ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВОГО ПРОКАТА КЛАССА ПРОЧНОСТИ K60-D, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ЭЛЕКТРОСВАРНЫХ ТРУБ ГАЗОПРОВОДОВ И ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ЗАВОДОВ ПО ПРОИЗВОДСТВУ СЖИЖЕННОГО ГАЗА

А. А. ПРИДЕИН, начальник технического управления, a.pridein@uralsteel.com; С. П. ЗУБОВ, технический директор; Л. В. ПРОКОПЕНКО, главный специалист – начальник прокатного отдела; Е. Л. БАЗАЕВ, главный специалист; Д. В. НИЖЕЛЬСКИЙ, главный специалист; Н. И. СИНДЯНОВ, заместитель начальника цеха; Д. А. ШАБЛЯ, ведущий специалист (АО “Уральская сталь”, Россия, Оренбургская обл., г. Новотроицк)

Аннотация. Разработана и внедрена технология производства на стане 2800 АО “Уральская сталь” листового проката класса прочности K60-D с использованием термомеханической прокатки и с последующим ускоренным охлаждением. Показано, что внедренная технология обеспечивает требуемый комплекс механических свойств и высокую хладостойкость проката в широком размерном диапазоне. Толщина листового проката, производимого для магистральных и промысловых нефтегазопроводов, трубопроводов газосборных сетей и заводов по сжижению природного газа, и деталей трубопроводов составляет 21,2; 28,5 и до 45 мм соответственно. Результаты испытаний подтверждено полное соответствие листового проката класса прочности K60-D, произведенного по разработанной технологии, требованиям, предъявляемым к металлу двухшовных труб категории D diam. 1420 мм.

Ключевые слова: листовой прокат класса прочности K60-D, термомеханическая прокатка, хладостойкость проката, электросварные трубы, двухшовные трубы категории D diam. 1420 мм.

Ссылка для цитирования. Придеин А.А., Зубов С.П., Прокопенко Л.В., Базаев Е.Л., Нижельский Д.В., Синдянов Н.И., Шабля Д.А. Организация производства листового проката класса прочности K60-D, предназначенного для электросварных труб газопроводов и газораспределительных систем заводов по производству сжиженного газа // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 1. С. 68–79.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-1-68-79

ORGANIZATION OF K60-D STRENGTH CLASS SHEET ROLLED STOCK PRODUCTION INTENDED FOR ELECTRO-WELDED PIPES OF PIPELINES AND DISTRIBUTION SYSTEMS OF LNG PRODUCTION PLANTS

A. A. PRIDEIN, Head of Technical Dpt, a.pridein@uralsteel.com; S. P. ZUBOV, Technical director; L. V. PROKOPENKO, Chief Specialist – Head of Rolling shop; E. L. BAZAEV, Chief Specialist; D. V. NIZHEL'SKII, Chief Specialist; N. I. SINDYANOV, Deputy of Head of shop; D. A. SHABLYA, Leading Specialist (JSC “Ural Steel”, Russia, Orenburg rgn., Novotroitsk)

Abstract. A technology of K60-D strength class sheet rolled stock production at 2800 mill of JSC “Ural Steel” elaborated and implemented, by application of thermomechanical rolling followed by accelerated cooling. It was shown that the implemented technology provides the required complex of mechanical properties and high resistance of the rolling stock within a wide dimensional range. The thickness of the rolling stock, produced for trunk pipelines and field oil and gas pipelines, gas-collecting nets pipelines and natural gas liquefaction plants as well as pipelines details was 21.2; 28.5 and up to 45 mm correspondently. Complete meeting the properties of the K60-D strength class sheet rolled stock, produced by the elaborated technology, the requirements to the materials for two-seamed 1420 mm diameter pipes of D category was confirmed by results of tests.

Key words: K60-D strength class sheet rolled stock, thermomechanical rolling, rolled stock cold resistance, two-seamed 1420 mm diameter pipes of D category.

For citation. Pridein A.A., Zubov S.P., Prokopenko L.V., Bazaev E.L., Nizhel'skii D.V., Sindyanov N.I., Shablya D.A. Organization of K60-D strength class sheet rolled stock production intended for electro-welded pipes of pipelines and distribution systems of LNG production plants. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnikeskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 1, pp. 68–79. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-1-68-79

Производство стали класса прочности К60 (Х70) освоено в 90-х годах прошлого века. На первоначальном этапе освоение осуществлялось на мощных на тот период толстолистовых станах 3600 МК “Азовсталь” и станах 3000 комбината им. Ильича.

Стан 2800 АО “Уральская сталь” (ОХМК) введен в эксплуатацию в 1960 г. и изначально был направлен на производство штрипса для изготовления электросварных прямошовных нефте- и газопроводных труб большого диаметра. В АО “Уральская сталь” освоение производства листового проката класса прочности К60 начато в 2001 г. Возможности прокатных клетей стана 2800 значительно уступали станам трехтысячникам, тем не менее в условиях АО “Уральская сталь” успешно освоено производство штрипса класса прочности К60 толщиной до 15,7 мм. Данный сортament позволил АО “Уральская сталь” ус-

пешно участвовать в реализации проекта, осуществляемого ПАО “Транснефть”, по строительству нефтепровода “Восточная Сибирь – Тихий океан” (ВСТО). Общий объем поставки по проекту ВСТО составил 300 тыс. т, в том числе более 30 тыс. т штрипса класса прочности К60 для труб диам. 530–1220 мм.

В качестве базового химического состава выбран классический химический состав (табл. 1) стали класса прочности К60, предусматривающий использование микролегирующих добавок (Nb, V, Ti), которые позволяют эффективно управлять процессами формирования зеренной структуры (контроль роста аустенитного зерна при нагреве, рекристаллизации аустенита), а также выделением мелкодисперсных упрочняющих частиц, тем самым формируя требуемый комплекс механических и технологических свойств проката.

ТАБЛИЦА 1. МАССОВАЯ ДОЛЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ (НЕ БОЛЕЕ ИЛИ В ПРЕДЕЛАХ, %) СТАЛИ КЛАССА ПРОЧНОСТИ К60 ДО РЕКОНСТРУКЦИИ СТАНА 2800

TABLE 1. MASS SHARE OF CHEMICAL ELEMENTS (LESS OR WITHIN, %) OF K60 STRENGTH CLASS STEEL BEFORE THE MODIFICATION OF 2800 MILL

C	Si	Mn	Nb	V	Ti	S	P	N
0,09–0,11	0,35–0,45	1,55–1,65	0,05–0,07	0,05–0,06	0,015–0,030	0,005	0,015	0,012

Вследствие ограниченных возможностей прокатных клетей в период до реконструкции стана и отсутствия ускоренного охлаждения применялась сталь с относительно высоким содержанием углерода (до 0,11 %) и кремния (до 0,45 %). При этом для упрочнения металла чистовая стадия контролируемой прокатки осуществлялась в достаточно низком интервале температур (730–760 °С). Это стало возможным благодаря специальным режимам с мелкочастотными частными обжатами, позволяющими обеспечить достаточную накопленную деформацию при допустимых нагрузках на клеть.

Другой характерной особенностью разработанной технологии было применение “относительно” высокой температуры нагрева слывов под прокатку (1200–1220 °С). Данный режим позволил провести прокатку в черновой клетке при температуре 1050–1120 °С с обеспечением относительных обжатий до 15–18 %. Такие обжаты позволили формировать более мелкое и равноосное аустенитное зерно после черновой стадии прокатки благодаря протеканию рекристаллизации после каждого прохода в клетки дуо и в конечном результате повысить как прочностные, так и пластические свойства. Температура окончания чистовой стадии контролируемой прокатки соответствовала двухфазному интервалу (730–760 °С). Данный режим значительно отличается от современных подходов формирования

структуры трубных сталей, но на тот момент он был единственным и обеспечил требуемый уровень механических характеристик проката класса прочности К60 толщиной до 15,7 мм по проекту ВСТО.

Общая реконструкция в 2008 г. сталеплавильного и прокатного производства позволила снять ограничение на размерный сортament стали класса прочности К60 и расширить на весь размерный сортament стана 2800. Модернизация действующего производства позволила на качественно новом уровне организовать производство штрипса, это непрерывная разливка стали, установка ковш-печь, вакууматор. Новое оборудование дает новые возможности. Внепечная обработка обеспечивает чистоту стали по неметаллическим включениям и вредным примесям: не более 0,002 % S, не более 0,0012 % P. Вакуумная обработка жидкой стали гарантирует получение содержания водорода не более 2 ppm. Замена прокатных клетей и пуск в работу установки ускоренного охлаждения (УКО) обеспечивают стабильный уровень вязких свойств с формированием мелкозернистой феррито-бейнитной структуры с величиной зерна не крупнее номера 9. Мощные прокатные клетки в комплексе с установкой ускоренного охлаждения позволили пересмотреть подход к выбору химического состава (табл. 2) в сторону снижения содержания углерода и кремния.

ТАБЛИЦА 2. МАССОВАЯ ДОЛЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ (НЕ БОЛЕЕ ИЛИ В ПРЕДЕЛАХ, %) СТАЛИ КЛАССА ПРОЧНОСТИ К60 ПОСЛЕ РЕКОНСТРУКЦИИ СТАНА 2800

TABLE 2. MASS SHARE OF CHEMICAL ELEMENTS (LESS OR WITHIN, %) OF K60 STRENGTH CLASS STEEL AFTER THE MODIFICATION OF 2800 MILL

C	Si	Mn	Nb	V	Ti	S	P	N
0,07–0,09	0,25–0,35	1,50–1,60	0,06–0,07	0,04–0,05	0,010–0,025	0,002	0,012	0,008

Корректировка химического состава с одновременным внедрением ускоренного охлаждения листов обеспечила получение мелкодисперсной феррито-бейнитной структуры, которая позволила увеличить ударную вязкость в 2–4 раза с одновременным ростом временного сопротивления и предела текучести.

В этот период совместно с ПАО “Челябинский трубопрокатный завод” (ЧТПЗ) и АО “Выксунский металлургический завод” (ВМЗ) по проекту газо-

провода “Сахалин – Хабаровск – Владивосток” было освоено производство двухшовных труб диам. 1220 мм с толщиной стенки 17,8 и 21,2 мм, объем поставки составил 1500 т.

Уровень механических характеристик, достигнутый при производстве листов толщиной 17,8 и 21,2 мм класса прочности К60, приведен на рис. 1. Серийные кривые KCV и ИПГ листов толщиной 17,8 и 21,2 мм приведены на рис. 2.

Рис. 1. Уровень механических свойств листов класса прочности К60 толщиной 17,8 и 21,2 мм: а — частотное распределение временного сопротивления; б — частотное распределение предела текучести

Fig. 1. Level of mechanical properties of K60 strength class sheets of 17.8 and 21.2 mm thickness: а — frequency distribution of tensile strength; б — frequency distribution of yield strength

Рис. 2. Серийные кривые KCV и ИПГ листов класса прочности К60 толщиной 17,8 и 21,2 мм: а — зависимость значения KCV от температуры испытания; б — зависимость значения ИПГ от температуры испытания

Fig. 2. Serial curves KCV and IPG of K60 strength class sheets of 17.8 and 21.2 mm thickness: а — test temperature dependence of KCV values; б — test temperature dependence of IPG values

Двухшовные трубы диам. 1220 мм, изготовленные в ПАО ЧТПЗ из листового проката класса прочности K60 толщиной 17,8 мм, в декабре 2009 г. были подвергнуты натурным испытаниям на полигоне в г. Копейск. Испытания проводили при температуре -20°C , давление составило 110 атм. В качестве концентратора напряжений выступал надрез и заложенный кумулятивный заряд. Разрушение труб с одной стороны от концентратора не пошло дальше первой трубы [трещина остановилась (закольцевалась) на расстоянии 970 мм от трубы инициатора]. С противоположной стороны трещина остановилась на третьей трубе (на расстоянии 30 м от инициатора). Разрушение труб происходило по основному металлу на расстоянии 200–900 мм от сварного шва по вязкому механизму. Трубы признаются прошедшими испытания, если разрушение не пошло дальше третьей трубы от трубы-инициатора. Таким образом, полигонные испытания подтвердили два важных факта:

- двухшовные трубы полностью соответствуют установленным требованиям для магистральных газопроводов;

- по эксплуатационным характеристикам двухшовные трубы не уступают одношовным.

Одновременно с освоением производства штрипса по проекту “Сахалин – Хабаровск – Владивосток” для АО ВМЗ поставлена опытная партия (150 т) штрипса класса прочности X70 толщиной 29,7 мм для труб диам. 610 мм для обустройства компрессорной станции “Портовая”.

Данный период совпал с пуском станов 5000 АО ММК и АО ВМЗ, которые на тот момент покрывали потребности АО “Газпром” в одношовных трубах диаметром до 1420 мм, в результате для новых газовых проектов “Сахалин – Хабаровск – Владивосток”, “Бованенково – Ухта” и других были выбраны одношовные трубы, которые производятся на станах 5000. Таким образом, при строительстве новых магистральных газопроводов станам 2800 достается “скромное” участие в изготовлении штрипса, предназначенного для ответвлений, перемычек, отводов, а также для промысловых трубопроводов и ремонтно-эксплуатационных нужд действующих газопроводов.

Такой колоссальный опыт не прошел бесследно, с целью освоения Южно-Тамбейского газоконденсатного месторождения в 2015–2017 гг. возникла необходимость в поставке труб диам. 530 мм для обустройства газосборных сетей ОАО “Ямал-СПГ”, предусматривающая строительство завода по производству сжиженного природного газа (СПГ) мощностью 16,5 млн

т/год. По заказам ПАО ЧТПЗ и АО “Загорский трубный завод” (ЗТЗ) АО “Уральская сталь” осуществляло поставку стали класса прочности K60 (X70) трех профилей штрипса: 25×1571 , 28×1569 , $28,5 \times 1563$ общим объемом 13 тыс. т для труб диам. 530 мм. Особенностью данного проекта была поставка “относительно” толстых профилей для стана 2800 (25–28,5 мм) класса прочности K60 (X70) с контролем ударной вязкости на образцах Шарпи при температуре -60°C , доли вязкой составляющей в изломе образцов ИПГ при температуре -20°C , с требованиями по ультразвуковому контролю (УЗК) листов по критериям, превышающим требования 0 класса сплошности ГОСТ 27772 в 10 раз. Фактически газосборные сети ОАО “Ямал-СПГ” стали первым проектом по участию АО “Уральская сталь” в масштабных проектах по строительству трубопроводов с толщиной стенки свыше 20 мм.

Для выполнения установленных требований по УЗК необходимо обеспечить чистоту стали от вредных примесей цветных металлов и удаление водорода в жидкой стали. Использование чугуна при шихтовке обеспечивает значительное снижение содержания в готовой стали цветных примесей — олова, свинца, сурьмы, цинка и др. В связи с этим при выплавке в электропечах содержание чугуна в шихтовке стали составляло не менее 80 %. Обработка жидкой стали в вакууматоре обеспечивала содержание водорода не более 2 ppm.

При непрерывной разливке стали на МНЛЗ на первой плавке в серии происходит набор скорости от нуля до рабочей, на последней плавке в серии, наоборот, происходит снижение скорости разливки от рабочей до нуля. Процесс разгона и торможения при непрерывной разливке ухудшает условия кристаллизации металла и приводит к переохлаждению поверхности непрерывнолитой заготовки. Для обеспечения заданных требований по УЗК при планировании разливки стали класса прочности X70 (K60) первая и последняя плавки в серии назначались на другие заказы со схожим химическим составом и более мягкими требованиями по УЗК.

Максимальное использование чугуна при шихтовке стали, вакуумирование жидкой стали, исключение первой и последней плавок при непрерывной разливке в сочетании с замедленным охлаждением листов в стопах обеспечили установленные требования по УЗК.

Уровень механических характеристик, достигнутый при производстве листов толщиной 25–28,5 мм класса прочности K60 (X70), приведен на рис. 3.

Рис. 3. Уровень механических свойств листов K60 (X70) толщиной 25–28,5 мм:
а — частотное распределение временного сопротивления; *б* — частотное распределение предела текучести;
в — частотное распределение относительного удлинения; *г* — частотное распределение отношения предела текучести
к временному сопротивлению

Fig. 3. Level of mechanical properties of 25–28.5 mm thick K60 (X70) sheets
a — frequency distribution of tensile strength; *б* — frequency distribution of yield strength; *в* — frequency distribution
of elongation; *г* — frequency distribution of yield strength relation to tensile strength

Для проработки сляба в черновой клети с обеспечением относительных обжатий до 15–18 % нагрев слябов под прокатку осуществлялся в диапазоне температур 1200–1220 °С.

Такой режим создавал условия формирования мелкого и равноосного аустенитного зерна благодаря протеканию рекристаллизации после каждого прохода в клети дуо и в конечном результате повышал как прочностные, так и пластические свойства. Для обеспечения “чистой” прокатки в интервале температур 790–820 °С подстуживание раската на межклетевом про-

странстве составляло 9–10 мин. На “чистой” стадии контролируемой прокатки относительные обжатия за проход составляли 12–15 %.

Ускоренное охлаждение сразу после окончания пластической деформации позволило сформировать мелкозернистую феррито-бейнитную микроструктуру, что обеспечило высокую прочность и хладостойкость проката в области низких температур.

Значения хладостойких характеристик в зависимости от температуры окончания прокатки и ускоренного охлаждения приведены на рис. 4.

Рис. 4. Зависимость KCV^{-60} и IPG^{-20} листов толщиной 25–28,5 мм от температуры конца прокатки и температуры ускоренного охлаждения в УКО:
 а — зависимость KCV^{-60} от температуры конца прокатки; б — зависимость IPG^{-20} от температуры конца прокатки;
 в — зависимость KCV^{-60} от температуры ускоренного охлаждения в УКО; г — зависимость IPG^{-20} от температуры конца прокатки

Fig. 4. End rolling temperature and accelerated cooling temperature in UKO dependence of KCV^{-60} and IPG^{-20} sheets of 25–28.5 thickness:
 а — end rolling temperature dependence of KCV^{-60} ; б — end rolling temperature dependence of IPG^{-20} ; в — accelerated cooling temperature in UKO dependence of KCV^{-60} ; г — end rolling temperature dependence of IPG^{-20}

Термомеханическая прокатка в сочетании с ускоренным охлаждением обеспечивает получение однородной мелкодисперсной феррито-бей-

нитной структуры (рис. 5). Соотношение структурных составляющих: бейнит 15 %, феррит 80 %, перлит 5 %.

Рис. 5. Микроструктура листов толщиной 25 мм

Fig. 5. Microstructure of 25 mm thick sheets

На рис. 6 представлен характерный вид изломов образцов при испытании падающим грузом ИПГ⁻²⁰. Результаты испытаний подтвердили соот-

ветствие листов установленным требованиям по доли вязкой составляющей в изломе образцов ИПГ не менее 70 % при температуре -20 °С.

Рис. 6. Вид изломов образцов толщиной 25 мм при испытании падающим грузом:
а — излом образцов ИПГ при температуре конца прокатки 810 °С;
б — излом образцов ИПГ при температуре конца прокатки 780 °С

Fig. 6. View of 25 mm thick specimens fracture at falling load test:
а — IPG specimens fracture at an end rolling temperature of 810 °С;
б — IPG specimens fracture at an end rolling temperature of 780 °С

Рис. 7. Уровень механических свойств листов K60-D толщиной 12,9 мм:
а — частотное распределение временного сопротивления; б — частотное распределение предела текучести;
в — частотное распределение относительного удлинения; г — частотное распределение отношения предела текучести к временному сопротивлению

Fig. 7. Level of mechanical properties of 12.9 mm thick K60-D sheets:
а — frequency distribution of tensile strength; б — frequency distribution of yield strength; в — frequency distribution of elongation; г — frequency distribution of yield strength relation to tensile strength

Промысловые газопроводы диам. 530 мм с толщиной стенки 12,9 мм применяются в “газовых” проектах по обустройству:

- Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения, поставки штрипса класса К60 на ВМЗ превысили 25 тыс. т;

- Медвежьего нефтегазоконденсатного месторождения для ООО “Газпромдобыча Надым”, поставки штрипса класса К60-D на ЧТПЗ составили 7 тыс. т.

По данным проектам осуществлялась поставка одного профиля штрипса 12,9×1611 мм для труб диам. 530 мм с контролем ударной вяз-

кости на образцах Шарпи и доли вязкой составляющей в изломе образцов ИПГ при температуре $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$. В соответствии с требованиями, предъявляемыми к промышленным трубопроводам, значения должны составлять: KCV^{-42} — не менее 120 Дж/см^2 , ИПГ $^{-42}$ — не менее 90 %.

Уровень механических характеристик, достигнутый при производстве листов толщиной 12,9 мм класса прочности К60-D, приведен на рис. 7.

Исследование микроструктуры проката с помощью оптической микроскопии показало, что структура металла состоит из смеси феррита с бейнитом “ферритным” (рис. 8).

Рис. 8. Микроструктура листов толщиной 12,9 мм:
а — четверть, $\times 500$; б — середина, $\times 500$; в — распределение зерен по номерам; г — распределение размеров зерен

Fig. 8. Microstructure of 12.9 mm thick sheets:
а — quarter, $\times 500$; б — middle, $\times 500$; в — grains distribution by numbers; г — grains size distribution

Оценка микроструктуры производилась автоматическим методом по ГОСТ 5639–82 путем определения процентного соотношения площади, занятой зернами различных номеров, при помощи системы анализа изображения SIAMS

700, Olympus GX51. Оценка проводилась при увеличении $\times 500$ по толщине листа. Соотношение структурных составляющих: бейнит 80 %, феррит 15 %, перлит 5 %.

Мелкозернистая структура, формируемая при контролируемой прокатке с ускоренным охлаждением в комплексе с повышенным уровнем чистоты по сере и фосфору и с пониженным содер-

жанием углерода, обеспечивает высокую хладостойкость проката в области низких температур (рис. 9).

Рис. 9. Зависимость KCV^{-42} и $ИПГ^{-42}$ листов толщиной 12,9 мм от температуры конца прокатки и температуры ускоренного охлаждения в УКО:

а — зависимость KCV^{-42} от температуры конца прокатки; б — зависимость $ИПГ^{-42}$ от температуры конца прокатки;
в — зависимость KCV^{-42} от температуры конца ускоренного охлаждения в УКО;
г — зависимость $ИПГ^{-42}$ от температуры конца прокатки

Fig. 9. End rolling temperature and accelerated cooling temperature in UKO dependence of KCV^{-42} and IPG^{-42} sheets of 12.9 mm thickness:

а — end rolling temperature dependence of KCV^{-42} ; б — end rolling temperature dependence of IPG^{-42} ;
в — accelerated cooling temperature in UKO dependence of KCV^{-42} ; г — end rolling temperature dependence of IPG^{-42}

Все эти проекты были успешно реализованы с обеспечением своевременной поставки штрипса со стана 2800.

Совместно с АО ЗТЗ предпринята попытка изготовления двухшовных труб диам. 1420 мм. В технических условиях ТУ 1381-032-85736056, согласованных с ООО «Газпром ВНИИГАЗ», предусмотрено изготовление двухшовных труб категории D диам. 1420 мм. Требования АО ЗТЗ и АО «Уральская сталь» к штрипсам, предназначенным для изготовления двухшовных труб категории D диам. 1420 мм, отражены в техническом соглашении ТС 13657842-524, они по вязким характеристикам превышали требования СТО «Газпром»

2-4.1-713–2013 к основному металлу труб категории D. Заказ предусматривал поставку штрипса 15,7×2194×12200 объемом 5800 т. После поставки 1200 т заказ был снят по причине отсутствия подтверждения со стороны АО «Газпром» по изготовлению двухшовных труб диам. 1420 мм. В дальнейшем отгруженные листы были переназначены для изготовления труб диам. 720 мм. Тем не менее результаты механических испытаний штрипсов, произведенных на стане 2800, полностью подтвердили соответствие требованиям, предъявляемым к металлу труб категории D диам. 1420 мм.

Уровень механических характеристик, достигнутый при производстве листов толщиной 15,7 мм класса прочности K60 (X70) для изготовления

двухшовных труб категории D диам. 1420 мм, приведен на рис. 10.

Рис. 10. Уровень механических свойств листов K60-D толщиной 15,7 мм для труб диам. 1420 мм:
а — частотное распределение временного сопротивления; б — частотное распределение предела текучести;
в — частотное распределение относительного удлинения; г — частотное распределение отношения предела текучести к временному сопротивлению

Fig. 10. Level of mechanical properties of 15.7 mm thick K60-D sheets for 1420 mm dia pipes:
а — frequency distribution of tensile strength; б — frequency distribution of yield strength; в — frequency distribution of elongation; г — frequency distribution of yield strength relation to tensile strength

Значения хладостойких характеристик в зависимости от температуры окончания прокатки и ускоренного охлаждения приведены на рис. 11.

В условиях стана 2800 АО «Уральская сталь» разработана и внедрена технология производства листового проката класса прочности K60-D с использованием термомеханической прокатки с последующим ускоренным охлаждением, надежно обеспечивающая требуемый комплекс механических свойств и высокую хладостойкость проката в области низких температур в широком размерном диапазоне:

- для магистральных и промысловых нефтегазопроводов с толщиной стенки до 21,2 мм;
- для трубопроводов газосборных сетей и заводов по сжижению природного газа с толщиной стенки до 28,5 мм;
- для деталей трубопроводов с толщиной стенки до 45 мм.

Проведенный комплекс работ подтвердил полное соответствие штрипса класса прочности K60-D, произведенного по разработанной технологии на стане 2800, требованиям, предъявляемым к металлу двухшовных труб категории D для магистральных газопроводов диам. 1420 мм.

Рис. 11. Зависимость KCV^{-20} и $ИПГ^{-20}$ листов К60-D толщиной 15,7 мм для труб диам. 1420 мм от температуры конца прокатки и температуры ускоренного охлаждения в УКО:
а — зависимость KCV^{-20} от температуры конца прокатки; б — зависимость $ИПГ^{-20}$ от температуры конца прокатки;
в — зависимость KCV^{-20} от температуры конца ускоренного охлаждения в УКО;
г — зависимость $ИПГ^{-20}$ от температуры конца прокатки

Fig. 11. End rolling temperature and accelerated cooling temperature in UKO dependence of KCV^{-20} and IPG^{-20} sheets of 15.7 mm thickness for 1420 mm dia pipes:

а — end rolling temperature dependence of KCV^{-20} ; б — end rolling temperature dependence of IPG^{-20} ; в — accelerated cooling temperature in UKO dependence of KCV^{-20} ; г — end rolling temperature dependence of IPG^{-20}

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Матросов Ю.И. Механизм влияния микродобавок ванадия, ниобия и титана на структуру и свойства малолегированных сталей // *Металлург.* 1984. № 11. С. 13–22.
2. Хайстеркамп Ф., Хулка К., Матросов Ю.И. и др. Ниобийсодержащие низколегированные стали. — М.: Интермет Инжиниринг, 1999. — 94 с.
3. Матросов Ю.И., Литвиненко Д.А., Голованенко С.А. Сталь для магистральных трубопроводов. — М.: Металлургиздат, 1989. — 288 с.
4. Морозов Ю.Д., Эфрон Л.И., Степашин А.М., Шабалов И.П. Контролируемая прокатка штрипсов на маломощных станах // *Металлург.* 2004. № 4. С. 47–50.
5. Зубов С.П., Кормишин А.М., Придеин А.А. и др. Разработка технологии производства штрипса толщиной 25–28,5 мм из стали класса прочности Х70 (К60) для обустройства газосборных сетей ОАО «Ямал-СПГ» // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации.* 2016. № 5. С. 43–47.

Поступила 7 октября 2018 г.

REFERENCES

1. Matrosov Yu.I. Influence mechanism of vanadium, niobium and titanium additives on structure and properties of pearlite-reduced steels. *MiTOM*, 1984, no. 11, pp. 13–22. (In Russ.).
2. Khaisterkamp F., Khulka K., Matrosov Yu.I., Morozov Yu.D., Efron L.I., Stolyarov V.I., Chevskaya O.N. *Niobiisoderzhashchie nizkolegirovannye stali* [Niobium containing low alloyed steels]. Moscow: Internet Inzhiniring, 1999, 94 p. (In Russ.).
3. Matrosov Yu.I., Litvinenko D.A., Golovanenko S.A. *Stal' dlya magistral'nykh truboprovodov* [A steel for pipe lines]. Moscow: Metallurgizdat, 1989, 288 p. (In Russ.).
4. Morozov Yu.D., Efron L.I., Stepashin A.M., Shabalov I.P. Controlled rolling of strips at low powerful mills. *Metallurg*, 2004, no. 4, pp. 47–50. (In Russ.).
5. Zubov S.P., Kormishin A.M., Pridein A.A., Prokopenko L.V., Sindyanov N.I. Elaboration of a technology for production of 25–28.5 mm thick strips of X70 (K60) strength class for construction of OJSC “Yamal-SPG” gas-collecting systems. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnikeskoi i ekonomicheskoi informatsii* = *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2016, no. 5, pp. 43–47. (In Russ.).

Received October 7, 2018