

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА КОЛЬЦЕВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ТРУБ МЕТОДОМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

УДК 621.643.2–034.14:620.17

Т.Н. Белослудцев, ООО «Газпром трансгаз Чайковский»
 (Чайковский, Россия), belosludtsevt@ptg.gazprom.ru

А.Ю. Котоломов, к.ф.-м.н., ООО «Газпром трансгаз Чайковский»,
 kotolomovayu@ptg.gazprom.ru

С.Ю. Настич, д.т.н., ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (Москва, Россия),
 S_Nastich@vniigaz.gazprom.ru

В.А. Лопаткин, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», V_Lopatkin@vniigaz.gazprom.ru

А.В. Шипилов, к.т.н., ПАО «Газпром» (Санкт-Петербург, Россия),
 A.Shipilov@adm.gazprom.ru

А.Е. Куранов, ООО «Оптон Инжиниринг» (Москва, Россия), ak@opton.ru

О.Б. Яременко, ООО «Оптон Инжиниринг», oy@frontics.net

В статье приведен анализ соотношения значений механических свойств металла кольцевых сварных соединений и основного металла труб классов прочности K52–K60 с наружным диаметром 530–1420 мм и толщиной стенки 10–23,2 мм при определении свойств методами инструментального индентирования и механических (стандартизованных) испытаний. В работе использовался прибор AIS-3000HD (Frontics Inc., Корея), отличающийся компактностью, виброзащищенностью и возможностью эксплуатации при температурах –30 °С и выше. Исследования проводились при температурах –20 и 20 °С. Получена корреляция свойств по простой линейной зависимости. Для прочностных свойств основного металла труб для разных типов образцов обеспечена высокая достоверность линейной аппроксимации $R^2 = 0,80–0,99$. Конечные значения механических свойств металла сварных соединений и основного металла, используемые в качестве исходных данных для расчетов, могут быть получены путем пересчета результатов индентирования с использованием системы поправочных коэффициентов. Это позволяет учесть различие в твердости и других характеристиках металла на поверхности и в приповерхностном слое толщиной $\approx 0,5$ мм в сравнении с основной частью сечения стенки труб или сварных соединений. Указанные различия характерны для труб в связи с особенностями производства листового проката, а для сварных соединений – технологией многопроходной сварки. В результате исследований показана принципиальная возможность применения методики инструментального индентирования взамен механических испытаний для использования получаемых значений механических свойств (в том числе прочностных, трещиностойкости, работы удара) при оценке работоспособности находящихся в эксплуатации сварных соединений для большого прочностного и размерного сортаментов труб и широкого диапазона температур испытаний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ТРУБЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ, КОЛЬЦЕВЫЕ СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ, ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ИНДЕНТИРОВАНИЕ, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ПРОЧНОСТЬ, ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ, ТВЕРДОСТЬ, МИКРОСТРУКТУРА СТАЛИ.

Кольцевыми сварными соединениями (КСС) называются элементы магистральных газопроводов (МГ), требующие регулярной оценки работоспособности в связи с возможностью возникновения

и развития дефектов. Исходными данными для расчетов при оценке работоспособности КСС по 2-му и 3-му уровням [1] служат механические свойства основного металла (ОМ) труб и участков КСС,

включающие металл сварного шва (МШ), линии сплавления (ЛС) и зоны термического влияния (ЗТВ). Предусматривается определение прочностных свойств, характеристик при испытаниях на ударный

T.N. Belosludtsev, Gazprom transgaz Tchaikovsky LLC (Chaykovsky, Russia), belosludtsevtn@ptg.gazprom.ru

A.Yu. Kotolomov, PhD in Physics and Mathematics, Gazprom transgaz Tchaikovsky LLC,

kotolomovayu@ptg.gazprom.ru

S.Yu. Nastich, DSc in Engineering, Gazprom VNIIGAZ LLC (Moscow, Russia), S_Nastich@vniigaz.gazprom.ru

V.A. Lopatkin, Gazprom VNIIGAZ LLC, V_Lopatkin@vniigaz.gazprom.ru

A.V. Shipilov, PhD in Engineering, PJSC Gazprom (Saint Petersburg, Russia), A.Shipilov@adm.gazprom.ru

A.Ye. Kuranov, OOO Opton Engineering (limited liability company) (Moscow, Russia), ak@opton.ru

O.B. Yaremenko, OOO Opton Engineering, oy@frontics.net

Determining mechanical properties of circular welded joint metal and pipe base metal using the instrumented indentation method

The article analyzes the mechanical properties of girth welded joint metal and base metal determined by instrumented indentation relative to standardized mechanical testing of K52–K60 strength grade pipes with outside diameters of 530–1420 mm and wall thicknesses of 10–23.2 mm. The study employed AIS–3000HD (Frontics Inc., Korea) recognized for being compact, vibration-resistant, and operable at down to –30 °C. The examination temperatures ranged from –20 to 20 °C. The properties were correlated by a simple linear relationship. For various specimen types, strength properties of pipe base metal showed high reliability of linear approximation: $R^2 = 0.80–0.99$. The final mechanical properties of welded joint metal and base metal used as input data for the calculation can be derived from the indentation results using a set of correction factors. This allows considering the differences in hardness and other properties on the surface and in a ≈ 0.5 mm thick near-surface metal layer compared with the major part of pipe wall section or welded joints. These differences are related to the specific features of rolled steel production for pipes and multiple-pass welding technology for welded joints. The results show the general possibility of using the instrumented indentation technique instead of mechanical testing and applying mechanical properties obtained (including strength, fracturing resistance, impact energy) to evaluate the operability of welded joints in operation in wide ranges of pipe strengths, pipe sizes, and test temperatures.

KEYWORDS: MAIN GAS PIPELINE PIPES, GIRTH WELDED JOINTS, INSTRUMENTED INDENTATION, MECHANICAL PROPERTIES, STRENGTH, FRACTURE RESISTANCE, HARDNESS, STEEL MICROSTRUCTURE.

изгиб (на образцах с V-образным надрезом) и трещиностойкости (вязкости разрушения) при минимальной расчетной температуре $T_{расч. мин}$.

Применение безобразцовых методов для определения механических свойств позволяет отказаться от вырезки катушки из КСС из трубопровода или сварки контрольных КСС, ускорить получение результатов и снизить затраты. Одним из наиболее совершенных способов таких испытаний можно назвать метод инструментального индентирования. Метод основывается на определении реакции материала на вдавливание твердосплавного сферического индентора (обычно диаметром 0,5 или 1,0 мм) при многоцикловом нагружении с промежуточными разгрузками и последующем преобразовании данных по специальным алгоритмам для получения диаграммы деформирования (в координатах «напряжение – деформация») и ме-

ханических свойств [2–4]. Наиболее совершенные методики позволяют определять прочностные свойства ($\sigma_{0,2}$ и σ_b), работу удара (KV) и трещиностойкость (K_{Jc}) – динамическое значение критического коэффициента интенсивности напряжений. Алгоритмы обработки учитывают тип материала, зависящий от типа кристаллической решетки, способа легирования и обобщенного уровня вязкости металла. Индентирование металла применительно к КСС и ОМ труб эксплуатируемых МГ проводится на наружной поверхности. При таких испытаниях фактического разрушения материала и образования шейки на образце не происходит. Опыт применения индентирования для оценки значений KV и K_{Jc} металла КСС и ОМ труб МГ представлен в [5].

Свойства металла участков КСС и ОМ труб, определяемые при механических испытаниях, обычно зависят от направления деформации образцов (относи-

тельно оси трубы или сварного шва), расположения концентраторов напряжения на образцах, температуры испытаний. У ОМ электросварных труб МГ наблюдается неоднородная структура по сечению, что связано со структурированием при непрерывной разливке слябов и прокатке листов по технологиям низкотемпературной контролируемой прокатки (НКП), контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением (КПУО) (или термомеханической обработки (ТМО)) [6]. Металл КСС, выполняемых многопроходной сваркой, имеет характерные зоны с различной структурой. При этом в ЗТВ имеются участки, которые подвергаются повторному нагреву в интервале температур фазового превращения, из-за чего формируется неблагоприятная структура стали с крупными островками мартенситно-аустенитной (МА) составляющей и снижается вязкость металла [7]. Как правило,

Таблица 1. Химический состав стали и прочностные свойства основного металла труб (по данным сертификатов качества)
 Table 1. Chemical composition of steel and strength properties of pipe base metal (according to the quality certificates)

Класс прочности Strength grade	Номинальные диаметр × толщина стенки, мм Diameter nominal × wall thickness, mm	Марка стали Steel grade	Композиция легирования стали. Массовая доля элементов, % Steel alloying composition. Element wt. %	Предел текучести σ_y , МПа Yield point, σ_y , МПа	Временное сопротивление σ_u , МПа Ultimate tensile strength, σ_u , МПа
K52 K52	720 × 10,0	17Г1С-У 17G1S-U	C – 0,15; Mn – 1,3; Si – 0,43; P – 0,012; S – 0,016	410	560
K55 K55	1220 × 12,4	13Г1С-У 13G1S-U	C – 0,10; Mn – 1,45; Si – 0,43; Nb – 0,08; Ti – 0,03; P – 0,016; S – 0,004	450	580
K60 K60	530 × 12,0 1020 × 16,0 1420 × 23,2	07Г2НД(Ф)Б (условная) 07G2ND(F)B (nominal)	C – 0,07; Mn – 1,6; Si – 0,21; Ni – 0,17; Cu – 0,15; Nb – 0,05; V – 0,04; Ti – 0,02; P – 0,007; S – 0,002	540	630

структурная неоднородность ОМ труб и КСС усиливается при увеличении толщины стенки труб.

В связи с вышеизложенным целью работы состояла в установлении корреляции значений механических свойств, определяемых посредством индентирования и разрушающих (стандартизованных) испытаний, для ОМ труб МГ с различным структурным состоянием стали и для зон КСС труб (МШ, ЛС и ЗТВ) при разной толщине стенки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось на материале КСС труб классов прочности K52, K55 и K60 (далее обозначены как трубы K52, K55, K60) с наружным диаметром 530–1420 мм и толщиной стенки 10,0–23,2 мм (табл. 1). Листовой прокат для труб был изготовлен по разным технологиям: для труб K52 – по технологии горячей прокатки с последующей нормализацией (ГП + Н), для труб K55 – по технологии НКП, для труб K60 – КПУО.

Производство опытных КСС осуществлялось при помощи многопроходной ручной дуговой сварки по действующим операционным технологическим картам. Изготовленные КСС были признаны годными по результатам неразрушающего ультразвукового контроля.

Индентирование проводилось с использованием AIS-3000HD



Рис. 1. Прибор AIS-3000HD на темплете из кольцевого сварного соединения в климатической камере
 Fig. 1. AIS-3000HD on a girth welded joint template in a climatic test chamber

(рис. 1). Прибор в целом пригоден для оценки свойств металла на эксплуатируемых МГ в полевых условиях благодаря рабочему диапазону температур испытаний от –30 до 50 °С, компактности и малому весу (10 кг). Индентирование происходило на темплатах размером 400 × 300 мм, содержащих участки сварного шва КСС. Подготовка поверхности осуществлялась путем зачистки поверхностного слоя на глубину около 0,1 мм (80–100 мкм) при помощи шлифмашинки. Зона индентирования на ОМ труб располагалась на расстоянии 80–100 мм от кольцевого шва. Индентирование выполнялось сферическим индентором из карбида вольфрама диаметром 0,5 мм

в режиме 15 циклов нагрузки/разгрузки со скоростью 0,3 мм/мин, степенью частичной разгрузки 50 %. В качестве $T_{расч}$ была выбрана температура –20 °С. Испытания проводились при температурах –20 °С и 20 °С. При значении –20 °С прибор, закрепленный на темплете, помещался в климатическую камеру ЗИКО КХТВ-240 (ООО «ЗИКО», Россия).

Механические испытания металла КСС и ОМ труб проводили по стандартным методикам при температурах –20 °С и 20 °С: на растяжение – по ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 6996–66, на ударный изгиб – по ГОСТ 9454–78 и ГОСТ 6996–66, на вязкость разрушения (трещиностойкость) – по BS 7448–1 (ОМ труб) и DIN EN ISO 15653:2010 (МШ, ЛС КСС). Растяжение ОМ труб проводили на плоских образцах при температуре –20 °С и на цилиндрических – при 20 °С. Прочность металла шва определяли на цилиндрических образцах с проточкой по центру шва. Трещиностойкость металла оценивали методом трехточечного изгиба на образцах типа SENB (single-edge notched bend). Твердость по Виккерсу (HV10) по ГОСТ 2999–75 определяли при температуре 20 °С. Испытания на ударный изгиб и трещиностойкость проводили на образцах с разной ориентацией и надрезом по [1]: для определения KV ОМ труб – LR, LC, CL; для определения KV МШ, ЛС и ЗТВ – LR и LC; для определения K_{Jc} ОМ труб – LC и CL;

Автоматизированные системы экспресс-диагностики методом инструментального индентирования

Получение механических характеристик
материалов неразрушающим методом

KCV



Ударная
вязкость

K_{1с}



Трещино-
стойкость

HV



Твердость

σ_Б



Предел
прочности

σ_T



Предел
текучести

σ_{ост}



Остаточное
напряжение

- Неразрушающий метод
- Минимум подготовки
- Быстрое испытание (2–5 мин)
- Малая площадь испытания
- В реестре средств измерений РФ
- Контроль действующих объектов
- Без подготовки образцов
- Компактный и легкий прибор
- Высокая точность измерения
- Простота использования

ООО «Оптон Инжиниринг»

📍 г. Москва, ул. Угрешская, д. 2, стр. 53

☎ +7 (495) 664-55-20

@ info@frontics.net, info@opton.ru

🌐 www.frontics.net

Зона испытания
Глубина 150 мкм

Таблица 2. Сравнение значений прочностных свойств ($\sigma_{0,2}$ и σ_b) основного металла труб, полученных в результате инструментального индентирования (ИИ) и при механических испытаниях (МИ)
 Table 2. Comparing pipe base metal strength properties ($\sigma_{0,2}$ and σ_b) obtained by instrumented indentation (II) and mechanical testing (MT)

Температура испытаний, °C Test temperature, °C	Тип образца Specimen type	Направление испытаний Test direction	ИИ – МИ, МПа II – MT, МПа	Средние значения по всем трубам Averages for all pipes			
				ИИ – МИ, МПа II – MT, МПа		(ИИ – МИ)/МИ, % (II – MT)/MT, %	
				$\sigma_{0,2}$	σ_b σ_u	$\sigma_{0,2}$	σ_b σ_u
-20	Цилиндрический Cylindrical	Продольное Longitudinal	25...130	67	93	13,8	15,3
20	Плоский полнотолщинный Flat full-thickness	Продольное Longitudinal	30...105	64	85	13,2	14,6
		Поперечное Transverse	40...110	78	80	17,5	13,7

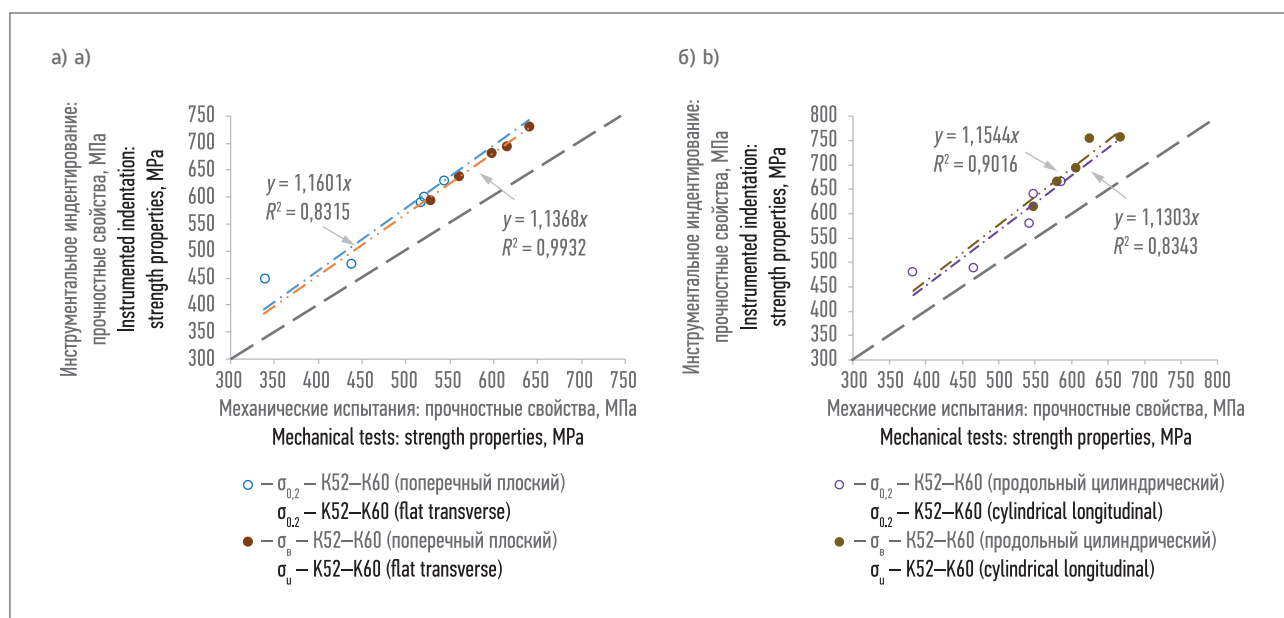


Рис. 2. Соотношение значений прочностных свойств основного металла труб классов прочности K52, K55 и K60 при индентировании (y) и испытаниях на растяжение (x): а) на плоских поперечных образцах при температуре 20 °C; б) на цилиндрических продольных образцах при температуре -20 °C

Fig. 2. Strength properties of base metal (K52, K55, and K60 strength grade pipes) by indentation (y) relative to tension testing (x) of: a) flat transverse specimens at 20 °C; b) cylindrical longitudinal specimens at -20 °C

для определения K_{JC} МШ – NP;
 для определения K_{JC} ЛС – NQ.

Структуру стали исследовали методом световой (оптической) микроскопии при увеличениях от x100 до x1000 на шлифах после травления в 4%-м спиртовом растворе HNO₃ с использованием микроскопа Zeiss AxioVert A1 (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Германия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прочностные свойства ($\sigma_{0,2}$ и σ_b) ОМ труб, определенные индентированием, относительно резуль-

татов механических испытаний имели повышенные значения. Величина завышения прочностных свойств была примерно одинаковой для всех труб K52, K55 и K60: при испытаниях на образцах разного типа и направления ≈ 60 – 90 МПа (табл. 2). Значения $\sigma_{0,2}$ и σ_b были завышены примерно в равной мере. Для прочностных свойств ОМ труб обеспечивалась корреляция по линейной зависимости с коэффициентом пропорциональности $\approx 1,12$ – $1,15$ и высокой достоверностью аппроксимации

$R^2 = 0,80$ – $0,90$, в отдельных случаях – до $R^2 = 0,99$ (рис. 2).

Для прочностных свойств МШ КСС при индентировании также получено завышение значений $\sigma_{0,2}$ и σ_b относительно таковых при механических испытаниях (рис. 3). В случае МШ КСС величина завышения значений $\sigma_{0,2}$ была больше, чем для значений σ_b . Вероятно, это связано с некоторой неоднозначностью определения индентированием значений $\sigma_{0,2}$ для непрерывной кривой деформирования, что характерно для МШ. Прочностные

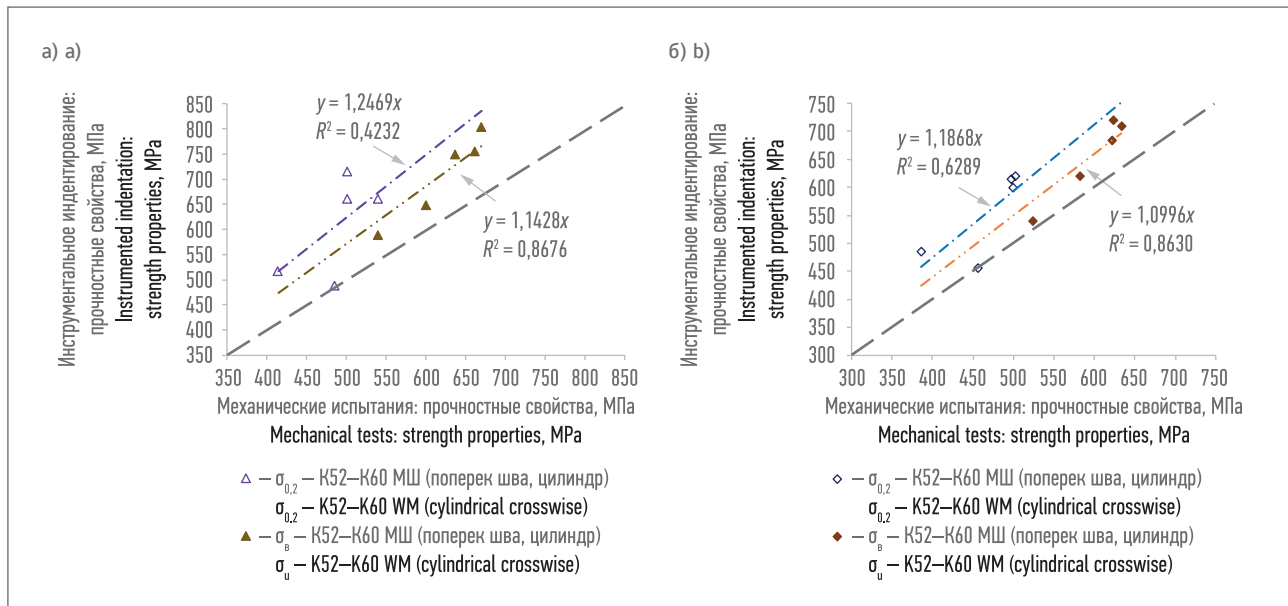


Рис. 3. Соотношение значений прочностных свойств металла шва кольцевого сварного соединения труб классов прочности K52, K55 и K60 при индентировании и механических испытаниях на цилиндрических образцах, расположенных поперек сварного шва: а) при температуре $-20\text{ }^\circ\text{C}$; б) при температуре $20\text{ }^\circ\text{C}$
 Fig. 3. Strength properties of girth weld metal (K52, K55, and K60 strength grade pipes) obtained by indentation and mechanical testing of cylindrical specimens oriented crosswise the weld (WM/C): а) at $-20\text{ }^\circ\text{C}$; б) at $20\text{ }^\circ\text{C}$

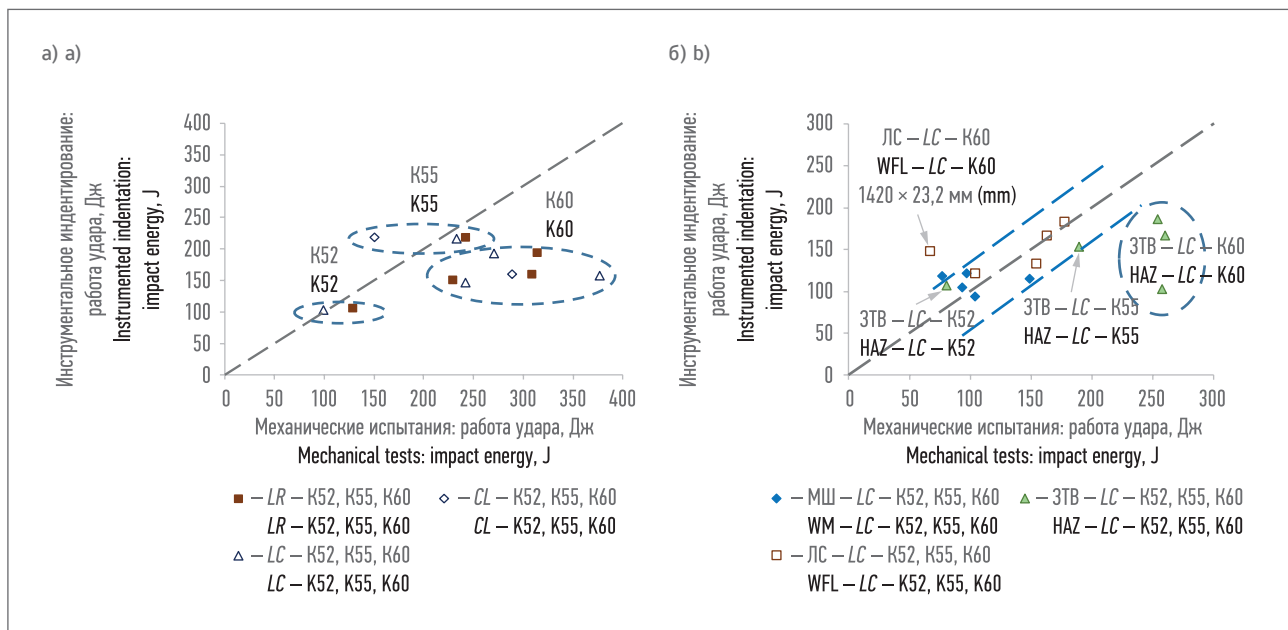


Рис. 4. Сравнение значений работы удара при температуре $-20\text{ }^\circ\text{C}$, полученных при индентировании и механических испытаниях: а) основной металл труб на образцах с ориентацией LC и LR (продольные) и CL (поперечные); б) участков кольцевого сварного соединения – металл шва, линия сплавления, зона термического влияния (линия сплавления + 2 мм) на образцах с ориентацией LC (поперек шва)
 Fig. 4. Comparing impact energies at $-20\text{ }^\circ\text{C}$ obtained by indentation and mechanical testing of: а) pipe base metal of LC and LR (longitudinal) and CL (transverse) specimens; б) гirth welded joint sections: weld metal (WM), weld-fusion line (WFL), heat-affected zone (HAZ, weld-fusion line + 2 mm) of LC (crosswise the weld) specimens

свойства МШ имели корреляцию по линейной зависимости с коэффициентом пропорциональности 1,19–1,25 для значений $\sigma_{0,2}$ и 1,10–1,14 – для значений σ_b . Для значений

σ_b , которые необходимы для оценки свойств КСС, обеспечивалась удовлетворительная достоверность линейной аппроксимации – $R^2 = 0,86\text{--}0,87$.

Результаты анализа показали, что для значений KV (рис. 4) и K_{JC} (рис. 5), получаемых при индентировании и механических испытаниях металла КСС и ОМ труб,

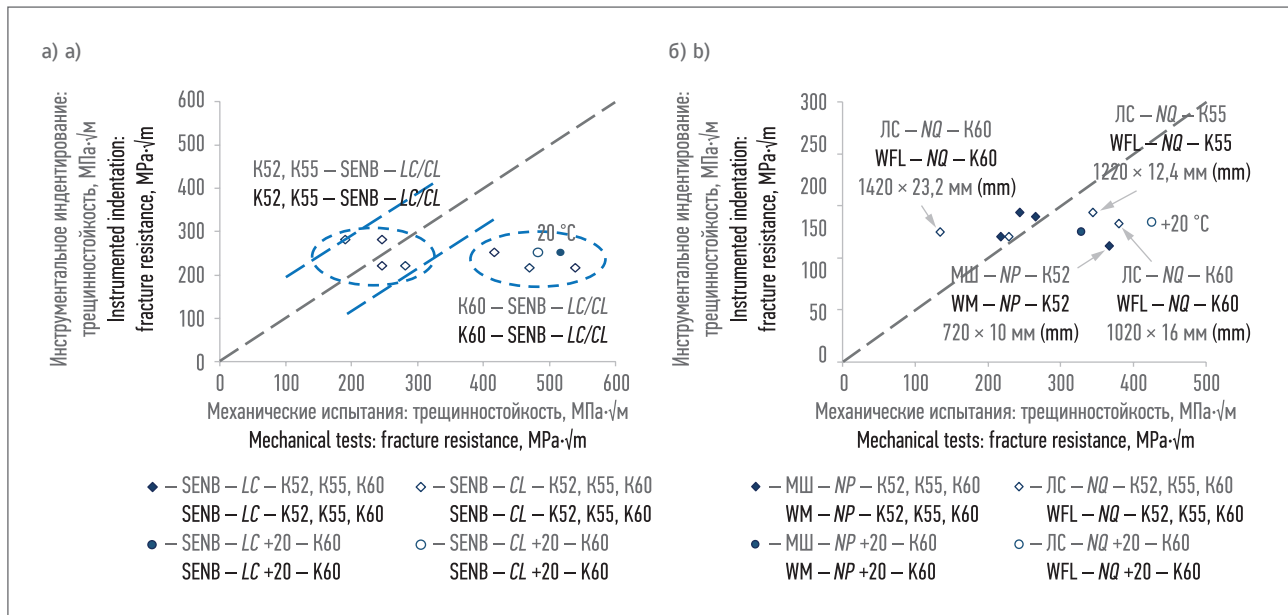


Рис. 5. Сравнение значений трещиностойкости, полученных при индентировании и механических испытаниях при температуре -20 °C (при 20 °C – отдельные точки): а) основной металл труб на образцах SENB с ориентацией LC (продольные) и CL (поперечные); б) металл шва на образцах с ориентацией NP и LC – с ориентацией NQ (оба – поперек шва)
Fig. 5. Comparing fracture resistances at -20 °C (individual points at 20 °C) obtained by indentation and mechanical testing of: a) pipe base metal of LC (longitudinal) and CL (transverse) SENB specimens; b) WM of NP specimens and WFL of NQ specimens (both crosswise the weld)

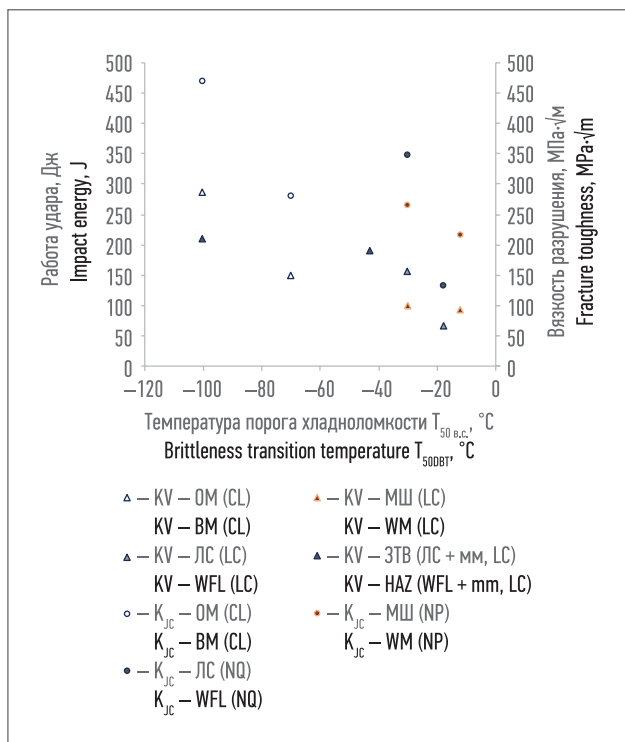


Рис. 6. Зависимость работы удара и трещиностойкости от температуры вязко-хрупкого перехода при механических испытаниях (при температуре испытаний -20 °C) для участков кольцевого сварного соединения и основного металла труб классов прочности K52, K55, K60
Fig. 6. Impact energies and fracture resistances as functions of brittleness transition temperature in mechanical testing at a test temperature of -20 °C for girth welded joint and base metal (BM) sections of K52, K55, K60 strength grade pipes

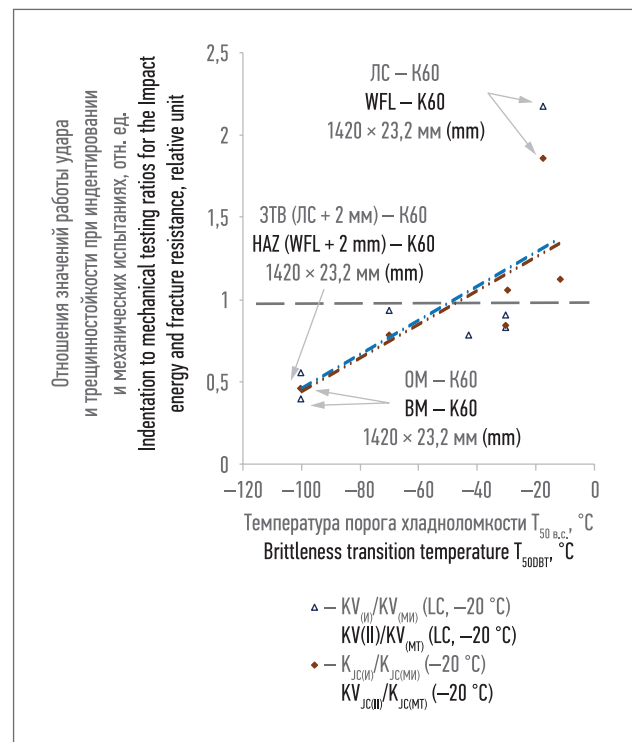


Рис. 7. Соотношение значений работы удара и трещиностойкости при индентировании и механических испытаниях (при температуре испытаний -20 °C) в зависимости от температуры вязко-хрупкого перехода металла
Fig. 7. Indentation to mechanical testing ratios for the impact energy and fracture resistance at the test temperature of -20 °C as functions of the brittleness transition temperature of the metal

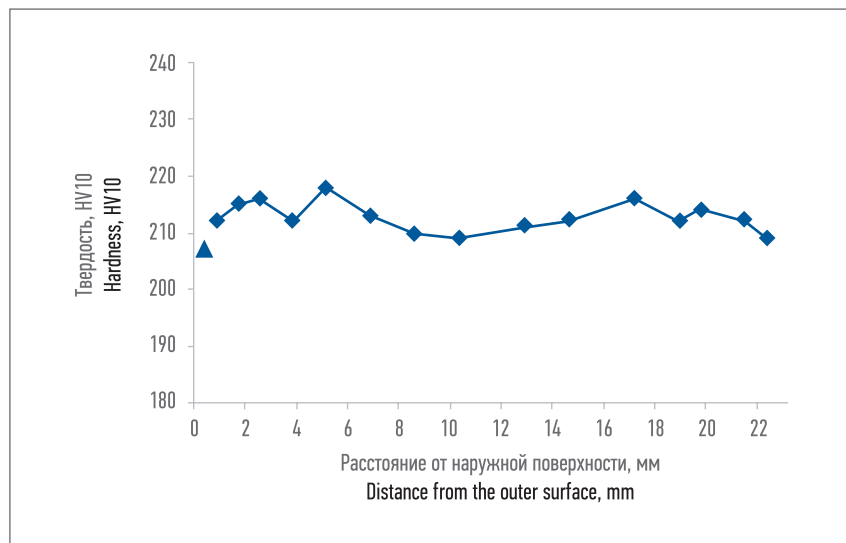


Рис. 8. Распределение твердости по Виккерсу по толщине основного металла трубы класса прочности K60 (1420 × 23,2 мм), точка X = 0 соответствует твердости на наружной поверхности
 Fig. 8. Vickers hardness distribution through the base metal thickness in a K60 strength grade pipe (1420 × 23.2 mm). X = 0 corresponds to the outer surface hardness

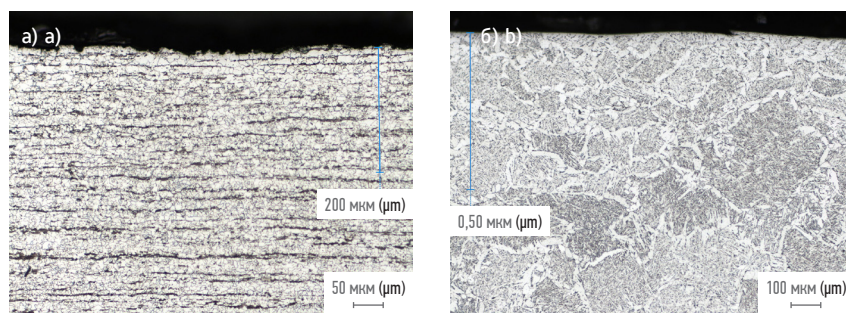


Рис. 9. Микроструктура участков кольцевых сварных соединений труб класса прочности K55 из стали 13G1S-U (диаметр 1220 × 12,4 мм) вблизи наружной поверхности: а) основного металла трубы, x200; б) сварного шва по центру, x100
 Fig. 9. Microstructure of the girth welded joint sections of K55 strength grade pipes made of 13G1S-U steel (1200 × 12.4 mm) near the outer surface of: a) pipe base metal, 200X; b) weld center, 100X

отсутствует единообразная корреляция. Характер соответствия значений зависит от рассматриваемого участка КСС, класса прочности труб и толщины стенки труб.

Проведена оценка хладостойкости металла зон КСС и ОМ труб путем определения температуры вязко-хрупкого перехода ($T_{50 \text{ в.с.}}$) по 50%-й доле вязкой составляющей в изломе ударных образцов с V-образным надрезом при сериальных испытаниях в диапазоне температур от $-80 \text{ }^\circ\text{C}$ до $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Металл с высоким уровнем хладостойкости (с низкой температурой $T_{50 \text{ в.с.}}$)

характеризуется, как правило, высокими значениями KV и K_{JC} (рис. 6). Уровень соответствия значений KV и K_{JC} , получаемых в результате индентирования и механических испытаний, оценивали через их отношение при температуре $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($KV_{(И)}/KV_{(М)}$ и $K_{JC(И)}/K_{JC(М)}$). Эти отношения значений KV и K_{JC} имеют зависимость от температуры $T_{50 \text{ в.с.}}$ (рис. 7). Соответствие значений KV и K_{JC} с отклонением пределах $\pm 20 \%$ (изменение отношения от 0,8 до 1,2), что можно считать приемлемым для оценки свойств металла индентированием, обеспечивается для металла КСС и ОМ труб при температуре $T_{50 \text{ в.с.}}$ в пре-

делах от -70 до $-20 \text{ }^\circ\text{C}$. Такой уровень хладостойкости для металла КСС и ОМ труб МГ можно рассматривать как удовлетворительный. Однако в результате индентирования для металла с пониженной хладостойкостью ($T_{50 \text{ в.с.}} > -20 \text{ }^\circ\text{C}$) определяются завышенные значения KV и K_{JC} (рис. 7), а для металла с очень высокой хладостойкостью ($T_{50 \text{ в.с.}} < -70 \text{ }^\circ\text{C}$) – их заниженные значения (рис. 7).

В результате измерения твердости HV10 ОМ труб установлено, что твердость на наружной поверхности трубы ниже среднего значения по сечению металла. В приповерхностной зоне ОМ труб шириной 3–4 мм наблюдается интенсивное повышение твердости (на 5–10 HV10) в направлении от поверхности. Максимальную твердость имеет металл примерно на $1/4$ толщины стенки трубы. Пример распределения твердости по сечению ОМ трубы представлен на рис. 8. Для металла КСС максимальные значения твердости получены вблизи ЛС, а минимальные – на расстоянии ≈ 2 мм от ЛС в приповерхностном слое толщиной 2 мм.

Структура ОМ труб различалась и зависела от состава стали и использованной технологии прокатки листов: ОМ труб класса прочности K52 и K55 имел полосчатую феррито-перлитную структуру, а ОМ труб класса прочности K60 – дисперсную феррито-бейнитную структуру. Структура ОМ всех труб у поверхности в слое толщиной $\approx 150\text{--}400 \text{ мкм}$ неоднородна и представляет собой переходной тип от наружного обезуглероженного слоя зерен феррита к структуре, характерной для основной части сечения стенки трубы. Структура этой зоны, состоящая преимущественно из мелких зерен полигонального феррита, более мелкозернистая, с меньшей полосчатостью и меньшей долей участков перлита или бейнита по сравнению со структурой основной части сечения (рис. 9). Толщина обезуглероженного слоя

Таблица 3. Тип труб для оценки свойств металла кольцевого сварного соединения и основного металла труб
 Table 3. Pipe type for evaluation of properties of girth welded joint metal and pipe base metal

Тип трубы / класс прочности труб магистрального газопровода Main gas pipeline pipe type / strength grade	Марка стали (условная) Steel grade (nominal)	Технология производства проката для труб Rolled pipe steel production technology
K48, K52 K48, K52	17Г1С-У 17G1S-U	ГП + Н, НП Hot rolling with subsequent normalizing, normalized rolling
K55 K55	13Г1С-У, 09ГСФ, 09Г2С, 09Г2ФБ, 10Г2ФБ, 10Г2ФБЮ 13G1S-U, 09GSF, 09G2S, 09G2FB, 10G2FB, 10G2FBYu	НКП Low-temperature controlled rolling
K56, K60 K56, K60	07Г2НДФБ, 07Г2НДБ 07G2NDFB, 07G2NDB	КПУО (ТМО) Controlled rolling with accelerated cooling (thermomechanical treatment)

Таблица 4. Хладостойкость металла труб и кольцевого сварного соединения
 Table 4. Cold resistance of pipe metal and girth welded joint

Участок кольцевого сварного соединения girth welded joint section	Тип исполнения трубы Pipe type	Диапазон температур вязко-хрупкого перехода $T_{50\text{в.с.}}^{\circ\text{C}}$ Fracture appearance transition temperature $FATT_{50\%}^{\circ\text{C}}$
Основной металл труб Pipe base metal	K48, K52 K48, K52	$-70 < T_{50\text{в.с.}} < -20$ $-70 < FATT_{50\%} < -20$
	K56, K60 K56, K60	$T_{50\text{в.с.}} < -70$ $FATT_{50\%} < -70$
Металл шва кольцевого сварного соединения girth weld metal	K48-K60 K48-K60	$-70 < T_{50\text{в.с.}} < -20$ $-70 < FATT_{50\%} < -20$
Линия сплавления Weld-fusion line	K48-K60 при $t \leq 20$ мм K48-K60 at $WT \leq 20$ mm	$-70 < T_{50\text{в.с.}} < -20$ $-70 < FATT_{50\%} < -20$
	K48-K60 при $t > 20$ мм K48-K60 at $WT > 20$ mm	$-20 < T_{50\text{в.с.}} < -20$ $-20 < FATT_{50\%} < -20$
Зона термического влияния (линия сплавления + 2 мм) Heat-affected zone (weld-fusion line + 2 mm)	K48, K52, K55 K48, K52, K55	$-70 < T_{50\text{в.с.}} < -20$ $-70 < FATT_{50\%} < -20$
	K56, K60 K56, K60	$T_{50\text{в.с.}} < -70$ $FATT_{50\%} < -70$

непосредственно у поверхности имеет значения от $\approx 30-50$ мкм (трубы класса прочности K55 и K60) до $\approx 100-150$ мкм (трубы класса прочности K60). Неоднородность структуры стали в приповерхностном слое формируется в результате нагрева слэбов для дальнейшей прокатки листов с интенсивными деформациями.

Металл сварного шва вблизи поверхности имеет слой толщиной ≈ 500 мкм с более мелкими зернами бейнита и большей объемной долей прослоек феррита по сравнению с глубже расположенным (рис. 9). Причиной этому послужили обеднение МШ по легирующим элементам и его обезуглероживание. Такая структура имеет пониженную твердость и прочность.

Металл КСС в ЗТВ на расстоянии 2 мм от ЛС на поверхности соответствует границе ЗТВ и ОМ труб, подвергнутого отпуску. Металл этой зоны имеет пониженную твердость, и при индентировании определяются высокие значения KCV и K_{Jc} .

Металл рассмотренных КСС и ОМ труб имеет структурную неоднородность в приповерхностном слое, что сопровождается интенсивным повышением твердости в слое толщиной 3-4 мм. В процессе индентирования по мере увеличения глубины погружения индентора твердость металла также увеличивается вследствие указанной структурной неоднородности. В результате обработки таких данных по принятым алгоритмам

получаются завышенные прочностные свойства металла. Устойчивое и объяснимое завышение их значений может быть скорректировано путем использования поправочных коэффициентов.

Значения KV и K_{Jc} металла участков КСС и ОМ труб, определяемые индентированием, имели разный уровень завышения или занижения в зависимости от уровня хладостойкости металла. Свойства металла в определенных зонах КСС и ОМ труб разного исполнения могут существенно различаться вблизи поверхности и в основной части сечения. Разрушение от концентратора напряжения (надреза) на образцах для механических испытаний располагается на некотором расстоянии

Таблица 5. Параметры труб и кольцевого сварного соединения для назначения поправочных коэффициентов K_i
 Table 5. Pipe and girth welded joint parameters for introducing correction factors K_i

Участок кольцевого сварного соединения girth welded joint section	Параметры для назначения коэффициентов K_i Parameters for introducing K_i correction factors		
	Прочностные свойства $\sigma_{0,2}$ и σ_b Strength properties $\sigma_{0,2}$ and σ_u	Работа удара KV^{-20} Impact energy KV^{-20}	Трещиностойкость K_{JC}^{-20} Fracture resistance K_{JC}^{-20}
Основной металл труб Pipe base metal	Тип исполнения Pipe type	Тип исполнения; тип образца (ориентация) Pipe type; specimen type (orientation)	Тип исполнения Pipe type
Металл шва кольцевого сварного соединения girth weld metal	Тип исполнения Pipe type	Тип исполнения Pipe type	Тип исполнения Pipe type
Линия сплавления Weld-fusion line	—*	Тип исполнения; толщина стенки ($t \leq 20$ мм; $t > 20$ мм) Pipe type; wall thickness ($t \leq 20$ mm; $t > 20$ mm)	Тип исполнения; толщина стенки ($t \leq 20$ мм; $t > 20$ мм) Pipe type; wall thickness ($t \leq 20$ mm; $t > 20$ mm)
Зона термического влияния (линия сплавления + 2 мм) Heat-affected zone (weld-fusion line + 2 mm)	—*	Тип исполнения (K48–K55 или K56–K60) Pipe type (K48–K55 or K56–K60)	—*

*Примечание. Значение определять не требуется.

*Note. There is no need to determine the value.

от поверхности даже в случае образцов с поверхностным надрезом (с учетом глубины надреза) [8]. Кроме того, задаваемый тип материала для расчетов предназначен для металла с удовлетворительной хладостойкостью, поэтому свойства металла с низкой или очень высокой хладостойкостью определяются с отклонением, величина которого ($KV_{(И)}/KV_{(МИ)}$ и $K_{JC(И)}/K_{JC(МИ)}$) увеличивается для очень низких или высоких значений $T_{50 \text{ в.с.}}$ (см. рис. 7).

Например, завышение при индентировании значений K_{JC} для металла ЛС труб класса прочности К60 с большой толщиной стенки (23,2 мм) объясняется тем, что при испытаниях на трещиностойкость на полнотолщинных образцах зона страгивания усталостной трещины располагается вблизи ЛС в середине сечения трубы [8]. В КСС труб с большой толщиной стенки, выполненных многопроходной сваркой, некоторые участки околосшовной зоны подвергаются повторному нагреву в интервале температур фазового превращения. Такие участки металла имеют неблагоприятную

структуру, что снижает вязкость металла.

Разработан подход для определения консервативных значений механических свойств КСС и ОМ труб классов прочности К52, К55 и К60 с использованием поправочных коэффициентов. Предложено проводить оценку механических свойств металла участков КСС и ОМ труб по результатам индентирования с помощью поправочных коэффициентов (K_i) в зависимости от типа исполнения труб. Тип трубы определяется по характерному сочетанию класса прочности, марки стали и технологии производства листов для труб (табл. 3). Условная марка стали отражает характерное сочетание легирующих элементов в металле. Тип исполнения основывается на этапах развития технологии производства труб МГ и листового проката для них: трубы из стали типа 17Г1С-У для технологии производства листов ГП + Н, а также нормализационной прокатки (НП), трубы класса прочности К55 из стали 13Г1С-У для технологии НКП и современные стали типа 07Г2НДФБ для технологии КПУО. Трубы класса прочности К56

рассматриваются как аналогичные трубам класса прочности К60 из современных сталей типа 07Г2НДФБ. Трубы класса прочности К60, изготовленные из стали типа 10Г2ФБ для технологии НКП, могут относиться к типу трубы К55.

Коэффициенты K_i определены в результате сравнительных испытаний, выполненных методами индентирования с использованием прибора AIS-3000HD и стандартизованных испытаний на образцах с определением значений $\sigma_{0,2}$, σ_b , KV и K_{JC} при температурах испытания -20 °С и 20 °С, а также металлографического анализа и замеров твердости по сечению металла и на поверхности. При оценке свойств металла ЛС также учитывается номинальная толщина стенки трубы (t), что позволяет учесть получение низких значений KV и K_{JC} при механических испытаниях из-за расположения надреза в зоне с неблагоприятной структурой в случае труб с большой толщиной стенки ($t > 20$ мм). Коэффициенты для значений KV ОМ труб учитывают ориентацию образцов (LR , LC , CL), что обусловлено формированием текстуры

металла разной интенсивности при прокатке листов по разным технологиям. При назначении коэффициентов K_i также учитывается уровень хладостойкости металла (по температуре $T_{50\text{в.с.}}$) для оценки степени завышения или занижения значений KV и K_{JC} при существенном различии в структуре стали вблизи поверхности и в основной части сечения (табл. 4). Тип трубы относится также к металлу КСС, исходя из соответствия назначаемой технологии сварки характеристикам труб. Консервативный подход при оценке свойств обеспечивается при назначении коэффициентов K_i с учетом наибольшего завышения или наименьшего занижения значений свойств, а также разброса значений при механических испытаниях и индентировании.

Система назначения коэффициентов K_i в зависимости от параметров КСС и труб МГ в общем виде представлена в табл. 5. Например, для получения консервативной оценки прочностных свойств ОМ

труб типов К48, К52, К55, К56, К60 во всех случаях используется коэффициент 1,2. Значения трещиностойкости ОМ труб типов К48, К52, К55 получают при помощи $K_i = 1,5$, а типов К56, К60 – $K_i = 0,6$.

Скорректированные значения механических свойств металла получают путем деления среднего значения свойства, определенного в результате индентирования, на коэффициент K_i для определенного типа трубы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опробовано применение безобразцового метода инструментального индентирования для определения механических свойств, включая прочностные свойства $\sigma_{0,2}$ и σ_b , работу удара KV и трещиностойкость K_{JC} металла КСС и ОМ труб МГ классов прочности К52–К60 из стали разных типов легирования (17Г1С–У, 13Г1С–У, 07Г2НДФБ) и широкого размерного сортамента (диаметром 530–1420 мм с толщиной труб 10,0–23,2 мм).

Для $\sigma_{0,2}$ и σ_b ОМ труб и металла сварного шва КСС обеспечивается устойчивая корреляция результатов индентирования и механических испытаний на образцах разных типов по линейной зависимости с высокой достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,80–0,99$. Корреляция значений KV и K_{JC} различается для участков КСС и ОМ труб в зависимости от структурного состояния металла, толщины стенки труб и расположения зоны разрушения в сечении металла. Полученные соотношения свойств металла объясняются особенностями структуры стали и распределения твердости в приповерхностном слое металла.

Представлен подход для получения консервативных значений механических свойств металла КСС и ОМ труб МГ по результатам индентирования с использованием коэффициентов K_i , назначаемых для разных участков КСС с учетом класса прочности, условной марки стали, толщины стенки труб и хладостойкости металла. ■

ЛИТЕРАТУРА

- СТО Газпром 2–2.4–715–2013. Методика оценки работоспособности кольцевых сварных соединений магистральных газопроводов (разраб. ООО «Газпром ВНИИГАЗ», утв. ОАО «Газпром» 29.12.2012). М.: Газпром экспо, 2014.
- Haggag F.M. In-Situ Measurements of Mechanical Properties Using Novel Automated Ball Indentation System // ASTM STP 1204. 1993. P. 27–44. DOI: 10.1520/STP12719S.
- Jang J.-Il., Choi Y., Lee Y.-H., et al. Instrumented microindentation studies on long-term aged materials: work-hardening exponent and yield ratio as new degradation indicators // Materials Science & Engineering: A. 2005. No. 395. P. 295–300. DOI: 10.1016/j.msea.2004.12.033.
- Lee J.-S., Jang J.-il., Lee B.-W., et al. An instrumented indentation technique for estimating fracture toughness of ductile materials: A critical indentation energy model based on continuum damage mechanics // Acta Materialia. 2006. No. 54. P. 1101–1109. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.10.033.
- Белослудцев Т.Н., Котоломов А.Ю., Ковех В.М. и др. Оценка механических свойств основного металла и металла сварных соединений трубопроводов неразрушающим (безобразцовым) методом по измерению твердости // Территория Нефтегаз. 2014. № 8. С. 36–42.
- Эфрон Л.И. Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали. М.: Металлургиздат, 2012.
- Lee S.G., Sohn S.S., Kim B., et al. Effects of martensite-austenite constituent on crack initiation and propagation in inter-critical heat-affected zone of high-strength low-alloy (HSLA) steel // Materials Science & Engineering: A. 2018. No. 715. P. 332–339. DOI: 10.1016/j.msea.2018.01.021.
- Великоднев В.Я., Степанов П.П., Чергунов С.А. и др. Испытания металла в зоне сплавления сварного соединения труб большого диаметра на трещиностойкость с определением показателя критического раскрытия в вершине трещины (CTOD) // Газовая промышленность. 2019. № 12. С. 126–134.

REFERENCES

- OAO Gazprom (open joint-stock company). *STO Gazprom 2–2.4–715–2013 (company standard). Evaluation procedure for operability of circular welded joints of main gas pipelines*. Moscow: Gazprom expo; 2014. (In Russian)
- Haggag FM. In-situ measurements of mechanical properties using novel automated ball indentation system. *ASTM Spec. Tech. Publ.* 1993; 1204: 27–44. <https://doi.org/10.1520/STP12719S>.
- Jang J-Il, Choi Y, Lee Y-H, Kwon D. Instrumented microindentation studies on long-term aged materials: work-hardening exponent and yield ratio as new degradation indicators. *Mater. Sci. Eng., A*. 2005; (395): 295–300. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.12.033>.
- Lee J-S, Jang J-il, Lee B-W, Choi Y, Lee SG, Kwon D. An instrumented indentation technique for estimating fracture toughness of ductile materials: A critical indentation energy model based on continuum damage mechanics. *Acta Mater.* 2006; (54): 1101–1109. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.10.033>.
- Belosludtsev TN, Kotolomov AYU, Kovekh VM, Ovsyannikov YeN, Chernyshov AV. Evaluation of the parent metal and pipeline welded joints metal mechanical properties using non-destructive (sample-free) tests to measure hardness. *Oil and Gas Territory [Territorija Neftegaz]*. 2014; (8): 36–42. (In Russian)
- Efron LI. *Physical Metallurgy in Big Metallurgy. Pipe Steels*. Moscow: Metallurgizdat; 2012. (In Russian)
- Lee SG, Sohn SS, Kim B, Kim WG, Um KK, Lee S. Effects of martensite-austenite constituent on crack initiation and propagation in inter-critical heat-affected zone of high-strength low-alloy (HSLA) steel. *Mater. Sci. Eng., A*. 2018; (715): 332–339. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.01.021>.
- Velikodnev VYa, Stepanov PP, Chegurov SA, Nastich SYu, Kalenskiy VS, Shabalov IP, et al. Testing of the fusion zone metal of the welded joint of large diameter pipes on fracture toughness with determination of critical crack tip opening displacement value (CTOD). *Gas Industry*. 2019; (12): 126–134. (In Russian)