

На основании полученных данных и с учётом особенностей осадки волнистой заготовки в валках разработана схема формовки гофрированного профиля 360×27×1,5 мм на ПГА 0,5–2,5×300×1500 ЛПЦ-7 ОАО «ММК» (рис. 8).

Выводы

Рассмотрены варианты конструкции и механические свойства гофрированных листовых профилей повышенной жёсткости:

- профиля с высокой жёсткостью в продольном направлении и значительной «податливостью» как в поперечном направлении, так и к осевому скручиванию;

– профиля с высокой жёсткостью в продольном и поперечном направлениях и устойчивостью к продольным и поперечным скручивающим нагрузкам.

Показана возможность получения гофрированных листовых профилей повышенной жёсткости методом валковой формовки.

Описаны особенности процесса профилирования, обеспечивающие устойчивость гнutoго профиля при последующей осадке гофров.

Разработана схема формовки гофрированного профиля 360×27×1,5 мм на профилегибочном агрегате 0,5–2,5×300×1500 ЛПЦ-7 ОАО «ММК».

Библиографический список

1. Гофрированные листовые профили повышенной продольной жёсткости / А.В. Урмацких, В.Г. Антипанов, С.А. Шишов и др. // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2005. С. 118–128.
2. Терегулов И.Г. Сопротивление материалов и основы теории пластичности. М: Высш. шк., 1984. 472 с.
3. Производство и применение гнутых профилей проката: Справочник / И.С. Тришевский, Г.В. Донец, В.И. Мирошниченко и др. М.: Металлургия, 1975. 536 с.
4. Тришевский И.С., Клепанда В.В., Хижняков Я.В. Холодногнутые гофрированные профили проката. Киев: Харьковская книжная типография «Коммунист», 1967. 288 с.

УДК 621.771

С. В. Денисов

РАЗРАБОТКА И ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА РУЛОННОГО ПРОКАТА ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБ

Для расширения рынков сбыта стали для трубной промышленности как в России, так и за рубежом в ОАО «ММК» приступили к разработке технологии производства полос класса прочности Х60, Х65 и Х70.

Требования по химическому составу к прокату класса прочности Х60, Х65 и Х70 представлены в **табл. 1** [1].

Требуемые механические свойства проката класса прочности Х60, Х65 и Х70 представлены в **табл. 2** [1].

Большой объем производства проката для трубной промышленности вызывает необходимость при разработке состава сталей для этого назначения ориентироваться на дешевые и недефицитные легирующие элементы. Технология же изготовления металла должна быть относительно простой и экономичной (**табл. 3**) [2].

Таким образом, для обеспечения конкурентоспособности конструкционного проката его необходимо производить методом контролируемой прокатки в сочетании с ускоренным охлаждением.

Технология контролируемой прокатки включает следующие основные этапы: выбор соответствующего химического состава стали; нагрев слябов с контролируемой температурой, обеспечивающей оптимальную степень растворения карбонитридов и получение относительно мелкого и однородного зерна аустенитной фазы перед прокаткой; измельчение зерен аустенитной фазы за счет многократной предварительной деформации и рекристаллизации; междеформационная пауза с охлаждением (желательно ускоренным) до температуры, при которой существенно заторможены процессы рекристаллизации аустенита; финальная деформация аустенита с суммарным обжатием 50–80% при температурах ниже температуры его рекристаллизации; деформации в γ - α -области; регулируемого охлаждения после прокатки [3].

Упрочнение за счет увеличения содержания углерода связано с повышением в стали объемной доли перлита. Увеличение доли перлита в стали сопровождается уменьшением отноше-

ния σ_T/σ_B , поскольку происходит более быстрый рост временного сопротивления по сравнению с пределом текучести.

В результате повышения содержания углерода снижаются пластические и вязкие свойства [4].

С увеличением содержания углерода, особенно выше 0,20%, существенно ухудшается способность к сварке и холодной деформации. Ударная вязкость стали, в первую очередь при минусовых температурах, снижается [4].

Марганец является основным легирующим компонентом в конструкционных низколегированных сталях. Его содержание составляет 1,4–1,7% [5].

Кремний обеспечивает повышение прочности и вязкости при легировании $\leq 0,3-0,5\%$ [5].

Содержание фосфора и особенно серы ограничивают 0,02%. Сера уменьшает сопротивляемость стали динамическим нагрузкам при низких температурах. Она образует сульфиды марганца, которые, будучи пластичными, при температурах горячей прокатки расплющиваются и вытягиваются в продолговатые включения. При низких температурах вследствие своей хрупкости эти включения существенно снижают ударную вязкость поперек направления прокатки. Анизотропия вязких свойств в готовых листах вследствие этого может быть весьма значительной – вязкие свойства листов в поперечном направлении могут быть в 1,5–2 раза ниже, чем в продольном направлении. Повышению вязких свойств и уменьшению анизотропии способствуют добавки циркония, церия и редкоземельных элементов, которые, растворяясь в сульфидах, понижают их пластичность при горячей деформации. Это способствует сохранению сульфидами формы, близкой к глобулярной [5].

Отличительной особенностью химического состава сталей, производимых способом контролируемой прокатки, является микролегирование карбонитридообразующими элементами (ниобием, ванадием, титаном и др.) в сотых, реже в десятых, долях процента. Микролегирование осуществляют для того, чтобы избежать экспоненциального роста зерна аустенита при нагреве под прокатку [5]. Добавки ванадия и алюминия в сталь задерживают аномальный рост зерна до температур 1000–1100°C, добавки ниобия – до 1150°C, титан образует очень стойкий нитрид TiN, тормозящий рост зерна до 1200°C и выше.

Исходя из вышеприведенного анализа, для повышения конкурентоспособности и удовлетворения требований потребителей прокат должен поставляться: после контролируемой прокатки или контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением, с содержанием углерода ме-

нее 0,20%, марганца в пределах 1,2–1,8%, кремния 0,15–0,60%, с низким содержанием серы и с микролегированием карбонитридообразующими элементами (ниобием, ванадием, титаном и др.).

По нашему мнению, наиболее близко к вышеперечисленным критериям подходят четыре варианта химического состава стали, которые представлены в табл. 4.

Таблица 1

Требования по химическому составу к прокату класса прочности X60, X65 и X70

Класс прочности	Массовая доля химических элементов, %			
	C	Mn	S	P
	не более			
X60	0,22	1,4	0,015	0,025
X65	0,22	1,45	0,015	0,025
X70	0,22	1,65	0,015	0,025

Примечания:

- Для каждого уменьшения на 0,01% ниже заданного максимального содержания углерода разрешается увеличение выше заданного содержания марганца на 0,05%, вплоть до максимальной величины 1,65% для проката класса прочности X60, X65 и до 2,00% для проката класса прочности X70.
- Могут использоваться ниобий, ванадий и титан.
- Суммарное содержание ниобия, ванадия и титана не должно превышать 0,15%.
- По согласованию между покупателем и изготовителем может поставляться /сталь/ и другого химического состава при условии соблюдения пределов, указанных в п. 3 примечания и приведенных в таблице содержания фосфора и серы.

Таблица 2

Требуемые механические свойства проката класса прочности X60, X65 и X70

Класс прочности	σ_T , Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	δ_5 , %	KV ⁰ , Дж	Количество вязкой составляющей в изломе образца, %
X60	414–565	517–758	22	27	60
X65	448–600	531–758	22	27	60
X70	483–621	565–758	21	27	60

Таблица 3

Дополнительные затраты на производство листов толщиной 20 мм в сравнении с горячей прокаткой

Процесс	Затраты, \$/т
Нормализация	19,5
Термомеханическая прокатка	0
Термомеханическая прокатка + ускоренное охлаждение	3,5

Прокатный передел на ШСГП начинается с нагрева слябов, который производится до температур около 1180–1220°C для обеспечения более полного растворения микролегирующих элементов в стали, при этом появляется возможность избежать подстуживания раската перед чистовой стадией контролируемой прокатки и повысить производительность стана.

Для успешного проведения черновой стадии прокатки необходимо обеспечить высокие единичные обжатия ($\epsilon=15\text{--}20\%$, не менее 5 обжатий) во всех последовательных клетях черновой подгруппы для полной рекристаллизации металла [5].

Особенностью проведения чистовой стадии прокатки на ШСГП является ограниченное число обжатий в последовательных клетях, что при прокатке высокопрочных сталей может вызывать перегрузку клетей по усилию. Целью чистовой стадии контролируемой прокатки является получение деформированных («оладеобразных») зерен аустенита, а также полос деформации в зернах, что повышает удельную эффективную поверхность аустенита ($Sv_{эфф}$) и позволяет получить большое число мест зарождения зерен феррита и, следовательно, существенно измельчить зерно феррита [5].

Решающее влияние на механические свойства сталей при контролируемой прокатке оказывают ее температурно-деформационные условия на стадии чистовой прокатки: температура начала и конца прокатки, суммарная деформация и распределение ее по проходам. Понижение температуры

окончания прокатки до температуры $A_{г3}$ приводит к измельчению зерна феррита в структуре, в связи с чем прочность, вязкость и сопротивление хрупкому разрушению сталей значительно повышаются. Большое значение для получения высокого комплекса механических свойств имеет обеспечение достаточной величины суммарного обжатия в заключительной фазе прокатки. Увеличение степени обжатия влияет аналогично снижению температуры конца прокатки, способствуя повышению прочности и снижению критической температуры хрупкости. Например, в работе [3] показано, что увеличение суммарной степени деформации при температуре ниже 900°C с 10 до 70% в мало-перлитной стали с титаном позволило снизить критическую температуру хрупкости с 0 до -50°C. Измельчение зерна феррита и соответственно улучшение комплекса механических свойств за счет деформации в нижней части аустенитной области достигает предельной величины при обжатии 70–75% [3].

Наиболее эффективным способом измельчения зерна при приемлемой стоимости является процесс, который объединяет контролируемую прокатку и ускоренное охлаждение. Свойства, полученные в результате применения этого процесса, не могут быть достигнуты путем применения только термической обработки. При снижении температуры смотки с 650 до 550°C повышается предел текучести на 80 Н/мм², без снижения хладостойкости металлопроката [2].

Таблица 4

Варианты химического состава стали

Вариант	Массовая доля химических элементов, %									
	C	Mn	Si	Al	Nb	Ti	V	S	P	N ₂
								не более		
1	0,11–0,14	1,25–1,4	0,4–0,55	0,02–0,05	0,03–0,045	0,015–0,035	–	0,010	0,020	0,01
2	0,10–0,14	1,40–1,80	0,25–0,50	0,02–0,05	0,04–0,07	0,005–0,02	–	0,010	0,020	0,01
3	0,14–0,20	1,2–1,4	0,30–0,60	0,01–0,04	–	0,01–0,04	0,05–0,14	0,010	0,020	0,01
4	0,09–0,12	1,55–1,75	0,15–0,30	0,02–0,05	0,02–0,05	0,010–0,035	0,08–0,12	0,010	0,020	0,01

Таблица 5

Результаты моделирования процесса контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением полос

Вариант	Cэ	Температура нагрева слябов, °C	$\Sigma\epsilon$, %	T _{кп} , °C	T _{см} , °C	σ_t , Н/мм ²	σ_b , Н/мм ²	δ_5 , %	KV ⁰ , Дж	Количество вязкой составляющей в изломе образца, %
1	0,35–0,42	1180–1220	70	800–840	560–600	430–520	547–610	21–27	51–83	69–86
2	0,37–0,43	1180–1220	70	800–840	560–600	455–530	566–620	21–27	69–87	69–82
3	0,39–0,44	1180–1220	70	800–840	560–600	455–560	540–640	17–21	38–47	43–67
4	0,41–0,43	1180–1220	70	800–840	560–600	515–580	590–670	23–27	76–119	94–100

Примечание. Cэ – углеродный эквивалент ($Cэ = (C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Cu+Ni)/15+15*B)$); $\Sigma\epsilon$ – суммарная степень деформации в чистовой группе клетей; T_{кп} – температура конца прокатки; T_{см} – температура смотки полос.

Таблица 6

Механические свойства проката класса прочности X60, X65 и X70

Класс прочности	Толщина полос, мм	σ_t , Н/мм ²	σ_b , Н/мм ²	δ_5 , %	KV ⁰ , Дж	Количество вязкой составляющей в изломе образца, %
X60	8,0–14,0	455–485	550–590	25–27	49–76	100
X65	8,0–12,0	510–570	600–620	23–25	54–89	100
X70	8,0–12,7	485–510	600–610	26–27	61–71	100

С помощью комбинированной математической модели [6] проведено моделирование процесса контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением полос с различными вариантами химического состава, представленными в **табл. 4**, с целью получения механических свойств в готовом прокате, удовлетворяющих требованиям потребителей (см. **табл. 2**). Результаты моделирования процесса контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением полос представлены в **табл. 5**.

Анализируя результаты проведенного математического моделирования процесса контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением полос, можно сделать следующие выводы:

1. Прокат для трубной промышленности классов прочности X60, X65 и X70 возможно производить, только используя вариант химического состава стали №4.

2. Прокат для трубной промышленности категории прочности X60 возможно производить, используя все варианты химического состава стали с 1 по 4. Однако прокат, произведенный при варианте №3 химического состава стали, менее пластичен (относительное удлинение ожидается в интервале 17–21%), что ниже требований API 5L.

3. При использовании вариантов легирования №1 и 2 прогнозируется получение практически одинакового комплекса свойств. Однако в варианте легирования №1 (при одинаковом содержании углерода в стали) используется меньше легирующих элементов, чем в варианте легирования №2.

4. Наибольшей хладостойкостью обладает прокат с вариантом химического состава стали №4.

В итоге, учитывая требования по химическому составу стали по API 5L и результаты моделирования, материалом для производства проката категорий прочности X65 и X70 был выбран вариант легирования №4. Для производства проката категории прочности X60 был выбран вариант легиро-

вания №1. Для поставки рулонного проката в соответствии с требованиями API 5L в ОАО «ММК» был разработан стандарт СТО ММК 242.

С помощью моделирования были найдены следующие основные температурно-деформационные параметры прокатки полос толщиной до 14 мм на ШСГП:

	X60	X65, X70
Температура нагрева слябов, °С	1180–1220	1180–1220
Суммарная степень деформации в чистой группе клетей, %	70–80	70–80
Температура конца прокатки, °С	770–810	800–840
Температура смотки полос, °С	570–610	560–600
Скорость охлаждения полос на отводящем рольганге, °С/с	2,5–4,8	2,8–5,3

Полученные механические свойства готового проката представлены в **табл. 6**.

Как видно из таблицы, механические свойства проката соответствовали требованиям потребителя для всех классов прочности.

В настоящее время по разработанной технологии успешно произведено более 2000 т проката категорий прочности X60, X65 и X70.

Таким образом, в ОАО «ММК» разработана технология производства проката категорий прочности X60, X65 и X70 в соответствии с API 5L.

Библиографический список

1. Технические условия на трубы для трубопроводов 5L (API 5L). Срок введения 2000 год.
2. Ниобийсодержащие низколегированные стали / Хайстеркамп Ф., Хулка К., Матросов Ю.И., Морозов Ю.Д. и др. М.: «СП. Интернет Инжиниринг», 1999. 90 с.
3. Потемкин В.К., Пешков В.А. Контролируемая прокатка. Термомеханическая обработка листов / ВИНТИ. 1986. 3–55.
4. Матросов Ю.И. // Бюл. Черная металлургия. 1981. № 11. С. 16–26.
5. Матросов Ю.И., Литвиненко Д.А., Голованенко С.А. Сталь для магистральных трубопроводов. М.: Металлургия, 1989. 288 с.
6. Денисов С.В., Карагодин Н.Н., Кутуева Р.Я. Методика определения основных технологических параметров контролируемой прокатки, обеспечивающих получение требуемых потребительских свойств // Прогрессивные толстолистовые стали для газонефтепроводных труб большого диаметра и металлоконструкций ответственного назначения: Сб. докл. М.: Металлургиздат, 2004. С. 111–115.