

УДК 539.42

DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-3-354-368

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ИСПЫТАНИЯ ПАДАЮЩИМ ГРУЗОМ
ВЫСОКОПРОЧНОЙ ТРУБНОЙ СТАЛИ X100 (K80)**

© 2021 г.

**Абакумов А.И.¹, Сафронов И.И.¹,
Смирнов А.С.¹, Арабей А.Б.², Есиев Т.С.²,
Яковлев С.Е.², Порошков А.В.³, Обыденнов Е.Н.³**

¹*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский
научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
Саров, Российская Федерация*

²*ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва, Российская Федерация*

³*АО «Выксунский металлургический завод», Нижегородская обл.,
Выкса, Российская Федерация*

abakumov@vniief.ru

Поступила в редакцию 16.07.2021

Исследуется поведение образцов перспективной трубной стали X100 при динамическом трехточечном изгибе. Проводится ее сопоставление со сталью класса прочности X80, используемой в настоящее время для строительства магистральных газопроводов.

Получены экспериментальные и расчетные механические характеристики трубной стали производства АО «Выксунский металлургический завод» класса прочности X100 на основе данных стандартных испытаний лабораторных образцов и испытаний падающим грузом. По сравнению со сталью класса прочности X80 у стали X100 выше показатели прочности, но ниже показатели пластичности и сопротивления вязкому разрушению.

Проведена скоростная видеосъемка распространения трещины в образце из стали X100, которая позволила с учетом зависимости усилия сопротивления образца от величины перемещения падающего груза существенно повысить информативность эксперимента с точки зрения исследования сопротивления металла вязкому разрушению, выявить закон продвижения трещины, оценить удельную энергию диссипации при продвижении трещины, верифицировать расчетную модель испытания.

Выполнена калибровка параметров модели деформирования и разрушения стали X100. Проведено численное моделирование поведения образцов X100 при испытаниях в условиях комнатной температуры. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с данными испытаний по зависимости усилия сопротивления образца от величины перемещения падающего груза; по работе бойка; по деформированным профилям и макрогеометрии изломов образца после испытания.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке требований и условий применения инструментированного испытания падающим грузом, а также при численном моделировании натуральных испытаний труб из

стали X100 с целью прогноза сопротивления трубопровода распространению вязкой трещины.

Ключевые слова: трубы класса прочности X100 (K80), метод испытания на ударный изгиб, пластическое деформирование и вязкое разрушение образца, скоростная видеосъемка, численное моделирование, сравнение расчета с экспериментом.

Введение

Трубы из стали класса прочности X100 (K80) обладают более высокой прочностью по сравнению с трубами из стали классов прочности X70–X80 (K60–K65), используемыми в настоящее время для строительства магистральных газопроводов. Поэтому использование труб из стали класса прочности X100 (K80) позволит уменьшить толщину стенки, обеспечить пропускную способность газопровода при уменьшении диаметра и повышении рабочего давления. Применение труб из стали класса прочности X100 может обеспечить снижение стоимости транспортировки газа на 4% по сравнению с трубами из стали класса прочности X80 и до 11% – по сравнению с трубами из стали класса прочности X65 [1, 2].

Основные производители труб в России, в том числе АО «Выксунский металлургический завод» (АО «ВМЗ»), уже изготовили опытные партии труб из стали класса прочности X100. В целях выработки полного комплекса требований к трубам из стали класса прочности X100 актуально провести оценку возможностей этой продукции с точки зрения обеспечения надежности эксплуатации газопровода.

Частью комплекса приемочных испытаний труб, который должен обеспечивать необходимую сопротивляемость трубопроводов протяженному вязкому разрушению, являются испытания падающим грузом (ИПГ) [3]. ИПГ – динамический аналог трехточечного изгиба – проводится с использованием копровой установки. В результате ИПГ в соответствии со стандартами ГОСТ 30456, API RP 5L3, ASTM E 436, EN 10274 определяется доля вязкой составляющей в изломе образца, которая в соответствии с современными требованиями для металла труб магистральных газопроводов должна быть не менее 85% при минимальной температуре эксплуатации газопровода. В целом ИПГ характеризует способность металла абсорбировать энергию бояка при деформировании и разрушении образца.

В настоящей статье рассмотрено поведение при ИПГ образцов стали X100 из опытной партии труб АО «ВМЗ». Особенностью исследования является то, что в процессе испытания производится временная запись ускорения бояка и скоростная видеосъемка процесса зарождения и распространения трещины по образцу. По замеренному ускорению программное обеспечение установки определяет перемещение бояка, силу, приложенную к образцу, работу разрушения образца. Такой инструментированный копер предоставляет важную дополнительную информацию о процессе разрушения образца. С помощью этой информации проводится анализ процесса разрушения, даются оценки характеристик трещиностойкости металла [4–7]. На базе полученных результатов осуществляется калибровка и верификация численной конечно-элементной модели ИПГ образца X100. В дальнейшем это может служить основой для расчетного прогноза сопротивления газопровода распространению вязкой трещины.

Механические свойства стали X100

С целью определения механических характеристик стали X100 в условиях заводской лаборатории АО «ВМЗ» проведен цикл стандартных испытаний:

- растяжение цилиндрических и плоских полнотолщинных образцов поперек и вдоль проката для определения модуля упругости E , условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ при 0,2% пластической деформации, временного сопротивления σ_b , относительного равномерного удлинения δ_p , относительного удлинения после разрыва δ , относительного сужения после разрыва u и др.;
- испытание на ударный изгиб по ГОСТ 9454 для определения ударной вязкости KCV;
- ИПГ для определения доли вязкой составляющей в изломе образца В по ГОСТ 30456;
- определение показателя трещиностойкости CTOD;
- определение твердости HV10 по ГОСТ 2999;
- получение цифровых 3D-представлений изломов образцов на установке CREAFORM.

Образцы стали X100 изготовлены из разных участков листов и труб в двух направлениях приложения силы растяжения: поперек и вдоль оси проката (оси трубы). В трубах отдельно исследован основной металл и область сварки. Испытания проведены при разных температурах.

Характеристики стали X100, полученные при испытании цилиндрических образцов поперек проката, представлены в таблице 1. Здесь для сравнения приведены также данные для стали класса прочности X80.

Таблица 1

Первичные механические характеристики трубных сталей

Сталь	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа
X100 (K80)	690–750	790–900
X100 [12]	756	757
X80 [12]	663	713

Экспериментальные диаграммы деформирования поперечных цилиндрических образцов (ГОСТ 1497, диаметр $d_0 = 10$ мм, рабочая часть $L = 50$ мм), отобранных из листов/труб, значительно отличаются друг от друга (рис. 1; здесь номинальное напряжение есть отношение силы растяжения к исходной площади поперечного сечения цилиндра; номера кривых соответствуют заводской маркировке образцов). Отличие диаграмм можно объяснить различным расположением образцов в листе/трубе и наклепом при формовке и экспандировании труб. Последнее приводит к накоплению в материале трубы 2–4% остаточных деформаций [8]. В результате диаграмма деформирования модифицируется: предел текучести $\sigma_{0,2}$ повышается, а относительные удлинения δ_p , δ уменьшаются.

По сравнению со сталью X80 сталь X100 имеет бóльшие предел текучести и временное сопротивление (см. таблицу 1 и рис. 1). С другой стороны, X100 обладает меньшим деформационным упрочнением и меньшей равномерной и максимальной пластической деформацией (см. рис. 1).

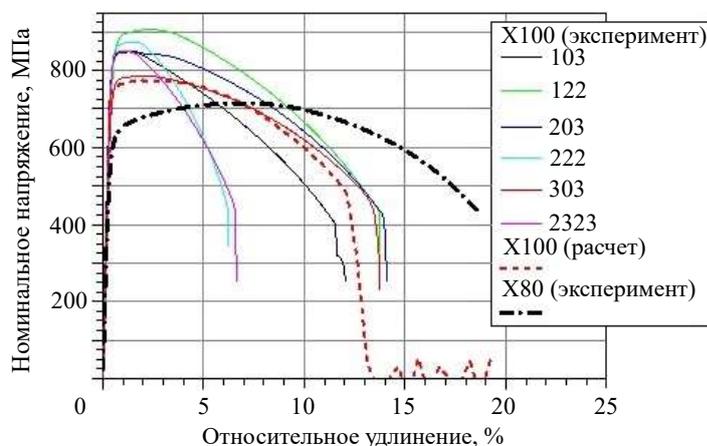


Рис. 1. Диаграммы растяжения при комнатной температуре цилиндрического образца трубы поперек оси трубы

Параметры численной модели деформирования и разрушения стали X100

Для описания деформирования и разрушения металла применена модифицированная модель макровязкого разрушения сталей Гурсона – Твергаарда – Нидельмана (GTNm) [9, 10]. Модификация позволяет описывать прямые и косые срезы, чашечный излом, а также их комбинацию при вязком разрушении маломерных объектов (стержней, пластин, оболочек).

При калибровке параметров расчетной модели GTNm стали X100 использованы результаты испытаний цилиндрических образцов поперек оси трубы при комнатной температуре. Результаты испытаний плоских образцов применяются для верификации расчетной модели поведения X100. Поскольку в опытных диаграммах деформирования наблюдался большой разброс, материал полагался изотропным.

Истинная диаграмма деформирования стали X100 в модели GTNm представлена в форме Джонсона – Кука (ε_M^p – интенсивность пластической деформации) [11]:

$$\sigma_T^{st} = \sigma_T^0 [1 + A(\varepsilon_M^p)^n] [1 + B\{1 - \exp(-\beta \varepsilon_M^p)\}]$$

с параметрами, приведенными в таблице 2.

Таблица 2

Параметры упрочнения в форме Джонсона – Кука

Сталь	σ_T^0 , МПа	A	n	B	β
X80 [9]	640	0,2	0,40	0,2	10
X100	700	0,3	0,21	-0,01	5

Параметры модели GTNm представлены в таблице 3. Из таблицы 3 видно, что сталь X100 более склонна к накоплению поврежденности и разрушается при меньшем критическом ее значении по сравнению со сталью X80 (см. параметры, выделенные жирным шрифтом).

Таблица 3

Параметры модели GTNm

Сталь	Поверхность Гурсона, начальная пористость				Разрушение		Вторичные поры			Сдвиговая пористость		
	q_1	q_2	$q_3 = q_1^2$	f_0	f_c	f_F	f_N	ε_N	σ_N	m	q_4	q_5
X80 [9]	1,5	1	2,25	0	0,07	0,37	0,01	0,3	0,1	2	0,8	0,25
X100	1,5	1	2,25	0	0,04	0,28	0,01	0,3	0,1	2	1,0	0,25

Начальный участок истинной диаграммы деформирования X100 (до равномерной пластической деформации, то есть до начала образования шейки) получен из опытных диаграмм. При больших деформациях истинная диаграмма калибрована расчетным моделированием процесса образования и развития шейки до разрыва образца (рис. 2). Расчетные и опытные диаграммы деформирования удовлетворительно согласуются по форме и характерным параметрам (предел текучести, временное сопротивление, равномерное и максимальное удлинение; см. рис. 1). Сравнение истинных диаграмм деформирования из настоящей статьи с аналогичными данными из других источников [12, 13] показывает их хорошее согласование.

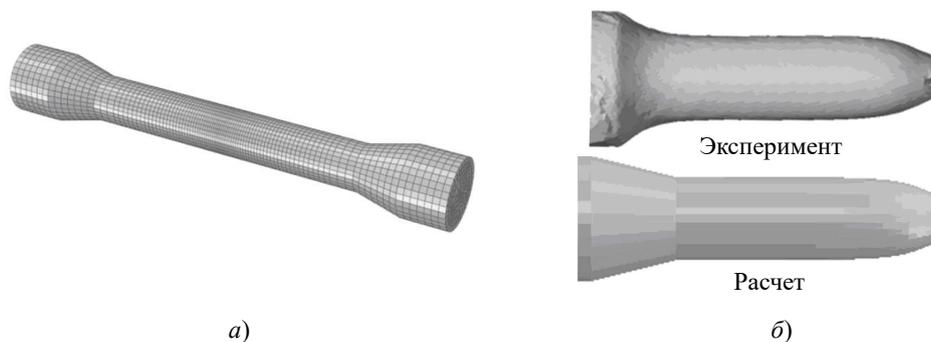


Рис. 2. Численное моделирование растяжения цилиндрического образца:
 а) расчетная сетка цилиндрического образца (размер элемента в области шейки 0,4×5×5 мм);
 б) сравнение экспериментальной и расчетной форм шейки после разрыва образца

Калиброванные параметры модели GTNm механического поведения стали X100 прошли проверку путем численного моделирования растяжения полнотолщинных плоских образцов, ИПГ и сопоставления с результатами испытаний.

Испытания падающим грузом

Образцы стали X100 для ИПГ изготовлены по чертежу согласно ГОСТ 30456 из трубы 1220×20,0 мм опытной партии АО «ВМЗ». Образцы были выпрямлены. Концентратор наносился методом прессования. Направление удара бойка и продвижение трещины – вдоль оси трубы.

На первом этапе были проведены динамические испытания на инструментированном копре ИМАТЕС 100 кДж заводской лаборатории Ижорского трубного завода. Энергия копра при испытаниях 58,8–59,0 кДж, скорость бойка в момент удара 6,84–6,85 м/с. Испытано 16 образцов по 2 образца при одной температуре. Диапазон температур испытания: от +20 до –70 °С. Доля вязкой составляющей в изломе образца падает с уменьшением температуры (рис. 3).

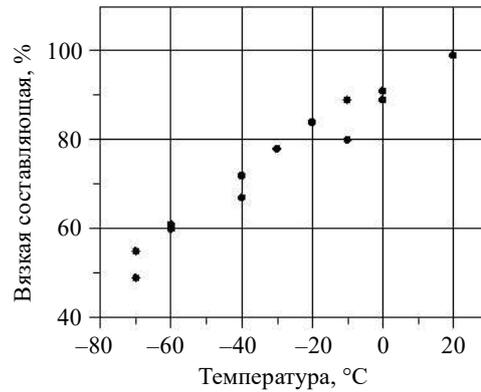


Рис. 3. Доля вязкой составляющей в изломе образцов X100 в зависимости от температуры

Экспериментальные зависимости усилия сопротивления образца от величины перемещения бойка падающего груза, приведенные на рис. 4, отражают закономерное поведение [14–16]: с понижением температуры пиковая (максимальная) сила реакции увеличивается и достигается раньше, а после пиковый участок становится более крутым и коротким.

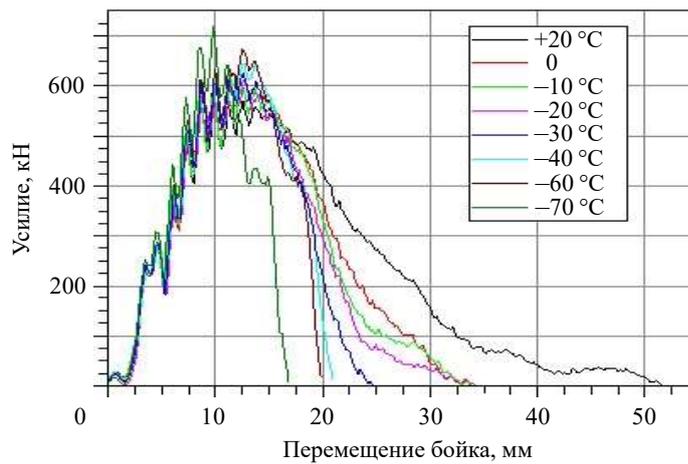


Рис. 4. Экспериментальные зависимости усилия сопротивления образца от перемещения бойка при разной температуре

На АО «ВМЗ» из той же партии был испытан образец на трехточечный изгиб при комнатной температуре в условиях статического нагружения. Как видно из рис. 5, влияние динамического нагружения выражается в увеличении силы реакции образца, а также в изменении вида среза – от прямого к косому (рис. 6).

На копре DWT100 АО «ВМЗ» с максимальной запасенной энергией 100 кДж при комнатной температуре были проведены испытания образцов стали X100 из той же партии и при тех же условиях (энергия бойка 60 кДж, скорость бойка 7,0 м/с) с одновременной скоростной съемкой хода распространения трещины (рис. 7).

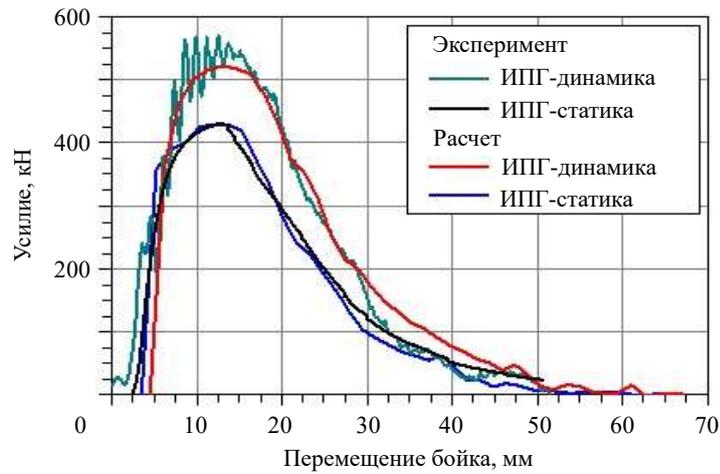


Рис. 5. Зависимости усилия сопротивления образца от величины перемещения бойка при динамическом и статическом нагружениях



Рис. 6. Сечения изломов образца на высоте 20 мм от его основания после динамического (а) и статического (б) нагружений

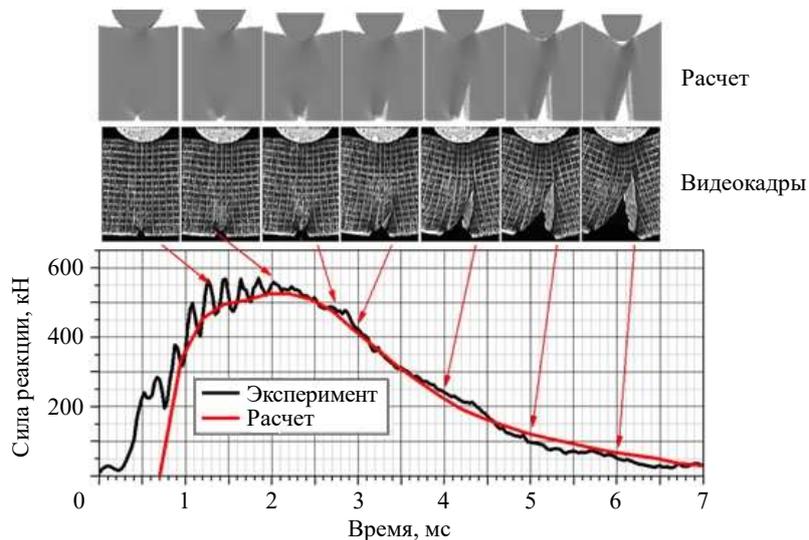


Рис. 7. Экспериментальный и расчетный вид трещины, сопоставленный с зависимостью усилия сопротивления образца от времени

Использование скоростной съемки в подобных экспериментах показано в [17]. Скоростная видеосъемка процесса испытаний позволила:

- совместить процесс распространения трещины в образце с зависимостью усилия сопротивления образца от величины перемещения бойка;
- связать начало зарождения трещины на поверхности образца с максимальной силой реакции;
- связать ниспадающий участок зависимости усилия сопротивления образца от величины перемещения бойка с процессом распространения трещины;
- выявить закон продвижения трещины (рис. 8); здесь стационарный участок движения трещины составляет 40 мм, далее ее движение замедляется;
- определить скорость движения трещины (15–22 м/с на первых 40 мм, рис. 8);
- определить связь движения бойка и вершины трещины (рис. 9);
- оценить удельную энергию диссипации при продвижении трещины: энергия падает с 11,5 до 4,0 Дж/мм² на первых 40 мм (рис. 10);
- верифицировать численную модель динамического деформирования и разрушения стали X100 и расчетную схему ИПГ.

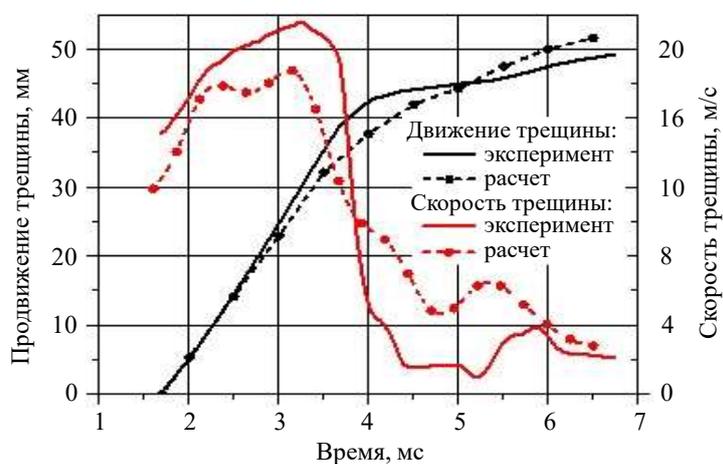


Рис. 8. Движение трещины по образцу и ее скорость

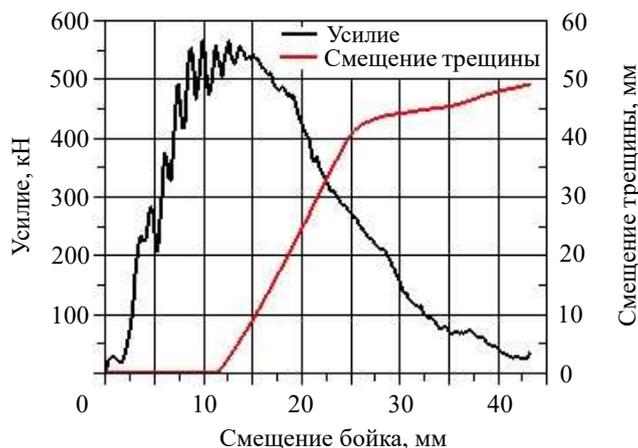


Рис. 9. Экспериментальные зависимости усилия сопротивления образца и смещение трещины от смещения бойка

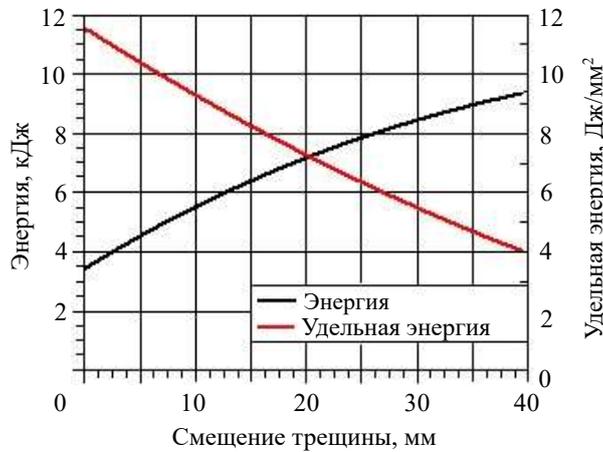


Рис. 10. Экспериментальные зависимости энергии, затрачиваемой на деформирование образца, от смещения трещины

Численное моделирование ИПГ

Адекватное математическое моделирование ИПГ является базой для расчетного прогнозирования сопротивления трубной стали протяженному разрушению. ИПГ являются динамическими испытаниями, и здесь можно обнаружить влияние скорости нагружения на поведение стали X100. Также важно, что ИПГ подвергается полно-толщинный образец трубы и трещина распространяется вдоль оси трубы подобно натурным пневматическим испытаниям труб.

Скоростные эффекты нагружения в модели материала GTNm могут быть учтены сомножителями в диаграмме деформирования материала [9]:

$$\sigma_T = \sigma_T^{st} \cdot k_r \cdot k_T,$$

где σ_T^{st} – статическая диаграмма деформирования стали X100, калиброванная выше; $k_r = [1 + C \{ \ln(1 + \dot{\epsilon}_M^p / \dot{\epsilon}_0^p) \}^k]$, $\dot{\epsilon}_0^p$ – масштабный множитель, $\dot{\epsilon}_M^p$ – расчетная скорость интенсивности пластического деформирования, $k_T = [1 - (T^*)^m]$, $T^* = T_a / T_m$, T_a – расчетная температура адиабатного разогрева, T_m – температура плавления металла.

Параметры динамического сомножителя k_r калибруются на основе данных ИПГ и квазистатического изгиба ИПГ-образца (таблица 4). Для параметров термического сомножителя k_T приняты типичные значения. Из таблицы видно, что сталь X100 более чувствительна к скорости нагружения, чем сталь X80 (см. параметры, выделенные жирным шрифтом). Используемые здесь зависимости от скорости нагружения согласуются с данными из доступных источников, например [13, 18].

Таблица 4

Параметры учета скорости нагружения трубной стали

Сталь	<i>C</i>	<i>k</i>	<i>m</i>	<i>T_m</i> , °C
X80 [19]	0,018	1	0,8	1500
X100	0,050	1	0,8	1500

Было проведено численное моделирование ИПГ образца стали X100 при комнатной температуре с использованием компьютерной параллельной программы ДАНКО

[19] (рис. 11, 12). Расчетная схема аналогична схеме, используемой в статье [20]. Начальная скорость падающего груза 6,85 м/с, его масса 2512 кг, коэффициент кулоновского трения между бойком, опорами и образцом принят равным 0,1.

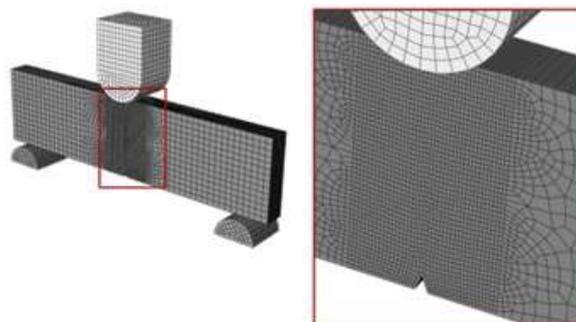


Рис. 11. Расчетная модель ИПГ (размер элемента в области трещины 1,2×1,5×1 мм)

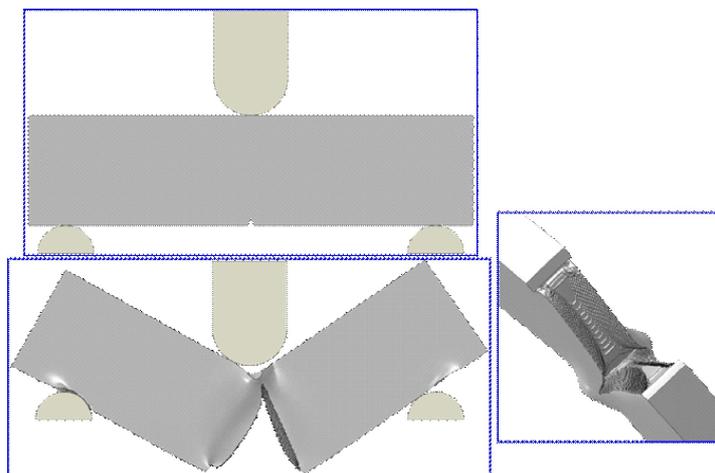


Рис. 12. Численное моделирование ИПГ

Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментом по временной зависимости усилия сопротивления образца (см. рис. 7), перемещению бойка, продвижению и раскрытию трещины (см. рис. 7 и 8), виду изломов и пластической вытяжки (рис. 13), работе падающего груза (рис. 14). По расчетам разница между энергией падающего груза и энергией пластического деформирования составляет примерно 7%. Она включает в себя энергию упругого деформирования и кинетическую энергию образца, а также потери на трение между деталями.

Проводилось исследование чувствительности результатов решения к размеру расчетной сетки. Рассмотрено три варианта размера ячейки в области продвижения трещины: крупная сетка 1,2×1,5×1 мм, средняя сетка 0,6×0,9×0,6, мелкая сетка 0,5×0,5×0,5. В модели использованы координаты: x – направление по длине образца, y – направление по высоте образца (продвижению трещины), z – направление по толщине образца. Для модели GTNm наиболее важна сетка поперек продвижения трещины (x, z). В целом оказалось, что расчетная зависимость усилия сопротивления образца от величины перемещения падающего груза малочувствительна к размеру сетки.

На мелкой сетке можно получать различные формы изломов, в частности, косой срез.

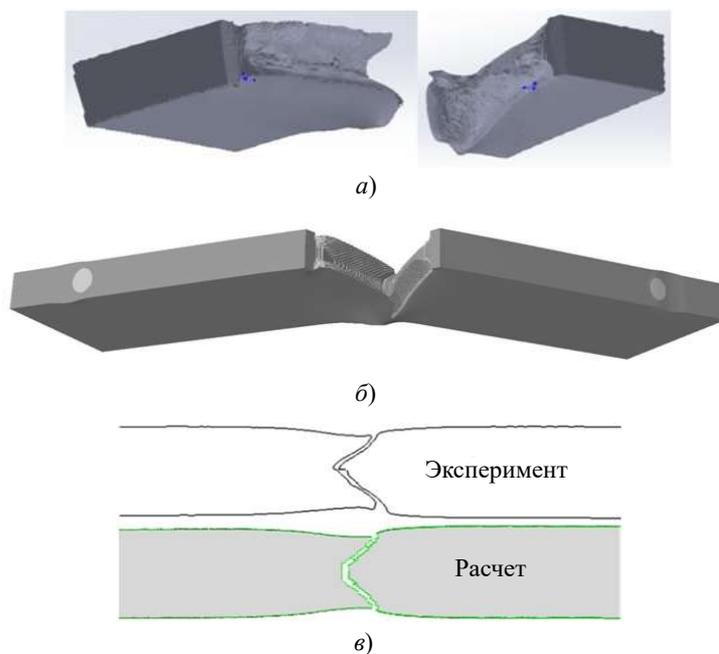


Рис. 13. Экспериментальный и расчетный изломы образца в ИПГ: *a* – эксперимент; *б* – расчет; *в* – профиль излома в эксперименте и в расчете на высоте 20 мм от нижней грани образца

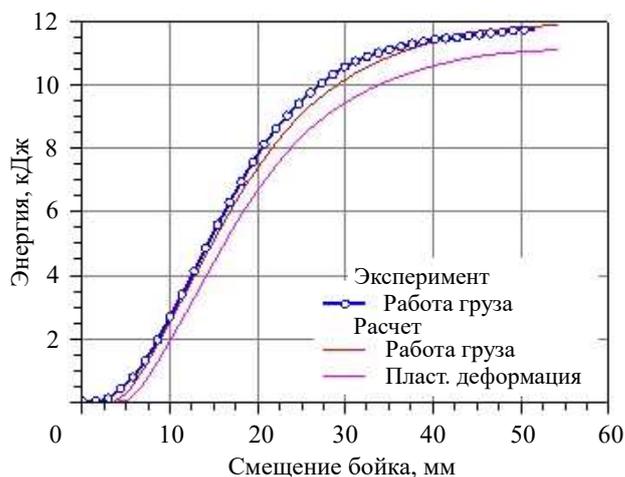


Рис. 14. Изменение энергии при движении бойка

Заключение

Получены экспериментальные и расчетные механические характеристики трубной стали производства АО «ВМЗ» класса прочности X100 на основе данных стандартных испытаний лабораторных образцов и испытаний падающим грузом (ИПГ). По срав-

нению со сталью класса прочности X80, у стали X100 выше показатели прочности, но ниже показатели пластичности и сопротивления вязкому разрушению.

При испытании падающим грузом проведена скоростная видеосъемка распространения трещины в образце из стали X100, которая с учетом зависимости усилия сопротивления образца от величины перемещения падающего груза позволила существенно повысить информативность эксперимента с точки зрения исследования сопротивления металла вязкому разрушению, выявить закон продвижения трещины, оценить удельную энергию диссипации при продвижении трещины, верифицировать расчетную модель ИПГ.

Выполнена калибровка параметров модели деформирования и разрушения стали X100. Проведено численное моделирование поведения образцов из стали X100 при ИПГ. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с данными испытаний при комнатной температуре по зависимости усилия сопротивления образца от величины перемещения падающего груза, работе бойка, деформированным профилям и макрогеометрии изломов образца после испытания.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке требований и условий применения инструментированного ИПГ, а также для численного моделирования натуральных испытаний труб из стали X100 с целью прогноза сопротивления трубопровода распространению вязкой трещины.

Список литературы

1. Bruschi R., Biery N.E., Marchesani F., Weir M.S., Macia M.L. Long-distance gas pipelines: adopting high-grade linepipe – cost benefit versus reliability. *Pipelines International Digest*. September 2010. P. 14–24.
2. Недзвецкий М.Ю., Арабей А.Б., Ментюков К.Ю. и др. Освоение производства труб большого диаметра класса прочности K80 (X100) в России. *Вести газовой науки*: Сб. науч. статей. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2020. №2 (44). С. 22–28.
3. ГОСТ 30456-97. *Металлопродукция. Прокат листовой и трубы стальные. Методы испытания на ударный изгиб*. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 8 с.
4. Матросов Ю.И., Литвиненко Д.А., Голованенко С.А. *Сталь для магистральных газопроводов*. М.: Металлургия, 1989. 289 с.
5. Арабей А.Б. Развитие технических требований к металлу труб магистральных газопроводов. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2010. №7. С. 3–10.
6. СТО Газпром 2-4.1-741-2013. *Технические требования к основному металлу труб K65 (X80) и методы их контроля*. М.: ОАО «Газпром», 2015. 25 с.
7. Р Газпром 133-2013. *Методики оценки сопротивления протяженному вязкому разрушению высокопрочных сталей на основе комплексных испытаний основного металла труб в заводских и лабораторных условиях*. М.: ОАО «Газпром», 2015. 185 с.
8. Besson J., Shinohara Y., Morgeneyer T.F., Madi Y. Ductile rupture of prestrained X100 pipeline steel sheets. *18th European Conference on Fracture of Materials and Structures from Micro to Macro Scale (ECF-18)*. Dresden, Germany. 30 Aug. – 02 Sept. 2010.
9. Абакумов А.И., Сафронов И.И., Смирнов А.С., Арабей А.Б. Численная модель макровязкого разрушения современных сталей магистральных газопроводов. *Проблемы прочности и пластичности*. 2017. Т. 79. №3. С. 301–311. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2017-79-3-301-311>.
10. Абакумов А.И., Сафронов И.И., Смирнов А.С., Арабей А.Б., Глебов А.Г., Есиев Т.С., Струин А.О. Численное моделирование испытания пластин с краевым надрезом на растяжение. *Проблемы прочности и пластичности*. 2017. Т. 79. №4. С. 462–470. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2017-79-4-462-470>.
11. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*. 1985. Vol. 21. Iss. 1. P. 31–48. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(85\)90052-9](https://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90052-9).

12. Kofiani K., Nonn A., Wierzbicki T., Kalwa C., Walters C. Experiments and fracture modeling of high-strength pipelines for high and low stress triaxialities. *Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference*. Rhodes, Greece. 17–22 Jun. 2012. P. 511–518.
13. Scheider I., Nonn A., Völling A., Mondry A., Kalwa C. A damage mechanics based evaluation of dynamic fracture resistance in gas pipelines. *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 3. P. 1956–1964. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.315>.
14. Штремель М.А., Арабей А.Б., Глебов А.Г., Абакумов А.И., Есиев Т.С., Струин А.О., Сарычев Б.А. Силы и деформации при испытании падающим грузом (ИПГ–DWTT). *Деформация и разрушение материалов*. 2016. №9. С. 36–47.
15. Одесский П.Д., Шабалов И.П., Арсенкин А.М., Шувалов А.Н., Лихачев М.В. Оценка сопротивления разрушению металла труб большого диаметра при испытаниях полнотолщинных образцов. *Деформация и разрушение материалов*. 2015. №4. С. 29–41.
16. Eiber R.J. Drop-weight tear test application to natural gas pipeline fracture control. *Journal of Pipeline Engineering*. 2013. Vol. 12. No 3. P. 175–182.
17. Эрделен-Пепплер М., Хилленбранд Х.-Г., Кальва С., Кнауф Г. Исследование применимости прогнозируемой способности к удержанию распространения разрушения для высокопрочного трубопровода в условиях низких температур. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2012. №3. С. 3–12. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2012-3-3-12>.
18. Nonn A., Kalwa C. Modelling of damage behaviour of high strength pipeline steel. [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.researchgate.net/publication/228836925. 8 с.
19. *Аттестационный паспорт программного средства «ДАНКО+ГЕПАРД» для расчета напряженно-деформированного состояния элементов сложных пространственных конструкций*. Рег. № 332 от 12.09.2013 г. Ростехнадзор, ФБУ «НТЦ ЯРБ».
20. Абакумов А.И., Сафронов И.И., Смирнов А.С., Арабей А.Б. и др. Численное моделирование испытания падающим грузом вязкой трубной стали при трехточечном изгибе. *Проблемы прочности и пластичности*. 2020. Т. 82. №4. С. 493–506. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2020-82-4-493-506>.

References

1. Bruschi R., Biery N.E., Marchesani F., Weir M.S., Macia M.L. Long-distance gas pipelines: adopting high-grade linepipe – cost benefit versus reliability. *Pipelines International Digest*. September 2010. P. 14–24.
2. Nedzvetskiy M.Yu., Arabey A.B., Mentyukov K.Yu. et al. Osvoenie proizvodstva trub bolshogo diametra klassa prochnosti K80 (X100) v Rossii [Commercial production of the large-diameter K80 (X100) grade pipes in Russia]. *Vesti gazovoy nauki*. Collected papers. Moscow. Gazprom VNIIGAZ Publ. 2020. No 2 (44). P. 22–28 (In Russian).
3. *GOST 30456-97. Metalloproduksiya. Prokat listovoy i truby stal'nye. Metody ispytaniya na udarnyy izgib* [Metal Production. Rolled Steel and Tubes. Methods of Blow Bending Tests]. Moscow. IPK Standard Publ. 2003. 8 p. (In Russian).
4. Matrosov Yu.I., Litvinenko D.A., Golovanenko S.A. *Stal dlya magistralnykh gazoprovodov* [Steel for Main Gas Pipelines]. Moscow. Metallurgiya Publ., 1989. 289 p. (In Russian).
5. Arabey A.B. Razvitie technicheskikh trebovaniy k metallu trub magistralnykh gazoprovodov [Development of technical requirements for the metal of pipes of main gas pipelines]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 2010. No 7. P. 3–10 (In Russian).
6. *STO Gazprom 2-4.1-741-2013. Tekhnicheskie trebovaniya k osnovnomu metallu trub K65(X80) i metody ikh kontrolya* [Technical Requirements for Base Metal of Pipes of K65 (X80) and Methods of their Control]. Moscow. “ОАО Guzprom” Publ. 2015. 25 p. (In Russian).
7. *R Gazprom 133-2013. Metodiki otsenki soprotivleniya protyazhennosti viazkomu razrusheniyu vysokoprochnykh staley na osnove kompleksnykh ispytaniy osnovnogo metalla trub v zavodskikh i laboratornykh usloviyakh* [R Gazprom 133-2013. Evaluation Methods for Resistance to the Longest Viscous Fracture of High Strength Steels Based on the Comprehensive Tests of Basic Metal Pipes under Factory and Laboratory Conditions]. Moscow. ОАО “Guzprom” Publ. 2015. 185 p. (In Russian).
8. Besson J., Shinohara Y., Morgeneyer T.F., Madi Y. Ductile rupture of prestrained X100

pipeline steel sheets. *18th European Conference on Fracture of Materials and Structures from Micro to Macro Scale (ECF-18)*. Dresden, Germany. 30 Aug.–02 Sept. 2010.

9. Abakumov A.I., Safronov I.I., Smirnov A.S., Arabey A.B. Chislennaya model makrovyazkogo razrusheniya sovremennykh staley magistralnykh gazoprovodov [A numerical model of macro-viscous failure of modern steels of gas mains]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2017. Vol. 79. No 3. P. 301–311.

10. Abakumov A.I., Safronov I.I., Smirnov A.S., Arabey A.B., Glebov A.G., Esiev T.S., Struin A.O. Chislennoe modelirovanie ispytaniya plastin s kraevym nadrezom na rastyazhenie [Numerically modeling tensile tests of plates with a lateral notch]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2017. Vol. 79. No 4. P. 301–311. P. 462–470 (In Russian).

11. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*. 1985. Vol. 21. Iss. 1. P. 31–48. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(85\)90052-9](https://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90052-9).

12. Kofiani K., Nonn A., Wierzbicki T., Kalwa C., Walters C. Experiments and fracture modeling of high-strength pipelines for high and low stress triaxialities. *Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference*. Rhodes, Greece. 17–22 Jun. 2012. P. 511–518.

13. Scheider I., Nonn A., Völling A., Mondry A., Kalwa C. A damage mechanics based evaluation of dynamic fracture resistance in gas pipelines. *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 3. P. 1956–1964. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.315>.

14. Shtremel M.A., Arabey A.B., Glebov A.G., Abakumov A.I., Esiev T.S., Struin A.O., Sarychev B.A. Sily i deformatsii pri ispytanii padayushchim gruzom (IPG–DWTT) [Forces and deformations during drop-weight test]. *Deformatsiya i razrushenie materialov* [Deformation & Fracture of Materials]. 2016. No 9. P. 36–47 (In Russian).

15. Odesskiy P.D., Shabalov I.P., Arsenkin A.M., Shuvalov A.N., Likhachyov M.V. Otsenka soprotivleniya razrusheniyu metalla trub bol'shogo diametra pri ispytaniyakh polnotolshchinnnykh obratstov [Fracture resistance assessment of metal of large diameter gas pipes at tests of wall thickness samples]. *Deformatsiya i razrushenie materialov* [Deformation & Fracture of Materials]. 2015. No 4. P. 29–41 (In Russian).

16. Eiber R.J. Drop-weight tear test application to natural gas pipeline fracture control. *Journal of Pipeline Engineering*. 2013. Vol. 12. No 3. P. 175–182.

17. Erdelen-Peppler M., Khillenbrand Kh.-G., Kal'va C., Knauf G. Issledovanie primenimosti prognoziruemoy sposobnosti k uderzhaniyu rasprostraneniya razrusheniya dlya vysokoprochnogo truboprovoda v usloviyakh nizkikh temperatur [Implementation research on predicted capability to suppress destruction propagation for high-strength main pipeline at low temperatures]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 2012. No 3. P. 3–12 (In Russian).

18. Nonn A., Kalwa C. Modelling of damage behaviour of high strength pipeline steel. [Electronic Resource]. Access mode: www.researchgate.net/publication/228836925. 8 p.

19. *Attestatsionnyy pasport programmogo sredstva "DANKO+GEPARD" dlia rascheta napriazhenno-deformirovannogo sostoyaniya elementov slozhnykh prostranstvennykh konstruksiy* [Certification Passport of the Software Tool "DANKO+GEPARD" for Calculating the Stress-Strain State of Elements of Complex Spatial Structures]. Reg. No 332. 12.09.2013. Rostekhnadzor, FBU "NTTs YaRB" (In Russian).

20. Abakumov A.I., Safronov I.I., Smirnov A.S., Arabey A.B. et al. Chislennoe modelirovanie ispytaniya padayushchim gruzom vyazkoy trubnoy stali pri trekhtochenom izgibe [Numerical simulation of a drop weight test of ductile pipe steel]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2020. Vol. 82. No 4. P. 493–506 (In Russian).

**COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE FALLING LOAD TEST
OF HIGH-STRENGTH PIPE STEEL X100 (K80)**

**Abakumov A.I.¹, Safronov I.I.¹, Smirnov A.S.¹,
Arabey A.B.², Esiev T.S.², Yakovlev S.E.²,
Poroshkov A.V.³, Obydenov E.N.³**

¹*Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics,
Sarov, Russian Federation*

²*Gasprom VNIIGAS LLC, Moscow, Russian Federation*

³*JSC Vyksunskij Metallurgicheskij Zavod,
Nizhny Novgorod region, Vyksa, Russian Federation*

The behavior of samples of the promising pipe steel X100 under dynamic three-point bending is studied. This steel is compared with steel X80 currently used in the gas transmission pipeline engineering.

Experimental and calculated mechanical characteristics were obtained for pipe steel X100 produced by JSC “VMZ” using data of the standard tests for laboratory samples and drop-weight tests (DWT). Steel X100 demonstrates higher strength indexes in comparison with steel X80, however, it has lower indexes of plasticity and ductile fracture resistance.

High-speed video-recording of the crack propagation in a sample of steel X100 was performed in the drop-weight test. In combination with the sample resistance force dependence on the drop-weight movement distance, such testing provided much more information for studying the metal resistance to ductile fracture and allowed revealing the crack propagation law, estimating the specific dissipation energy during the crack propagation, and verifying the computational model used in DWT.

Parameters of the X100 steel strain and fracture model were calibrated. The numerical simulation of the behavior of the X100 steel samples in tests at room temperature was performed. Simulation results satisfactorily agree with data of the tests with regard to such parameters as: the sample resistance force dependence as a function of the drop-weight movement distance; the striker work; strained foils, and macrogeometry of fractures in the tested sample.

This results may be used for the development of requirements and conditions of using equipped DWT, as well as for the numerical simulation of full-scale tests of pipes made of steel X100 to predict the pipeline resistance to a propagating ductile crack.

Keywords: pipes of the X100 (K80) strength grade, drop-weight test (DWT) procedure, plastic strain and ductile fracture of a sample, high-speed video-recording, numerical simulation, comparison of the calculated and experimental results.