

вибровозбудителя, учитывающим только изнашивание трущейся поверхности контртела.

Точность математических моделей разработанного вибровозбудителя была доказана в ходе экспериментальных исследований на установке, показанной на **рис. 8**, при этом теоретически время безотказной работы составляет 4320 ч, что примерно на 30% превышает время безотказной работы у аналогичных машин.

Рассмотренный универсальный роторный вибровозбудитель повышенной мощности, по сравнению с дебалансными и простыми роторными системами, обладает следующим преимуществом: возможностью отдельного регулирования частоты колебаний в диапазоне 0...3000 Гц и ам-

плитуды колебаний в диапазоне 0...30 мм; сниженными на 20% нагрузками на опорные узлы; повышенной долговечностью; возможностью управления двумя и более колебательными системами с различными характеристиками; простотой конструкции и настройки.

В связи с этим широкая универсальность вибровозбудителей с широкими технологическими возможностями позволяет использовать их в качестве источников колебаний в вибрационных машинах различного назначения и мощности с повышением производительности работ и качества выпускаемой продукции.

#### Библиографический список

1. Сергеев, С.В. Повышение эффективности вибрационных процессов при механической обработке различных материалов: монография / С.В. Сергеев. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. 262 с.
2. А.с. 1664412 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 06 В 1/16. Способ возбуждения круговых колебаний и устройство для его осуществления / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, С.В. Сергеев. № 4414912/24-28; заявл. 24.04.1988; опубл. 23.07.1991, Бюл. № 27. 5 с.
3. Пат. 2213618 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 02 С 19/00. Способ и устройство измельчения материалов / С.В. Сергеев, Р.Г. Закиров, Е.Н. Гордеев, Б.А. Решетников. № 2002102797/03; заявл. 31.01.2002; опубл. 10.10.2003, Бюл. № 28. 6 с.
4. Иванов, М.Н. Детали машин: учебник для студентов высших техн. учебных заведений / М.Н. Иванов. 5-е изд., перераб. М.: Высш. шк., 1991. 383 с.

УДК 669.462

Салганик В.М., Денисов С.В.

## РАЗРАБОТКА И ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА РУЛОННОГО ПРОКАТА КЛАССОВ ПРОЧНОСТИ Х60-Х70 ТОЛЩИНОЙ БОЛЕЕ 12 ММ 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 толщиной более 12 мм.

Требования по химическому составу к прокату классов 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 конкуренто-

способности 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 слэбов с контролируемой температурой, обеспечивающей оптимальную степень растворения карбонитридов и относительно мелкое и однородное зерно 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 рекристалли-

зации; деформация в  $\gamma$ - $\alpha$ -области; регулируемое охлаждение после прокатки [3].

Упрочнение за счет увеличения содержания углерода связано с повышением в стали объемной доли перлита. Последнее сопровождается уменьшением отношения  $\sigma_T/\sigma_B$ , поскольку происходит более быстрый рост временного сопротив-

ления 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 не более 0,5%.

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 1,5–2,0 раза ниже, чем в продольном. 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, подвергаемых контролируемой прокатке, 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. Добавки ванадия и алюминия в сталь задерживают аномальный рост зерна до температур 1000–1100°C, добавки ниобия – до 1150°C, титан образует весьма стойкий нитрид TiN, тормозящий рост зерна при 1200°C и выше.

Исходя из проведенного анализа, для повышения конкурентоспособности и удовлетворения требований потребителей прокат должен поставляться после контролируемой прокатки или контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением, с содержанием углерода менее 0,20%, марганца в пределах 1,2–1,8%, кремния 0,15–0,60%, с низким содержанием серы и с микролегирова-

Таблица 1

### Требования по химическому составу к прокату классов прочности Х60, Х65 и Х70

Класс прочности	Массовая доля химических элементов, %			
	С	Мn	S	P
	не более			
Х60	0,22	1,4	0,015	0,025
Х65	0,22	1,45	0,015	0,025
Х70	0,22	1,65	0,015	0,025

Примечания по массовой доле химических элементов:

Для каждого уменьшения на 0,01% ниже заданного максимального содержания углерода разрешается увеличение вышезаданного содержания марганца на 0,05% вплоть до максимальной величины 1,65% для проката классов прочности Х60, Х65 и до 2,0% для проката класса прочности Х70.

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 по суммарному содержанию ниобия, ванадия и титана и приведенного в таблице содержания фосфора и серы.

Таблица 2

### Требуемые механические свойства проката классов прочности Х60, Х65 и Х70

Класс прочности	$\sigma_T$	$\sigma_B$	$\delta_5, \%$	$KV^0, Дж$	Количество вязкой составляющей в изломе образца, %
	Н/мм <sup>2</sup>		не менее		
Х60	414–565	517–758	22	27	60
Х65	448–600	531–758	22	27	60
Х70	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

нием карбонитридообразующими элементами (ниобием, ванадием, титаном и др.).

По нашему мнению, наиболее близко к вышеперечисленным критериям подходят четыре варианта химического состава стали (табл. 4).

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

Успешное проведение черновой стадии прокатки требует высоких единичных обжатий ( $\epsilon = 15\text{--}20\%$ , не менее 5 обжатий) во всех последовательных клетях черновой подгруппы для обеспечения полной рекристаллизации металла [5].

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

Решающее влияние на механические свойства сталей при контролируемой прокатке оказывают ее температурно-деформационные условия на стадии чистой прокатки: температура начала и конца прокатки, суммарная деформация и распределение ее по проходам. Понижение температуры окончания прокатки до температуры  $A_{r3}$  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 суммарного обжатия достаточной величины в заключительной фазе прокатки. Увеличение степени обжатия влияет аналогично снижению температуры конца прокатки,

способствуя повышению прочности и снижению критической температуры хрупкости. Например, в работе [4] показано, что увеличение суммарной степени деформации при температуре ниже 900°C с 10 до 70% в малоперлитной стали с титаном позволило снизить критическую температуру хрупкости с 0 до  $-50^\circ\text{C}$ . 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 этого процесса, не могут быть достигнуты только термической обработкой. При снижении температуры смотки с 650 до 550°C повышается предел текучести на 80 Н/мм<sup>2</sup> без снижения хладостойкости металлопроката [2].

С помощью комбинированной математической модели [6] проведено исследование процесса контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением полос с различными вариантами химического состава (см. табл. 4). Результаты моделирования процесса контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением полос представлены в табл. 5.

Анализируя результаты проведенного математического моделирования процесса контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением

Таблица 4

## Варианты химического состава стали

Вариант	Массовая доля химических элементов, %						
	C	Mn	Si	Al	Nb	Ti	V
1	0,11–0,14	1,25–1,40	0,40–0,55	0,02–0,05	0,030–0,045	0,015–0,035	–
2	0,10–0,14	1,40–1,80	0,25–0,50	0,02–0,05	0,040–0,070	0,005–0,020	–
3	0,14–0,20	1,20–1,40	0,30–0,60	0,01–0,04	–	0,010–0,040	0,05–0,14
4	0,09–0,12	1,55–1,75	0,15–0,30	0,02–0,05	0,020–0,050	0,010–0,035	0,08–0,12

Таблица 5

## Результаты моделирования процесса контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением полос

Вариант химического состава стали	C <sub>3</sub> – углеродный эквивалент	$\sigma_T$	$\sigma_B$	$\delta_5$	ИПГ	KV <sup>0</sup> , Дж
		Н/мм <sup>2</sup>		%		
1	0,35–0,42	430–520	547–610	21–27	69–86	51–83
2	0,37–0,43	455–530	566–620	21–27	69–82	69–87
3	0,39–0,44	455–560	540–640	17–21	43–67	38–47
4	0,41–0,43	515–580	590–670	23–27	94–100	76–119

Примечание:

$C_3 = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15 + 15B$ .

Суммарная степень деформации в чистой группе клетей 70%.

Температура конца прокатки 1180–1220, смотки – 800–840°C.

Таблица 6

## Механические свойства проката класса прочности X60, X65 и X70

Класс прочности	Толщина полос, мм	$\sigma_T$	$\sigma_B$	$\delta_5$	ИПГО	KV0,
		Н/мм <sup>2</sup>		%		Дж
X60	12,1–16,0	455–485	550–590	25–27	100	49–76
X65	12,1–15,9	485–510	600–620	26–27	100	54–89
X70	12,1–15,0	510–570	600–650	23–25	100	61–91

полос, предназначенных для трубной промышленности, можно сделать следующие выводы:

1. Прокат классов прочности X60, X65 и X70 возможно производить, только используя вариант №4 химического состава стали.
2. Прокат категории прочности X60 возможно производить, используя все варианты химического состава стали (с 1 по 4). Однако прокат, произведенный из стали по варианту № 3 химического состава, менее пластичен (относительное удлинение ожидается в интервале 17–21%), что ниже требований API 5L, и поэтому указанный вариант не рекомендуется к использованию.
3. При вариантах 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 химическим составом стали по варианту № 4.

В итоге, учитывая требования по химическому составу стали по API 5L и результаты моде-

лирования, материалом для производства проката категорий прочности X65 и X70 был выбран вариант №4. Для производства проката категории прочности X60 был выбран вариант легирования №1. Для поставки рулонного проката в соответствии с требованиями API 5L в ОАО «ММК» был разработан стандарт СТО ММК 242-2000 «Прокат горячекатаный листовой и рулонный из углеродистой качественной и низколегированной стали для электросварных труб с требованиями по API 5L».

С помощью моделирования были найдены основные температурно-деформационные параметры прокатки полос толщиной до 14 мм на ШСПП для классов прочности:

	X60	X65, X70
температура нагрева слябов, °С	1180–1220	1180–1220
суммарная степень деформации в чистовой группе клетей, %	70–80	70–80
температура конца прокатки, °С	770–810	780–840
температура смотки полос, °С	570–610	560–600
скорость охлаждения полос на отводящем рольганге, °С/с	2,5–4,8	2,8–5,3

Достиженные механические свойства проката соответствовали требованиям потребителя для всех классов прочности (табл. 6).

В настоящее время по разработанной технологии успешно произведено около 5000 т проката категорий прочности X60, X65 и X70 толщиной более 12 мм.

Таким образом, можно заключить, что в ОАО «ММК» создана эффективная 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 / Ф.Хайстеркамп, К.Хулка, Ю.И.Матросов, Ю.Д.Морозов и др. М.: СП. Интермет Инжиниринг, 1999. 90 с.
3. Потемкин В.К., Пешков В.А. Контролируемая прокатка. Термомеханическая обработка листов. М.: ВИНТИ, 1986. С. 3–55.
4. Матросов Ю.И. Пути повышения прочности, вязкости и хладостойкости низколегированных сталей для газопроводных труб большого диаметра // Бюл. НТИ. Черная металлургия. 1981. №11 (895). 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: Сборник докладов. М.: Металлургияиздат, 2004. С. 111–115.