

УДК 669.14.018.41

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ТРУБНЫЕ СТАЛИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ С ФЕРРИТО-БЕЙНИТНОЙ СТРУКТУРОЙ

© Морозов Юрий Дмитриевич, Матросов Максим Юрьевич, Настич Сергей Юрьевич,

ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина». Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 9/23.
E-mail: chermet@chermet.net

Арабей Андрей Борисович,

ОАО «ГАЗПРОМ» Россия, 117997, Москва, ул. Намёткина, 16
E-mail: A.Arabey@adm.gazprom.ru

Статья поступила 24.03.2008 г.

Получение комплекса характеристик трубных сталей с феррито-бейнитной структурой возможно осуществлять варьированием химического состава в сочетании с контролем параметров термомеханической прокатки и подбором параметров технологии ускоренного охлаждения.

Ключевые слова: трубные стали, контролируемая прокатка, ускоренное охлаждение структурные составляющие, феррит, бейнит, перлит.

Иntenсивное развитие промышленного производства в нашей стране и за рубежом, особенно в таких странах, как Китай, Индия, Бразилия и других развивающихся странах требует большого количества энергоносителей. В нашей стране большие запасы основных энергоносителей, природного газа и нефти находятся в труднодоступных районах Севера, Западной Сибири и арктического шельфа, транспортировка откуда затруднена в связи с удаленностью и суровыми климатическими условиями. Кроме того, в последнее время для доставки энергоносителей потребителям кратчайшим путем прокладываются подводные морские трубопроводы – это газопровод по дну Балтийского моря (Норд-Стрим) и через Черное море в Турцию и Болгарию. Новые трубопроводы характеризуются повышенным по сравнению с традиционными (75 атм – газопроводы, 55 атм – нефтепроводы) рабочим давлением (100–200 атм – газопроводы, 75–100 атм – нефтепроводы) и большей толщиной стенок труб (до 39 мм). Для экономии металла и снижения стоимости строительства при сохранении надежности трубопроводов повышаются требования к трубам по прочности до 565 Н/мм² (K65), ударной вяз-

кости (до 180 Дж/см² при –20 °С), хладостойкости и свариваемости – ударная вязкость околошовной зоны $KCV^{-40} \geq 70$ Дж/см² (табл. 1).

В настоящее время такие требования не все металлургические компании в мире согласны выполнять.

Увеличенная толщина стенки трубы усложняет выполнение указанных требований. Так, переход от толщины 10 мм к толщине 40 мм при производстве листов по технологии контролируемой прокатки вызывает снижение прочности на 100 Н/мм² (рис. 1). Достижение указанных высоких требований возможно лишь при переходе от традиционной для трубных сталей контролируемой прокатки феррито-перлитной структуры к более мелкой феррито-бейнитной структуре. В этом случае ферритное зерно со средним размером ≈5 мкм заменяется бейнитным с размером ≈1 мкм. Для получения стали с феррито-бейнитной или бейнитной структурой необходимо:

- снижение содержания углерода до 0,13–0,07%;
- использование легирующих элементов, снижающих температуру $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения и тормозящих перлитную реакцию (Mn, Mo, Ni, Cr), а также повышение содержания Mn;

Таблица 1. Требования к листовой стали для новых проектов газопроводов

Класс (категория) прочности	Рабочее давление, атм	Предел текучести σ_r , Н/мм ²	Временное сопротивление σ_B , Н/мм ²	Относительное удлинение, δ_5 , %	σ_r/σ_B	Ударная вязкость, Дж/см ²				Доля волокна, %	
						основной металл		околошовная зона		ИПГ ⁻²⁰	ИПГ ⁻¹⁰
						KCV ⁻²⁰	KCV ⁻⁴⁰	KCV ⁻²⁰	KCV ⁻⁴⁰		
K60	75	490–600	590–690	22	0,9	90	–	–	39,2 ¹	90	–
K60	100	490–600	590–690	22	0,9	127,4	–	–	39,2	90	–
K65 (X80)	120	565–665	645–760	20	0,92	180	70	–	70	90	–
DNV485 (X70)	220	500–605	570–690	20,5	0,9	50	–	50 ²	–	–	90

¹ При толщине стенки трубы более 10 до 25 мм включительно. При толщине стенки трубы > 25 мм $KCV^{-40} = 44,1$ Дж/см².

² При толщине стенки трубы более 20 до 40 мм включительно, температура испытаний –30 °С.

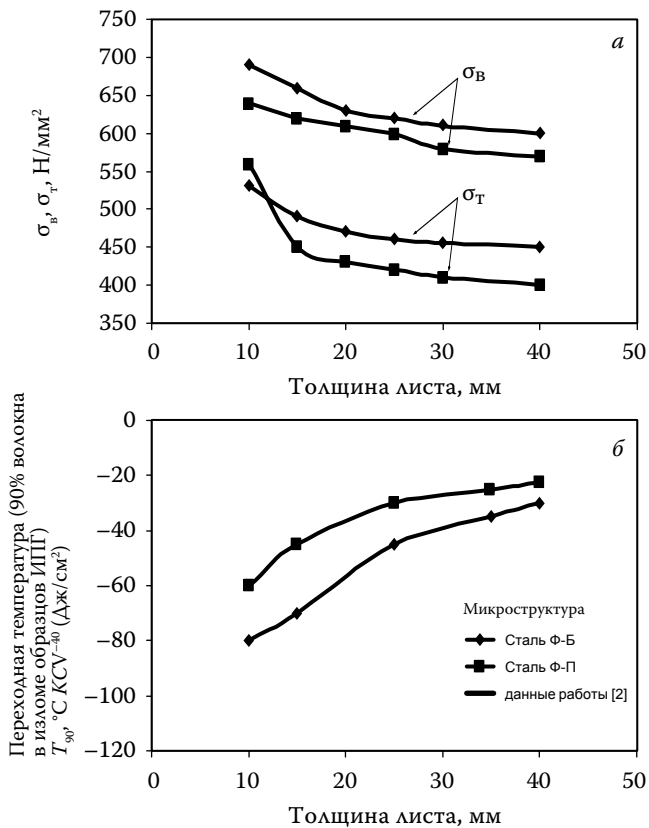


Рис. 1. Влияние толщины листа на прочность (а) и хладостойкость (б) листовой стали контролируемой прокатки

- микролегирование Nb и V. Для использования Nb в качестве стимулирующего промежуточное превращение увеличивают его содержание и организуют контролируемую прокатку (КП) таким образом, чтобы к моменту превращения максимальное количество Nb оставалось в твердом растворе;
- снижение содержания вредных примесей и газов ($S \geq 0,002\%$; $N \leq 0,006\%$; $H_2 \leq 2 \text{ см}^3/100 \text{ г}$; $P \leq 0,010\%$);
- микролегирование Ti в стехиометрическом соотношении с азотом $Ti \geq 3,4N$;
- использование ускоренного охлаждения после КП.

Термокинетическая диаграмма одного из вариантов состава стали класса прочности K65 (рис. 2) показывает, что при скорости ускоренного охлаждения > 5 град/с структура стали состоит из смеси феррита и бейнита (до 40%). Ниже приведены типичные схемы легирования, используемые для получения феррито-бейнитной стали с ускоренным охлаждением после контролируемой прокатки:

C(0,06–0,07) – Mn(1,65) – Mo(0,25) – Nb(0,05) – [V(0,08)];
 C(0,06–0,07) – Mn(1,80) – Mo(0,25) – Ni(0,25) – Nb(0,05) – [V(0,05)];
 C(0,06–0,07) – Mn(1,80) – Mo(0,25) – Ni(0,25) – Cu(0,25) – Nb(0,05);
 C(0,07–0,08) – Mn(1,70) – Mo(0,15) – Ni(0,20) – Cu(0,20) – Cr(0,20) – Nb(0,05);
 C(0,03–0,07) – Mn(1,50–1,80) – Ni(0,20) – Cu(0,30) – Cr(0,30) – Nb(0,05–0,10);
 C(0,06–0,09) – Mn(1,70) – Ni(0,25) – Cr(0,30) – Nb(0,10).

Характерно высокое содержание марганца ($\approx 1,8\%$), молибдена, и в ряде случаев, никеля, хрома и меди (до 0,3%). Содержание ниобия в сталях с феррито-

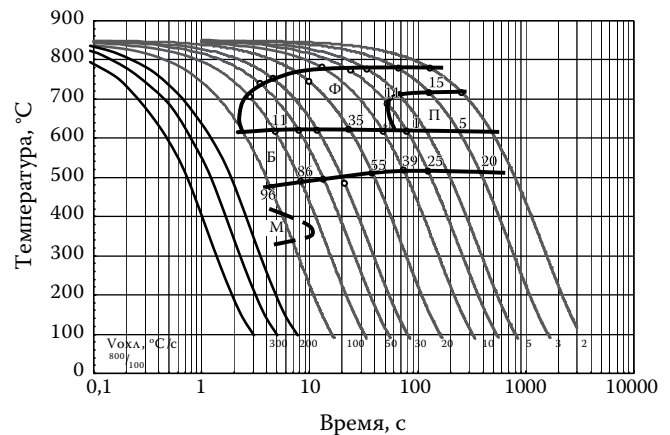


Рис. 2. Термокинетическая диаграмма превращения деформированного аустенита при охлаждении стали класса прочности K65 (состав, %: 0,06 C; 1,69 Mn; 0,24 Si; 0,22 Mo; 0,22 Ni; 0,07 Nb; 0,048 V)

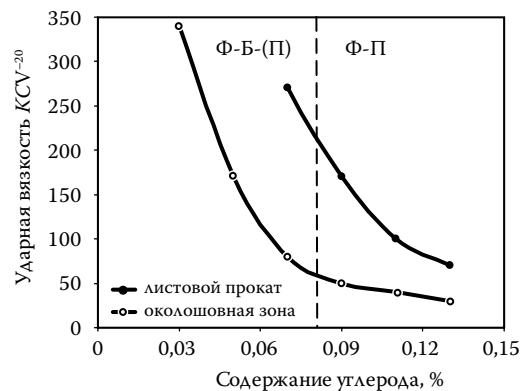


Рис. 3. Влияние содержания углерода на ударную вязкость листового проката и металла околошовной зоны при сварке

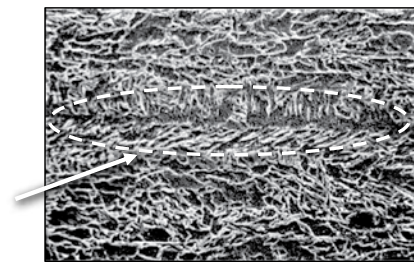


Рис. 4. Микроструктура листа с крупным бейнитным участком с грубыми карбидами, $\times 1500$ (СЭМ)

бейнитной структурой выше, чем у феррито-перлитной стали. Ниобий в твердом растворе снижает температуру $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения стали, чем способствует образованию бейнита. В реальных промышленных условиях режим термомеханической прокатки организуют таким образом, чтобы часть ниобия до момента превращения оставалась в твердом растворе, а затем после превращения выделилась в виде карбида (карбонитрида) в виде мелкой фракции и увеличило прочность металла за счет дисперсионного твердения. Низкое содержание углерода улучшает свариваемость, по-



Рис. 5. Влияние объемной доли крупнозернистого бейнита на температуру вязко-хрупкого перехода ($T_{кр}$)

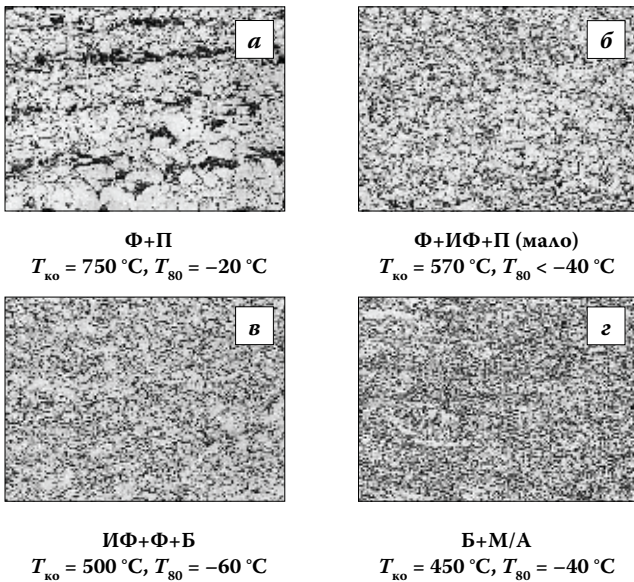


Рис. 6. Структура стали контролируемой прокатки с охлаждением на воздухе (а) и с ускоренным охлаждением (б, в, г), $\times 500$

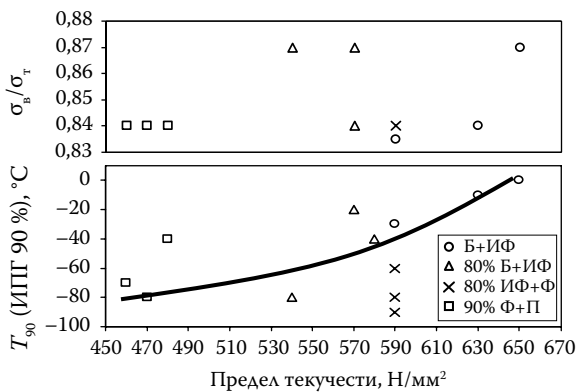


Рис. 7. Изменение степени упрочнения стали в зависимости от микроструктуры и связь с температурой перехода в хрупкое состояние ($T_{кп} = 830 \div 850$ °С; $T_{кво} = 530 \div 560$ °С; $v_{yo} = 12 \div 15$ град/с; $d_{Fe} = 4,5 \div 6$ мкм)

вышая низкотемпературную ударную вязкость, как основного металла, так и околосшовной зоны (рис. 3). Однако при выборе содержания углерода необходимо учитывать его влияние на другие показатели свойств стали. Низкое содержание углерода благоприятно

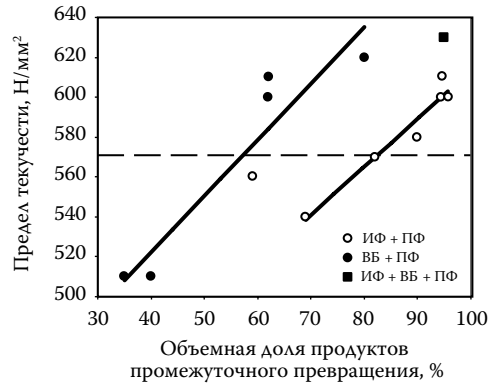


Рис. 8. Зависимость предела текучести от объемной доли продуктов промежуточного превращения

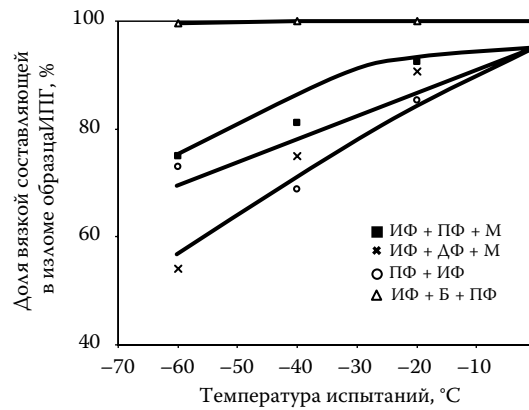


Рис. 9. Температурная зависимость доли вязкой составляющей в изломе образцов ИПГ листового проката К65 с различной структурой

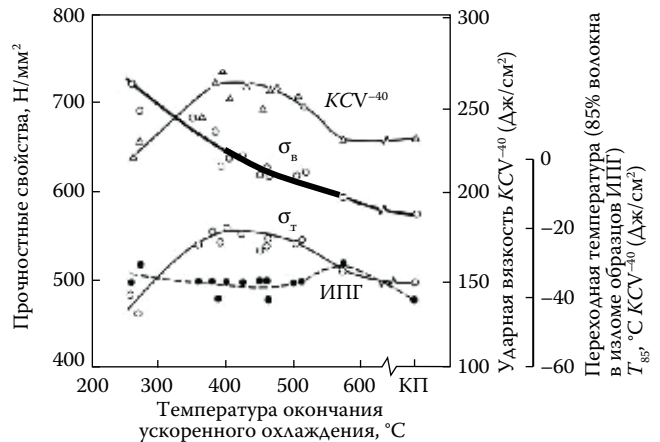


Рис. 10. Зависимость механических характеристик стали X80 от температуры окончания ускоренного охлаждения ($T_{кп} = 730 \div 780$ °С, скорость охлаждения 18–20 град/с)

для повышения хладостойкости (тест ИПГ), однако снижает прочностные характеристики (σ_t , σ_b) и степень упрочнения стали (σ_t/σ_b). Так, в области температур завершения ускоренного охлаждения (600–500 °С) при снижении содержания углерода с 0,08 до 0,05% по разному изменяются величины σ_t и σ_b . Если снижение предела текучести составляет ≈ 20 Н/мм², то временное сопротивление снижается на ≈ 30 Н/мм², в результате повышается степень упрочнения σ_t/σ_b (почти на 0,2%),

Таблица 2. Примеры химических составов сталей с Ф-Б микроструктурой разных категорий прочности

Сталь	Процесс	Химический состав, %								
		C	Mn	Mo	Ni	Cu	V	Nb	Ti	Cr
X65	КП+УО	0,05	1,50	–	0,20	0,20	–	0,06	0,02	0,2
X70	КП+УО	0,07	1,60	0,30	–	–	0,05	0,05	0,02	–
X80	КП+УО	0,07	1,85	0,30	0,20	–	0,05	0,05	0,02	–
X100	КП+(ПЗ+СО) КП+(ПЗ+О)	0,07	1,95	0,30	0,25	0,25	–	0,07	0,02	–

что может вывести прокат за требования стандарта. Важным условием обеспечения заданного комплекса свойств является получение однородной мелкой структуры аустенита перед превращением. Появление крупных зерен в структуре аустенита в случае превращения по сдвиговому механизму приводит к образованию грубой бейнитной структуры (рис. 4) и в результате – к повышению критической температуры хрупкости (рис. 5).

В зависимости от режимов термомеханической обработки можно получить феррито-бейнитную сталь с различным содержанием структурных составляющих: нижнего, верхнего бейнита, полигонального и игольчатого (безуглеродистого) феррита и фазы МА (рис. 6). При этом свойства металла также имеют различные значения. На рис. 7–9 приведены экспериментальные данные по влиянию структурных составляющих (химический состав различен) на основные показатели свойств трубной стали: предел текучести, критическую температуру хрупкости (количество вязкой составляющей в образце ИПГ – 85%), степень упрочнения. Наиболее прочной структурной составляющей, по-видимому, является бейнит (верхний, нижний), однако он (особенно верхний) повышает температуру перехода в хрупкое состояние. Наиболее благоприятной структурой, как по прочности, так и по вязкости, является игольчатый феррит (безуглеродистый бейнит) в сочетании с небольшим количеством мягкой фазы – полигонального феррита ($\approx 10\%$). Для получения прочности стали класса прочности К65 содержание сдвиговой структуры должно быть не менее 50–60%.

Наибольшая прочность стали класса прочности К65 с феррито-бейнитной структурой достигается при температуре начала охлаждения в области критической точки A_{r3} ($v_{\text{охл}} = 10\div 15$ град/с). При изменении температуры конца ускоренного охлаждения от 600 до 250 °С временное сопротивление непрерывно увеличивается (рис. 10). Предел текучести увеличивается до температуры конца ускоренного охлаждения 400 °С (температура начала мартенситного превращения),

а затем снижается из-за изменения формы кривой «напряжение – деформация» (отсутствия площадки текучести на диаграмме растяжения). Появление в структуре мартенсита также ведет к снижению ударной вязкости и практически не влияет на температуру вязко-хрупкого перехода (тест ИПГ).

В табл. 2 приведены типичные составы феррито-бейнитных сталей. Сталь X65 используется для получения листового проката на реверсивных станах или НШС в листовом исполнении. Сталь X70, прокатанная на реверсивных станах без ускоренного охлаждения (можно и с ускоренным охлаждением), используется для изготовления труб без экспандирования. Обе стали без ускоренного охлаждения могут содержать перлит. Состав стали X80 типичен при толщине проката до 30 мм. Для получения стали X100 необходимы более жесткие схемы охлаждения после завершения термомеханической обработки. Это или прямая закалка и последующий отпуск с отдельного нагрева, или охлаждение с высокой скоростью (20–25 град/с) с последующим самоотпуском при 550–600 °С. Благодаря такому охлаждению в поверхностном слое образуется более твердая структура и более мягкая – в центральных зонах проката. Толщина закаленного поверхностного слоя в зависимости от толщины листа и скорости охлаждения может составлять 3–5 мм. В подповерхностном слое образуется структура отпущенного мартенсита, участки центральной части имеют феррито-перлитную структуру с наличием бейнита. Различие структур по твердости может составлять до 50 HV.

Благодаря более высоким скоростям охлаждения, чем при обычном ускоренном охлаждении, можно достигнуть увеличения прочностных и вязких свойств.

Закключение. Таким образом, можно утверждать, что варьированием химического состава в сочетании с контролем параметров термомеханической прокатки и подбором параметров технологии ускоренного охлаждения можно получить комплекс характеристик стали с феррито-бейнитной структурой, соответствующих их заданным значениям.