

ОСВОЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА С ПОВЫШЕННОЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТЬЮ

**И.Ю. Пышминцев¹, А.О. Струин¹, А.М. Гервасьев¹, Е.Р. Струина¹,
А.О. Худяков¹, В.В. Микуров¹, П.А. Стеканов², А.В. Мозговой³**

¹ ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности», г. Челябинск,

² ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск,

³ АО «Волжский трубный завод», г. Волжский

На территории Российской Федерации до недавнего времени отсутствовала необходимость строительства трубопроводов в сейсмически активных районах. Необходимость строительства современных трубопроводов в районах повышенной сейсмичности на территории Российской Федерации обусловлена началом освоения ОАО «Газпром» новых газовых месторождений, расположенных на Дальнем Востоке и в Восточной Сибири (проект газотранспортной системы «Сила Сибири»). Для обеспечения безопасности транспорта газа на этих участках необходимо повышать деформационную способность магистральных газопроводов. В соответствии с традиционным подходом к проектированию газопровода, при пересечении трассы газопровода «сложных» участков для увеличения деформационной способности используют трубы меньшего диаметра с большей толщиной стенки. В этом случае для сохранения пропускной способности газопровода увеличивают количество ниток, что в итоге приводит к дополнительным затратам. Альтернативным решением является использование труб, обладающих высокой деформационной способностью, достигнутой за счет улучшения свойств основного металла, так называемых труб с повышенной деформационной способностью.

Рассмотрены особенности проектирования магистральных трубопроводов на участках с повышенной сейсмичностью, слабонесущими, вечномерзлыми и пучинистыми грунтами, в районах активных тектонических разломов. Рассмотрены преимущества использования труб с повышенной деформационной способностью на данных участках, их отличительные свойства и способы производства. На основе проведенных исследований изложены пути получения листового проката, а в дальнейшем и труб с повышенной деформационной способностью и высокими вязкими свойствами сварных соединений. Приведены результаты изготовления опытных партий листового проката и труб.

Ключевые слова: трубы для АТР; технология производства; повышенная деформационная способность; микроструктура; двухфазная сталь; вязкие свойства.

Потребность в применении труб большого диаметра с повышенной деформационной способностью возникла при освоении ОАО «Газпром» газовых месторождений Восточной Сибири и Дальнего Востока, характеризующихся сложными геолого-климатическими условиями. Магистральные газопроводы в данных регионах прокладываются на участках с повышенной сейсмичностью, слабонесущими, вечномерзлыми и пучинистыми грунтами, в районах активных тектонических разломов (рис. 1). Для обеспечения безопасности транспорта газа на этих участках необходимо повышать их деформационную способность. В соответствии с традиционным подходом к проектированию газопровода, при пересечении трассы газопровода «сложных» участков для увеличения деформационной способности используют трубы меньшего диаметра с большей толщиной стенки. В этом случае для сохранения пропускной способности газопровода увеличивают количество ниток, что в итоге приводит к дополнительным затратам. Альтернативным решением является использование труб, обладающих высокой деформационной способностью, достигнутой за счет улучшения

свойств основного металла, так называемых труб с повышенной деформационной способностью.

Данный вид трубной продукции появился сравнительно недавно в результате развития металлургического, листопрокатного и трубного производства. Впервые концепция производства и применения труб с повышенной деформационной способностью была изложена представителями японской компании Japan Future Enterprise [1]. Отличительной особенностью данных труб является повышение сопротивления локализации пластических деформаций (способность деформироваться при изгибе без гофрообразования в области сжимающих напряжений) и сохранение целостности при деформировании трубы с гофром. Применение труб с повышенной деформируемостью несомненно перспективно, поскольку позволяет уменьшить металлоемкость газопровода и сократить затраты на его строительство.

Особенностью проектирования трубопроводов в сейсмических районах является допустимость наличия пластических деформаций в процессе эксплуатации трубопровода. Данная концепция проектирования получила широкое развитие

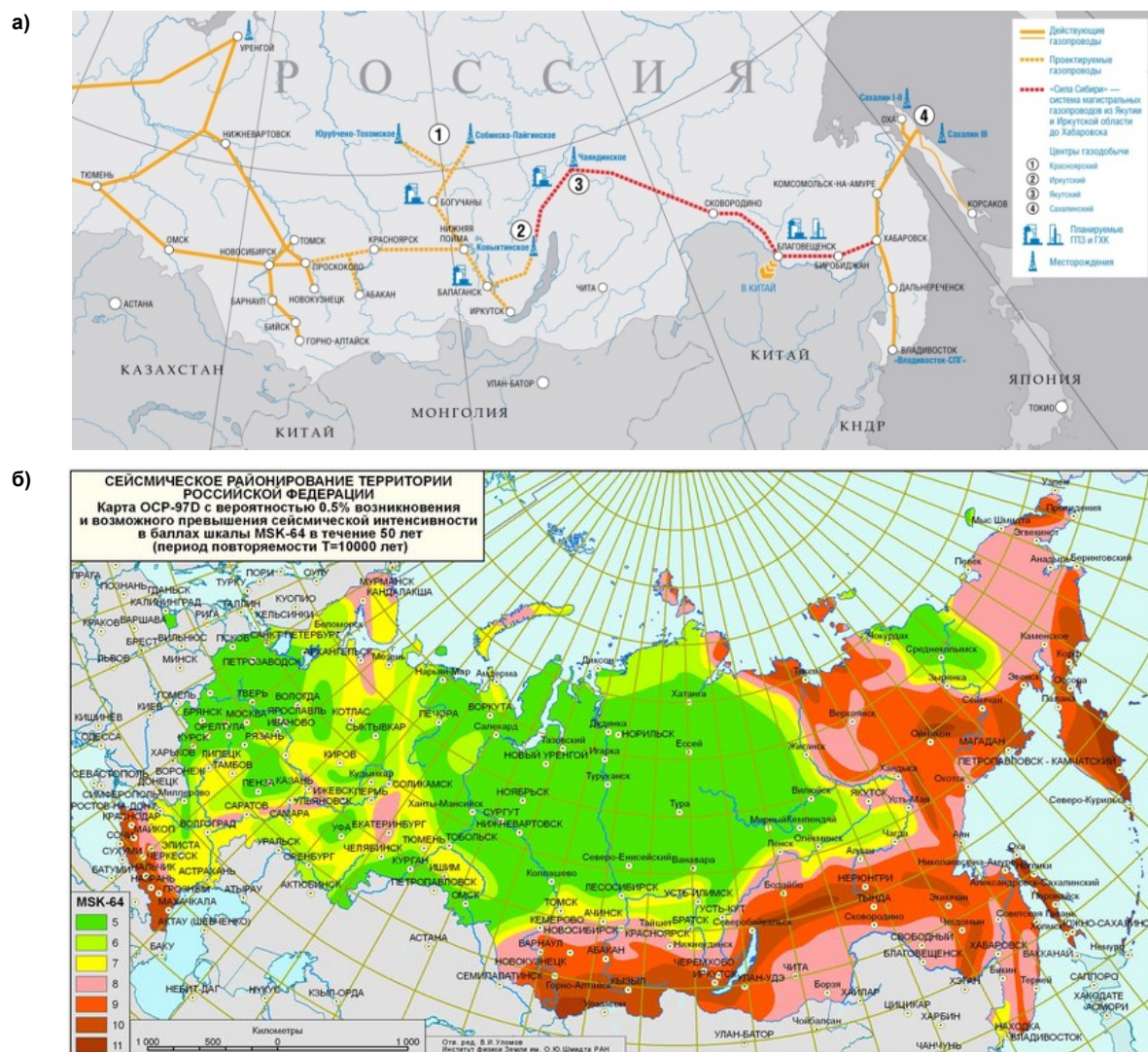


Рис. 1. Освоение газовых ресурсов и формирование газотранспортной системы на Востоке России (ГТС «Сила Сибири») (а), сейсмическое районирование территории Российской Федерации (б)

за рубежом и носит название Strain-Based Design (проектирование, основанное на деформациях, далее SBD). В качестве критерия, характеризующего сопротивление труб сейсмическим воздействиям, принято использовать критерий SBD – величину критической деформации трубы¹, $\epsilon_{кр}$. Соответственно трубы, используемые для строительства сейсмостойких газопроводов, должны иметь величину критической деформации больше нормируемой.

Как известно, единственным российским документом, регламентирующим нормы укладки сухопутных трубопроводов в сейсмических районах, является СНиП 2.05.06–85 «Магистральные трубопроводы». СНиП 2.05.06–85 предусматривает определение напряжений, возникающих в трубопроводе от воздействия сейсмических волн. При

этом не учитывает нагрузки, возникающие от перемещения и разжижения грунта. Следует признать, что существующая в России нормативная база документов по проектированию трубопроводов в сейсмических районах нуждается в обновлении. В данной ситуации разумно обратиться к опыту, накопленному зарубежными коллегами. Наиболее современные нормы проектирования трубопроводов в районах повышенной сейсмичности разработаны японскими коллегами. Они представлены в табл. 1.

Как видно из данных представленных в табл. 1, при строительстве газопровода в районах, где могут происходить деформации грунта первого уровня трубы должны иметь величину критической деформации более 1 % или более отношения номинальной толщины стенки трубы с коэффициентом 0,35 к ее номинальному диаметру. Допустимое число циклов нагружения трубопровода – 50, т. е. два землетрясения по 15 циклов каждое и 20 циклов в запас прочности. При деформациях почвы

¹ Критическая деформация трубы – величина продольной деформации основного металла трубы, при которой происходит образование гофра.

Нормы проектирования трубопроводов в сейсмически опасных районах в Японии [2, 3]

Тип деформации грунта		Вероятность и последствия проявления сейсмической активности	Общее число циклов нагружения трубопровода	Критическая деформация, не менее	Последствия
Временная (сейсмические волны)	Уровень 1	Общая деформация грунта. Происходит один или два раза в течение жизни трубопровода	$N_{ц} = 50$	1 % или $35t/D^*$	Эксплуатацию трубопровода можно возобновить сразу же, без проведения ремонтных работ
	Уровень 2	Очень сильная деформация грунта при землетрясении на суше или при подводном землетрясении. Вероятность возникновения в течение срока эксплуатации трубопровода мала	$N_{ц} = 3...5$	3 %	Возможно возникновение существенной локальной деформации трубопровода или общей деформации, но без утечки транспортируемого продукта
Остаточная	Разжижение грунта	Статическая деформация, без повторений. Является причиной общей деформации трубопровода	$N_{ц} = 1/4$ монотонная деформация		

Примечание: * t – толщина стенки трубы, D – диаметр трубы.

второго уровня, а также в случаях разжижения грунта трубы должны иметь величину критической деформации более 3 %.

В работах [1, 4] установлено, что величина кри-

тической деформации зависит от величины коэффициента деформационного упрочнения при малых степенях деформации, отношения σ_T/σ_B и предела текучести. Данные зависимости показаны на рис. 2.

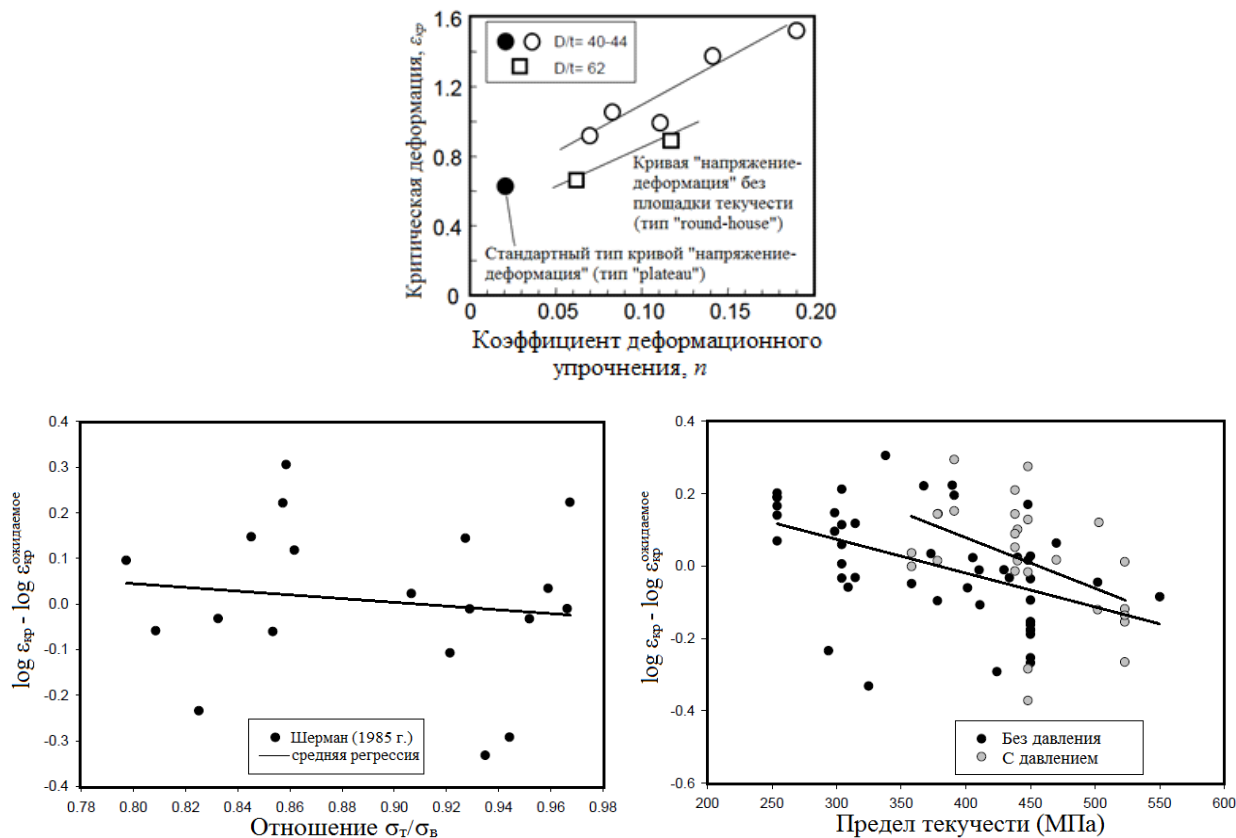


Рис. 2. Зависимость критической деформации трубы от механических свойств основного металла [4, 5]

Согласно результатам, приведенным на рис. 2, можно сделать вывод, что для повышения деформационной способности, т. е. величины критической деформации, основной металл труб должен иметь:

- низкое соотношение σ_T/σ_B ;
- низкий предел текучести (не более 100 МПа выше минимально допустимого значения);
- высокую степень упрочнения при малых степенях деформации (от 0,5 до 4%), или же высокое значение альтернативного параметра $\sigma_{2,0}/\sigma_{1,0}$, дифференциально характеризующего эту величину.

Последнее требование подразумевает отсутствие площадки текучести на диаграмме растяжения. Такой тип кривой носит название Roundhouse (рис. 3).

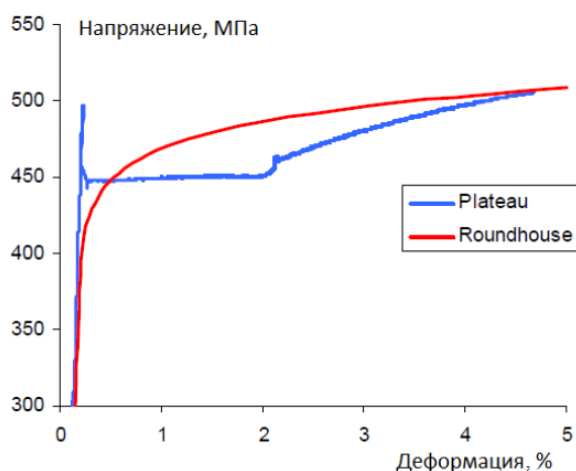


Рис. 3. Кривые «напряжение-деформация» [5]

Вышеизложенные соображения нашли свое отражение в «Технических требованиях к трубам опытных партий для участков магистральных газопроводов на рабочее давление до 9,8 МПа (100 кгс/см²) включительно, пересекающих зоны активных тектонических разломов (АТР)», разрабо-

танных для ГТС «Сила Сибири». Данный нормативный документ содержит следующие дополнительные требования к основному металлу труб (применительно к трубам К60):

- величина соотношения σ_T/σ_B не более 0,88 на продольных образцах и не более 0,85 на поперечных образцах;
- величина соотношения $R_{2,0}/R_{1,0}$ не менее 1,025...1,040, в зависимости от требований Заказчика;
- величина раскрытия в вершине трещины (СТОД) при температуре испытания минус 20 °С не менее 0,40 мм для основного металла трубы и не менее 0,20 мм для ЗТВ сварного соединения и другое.

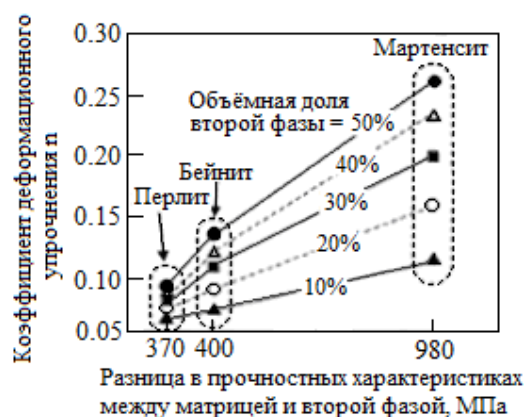
Повышенная деформационная способность труб обеспечивается посредством формирования специального типа микроструктуры основного металла. Аналитические исследования, приведенные в работах [6, 7], показали, что для повышения коэффициента деформационного упрочнения оптимальный тип микроструктуры — двухфазный. Стали, состоящие из твердой и мягкой фазы, имеют высокий коэффициент деформационного упрочнения. К примеру, при деформации однофазного феррита возникают полосы Чернова – Людерса, на диаграмме наблюдается площадка текучести (рис. 4, а). В двухфазной феррито-бейнитной стали, площадка текучести исчезает после достижения определенной объемной доли бейнита (см. рис. 4, а). При этом коэффициент деформационного упрочнения растет с увеличением разницы в прочностных характеристиках между матрицей и второй фазой (рис. 4, б).

К сожалению, опыт производства труб большого диаметра и проката с повышенной деформационной способностью на российских трубных заводах и в листопрокатных цехах отсутствует. Эксклюзивными поставщиками данного вида труб для ОАО «Газпром» являются японские компа-



* Отношение размера бейнитной составляющей в продольном и поперечном направлениях

а)



б)

Рис. 4. Влияние типа и параметров микроструктуры на коэффициент деформационного упрочнения стали [8]



а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Производство опытной партии листового проката (а, б) и труб (в, г) с повышенной деформационной способностью на ОАО «ММК» и ОАО «ВТЗ», соответственно

нии. С целью импортозамещения ОАО «ММК» и предприятиями группы ОАО «ТМК» в составе ОАО «ВТЗ» и ОАО «РосНИТИ» было принято решение о совместной разработке технологии производства проката и труб К60 диаметром 1420 мм с толщиной стенки 32,0 мм с повышенной деформационной способностью для проекта ГТС «Сила Сибири» (рис. 5).

Первым шагом освоения нового вида трубной продукции стала разработка технологии изготовления листового проката К60, имеющего повышенную деформируемость. На данном этапе были решены вопросы выбора химического состава и режима проведения термомеханической контролируемой обработки (далее ТМКО). Химический состав стали выбрали из расчета обеспечения «хорошей» свариваемости и технологичности проведения ТМКО. Режим ТМКО выбрали таким образом, чтобы обеспечить получение двухфазной микроструктуры в готовом листовом прокате. Целевым типом микроструктуры была феррито-бейнитная микроструктура с прослойками полигонального феррита. В качестве «мягкой» фазы в микроструктуре такого типа выступает полигональный феррит, а качестве «твердой» – мелкодисперсная феррито-бейнитная смесь. Разработан-

ные режимы ТМКО предварительно были промоделированы на комплексе Gleeble 3800.

Для освоения технологии изготовления листового проката с повышенной деформационной способностью в ККЦ (было ЭСПЦ) ОАО «ММК» была выплавлена опытная плавка в объеме 320 тонн. Концепция легирования плавки приведена в табл. 2. Плавка была разлита на МНЛЗ № 6 с применением технологии «мягкого обжатия» слитка на 19 слябов сечением 300×2600 мм. В результате поиска целевых режимов ТМКО в условиях производства слябы были прокатаны по шести режимам. После нескольких промышленных экспериментов на стане 5000 ОАО «ММК» удалось получить листовой прокат, соответствующий техническим условиям, имеющий низкое значение отношения предела текучести к пределу прочности и на поперечных и на продольных образцах (табл. 3), а также, что более важно, целевой двухфазный тип микроструктуры (рис. 6). При этом на диаграммах растяжения отсутствовала площадка текучести (рис. 7).

Опытная партия труб К60 с повышенной деформационной способностью диаметром 1420 мм с толщиной стенки 32,0 мм в объеме 5 труб была изготовлена в условиях ОАО «ВТЗ» в июле 2014 г. в присутствии представителей ООО «ВНИИГАЗ».

Таблица 2

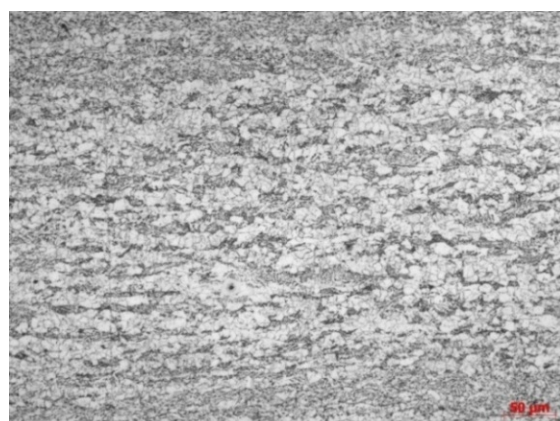
Концепция легирования опытной плавки, мас. %

C	Mn	Mo	Ni	V+ Nb+ Ti	Mo+ Cr+ Cu	S	P
< 0,06	< 1,8	< 0,20	< 0,30	< 0,08	< 1,8	< 0,005	< 0,010

Таблица 3

Механические свойства листового проката опытной партии

Тип образца	Поперечное направление						Продольное направление					
	$\sigma_{0,5}$, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0,5}/\sigma_B$	δ_5 , %	δ_p , %	ψ , %	$\sigma_{0,5}$, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0,5}/\sigma_B$	δ_5 , %	δ_p , %	ψ , %
Плоский	542	656	0,83	22,5	9,0	–	493	597	0,83	23,5	8,0	–
Цилиндр.	527	627	0,84	26,0	–	80	491	609	0,81	26,0	–	81
ТУ	500–590	590–700	$\leq 0,85$	≥ 22	$\geq 9,0$	≥ 65	480–570	560–690	$\leq 0,88$	≥ 22	$\geq 9,0$	≥ 65



×200



×500

Рис. 6. Микроструктура опытной партии листового проката

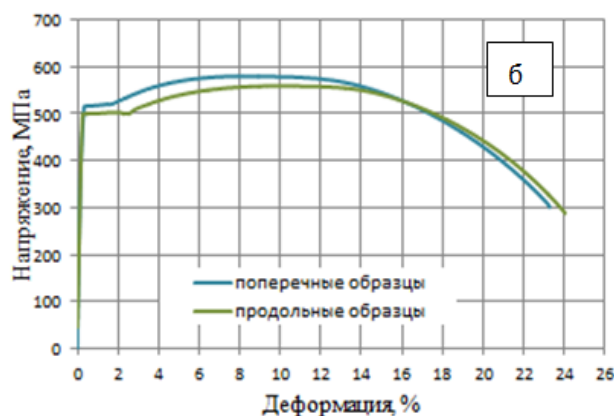
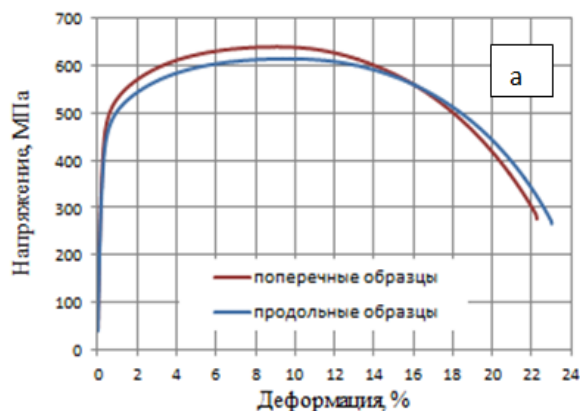


Рис. 7. Диаграммы растяжения опытной партии проката К60 с повышенной деформационной способностью (а) и обычной стали К60 (б)

Согласно программе квалификационных испытаний:

– две трубы из партии были отправлены на ООО «КЗИТ» для проведения гидравлических испытаний с искусственным надрезом по линии сплавления сварного шва;

– на одной трубе были проведены механические испытания в расширенном объеме, согласно программе квалификационных испытаний труб;

– одна труба была использована для проверки технологии ремонта заводского сварного шва.

С целью получения высоких вязких свойств сварного шва и зоны термического влияния сварка внутреннего и наружного швов проводилась по режимам с низкими значениями погонной энергии и с применением ранее отработанных сочетаний сварочных материалов.

Механические свойства опытной партии труб

Таблица 4

Механические свойства трубы опытной партии

	Поперечное направление					Продольное направление					
	$\sigma_{0,5}$, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0,5}/\sigma_B$	δ_5 , %	ψ , %	$\sigma_{0,5}$, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0,5}/\sigma_B$	δ_5 , %	ψ , %	$\sigma_{2,0}/\sigma_{1,0}$
Труба опытной партии	506	614	0,82	22	81	517	598	0,86	23	79	1,032
ТУ	480–590	590–710	$\leq 0,85$	≥ 20	≥ 64	480–580	560–700	$\leq 0,88$	≥ 20	≥ 64	–

Таблица 5

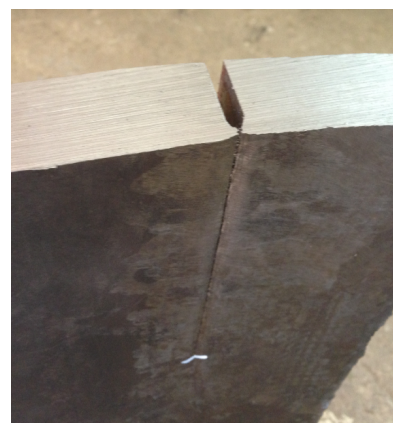
Результаты испытания на статическую трещиностойкость

	Поперечное направление		
	CTOD _{ОМ} , мм	CTOD _{ЦШ} , мм	CTOD _{ЛС} , мм
Труба опытной партии	1,126	0,518	0,472
ТУ	$\geq 0,40$	$\geq 0,20$	$\geq 0,20$

Примечание. ОМ – основной металл; ЦШ – центр шва; ЛС – линия сплавления. Температура испытания: –20 °С.



а)



б)

Рис. 8. Труба после проведения гидроиспытания: а – внешний вид, б – искусственный надрез в разрезе

приведены в табл. 4 и 5. Видно, что металл полностью удовлетворяет требованиям ТУ. Основной металл и сварное соединение обладают высокой вязкостью, что хорошо видно по высокому уровню полученных результатов испытания по определению величины критического раскрытия в вершине трещины. Также следует обратить внимание на высокое значение отношения напряжений при 2,0 и 1,0 % полной деформации и низкое отношение предела текучести к пределу прочности, что говорит о повышенной деформационной способности полученного металла трубы.

Наиболее жестким испытанием свойств трубы было прохождение полномасштабного гидравлического испытания труб с надрезом по линии сплавления на ООО «Копейский завод изоляции труб». Результаты данного испытания признаны удовлетворительными, трещина не вышла за пределы механического надреза, давление разрушения составило 14,5 и 15 МПа (рис. 8).

В результате совместной работы технических специалистов ОАО «ММК», ОАО «ВТЗ» и ОАО «РосНИТИ» были разработаны технологии изготовления листового проката и труб с повышенной деформационной способностью и высокими вязкими свойствами сварных соединений.

Литература/References

1. Ishikawa N., Okatsu M., Endo S. Design Concept and Production of High Deformability Linepipe. *6th International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2006.*
2. *Seismic Design Codes for High-Pressure Gas Pipelines JGA-206-03.* JGA (Japan Gas Association), 2004.
3. *Seismic Design Codes for High-Pressure Gas Pipelines Considering Liquefaction-Induced Permanent Ground Deformation JGA-207-01.* JGA (Japan Gas Association), 2001.

4. *Strain-Based Design of Pipelines*. Report. Project No. 45892GTH. EWI, 2003.

5. Carr M., MacRae I., Bruton D. Local Buckling of Pressurised Seamless Linepipe: Results of the SAFEBUCK JIP. *Pipeline Technology Conference, Ostend, 2009*

6. Hüper T., Endo S., Ishikawa N., Osawa K. Effect of Volume Fraction of Constituent Phases on the Stress-Strain Relationship of Dual Phase Steels. *ISIJ International*, 1999, vol. 39, no. 3, pp. 288–294. DOI: 10.2355/isijinternational.39.288

7. Okatsu M. Development of High Strength Linepipe with Excellent Deformability. *Proceedings of OMAE'05*. 2005.

8. Ishikawa N., Endo S., Kondo J. *High Performance UOE Linepipes*. JFE Technical Report No. 7 (Jan. 2006), 2006.

Пышминцев Игорь Юрьевич, д-р техн. наук, генеральный директор, ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности», г. Челябинск; secretariat@rosniti.ru.

Струин Алексей Олегович, канд. техн. наук, заведующий отделом сварных труб, ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности», г. Челябинск; struin@rosniti.ru.

Гервасьев Алексей Михайлович, канд. техн. наук, научный сотрудник, ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности», г. Челябинск; gervasevam@sinara-group.com.

Струина Елена Равкатовна, младший научный сотрудник, ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности», г. Челябинск; nasybulina@rosniti.ru.

Худяков Артем Олегович, начальник участка сварки, ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности», г. Челябинск; hudakov@rosniti.ru.

Микуров Виталий Валерьевич, младший научный сотрудник, ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности», г. Челябинск; micurov@rosniti.ru.

Стеканов Павел Александрович, начальник лаборатории стана 5000, ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск; stekanov.PA@mmk.ru.

Мозговой Антон Васильевич, канд. техн. наук, начальник бюро новых видов продукции, АО «Волжский трубный завод», г. Волжский; vtz@vtz.ru.

Поступила в редакцию 6 февраля 2015 г.

DOI: 10.14529/met160112

DEVELOPMENT OF HIGH-DEFORMABILITY LINE PIPES

I.Yu. Pyshmintsev¹, secretariat@rosniti.ru,

A.O. Struin¹, struin@rosniti.ru,

A.M. Gervas'ev¹, gervasevam@sinara-group.com,

E.R. Struina¹, nasybulina@rosniti.ru,

A.O. Khudyakov¹, hudakov@rosniti.ru,

V.V. Mikurov¹, micurov@rosniti.ru,

P.A. Stekanov², stekanov.PA@mmk.ru,

A.V. Mozgovoy³, vtz@vtz.ru

¹ JSC “Russian Research Institute of the Tube and Pipe Industries” (RosNITI), Chelyabinsk, Russian Federation,

² OJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works”, Magnitogorsk, Russian Federation,

³ JSC “Volzhsky Pipe Plant”, Volzhsky, Russian Federation

Recently the demand for pipeline construction in seismic and permafrost regions in Russia has grown significantly. The need for pipeline construction in ATR regions is caused by Gazprom activities in Western Siberia and in the Far East (project “Power of Siberia”). High deformability of pipe steel will enable safe gas transmission through the pipeline. Common approach to gas pipelines includes smaller diameter pipes with thicker walls for regions susceptible to seismic activities. This approach requires more branches in such areas

to maintain the amount of supplied gas. An alternative solution is the use of high deformability pipes instead of changing pipe sizes.

In this paper pipeline design features applied in seismic and permafrost regions are discussed. Advantages of using high deformability pipes in these regions are substantiated, an overview of their properties and manufacturing technologies is presented. Technology of plate rolling and production of high deformability pipes and high toughness of seam welds is developed. Results of the production of trial lots of plates and pipes are presented.

Keywords: pipes for ATR; technology; high deformability; microstructure; dual phase steel; toughness.

Received 6 February 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Освоение производства труб большого диаметра с повышенной деформационной способностью / Пышминцев И.Ю., Струин А.О., Гервасьев А.М. и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 82–90. DOI: 10.14529/met160112

FOR CITATION

Pyshmintsev I.Yu., Struin A.O., Gervas'ev A.M., Struina E.R., Khudyakov A.O., Mikurov V.V., Stekanov P.A., Mozgovoy A.V. Development of High-Deformability Line Pipes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 82–90. (in Russ.) DOI: 10.14529/met160112