) of bainitic-martensitic areas at the cross section. This provided a high processability with no need for softening treatments. **Practical Relevance:** This gives the best combination of the wire rod structure and properties meeting regulatory and customers' requirements and ensuring a high-performance wire drawing process. Thus, in the case of the Sv-08G2S steel the tensile strength dropped from 750 to 500 MPa, the contraction ratio increased from 35 to 75%, the number of bainitic-martensitic areas saw an 8-fold reduction (from 40 to 5%). This also saved two intermediate recrystallization annealing operations when drawing a 0.8 mm wire out of a 5.5 mm wire rod.

Keywords: Metallurgical factors, micro-alloying, boron, wire rod, Stelmor line, heat treatment, cooling rate, structure, properties, bainitic-martensitic areas.

References

1. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Mironov O.A. The effect of chemical composition on the structure and properties of heat- and wear resistant cast irons. *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of higher educational institutions. Ferrous metallurgy], 2007, no. 3, pp. 44-47.
2. Ri E.Kh., Ri Khosen, Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V. et al. *Kompleksno-legirovannye belye chuguny funktsional'nogo naznacheniya v litom i termoobrabotannom sostoyanii* [Functional application multi-alloyed white cast irons in the as-cast and heat-treated states]. Vladivostok: Dalnauka, 2006, 275 p.
3. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Molochkov P.A. Structure and Wear Resistance of Chromium-Vanadium Cast Irons. *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 2004, no. 7, pp. 25-28.
4. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Voronkov B.N. *Kompleksno-legirovannye belye iznosostoykie chuguny* [Wear resistant multi-alloyed white cast irons]. Cheliabinsk: Izdatelstvo REKPOL Print Shop, 2005, 178 p.
5. Kolokoltsev V.M., Petrochenko E.V., Solovyev V.P., Tsybrov S.V. Edited by Kolokoltsev V.M. *Spetsial'nye chuguny. Litye, termicheskaya obrabotka, mekhanicheskie svoystva: ucheb. posobie* [A guide in special cast irons: Casting, heat treatment, mechanical properties]. Magnitogorsk: NMSTU, 2009, 187 p.
6. Pokhodnya I.K. Welding materials: The current state and development trends. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic Welding], 2003, no. 3, pp. 9-20.
7. Gracheva V.S. *Nizkolegirovannye provoloki s uluchshennymi tekhnologicheskimi svoystvami dlya svarki v zashchitnykh gazakh stroitel'nykh metallokonstruktsii: dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.23.01; 05.16.01* [Low-alloy wire with improved processing properties for gas-shielded welding of steel structures: Ph.D. dissertation: 05.23.01; 05.16.01]. Makeevka, 1996, 202 p.
8. Kulesha V.A., Degtyarev V.N., Khabibulin D.M., Urtsev V.N., Klekovkina N.A., Miroshnichenko V.D. Effect of rolling in the two-phase region on the structure and mechanical properties of the 08G2S wire rod and wire. *BTI Chernaya metallurgiya* [BTI Ferrous metallurgy], 2000, no. 6, pp. 69-73.
9. Kulesha V.A., Degtyarev V.N., Khabibulin D.M. et al. Analysing the impact of the final wire rod rolling temperature on the structure and mechanical properties of the wire. *BTI Chermetinformatsiya: Chernaya metallurgiya* [BTI Chermetinformatsiya: Ferrous metallurgy], 2000, no. 3, 4, pp. 64-65.
10. Deyneko L.N., Klimenko A.P., Gul' Yu.P., Karnaukh A.I., Dudkina O.A. A study of the process parameters effect on the austenite decomposition kinetics in the 08G2S steel. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie: sbornik nauchnykh trudov* [Construction, materials science, mechanical engineering: Research papers]. Dnepropetrovsk: PGASA, 2002, pp. 106-111.
11. Shibata K. Boron behavior in the steel and its effect on the structure and properties. Institute of Japan's steel industry, 2000. Information from the Internet.
12. Bobylev M.V., Lamukhin A.M., Kuvshinnikov O.V. et al. Optimized hardenability and composition of heat-treated boron steel. *Stal'* [Steel], 2002, no. 7, pp. 68-71.
13. Frank A. R., Kirkcaldy A. The effect of boron on the properties of electric arc-sourced plain carbon wiredrawing qualities. Wire Journal International, 1998, no. 5, pp. 100-113.
14. B. Yalamanchili, J. Nelson, P. Power, D. Lanham. North Star Steel Texas's experience with boron additions to low-carbon steel. Wire Journal International, 2001, no. 11, pp. 90-94.
15. Medyushko V.A., Razorenov O.N., Krivorotov V.I., Medyushko Yu.V. Analysis of the welding wire quality indicators by statistical evaluation of the chemical composition stability. *Industriya* [Industry], 2005, no. 1(39).
16. Rosikhin V.V., Bolshakov V.I., Vorobyev G.M. et al. On the possibility of the formation of a solid solution of silicon in iron. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie: sbornik nauchnykh trudov* [Construction, materials science, mechanical engineering: Research papers]. Dnepropetrovsk: PGASA, 2003, vol. 22, pp. 129-135.
17. Gultsin A.S., Sokolov A.A., Zaytseva M.V., Bakaev D.R. Improving the quality of the Sv-08G2S welding wire at MMK JSC and MMK-METIZ JSC. *Gorniy zhurnal* [Mining Journal], 2012, no. 3.
18. Stogniy Yu.D., Stovpchenko A.P., Grishchenko Yu.N. Looking at the production of steel with a given level of mechanical properties. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vesnik of Priazovskyi State Technical University], 2010, pp. 10-13.
19. Stovpchenko A.P. The problem of steel micro-alloying in relation to the production of welding wires. *Sovremennye problemy metallurgii: sbornik nauchnykh trudov* [Current problems of metallurgy: Research papers], Vol. 1, Dnepropetrovsk, 1999, pp. 133-141.
20. Taranets M.A. Current trends in the production of the Sv-08G2S welding wire. *Rynki sortovogo prokata i metizov: sbornik materialov vtoroy ezhegodnoy nauchno-*

tekhnicheskoy konferentsii [Long products and metalware markets: Proceedings of the 2nd Annual Research Conference]. Alushta, 2004 (Metall-kuryer), pp. 83-85.
21. Kostyuchenko V.P., Taranets M.A., Degtyarenko Z.A., Shamin S.A., Kuzyakov V.D. The problems of welding materials production at Mezhgosmetiz-Mtsensk JSC. *Metizy* [Hardware], 2006, no. 3 (12), pp. 17-20.
22. Kostyuchenko V.P., Taranets M.A., Degtyarenko Z.A., Shamin S.A., Kuzyakov V.D. Some features of copper-coated welding wire production at Mezhgosmetiz-Mtsensk JSC. *Svarshchik v Belorussii* [Welder in Belarus], 2005, no. 1 (18), pp. 12-15.
23. Emelyushin A.N., Sheksheev M.A. Looking at the effect of heat cycles on the primary structure of the K56 steel in a welding operation. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Important problems of modern science, technology and education], 2011, no. 1, PP. 150-153.
24. Emelyushin A.N., Sychkov A.B., Zavalishchin A.N., Sheksheev M.A. Formation of the structure and properties of welded joints in the K56steel grade in an arc welding operation. *Chernye metally* [Ferrous metals], 2013, no. 8 (980), pp. 18-22.
25. Emelyushin A.N., Sychkov A.B., Sheksheev M.A. Looking at the formation of the structure and properties of the heat-affected zone in low-alloy steel pipe in different arc welding conditions. *Chernaya metallurgiya* [Ferrous Metallurgy], 2013, no. 9 (1365), pp. 50-52.
26. Emelyushin A.N., Sychkov A.B., Sheksheev M.A. Looking at the weldability of the K56 high-strength pipe steel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2012, no. 3, pp. 26-30.
27. Sychkov A.B., Zavalishchin A.N., Perchatkin A.V. Structure formation in a high-plasticity steel wire rod made of the Sv-08G2S low-carbon boron microalloyed steel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2012, no. 2, pp. 50-53.
28. Sychkov A.B., Parusov V.V., Nesterenko A.M., Zhukova S.Yu., Zhigarev M.A., Perchatkin A.V., Peregudov A.V., Chuyko I.N. *Struktura i svoystva katanki dlya izgotovleniya elektrodov i svarochnoi provoloki* [The structure and properties of the wire rod for welding]. Bendery: Poligrafist, 2009, 608 p.
29. Parusov V.V., Zhukova S.Yu., Evsyukov M.F., Sychkov A.B. et al. The kinetics of phase transformations in the continuously cast Sv-08G2S steel wire rod under continuous cooling conditions. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoy metallurgii: sbornik nauchnykh trudov* [Basic and applied problems of ferrous metallurgy: Research papers]. Dnepropetrovsk: DrukarnyaVizion, 2004, vol. 9, pp. 191-197.
30. Parusov V.V., Sychkov A.B., Derevyanchenko I.V., Zhukova S.Yu., Kucherenko O.L., Zhigarev M.A. High-deformability wire rod made of steel Sv-08G2S. Metallurgist. January 2007, vol. 51, iss. 1-2, pp. 121-130.
31. Parusov V.V., Sychkov A.B., Zhukova S.Yu., Zhigarev M.A. The effect of the chemical composition and process parameters on the mechanical properties of the Sv-08G2S steel wire rod. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry], 2005, no. 4, pp. 68-71.
32. Nesterenko A.M., Sychkov A.B., Zhukova S.Yu., Sukhomlin V.I. Fine microstructure of wire rods manufactured from Sv-08G2S high-plasticity steel. Metallurgist. September 2008, vol. 52, Iss. 9-10, pp. 511-516.
33. Sychkov A.B., Sheksheev M.A., Malashkin S.O., Kamalova G.Ya. The structure of the wire rod made of the Sv-08G2S steel with an improved chemical composition. *Sovremennye problemy gorno-metallurgicheskogo kompleksa. Nauka i proizvodstvo. T.1: trudy XII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Current issues of mining and metallurgy. Science and Industry. Vol. 1. Proceedings of the 12th Russian Research Conference with international participation]. Stary Oskol: Publishing house of the MISA branch, 2015, pp. 213-219.
34. Sychkov A.B., Parusov V.V., Zhigarev M.A., Zhukova S.Yu., Perchatkin A.V., Peregudov A.V. Development of a producton process for rolled welding wire made from Sv-08KHGSMFA alloy. Metallurgist, July 2007, Vol. 51, Issue 7-8, PP. 384-393.
35. Nesterenko A.M., Sychkov A.B., Sukhomlin V.I., Zhukova S.Yu., Moroz A.N. Special features of rod from steel Sv-08KHG2SMF. Metal Science and Heat Treatment, Vol. 51, no. 7-8, pp. 372-374.
36. Parusov V.V., Sychkov A.B., Derevyanchenko I.V., Zhigarev M.A. A new application of boron in metallurgy. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], no. 1 (9), 2005, pp. 15-17.

Received 22/04/16

Влияние металлургических факторов и термической обработки на формирование структуры сварочной катанки / Кижнер М., Сычков А.Б., Шекшеев М.А., Малашкин С.О., Камалова Г.Я. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №3. С. 55–70. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-3-55-70

Kizhner M., Sychkov A.B., Sheksheyev M.A., Malashkin S.O., Kamalova G.Ya. The effect of metallurgical factors and heat treatment on the structure of wire rod for welding application. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 3, pp. 55–70. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-3-55-70