

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 669.14.018.292:621.74.047

Бедринов А.И., Куницын Г.А., Придеин А.А., Прокопенко Л.В., Базаев Е.Л., Самохина О.В.

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ШТРИПСА, СТОЙКОГО К СЕРОВОДОРОДНОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

Аннотация. Для сооружения промышленных нефтепроводов наиболее востребованы трубы из сталей 09ГСФ и 13ХФА, соответствующие классу прочности K52. К стойкости трубной продукции и соединительных деталей промышленных нефте- и нефтепродуктопроводов и к воздействию агрессивных сред, содержащих воду и сероводород, предъявляются повышенные требования. В АО «Уральская Сталь» успешно внедрена унифицированная комплексная технология производства коррозионно-стойкого листового проката из сталей 09ГСФ и 13ХФА в широком диапазоне размерного сортамента с обеспечением требований к водородному растрескиванию по стандарту NACE TM0284 и сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением по методу «А» стандарта NACE TM0177. Разработаны режимы контролируемой прокатки с ускоренным последеформационным охлаждением и последующим высоким отпускком, обеспечивающие заданный уровень механических характеристик, соответствующих классу прочности K52. Для обеспечения удовлетворительной плоскостности листов рекомендованы варианты химического состава стали в зависимости от толщины готового листа. Режимы производства обеспечивают высокую хладостойкость металла и фактические значения ударной вязкости KCV⁴⁰, значительно превышающие нормативные требования. Показано, что снижение соотношения Ca/S в металле до ~0,6–1,0 при содержании серы менее 0,002 % не только не приводит к снижению коррозионной стойкости, но и минимизирует ликвационную неоднородность стали и загрязненность неметаллическими включениями. Разработанная в АО «Уральская Сталь» технология обеспечивает возможность промышленного производства коррозионно-стойкого листового проката из сталей 09ГСФ и 13ХФА в широком размерном диапазоне.

Ключевые слова: внепечная обработка, коррозионная стойкость, водородное растрескивание, сероводородное растрескивание, контролируемая прокатка, ускоренное охлаждение, высокий отпуск, микроструктура.

Введение

Отличительной особенностью требований, предъявляемых к трубной продукции и соединительных деталей промышленных трубопроводов для нефти и нефтепродуктов, является стойкость к воздействию агрессивных сред, содержащих воду и сероводород.

Под воздействием воды и сероводорода стальные трубы подвергаются коррозии с потерей массы и насыщению водородом. В присутствии H₂S водород, образующийся на поверхности металла в результате коррозионных процессов, проникает внутрь стали, скапливается в местах существования дефектов – неметаллические включения, примеси, дислокации – и вызывает растрескивание.

Как показали многочисленные исследования [1–4], разрушение труб, транспортирующих такие углеводороды, происходит в основном по двум механизмам:

- 1) водородное растрескивание (НІС);
- 2) сероводородное растрескивание под напряжением (SSCC).

Металл труб и штрипсов в сероводородостойком исполнении дополнительно к обычным требованиям, предъявляемым к трубам магистральных нефтепроводов, должен соответствовать целому ряду особых требований к химическому составу и технологии производства как на сталеплавильном, так и на прокатном переделах.

Производство сероводородостойкого проката возможно по сквозной (комплексной) технологии, включающей выполнение специальных мероприятий при выплавке, внепечной обработке, непрерывной разливке, а также прокатке и термообработке. Указанный комплекс мер должен обеспечить:

- повышение чистоты стали по содержанию газов, водороду и кислороду;
- минимальное легирование стали для достижения требуемого комплекса механических свойств;
- общее уменьшение количества неметаллических включений, в первую очередь вытянутых в направлении прокатки, а также максимальную их глобуляризацию, снижение содержания серы (не более 0,002 %);
- снижение ликвационной и структурной неоднородности (и в т.ч. структурной полосчатости);
- получения однородной максимально дисперсной микроструктуры.

В настоящее время для промышленных нефтепроводов наиболее востребованы штрипсы и трубы из стали марок 09ГСФ и 13ХФА по уровню прочности соответствующих классу прочности K52.

Основные технические требования на электросварные трубы классов прочности K52 для транспортировки нефтепродуктов утверждены ПАО «НК «Роснефть» и приведены в Положении компании.

Освоение производства

На протяжении 20 лет АО «Уральская Сталь» надежный поставщик штрипса из коррозионно-

стойкой стали марки 09ГСФ. Промышленные поставки штрипса из стали 09ГСФ начались в далеком 1998 году и продолжают по настоящее время. Основными потребителями являются ПАО «ЧТПЗ», АО «ВМЗ», АО «ВТЗ», АО «ЗТЗ».

Разработку химического состава, обработку режимов разлива, внепечной обработки стали, режимов контролируемой прокатки и термической обработки осуществлялись совместно со специалистами ООО «Самарский ИТЦ». Исходя из состава оборудования, в 1998 году выплавку производили в электропечах ДСП, внепечная обработка ограничивалась продувкой через фурмы аргоном с последующей разливкой стали в изложницы. Учитывая ограниченные возможности сталеплавильного цеха, к готовому листу предъявлялись соответствующие «скромные» технические требования: отсутствие требований по загрязненности стали неметаллическими включениями, содержание серы не более 0,010%, содержание фосфора не более 0,020%, требования по сплошности листов не превышали 2-го класса сплошности ГОСТ 27772, величина зерна не должна превышать 8-го номера по ГОСТ 5639. Возможности стана 2800 также были не безграничны, максимальная величина относительных обжатий чистовой прокатки не превышала 7–8%, температура окончания контролируемой прокатки составляла 770–810°C. Тем не менее к металлу предъявлялись на тот момент «революционные» требования: обеспечение после контролируемой прокатки ударной вязкости KCV^{-40} и KCU^{-60} не менее 59 Дж/см², металл должен быть стойким к водородному растрескиванию (коэффициент длины трещин CLR не более 6%, коэффициент ширины трещин CTR не более 3%), величина пороговой нагрузки по стандарту NASE TM 0177-90 должна быть не менее 70%. Тем не менее АО «Уральская Сталь» успешно справилось с поставленной задачей и обеспечило поставку металлопроката в установленные сроки, объем пилотного проекта составил 1200 т. В следующем 1999 году поставка составляла уже 6500 т. С того момента на АО «Уральская Сталь» прошло ряд коренных изменений в части состава основного оборудования и, соответственно, технологических возможностей по обеспечению качественных характеристик при производстве толстолистового проката. В процессе модернизации производства выполнено:

- реконструкция электропечей;
- введены в действие установка «печь-ковш» и установка по вакуумной обработке стали;
- ввод в действие слябовой установки непрерывной разлива и перевод всего производства толстого листа на использование литых слябов;
- реконструкция старых и ввод новых методических нагревательных печей;
- по проекту SMS DEMAG произведена полная замена черновой и чистовой клетей стана 2800;
- введена в эксплуатацию установка ускоренного последовательного охлаждения;

- введена в действие одиннадцатиролковая листопродвижная машина;

- общая реконструкция действующего производства, позволила автоматизировать процессы выплавки, разлива стали и процесса прокатки;

- в настоящее время по проекту Tenova введен в эксплуатацию комплекс «роликовая печь – роликозакалочная машина (РТП-РЗМ)».

Переход на новую технологическую базу позволил на качественно новом уровне обеспечить производство штрипса для электросварных труб. Это касается в первую очередь обеспечения металлургической чистоты стали по неметаллическим включениям, вредным примесям и газам, узким интервалам по обеспечению химического состава, высокого уровня ударной вязкости, комплекса Z-свойств и сплошности по результатам УЗК.

Металл труб и штрипсов в сероводородостойком исполнении дополнительно к обычным требованиям, предъявляемым к трубам магистральных нефтепроводов, должен соответствовать целому ряду особых требований к химическому составу и технологии производства как на сталеплавильном, так и на прокатном переделах.

Уменьшение сегрегационной неоднородности и обеспечение чистоты металла по примесям обеспечивается применением качественных первородных материалов, глубоким рафинированием и обеспечением требований по разливу и кристаллизации слитка. Требуемая микроструктура стали ферритобейнитного класса достигается оптимальным легированием стали карбонитридообразующими элементами и производством по технологии контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением [5].

АО «Уральская Сталь» совместно со специалистами ООО «Самарский ИТЦ», а в дальнейшем с ООО «ИТ-Сервис» провели совместную работу по совершенствованию технологии производства штрипса из стали марки 09ГСФ в сероводородостойком исполнении. Итогом этой работы стала разработка Спецификации процесса производства стали марки 09ГСФ для изготовления листового проката повышенной коррозионной стойкости, включающая: выплавку полупродукта в ДСП; обработку на УКП с получением металла требуемого марочного состава с содержанием серы не более 0,002% масс.; вакуумирование, модифицирование неметаллических включений до начала и по окончании вакуумной обработки с суммарным расходом SiCa 0,6–1,0 кг/т и разливу стали на МНЛЗ.

Другая ситуация обстоит со сталью марки 13ХФА. Результаты производства опытной партии оказались отрицательными – не достигнуто нормируемое значение по ударной вязкости. В дальнейшем запросы на 13ХФА носили единичный характер, и, учитывая отрицательный опыт производства, АО «Уральская Сталь» не подтверждало такие заказы.

Тем не менее в связи с общим падением спроса на толстолистовой прокат изготовители вынуждены принимать «любые» заказы. Так произошло и с

13ХФА. Первоначально подтвержден заказ на поставку 1000 т листа толщиной 9 мм, и в дальнейшем заказы принимались на любую толщину листа без ограничения объемов.

Учитывая опыт производства 09ГСФ, основные усилия были направлены на минимизацию развития осевой ликвационной неоднородности металла при производстве слабов и подбор режимов прокатки и термической обработки, снижающих отрицательное влияние ликвационной неоднородности на стойкость металла к водородному растрескиванию.

На первом этапе разработки технологии производства 13ХФА в условиях АО «Уральская Сталь» выбран базовый химический состав с высоким содержанием ванадия, хрома, а также небольшой добавкой ниобия и никеля (табл. 1).

В дальнейшем проведена унификация режимов производства 13ХФА и 09ГСФ.

Ввиду отсутствия машины холодной правки в зависимости от толщины листа использовали два диапазона массовой доли углерода:

- для условно «тонких» профилей толщиной 8–12 мм массовая доля углерода была 0,10–0,12%;
- для условно «толстых» профилей толщиной более 12 мм массовая доля углерода была 0,07–0,09%.

Для обеспечения серийной нормы разливки на МНЛЗ профиля толщиной 12–18 мм плавил как с диапазоном углерода 0,10–0,12%, так и 0,07–0,09%.

При выплавке в ДСП емкостью 120 т получали полупродукт с низкими массовыми содержаниями углерода и фосфора: 0,04–0,07% и 0,008–0,012% соответственно. При обработке на УКП решалась задача получения металла требуемого химического состава с низким остаточным содержанием серы (0,002 % и менее). При обработке стали в вакууматоре камерного типа обеспечивалось снижение массового содержания водорода в стали до 2,0 ppm и менее. Окончательная корректировка металла по содержанию алюминия и модифицирование неметаллических включений осуществлялись по завершении вакуумной обработки. При этом остаточное содержание алюминия в стали составляло 0,025–0,035%, количество вводимого модификатора (силикокальция в виде проволоки с наполнителем из SiCa) определялось исходя из поставленной задачи выполнения критерия $Ca/S > 1,0$

для гарантированного связывания всей ликвидирующей в процессе кристаллизации серы в глобулярные включения с оболочкой из CaS [6].

Модифицирование неметаллических включений проводилось при глубокой степени десульфурации и при относительно низком расходе SiCa в два этапа: перед вакуумированием металла (0,7–1,0 кг/т) и по окончании вакуумной обработки стали (0,3–0,6 кг/т). Цель по достижению критерия $Ca/S > 1$ не ставилась, фактическое значение Ca/S находилось в диапазоне 0,5–0,8. Снижение соотношения Ca/S в металле до ~ 0,6–1,0 при содержании серы менее 0,002% не только не приводит к снижению коррозионной стойкости, но и минимизирует ликвационную неоднородность стали и загрязненность неметаллическими включениями [7].

Данный способ модифицирования обеспечивает низкую долю экзогенных включений: до 10–15% включений на основе MgO и до 10% включений, близких по составу ковшевому шлаку. Данное обстоятельство дополнительно указывает на определяющее влияние операции модифицирования вакуумированного металла на формирование типов неметаллических включений и уровень загрязненности ими металла.

После непрерывной разливки слябы направлялись на противоблоксную обработку в отапливаемых колодцах в течение 48 часов.

Другой характерной особенностью разработанной технологии было применение «относительно» высокой температуры нагрева слабов под прокатку 1200–1220 °С. Данный режим позволил провести прокатку в черновой клети при температуре 1050–1120°С, с обеспечением относительных обжатий до 15–18%. Такие обжатия позволили формировать более мелкое и равноосное аустенитное зерно после черновой стадии прокатки благодаря протеканию рекристаллизации после каждого прохода на клети дуо и в конечном результате повысить как прочностные, так и пластические свойства. Чистовая стадия прокатки осуществляется в интервале температур 800–820°С. Суммарная деформация на чистовой стадии прокатки составляет более 75%, частные обжатия за проход составляют 12–18 %.

Таблица 1

Химический состав стали марок 09ГСФ, 13ХФА

Марка стали	Массовая доля химических элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Al	Mo	V	S	P	N
09ГСФ	не более 0,13	не более 0,70	не более 0,70	не более 0,30	0,020–0,04	не более 0,20	0,04–0,12	0,002	0,015	0,010
13ХФА	не более 0,13	0,17–0,40	не более 0,70	0,50–1,00	0,020–0,050	не более 0,30	0,04–0,10	0,002	0,010	0,009

Применение ускоренного охлаждения сразу после окончания пластической деформации обеспечивает получение мелкозернистой структуры с номером зерна 9–11. Увеличение интенсивности охлаждения позволяет получить мелкодисперсную феррито-бейнитную микроструктуру и обеспечивает нормируемую прочность, соответствующую классу прочности К52 и высокую хладостойкость штрипса. Температура конца ускоренного охлаждения назначается в зависимости от содержания углерода и толщины листа и варьируется от 650 до 580°C. Далее для снятия внут-

ренних напряжений листы проходят термическую обработку по режиму «высокий отпуск» с температурой печи по зонам 750°C. Конкретное удельное время назначалось исходя из фактического уровня механических свойств после контролируемой прокатки с УКО и варьируется от 2,5 до 5 мин/мм.

Общий объем поставки коррозионно-стойкого штрипса превысил 500 000 т.

Уровень механических характеристик, достигнутый при производстве листового проката из стали марок 09ГСФ, 13ХФА, приведен на рис. 1.

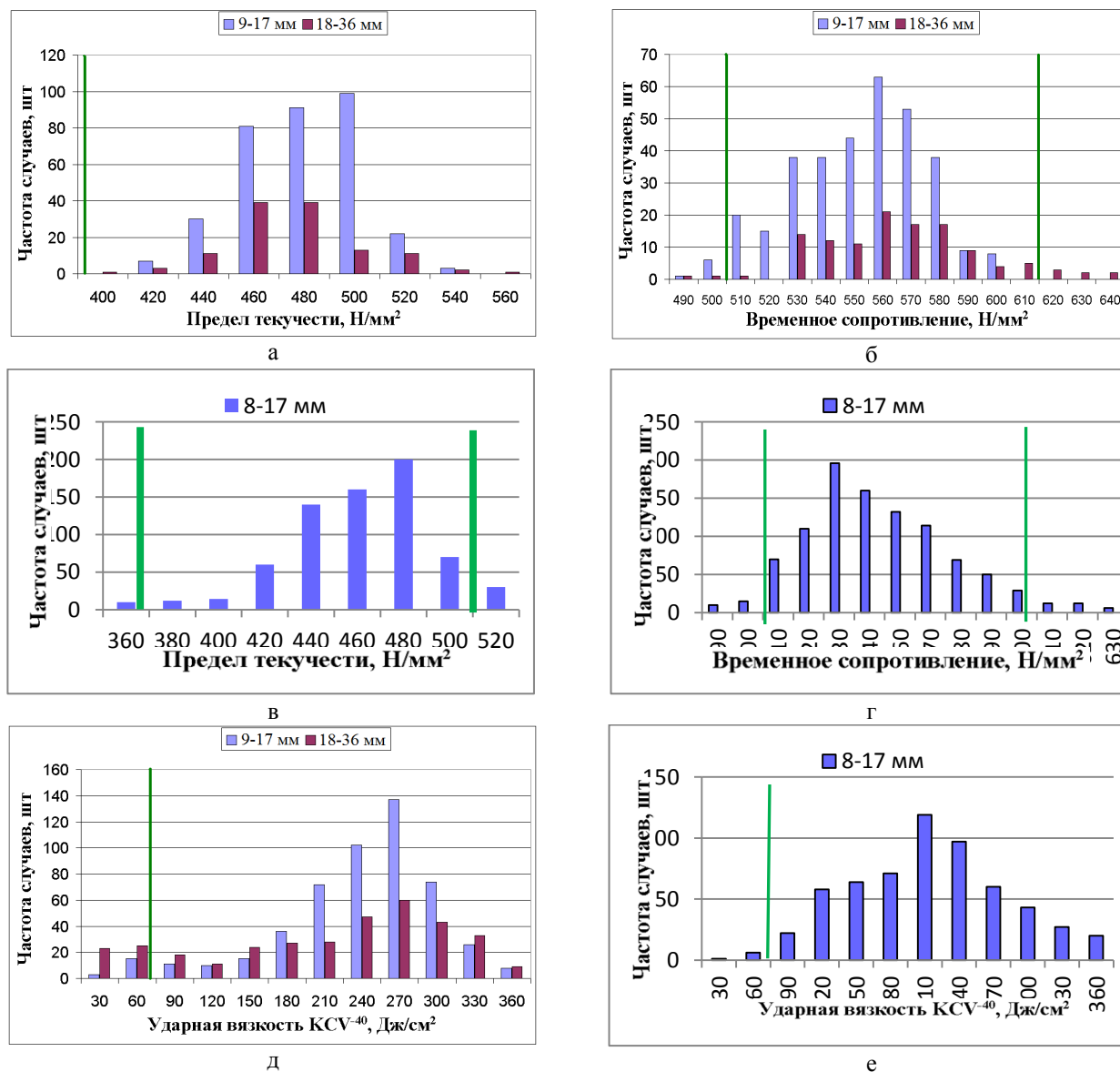


Рис. 1. Уровень механических и вязких свойств, достигнутый при производстве листов толщиной 8–36 мм:
 а – частотное распределение предела текучести 13ХФА;
 б – частотное распределение временного сопротивления 13ХФА;
 в – частотное распределение предела текучести 09ГСФ;
 г – частотное распределение временного сопротивления 09ГСФ;
 д – частотное распределение ударной вязкости KCV⁻⁴⁰ 13ХФА;
 е – частотное распределение ударной вязкости KCV⁻⁴⁰ 09ГСФ

Известно, что снижение содержания углерода благоприятно сказывается на хладостойкости стали, но приводит к снижению прочностных свойств металла. С целью обеспечения заданного уровня временного сопротивления и предела текучести снижение углерода необходимо компенсировать снижением температуры конца ускоренного охлаждения. Все это выглядит вполне естественно и закономерно, однако снижение температуры конца ускоренного охлаждения приводит к изгибанию «головной» и «донной» частей листа. В результате чего листы имеют неудовлетворительную плоскостность, данный факт особенно ярко выражен на «тонких» профилях толщиной 8–10 мм.

Возникает замкнутый круг. С одной стороны, для повышения ударной вязкости необходимо снизить содержание углерода с одновременным снижением температуры конца ускоренного охлаждения, с другой – для обеспечения удовлетворительной плоскостности необходимо, наоборот, повысить температуру конца ускоренного охлаждения и тем самым оставить содержание углерода на уровне 0,10–0,12%.

В рамках текущих заказов на АО «Уральская Сталь» произведена выплавка стали марок 09ГСФ и 13ХФА в двух диапазонах содержания углерода: 0,07–0,09 и 0,10–0,12% в широком диапазоне толщины листа.

Значения ударной вязкости KCV^{40} в зависимости от содержания углерода представлены на рис. 2.

Из представленных данных видно, что при углероде 0,10% и выше ударная вязкость KCV^{40} ведет себя нестабильно, на отдельных образцах происходит резкое падение до 20 Дж/см² и это падение тем больше, чем больше толщина листа.

Учитывая вышесказанное, технологическим регламентом определено для прокатки на листы толщиной от 8 до 10 мм выплавлять плавки с содержанием углерода 0,10–0,12%, а для прокатки на листы свыше 18 мм выплавлять плавки с содержанием углерода 0,07–0,09%. Учитывая малотоннажность заказов, для обеспечения плавочной нормы при выплавке стали в ЭСПЦ листы толщиной 11–17 мм назначаются на выплавку в обоих интервалах содержания углерода и определяются конкретным портфелем заказов.

Контролируемая прокатка в сочетании с ускоренным охлаждением обеспечивает получение однородной мелкодисперсной ферритобейнитной структуры. На рис. 3 представлена характерная микроструктура листов 13ХФА и 09ГСФ. Соотношение структурных составляющих: для 13ХФА – бейнит 40%, феррит 55%, перлит 5%; для 09ГСФ – бейнит 60%, феррит 35%, перлит 5%.

Оценка микроструктуры производится автоматическим методом по ГОСТ 5639-82 путем процентного соотношения площади, занятой зернами различных номеров, при помощи системы анализа изображения SIAMS 700, OLYMPUS GX51. Оценка проводится при увеличении $\times 500$ и $\times 100$ по толщине листа.

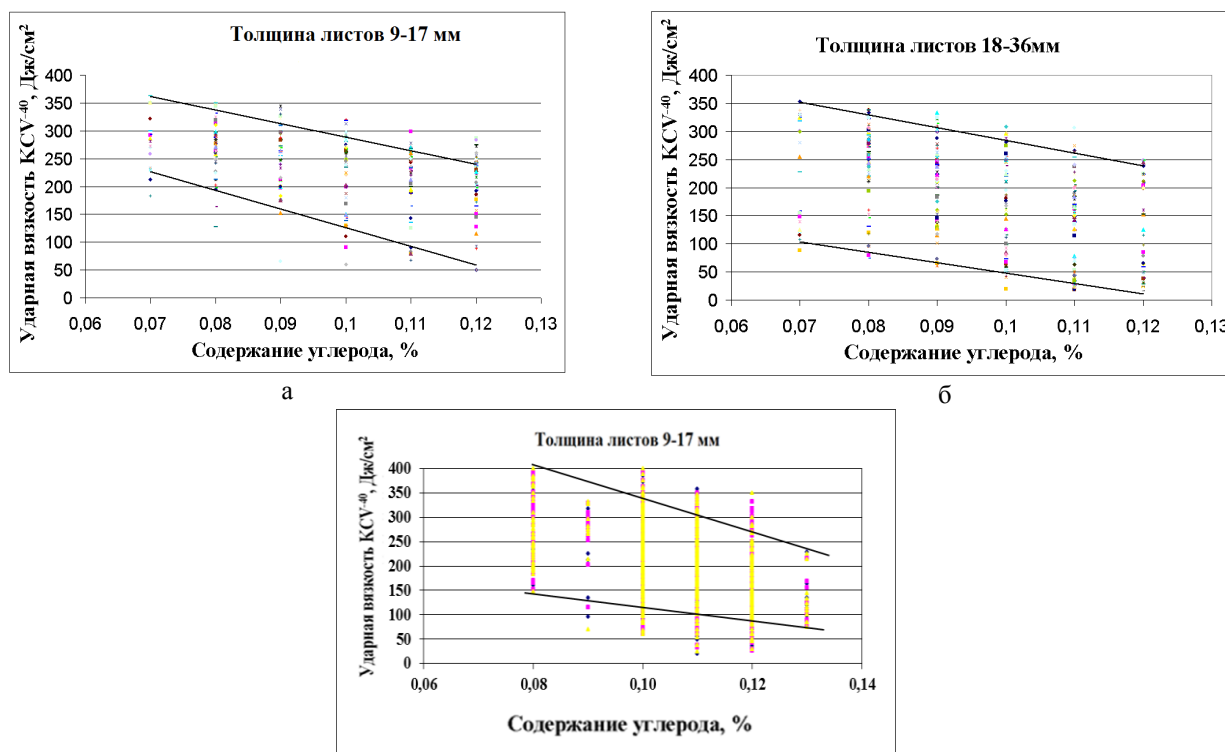


Рис. 2. Значения ударной вязкости KCV^{40} в зависимости от содержания углерода: а – листов стали марки 13ХФА толщиной 9–17 мм; б – листов стали марки 13ХФА толщиной 18–36 мм; в – листов стали марки 09ГСФ толщиной 9–17 мм

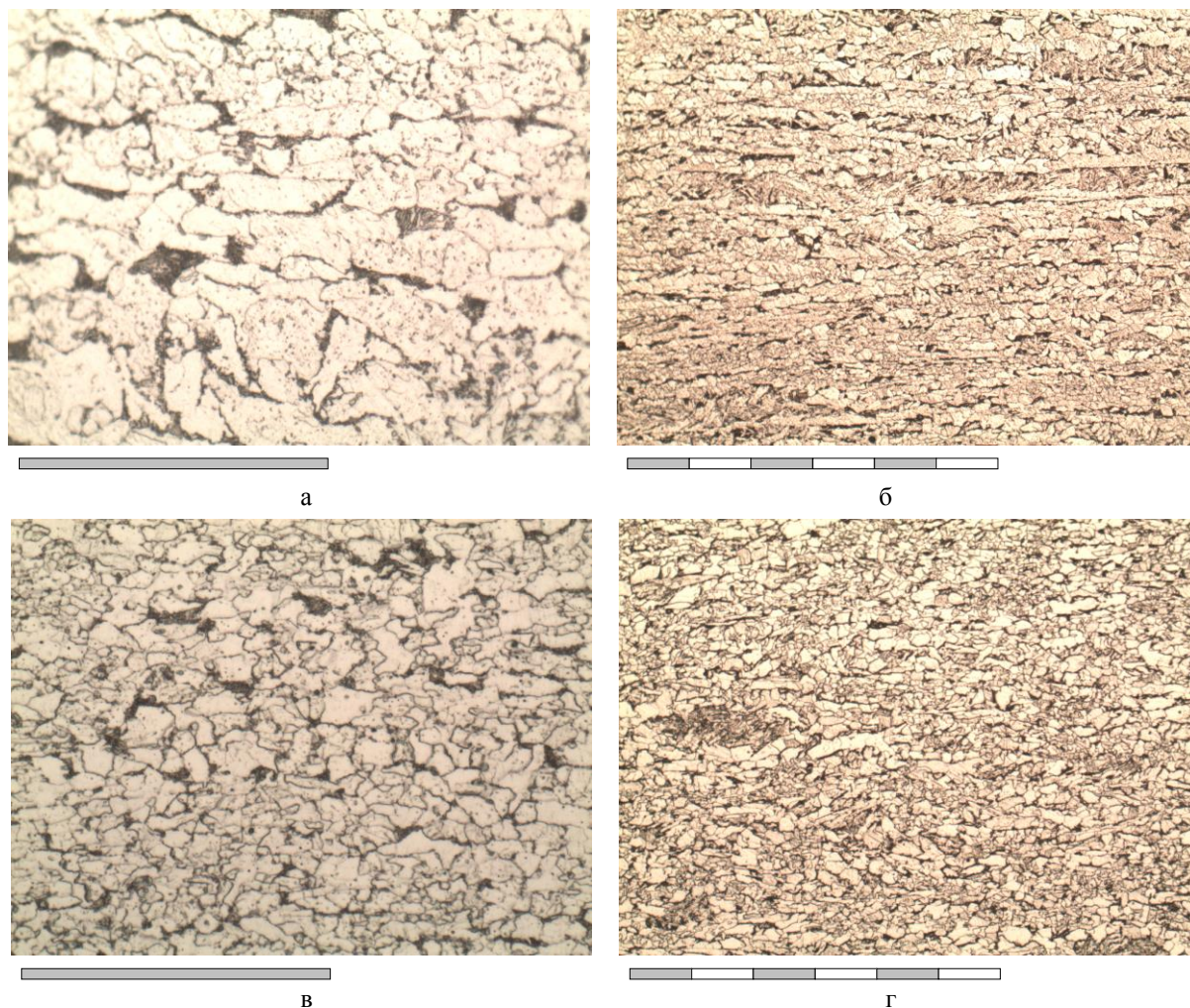


Рис. 3. Микроструктура листов:

а – поверхность $\times 500$, лист 17 мм 13ХФА; б – поверхность $\times 100$, лист 17 мм 13ХФА;
 в – поверхность $\times 500$, лист 15 мм 09ГСФ; г – поверхность $\times 100$, лист 15 мм 09ГСФ;

Проведенные в НПАО НПО «ВНИИТнефть» и ООО «НИПП «Вальма» исследования коррозионной стойкости проката, произведенного по технологии контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением и последующим высоким отпуском, показали, что листовая прокат полностью соответствует установленным требованиям нормативной документации в части сопротивления коррозионному сероводородному растрескиванию под напряжением и водородному растрескиванию:

- коэффициент длины трещины CLR не превышает 6%;
- коэффициент длины трещины в сечениях одного образца CLR не превышает 15%;
- коэффициент толщины трещины CTR не превышает 3%;
- СКРН по NACE TM 0177 Метод А $\sigma_{th} = 0,72\sigma_T$;
- скорость общей коррозии по методике НефтеГазСервис №9668-006-593377520-2003, не превышает 0,5 мм/год.

Заключение

В условиях АО «Уральская Сталь» успешно внедрена унифицированная комплексная технология производства коррозионностойкого листового проката из стали марок 09ГСФ, 13ХФА в широком диапазоне размерного сортамента с обеспечением требований к водородному растрескиванию по NACE TM0284 и сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением по методу «А» стандарта NACE TM0177.

Разработанные режимы контролируемой прокатки, включающие ускоренное последеформационное охлаждение с проведением последующего «высокого отпуска» с контролем температуры металла на выходе из печи, обеспечивают заданный уровень механических характеристик, соответствующих классу прочности K52.

Для обеспечения удовлетворительной плоскостности листов целесообразно применение двух вариан-

тов химического состава в зависимости от толщины готового листа.

Режимы производства обеспечивают высокую хладостойкость металла, фактические значения ударной вязкости KCV^{40} значительно превышают нормативные требования.

Снижение соотношения Ca/S в металле до $\sim 0,6-1,0$ при содержании серы менее 0,002% не только не приводит к снижению коррозионной стойкости, но и минимизирует ликвационную неоднородность стали и загрязненность неметаллическими включениями.

АО «Уральская Сталь» имеет возможность промышленного производства коррозионно-стойкого листового проката из стали марок 09ГСФ, 13ХФА в широком размерном диапазоне.

Список литературы

1. Nakasugi H., Matsuda H. Development of new line-pipe steels for sour-gas service. Nippon steel Techn. Rep. 1979, №14, pp. 66-78.
2. Treseder R., Swanson T. Factors in sulfide corrosion cracking of high strength steels. Corrosion, 1968, v. 24, №2, pp.31-37.
3. Townsend H. Hydrogen sulfide stress corrosion cracking of high strength steels wire. Corrosion, 1972, v. 28, №2, pp.39-46.
4. Li.J., Oriani R., Darken L. The thermodynamic of stressed solids. Zeitschrift fur physic. Chem N.F., 1966, Bd49, № 3-5, pp. 271-290.
5. Влияние режимов деформационно-термической обработки на склонность трубной стали к коррозионному растрескиванию под напряжением / Ю.Д. Морозов, О.Н. Чевская, Г.А. Филиппов, А.А. Батьков и др. // Металлург. 2007. № 11. С. 27-32.
6. Титова Т.М. О целесообразности позднего микрولةгирования стали в процессе формирования непрерывнолитой заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ // Металл и литье Украины. №3. 2009. С. 19-22.
7. Разработка технологии производства стали 09ГСФ повышенной коррозионной стойкости / А.А. Сафронов, В.С. Дуб, М.А. Мовчан, А.В. Иоффе, Е.Л. Базаев, А.А. Придеин // Сталь. 2016. № 2.

Сведения об авторах

Бедринов Александр Игоревич – главный инженер АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия. E-mail: a.bedrinov@uralsteel.com.

Куницын Глеб Александрович – технический директор АО «Уральская сталь», доктор технических наук, Новотроицк, Россия. E-mail: g.kunitsyn@uralsteel.com.

Придеин Андрей Александрович – начальник управления технического сопровождения прокатного производства АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия. E-mail: a.pridein@uralsteel.com.

Прокопенко Леонид Владимирович – начальник прокатного отдела АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия. E-mail: l.prokopenko@uralsteel.com.

Базаев Евгений Леонидович – главный специалист по инновационным видам продукции АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия. E-mail: e.bazaev@uralsteel.com.

Самохина Ольга Викторовна – начальник отдела по термической обработке АО «Уральская Сталь», Новотроицк, Россия. E-mail: o.samohina@uralsteel.com.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

SPECIAL ASPECTS OF PRODUCTION OF STRIPS RESISTANT TO HYDROGEN SULFIDE STRESS CRACKING

Bedrinov Alexander I. – Chief Engineer JSC «Ural Steel», Novotroitsk, Russia. E-mail: a.bedrinov@uralsteel.com

Kunitsyn Gleb A. – Technical Director; JSC «Ural Steel», Doctor of Technical Sciences, JSC «Ural Steel», Novotroitsk, Russia. E-mail: g.kunitsyn@uralsteel.com.

Pridein Andrey A. – Head of Dpt. Technical support of rolling Production, JSC «Ural Steel», Novotroitsk, Russia. E-mail: a.pridein@uralsteel.com.

Prokopenko Leonid V. – Head of Rolling Dpt., JSC «Ural Steel», Novotroitsk, Russia. E-mail: l.prokopenko@uralsteel.com

Bazaev Evgeniy L. – Chief Spec. in Innovative Products, JSC «Ural Steel», Novotroitsk, Russia. E-mail: e.bazaev@uralsteel.com.

Samohina Olga V. – Head of Thermal Dpt., JSC «Ural Steel», Novotroitsk, Russia. E-mail: o.samohina@uralsteel.com.

Abstract. For the construction of field oil pipelines, pipes made of 09ГЦФ and 13ХФА steels corresponding to the strength class K52, are most in demand. Increased requirements are imposed on the resistance to the effect of aggressive media containing water and hydrogen sulfide of pipe products and fittings of field oil and oil product pipelines. JSC Ural Steel has successfully implemented a unified integrated process for the production of corrosion-resistant plates made of 09ГЦФ and 13ХФА steel grades with a wide range of sizes, meeting the requirements for hydrogen-induced cracking according to the NACE TM0284 standard and sulfide stress corrosion cracking according to method A of NACE TM0177 standard. Controlled rolling patterns with accelerated post-deformation cooling and subsequent high tempering have been developed, which provide a specified level of mechanical characteristics corresponding to the strength class K52. To ensure satisfactory flatness of plates, variants of chemical composition of steel are recommended depending on the thickness of the finished plate. Production modes provide high cold resistance of steel and actual values of impact toughness KCV^{40} that significantly exceed regulatory requirements. It is shown that a decrease in the Ca/S ratio in steel down to ~ 0.6–1.0 with a sulfur content of less than 0.002% does not only lead to a decrease in corrosion resistance, but also minimizes the segregation inhomogeneity of the steel and contamination with non-metallic inclusions. The process developed at JSC Ural Steel provides the possibility of industrial production of corrosion-resistant plates made of 09ГЦФ and 13ХФА steel grades with a wide size range.

Key words: secondary metallurgy, corrosion resistance, hydrogen-induced cracking, hydrogen sulfide cracking, controlled rolling, accelerated cooling, high tempering, microstructure.

Ссылка на статью:

Особенности производства штрипса, стойкого к сероводородному растрескиванию под напряжением / А.И. Бедринов, Г.А. Куницын, А.А. Придеин, Л.В. Прокопенко, Е.Л. Базаев, О.В. Самохина // Теория и технология металлургического производства. 2021. №2(37). С. 24-31.
Bedrinov A.I., Kunitsyn G.A., Pridein A.A., Prokopenko L.V., Bazaev E.L., Samohina O.V. Special aspects of production of strips resistant to hydrogen sulfide stress cracking. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 37, no. 2, pp. 24-31.