

УДК 621.774.2.

## Влияние формовки в вальцах на комплекс механических свойств металла электросварных труб большого диаметра

И. П. Шабалов, Д. М. Соловьев, Г. А. Филиппов, О. В. Ливанова

ФГУП "ЦНИИчермет им. И. П. Бардина", г. Москва. E-mail: iqs12@yandex.ru

Проведены исследования комплекса механических свойств и сопротивления разрушению металла листа и готовой трубы, изготовленных на линии формовки в вальцах в исходном и состаренном состоянии. Установлено, что трубный передел не оказывает существенного влияния на прочностные и пластические характеристики, но повышает ударную вязкость относительно уровня листа. В наибольшей степени трубный передел оказывает влияние на параметры сопротивления разрушению в области "кромка". Трубный передел повышает склонность к деформационному старению, а развитие деградационных процессов при длительной эксплуатации труб зависит от степени деформационного воздействия в локальных областях по сечению трубы.

Ключевые слова: формовка в вальцах, электросварные трубы большого диаметра, деформационное старение, механические свойства.

Researches have been performed of the complex of mechanical properties and resistance to destruction of the metals of a sheet and a finished pipe, produced on the line with 3-roll bending process, in the initial and aged states. The pipe repartition is found to have no essential effect on strength and plastic characteristics, but it increases the impact strength concerning the sheet level. The most pronounced effect the pipe repartition has on the parameters of destruction resistance of the edge area. The pipe repartition increases tendency to strain ageing, but the development of degradation processes at long operation of pipes depends on the extent of deformation influence in local areas on the pipe section.

Keywords: 3-roll bending process, electric-welded pipes of large diameter, strain ageing, mechanical properties.

Известно, что остаточные напряжения вносят значительное распределение напряжений в металле трубы, вызванных внутренним рабочим давлением [1]. Напряжения от проектного рабочего давления, суммируясь с остаточными напряжениями, могут привести к началу пластического течения материала в локальных зонах. Это обстоятельство может оказаться достаточным для преодоления порогового уровня напряжения разрушения и начала развития трещин от внешне незначительных по размеру поверхностных дефектов [2, 3].

Возникновение внутренних напряжений в конструкционном материале начинается в самом процессе его изготовления. Материал листового проката, из которого изготавливаются трубы большого диаметра, уже содержит некоторые остаточные напряжения, связанные с неравномерностью пластического деформирования и температурного режима при прокатке и последующем "отпуске" металла листов [4, 5].

После окончания процесса формовки трубы в ней имеются остаточные напряжения, связанные с

операцией упруго-пластического изгиба и пластического деформирования листа. Распределение остаточных напряжений по периметру прямошовной трубы весьма неоднородное.

Сварочные напряжения накладываются на технологические, полученные трубной заготовкой в процессе формирования основного профиля на участках подгибки кромок, изгиба основной ширины заготовки и сборки-сварки.

При формовке металл трубы в зонах интенсивной деформации испытывает напряжения, превышающие предел текучести материала и близкие к пределу прочности. С учетом неоднородности структуры металла и включений в металле трубы могут сложиться условия зарождения микродефектов. Зоны с повышенным уровнем остаточных напряжений образуются вследствие интенсивной упруго-пластической деформации заготовки в процессе формовки трубы и имеют определенную привязку по периметру относительно сварного шва [6]. При формовке трубной заготовки происходит деформирование материала. Относительно нейтральной оси стенки трубной заготовки деформация имеет разный знак. В зоне подгибки кромок деформация металла максимальна [7].

При экспансировании происходит правка трубы и она приобретает правильную геометрическую форму. Радиус в зоне подгибки кромок увеличивается, на наружной и внутренней поверхности возникают деформации разного знака: на наружной поверхности трубы — напряжения сжатия, на внутренней поверхности — напряжения растяжения. Раздача трубы (0,8 – 1,2%) приводит к ее пластическому деформированию по всему периметру и перераспределению остаточных напряжений. Деформация металла в разных зонах трубной заготовки зависит от предела текучести материала и коэффициента упрочнения стали при деформировании. Наибольшая пластическая деформация возникает в зоне термического алияния и в прилегающей зоне разупрочненного металла. На большем расстоянии от оси сварного шва (150 мм), в зоне термомодеформационного упрочнения, металл работает преимущественно в упругой области. В этой зоне на поверхности трубы зафиксированы наиболее высокие растягивающие напряжения [7]. Проведенный анализ указывает на то, что технологические особенности производства определяют уровень остаточных напряжений в металле прямошовных сварных труб.

На сегодняшний день средняя продолжительность эксплуатации магистральных газопроводов составляет 30 лет, что для подавляющего большинства газопроводов является проектным ресурсом. Необ-

ходимо отметить, что практически все прямошовные трубы, из которых сварены магистральные газопроводы как импортного, так и отечественного производства, изготовлены на линиях, в основе которых лежит процесс УОЕ формовки трубной заготовки.

В настоящее время в России введена в эксплуатацию новая линия по производству труб большого диаметра (ТБД), основанная на принципиально ином методе формовки трубной заготовки — формовка в вальцах. Существующий опыт поставок труб с новой линии не позволяет делать выводы о влиянии типа формовки на потребительские свойства материала трубы после длительной эксплуатации.

Известно [7 – 9], что степень деградации механических свойств вследствие длительной эксплуатации возможно оценить по склонности к деформационному старению.

Целью работы является исследование изменений комплекса механических свойств и склонности к деформационному старению металла после трубного передела по схеме формовки в вальцах в различных сечениях по периметру трубы.

#### Материал и методика эксперимента

Формовка в вальцах (рис. 1) является одной из современных технологических схем по производству прямошовных сварных ТБД. В настоящее время эта технологическая схема освоена и успешно работает на ОАО «ВТЗ».

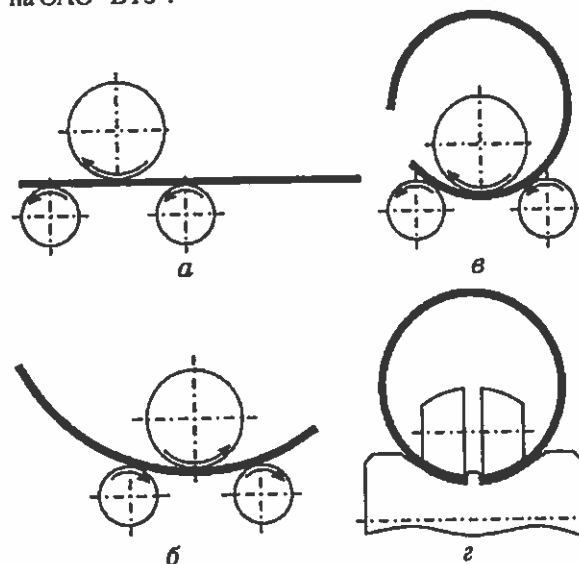


Рис. 1. Основные операции формоизменения трубной заготовки при производстве прямошовных сварных труб большого диаметра: а – в – формовка на вальцах в один или несколько проходов; г – формовка прикромочной зоны в роликовой кассете.

Химический состав металла листа для схемы формовки в вальцах

Содержание элементов, масс. %													
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	V	Nb	As
0,095	0,25	1,69	0,010	<0,002	0,026	0,03	<0,005	0,059	0,029	0,016	0,055	0,048	0,003

Для определения схемы отбора образцов для исследования влияния способа формовки трубной заготовки на состояние металла труб с имитацией длительной эксплуатации были рассмотрены экстремальные сечения профиля трубной заготовки. Выбор экстремальных сечений обусловлен особенностями схем формоизменения по основным деформационным участкам оборудования линий трубоэлектросварочного стана с учетом геометрии профилированного рабочего инструмента, условий контактного взаимодействия инструмента и трубной заготовки [10].

Были выбраны три экстремальных сечения: центр зоны подгиба кромки, "90°" и "дно". На участке подгиба прикромочной зоны (далее "кромка") определяется диапазон ширины и формы подгибаемых кромок в роликовой кассете, при которой за счет непрерывного наезда трубы с прямыми кромками на предварительно настроенную роликовую кассету с разрезной шайбой обеспечиваются заданные параметры кромок перед сборкой и сваркой. В этой зоне происходит непрерывное осевое деформирование в сочетании с поперечным изгибом. Сечения "90°" и "дно" характеризуют процесс поэтапной валковой формовки. При этом возможны смещения и прогибы заготовки в различных сечениях профиля. Вышеперечисленные три сечения дают примерную схему отбора образцов в зависимости от режимов формоизменения тела трубы и прикромочной зоны.

Для исследования изменений комплекса механических свойств после трубного передела были отобраны образцы от листа и готовой трубы размером 1220 × 14 мм после формовки, сварки и экспандирования из того же листа в вышеуказанных сечениях. Темплеты отбирали на расстоянии одной трети ширины листового проката от продольной кромки. Расположение образцов либо совпадает, либо близко к местам отбора образцов на трубной заготовке и готовой трубе. Образцы отбирались в поперечном направлении из средней трети по толщине листового проката и стенки готовой трубы. Выбранный размер образцов позволил не расформовывались темплеты от готовой трубы.

Исследуемая сталь (табл. 1) характеризуется пониженным содержанием углерода (0,095 %), высокой степенью чистоты по вредным примесям

(0,010 % P и 0,002 % S). Сталь микролегирована ниобием, ванадием, что характерно для трубной стали класса прочности K60.

Исследование микроструктуры проводили на оптическом микроскопе Nikon 200MA на микрошлифах, вырезанных в поперечном направлении из металла листа. Травление осуществляли в 4% спиртовом растворе азотной кислоты при комнатной температуре путем смачивания поверхности шлифа. Размер ферритного зерна оценивали по ГОСТ 5639.

Для выявления влияния трубного передела на стандартные механические свойства проводили испытания на растяжение при комнатной температуре на цилиндрических образцах пятикратной длины (тип III, образец № 5 по ГОСТ 1497-84) на универсальной машине "Инстрон".

Для оценки склонности к деформационному старению испытания проводили по методике [7]. Образцы деформировали на 2 % выше площадки текучести с записью диаграммы растяжения, разгрузили, подвергали нагреву при температуре 200 °C в течение 1 часа и повторно испытывали на растяжение с записью диаграммы растяжения. Склонность стали к деформационному старению определяли по величине  $\Delta\sigma$ , — прирост значения  $\sigma_{0,2}$  после старения относительно  $\sigma_{0,2}$  в исходном состоянии.

Низкотемпературные испытания на ударный изгиб проводили на образцах с различными концентраторами напряжений: KCU (тип I по ГОСТ 9454), KCV (тип II по ГОСТ 9454). Испытания проводились при температурах 20 °C, -40 °C, -80 °C, -196 °C. По причине высоких значений ударной вязкости проведение испытаний на образцах с U-образным концентратором напряжений при плюс 20 °C не представлялось возможным.

Для оценки влияния старения на трещиностойкость были проведены испытания на ударный изгиб образцов с предварительно созданной трещиной (тип 15 по ГОСТ 9454-78) в исходном и состаренном состоянии. Испытания проводили при температурах -40 и -80 °C, поскольку именно этот температурный интервал для данных сталей в наибольшей степени отражает переход от вязкого разрушения к хрупкому.

Испытания на статический изгиб проводили на образцах с надрезом Шарпи (тип II по ГОСТ 9454) на

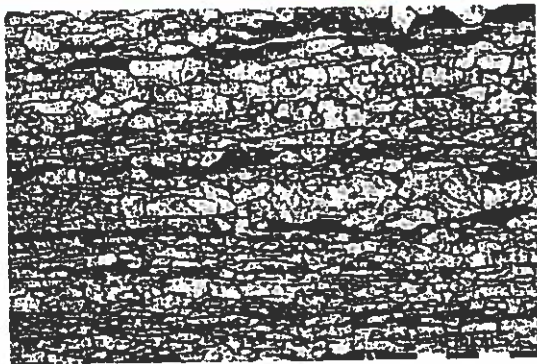


Рис. 2. Микроструктура металла листа для формовки в вальцах,  $\times 400$ .

машине "Инстрон" при скорости движения траверсы 0,2 см/мин. При испытаниях определяли разрушающее напряжение  $\sigma_p$ , напряжения общей текучести  $\sigma_{от}$  и составляющие работы разрушения  $A_n$  — работу зарождения  $A_z$  и распространения  $A_p$  трещины.

Определение температурной зависимости внутреннего трения проводили на релаксаторе типа "обратный крутильный маятник" при частоте колебаний 1,0 Гц. Образец имел квадратное сечение  $1 \times 1$  мм и длину рабочей части 70 мм. Измерение внутреннего трения проводили в амплитудонезависимой области (с амплитудой  $2,2 \cdot 10^{-6}$ ).

Для оценки остаточных напряжений II-го рода на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 определяли микронскажения кристаллической решетки ( $\Delta a/a$ ). Для увеличения точности измерений на дифрактометре записывали в  $FeK_{\beta}$  излучении кривую распределения интенсивности интерференционной линии (301)  $K_{\beta}$  исследуемых образцов и эталона (отожженного железа), а также других линий.

## Результаты и обсуждение

### Исследования микроструктур

Трубы класса прочности К60 производят как из сталей ферритно-перлитного, так и ферритно-бейнитного класса. Внешний вид микроструктуры металла листа для формовки в вальцах представлен на рис. 2. Видно, что прокат имеет в основном ферритно-перлитную микроструктуру. Осевая зона выражена слабо.

### Испытание на растяжение

Значение временного сопротивления  $\sigma_b$  для листа составляет 652 Н/мм<sup>2</sup>. После трубного передела

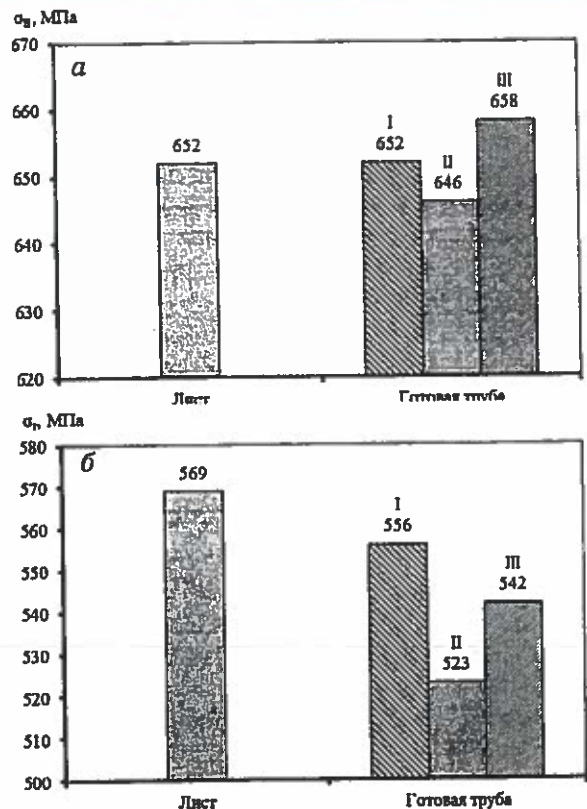


Рис. 3. Влияние трубного передела и места отбора образцов на временное сопротивление и предел текучести: а — временное сопротивление, б — предел текучести (I — "кромка"; II — "дно"; III — "90°").

средний уровень значений временного сопротивления остается на уровне значений для листа. По периметру готовой трубы прочностные показатели различаются незначительно (рис. 3). Максимальное значение имеет металл в области "90°", а минимальное 646 Н/мм<sup>2</sup> — в области "дна".

На предел текучести трубный передел влияет в большей степени, снижая его в среднем на 5%, что, по-видимому, является следствием эффекта Баушингера. Можно отметить, что при испытании образцов из металла листа на диаграммах растяжения наблюдается площадка текучести, которая исчезает в металле готовой трубы независимо от места вырезки образцов. Это, вероятно, является следствием возрастания равномерного общего накопления деформации. Максимум предела текучести (556 Н/мм<sup>2</sup>) имеет металл в области "кромки", что, по-видимому, является следствием большей степени суммарной деформации, а минимум — металл в области дна.

Относительные удлинение и сужение в металле листа и готовой трубы почти не различаются.

### Испытания на ударный изгиб

При температуре испытаний  $-40^{\circ}\text{C}$  значения ударной вязкости КСУ в металле листа несколько ниже ( $273 \text{ Дж/см}^2$ ), чем в металле готовой трубы в области "кромки" ( $303 \text{ Дж/см}^2$ ) и "дна" ( $309 \text{ Дж/см}^2$ ), но выше, чем в области  $90^{\circ}$  ( $246 \text{ Дж/см}^2$ ). При температуре испытаний  $-80^{\circ}\text{C}$  минимальное значение ударной вязкости отмечено для металла листа —  $209 \text{ Дж/см}^2$ . По всем сечениям готовой трубы ударная вязкость выше, чем в листе, а максимум значений приходится на металл "дна" —  $250 \text{ Дж/см}^2$  (рис. 4). При температуре испытаний  $-196^{\circ}\text{C}$  значения КСУ резко снижаются до уровня  $8,5 - 13 \text{ Дж/см}^2$  и становятся близкими, независимо от места отбора проб и стадии трубного передела.

При испытаниях на ударный изгиб образцов с острым надрезом (тип II по ГОСТ 9454) при  $+20^{\circ}\text{C}$  наблюдается повышение уровня ударной вязкости в металле готовой трубы по сравнению с листом, за исключением области  $90^{\circ}$  ( $266,5 \text{ Дж/см}^2$ ). При снижении температуры до  $-40^{\circ}\text{C}$  минимальное значение КСВ достигается в металле листа, а максимальное в трубе, в области "дна". При температуре  $-80^{\circ}\text{C}$  минимальное значение ударной вязкости по-прежнему достигается в металле листа ( $144 \text{ Дж/см}^2$ ), а в металле готовой трубы место вырезки образца перестает играть ведущую роль, разброс значений незначителен ( $160,5 - 168,5 \text{ Дж/см}^2$ ). При снижении температуры до  $-196^{\circ}\text{C}$  место выбора проб не

оказывает влияния на уровень значений ударной вязкости ( $8,5 - 9 \text{ Дж/см}^2$ ).

В листе и в готовой трубе в температурном интервале от  $+20$  до  $-196^{\circ}\text{C}$  переход от U-образного концентратора напряжений к V-образному оказывает заметное влияние на значения ударной вязкости. Во всех местах вырезки образцов переход к острому концентратору напряжений снижает значение ударной вязкости, так при температуре испытаний  $-40^{\circ}\text{C}$  снижение составило  $15 - 20\%$ , при температуре испытаний минус  $80^{\circ}\text{C}$  —  $25 - 30\%$ .

В целом, трубный передел повышает ударную вязкость в среднем на  $10\%$  вне зависимости от температуры испытаний, места отбора образцов и типа надреза. Исключением являются образцы, вырезанные из области  $90^{\circ}$ , при температуре испытаний  $-20^{\circ}\text{C}$ , где ударная вязкость ниже, чем у металла листа.

При температуре испытаний  $-40^{\circ}\text{C}$  и  $-80^{\circ}\text{C}$  доля вязкой составляющей в изломе на образцах с круглым и острым надрезом составляет  $100\%$  и  $95\%$ , соответственно. Доля вязкой составляющей не меняется на образцах с круглым и острым надрезом после трубного передела и по окружности готовой трубы.

### Испытания на статический изгиб

При испытаниях на сосредоточенный изгиб трубный передел незначительно снижает значения разрушающего напряжения,  $\sigma_p$ , максимально на  $6\%$  в области "кромки" (рис. 5). Предел общей текучести  $\sigma_{от}$  также снижается по всему сечению трубы. Это

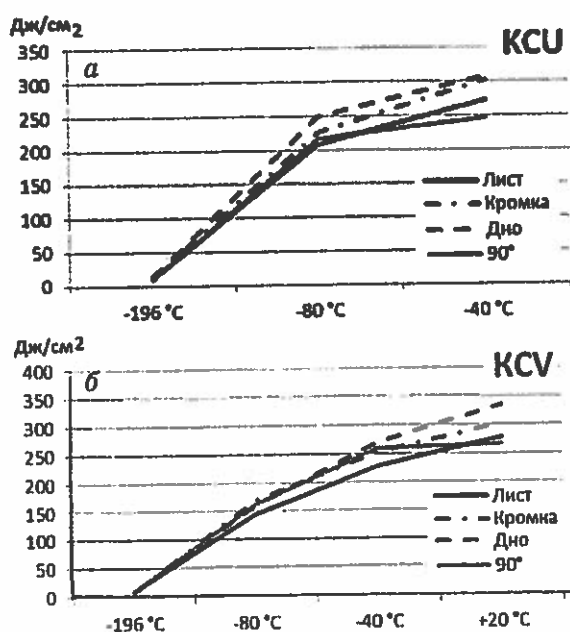


Рис. 4. Влияние трубного передела на температурную зависимость ударной вязкости: а – образцы типа КСУ; б – образцы типа КСВ.

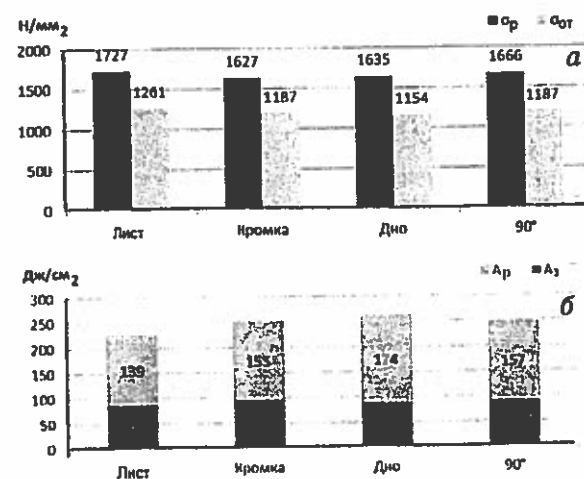


Рис. 5. Влияние трубного передела на параметры сопротивления разрушению: а – разрушающее напряжение и предел общей текучести, б – работа зарождения и распространения трещины.

снижение в области “дна” достигает 8 %. Трубный передел не оказывает значительного влияния на величину работы зарождения трещины  $A_z$ . Работа распространения трещины  $A_p$  в металле готовой трубы увеличивается, по сравнению со значением в металле листа, максимальное значение достигается в области “дна” (173,5 Дж/см<sup>2</sup>).

Таким образом, при статических испытаниях в результате трубного передела работа зарождения трещины практически не меняется, а работа распространения трещины существенно возрастает.

### Испытания на ударный изгиб образцов с усталостной трещиной

Также как при испытаниях на статический изгиб, трубный передел повышает работу распространения трещины, то есть среднее значение ударной вязкости на образцах с предварительно созданной трещиной относительно уровня листа на 15 – 25 Дж/см<sup>2</sup> в исходном состоянии (рис. 6). Максимальное значение ударной вязкости при температуре испытаний –40 °С достигается в области “кромки”, как в исходном состоянии (88,5 Дж/см<sup>2</sup>), так и после искусственного старения (91 Дж/см<sup>2</sup>), а минимальное — в области “дна”.

При температуре испытаний –80 °С сохраняется разброс значений по окружности готовой трубы на уровне 11 %, уровень значений снижается в среднем до 44 Дж/см<sup>2</sup>. Необходимо отметить, что мини-

мальные значения зафиксированы для области “кромка” (41 Дж/см<sup>2</sup>).

Старение приводит к значительному разбросу значений ударной вязкости по периметру готовой трубы — более 20 Дж/см<sup>2</sup>, при этом среднее значение в результате старения снижается всего на 5 %. На образцах с усталостной трещиной доля вязкого волокна незначительно снижается при температуре испытаний –40 °С в среднем до 92,5 % (табл. 2), по сравнению с долей волокна на образцах с круглым и острым надрезом. Дополнительное старение практически не влияет на долю вязкой составляющей (средняя 87,5%).

Таблица 2

Доля вязкости составляющей в изломе образцов с усталостной трещиной при температурах испытания –40 °С и –80 °С в исходном и состаренном состоянии

Содержание вязкого волокна, %	Состояние КСТ			
	исходное		состаренное	
	–80 °С	–40 °С	–80 °С	–40 °С
Лист	25	90	—	—
Кромка	35	90	7,5	90
Дно	60	90	20	90
90°	40	100	20	90

При температуре испытаний –80 °С доля вязкой составляющей снизится в среднем до 40 %, при этом наблюдается значительный разброс значений по сечению готовой трубы. Так минимальные значения зафиксированы для области “кромка” (35 %), максимальные для области “дно” (60 %). После старения при температуре испытаний –80 °С доля вязкой составляющей достигает относительно минимальных значений (в среднем 13,75 %). Распределение значений по сечению готовой трубы после старения сохраняется — минимальные значения зафиксированы для области “кромка” (7,5 %).

Можно полагать, что в результате трубного передела и деформационного старения сопротивление распространению трещины (КСТ) возрастает, по сравнению с листом, а следовательно, сопротивление зарождению трещины несколько снижается, причем в наибольшей мере в области “кромка”. Некоторое снижение работы зарождения трещины при динамических испытаниях, по-видимому, связано с более жестким видом испытаний, по сравнению со статическим разрушением.

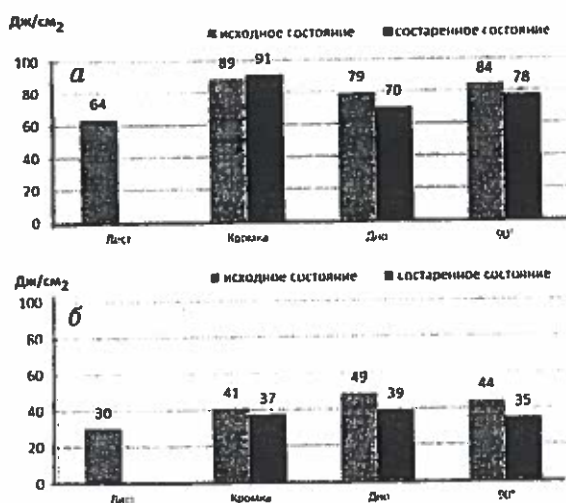


Рис. 6. Влияние трубного передела на склонность к старению при испытании на ударный изгиб образцов с трещиной при формовке в вальцах: а — при температуре испытаний –40 °С, б — при температуре испытаний –80 °С.

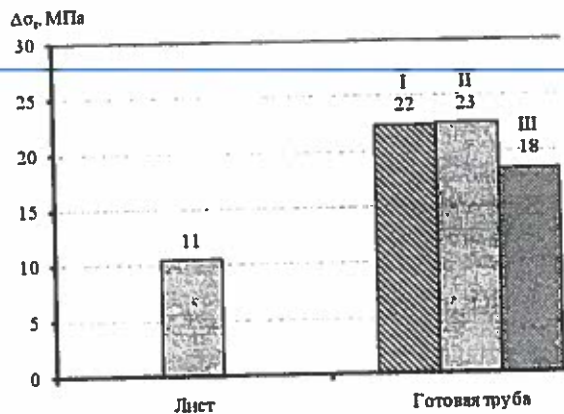


Рис. 7. Склонность к деформационному старению, I – “кромка”; II – “дно”; III – “90°”.

### Испытания на склонность к деформационному старению

Минимальный прирост предела текучести в результате деформационного старения наблюдается для металла листа ( $\Delta\sigma_{ст} = 11 \text{ Н/мм}^2$ ), а в металле

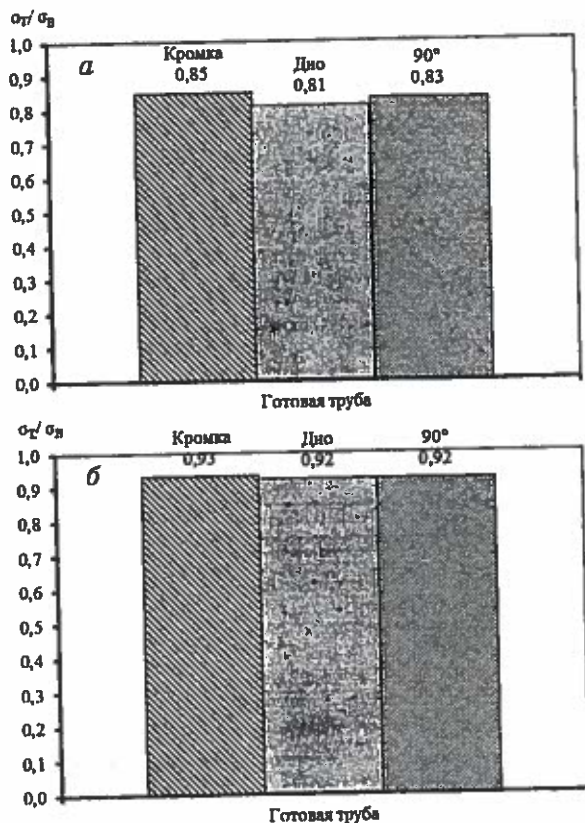


Рис. 8. Изменение соотношения предела текучести к временному сопротивлению после деформационного старения: а – исходное состояние, б – после деформационного старения

готовой трубы он увеличивается примерно в 2 раза (рис. 7). Можно отметить, что наибольшая склонность к деформационному старению в металле готовой трубы отмечена в области “кромки” и “дна” ( $\Delta\sigma_{ст} = 23 \text{ Н/мм}^2$ ).

Для стали типа 17ГС с содержанием углерода (0,16–0,19 %) и азота (0,006–0,008) в горячекатаном или нормализованном прирост предела текучести в результате деформационного старения составляет примерно 90–110 Н/мм<sup>2</sup>. Даже после длительной эксплуатации, например, в течении 30–40 лет на нефтепроводах, в зависимости от уровня рабочих давлений прирост предела текучести составляет 48–56 Н/мм<sup>2</sup> [7]. Очевидно, столь низкое абсолютное значение прироста предела текучести связано с технологией производства листа и низким содержанием примесей внедрения.

Отношение  $\sigma_t/\sigma_v$  в исходном состоянии в готовой трубе составляет 0,81–0,85 (рис. 8а). Деформационное старение повышает это соотношение до 0,92–0,93 (рис. 8б), что является следствием повышения предела текучести. Столь высокое значение  $\sigma_t/\sigma_v$  может неблагоприятно сказываться на надежности труб при длительной эксплуатации.

### Рентгеноструктурный анализ микроискажений кристаллической решетки

Формовка трубной заготовки повышает уровень остаточных микронапряжений в среднем на 46 % (рис. 9). Увеличение микроискажений кристаллической решетки в результате трубного передела является следствием накопленной пластической деформации, однако, существенного различия в величине искажений по сечению готовой трубы не обнаружено.

### Температурная зависимость внутреннего трения

Для исследования причин влияния трубного передела на склонность к деформационному старению

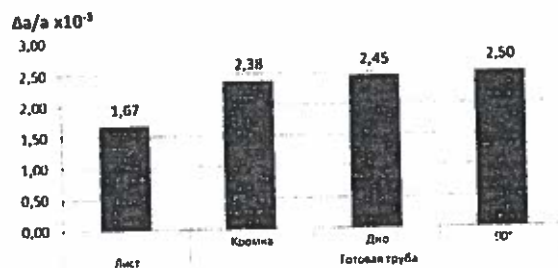


Рис. 9. Изменение величины остаточных микронапряжений II рода.

Результаты исследования температурной зависимости внутреннего трения

Место отбора проб	До старения				После старения			
	Пик Сноека		Пик Кестера		Пик Сноека		Пик Кестера	
	$T, ^\circ\text{C}$	$Q^{-1} \cdot 10^{-4}$	$T, ^\circ\text{C}$	$Q^{-1} \cdot 10^{-4}$	$T, ^\circ\text{C}$	$Q^{-1} \cdot 10^{-4}$	$T, ^\circ\text{C}$	$Q^{-1} \cdot 10^{-4}$
Лист	50	4,4	210	5,2	—	—	200	3
Готовая труба								
“Кромка”	100	4,2	283	6,0	70	2,4	240	3,6
“90°”	62	4,2	223	4,0	—	—	220	3,4
“Дно”	95	3,2	270	11,6	—	—	235	6

нию и параметры трещиностойкости проводили измерение температурной зависимости внутреннего трения, в частности высоты и положения пиков Сноека и Кестера.

Известно, что процесс деформационного старения железа и стали связан с взаимодействием атомов внедрения с дислокациями, затрудняющими их движение, что приводит к повышению предела текучести и снижению пластичности [8, 9]. При этом происходит снижение высоты пика Сноека. Пик Кестера отражает деформационные процессы и накопление дефектов в материале [11].

Исследовали температурную зависимость внутреннего трения образцов металла листа и готовой трубы, отобранные в области “кромки”, “90°” и “дна” в исходном состоянии и после искусственного старения, имитирующего длительную эксплуатацию. Результаты представлены в табл. 3.

До старения в листе высота пика Сноека составляет  $4,4 \cdot 10^{-4}$ . Высота данного пика примерно в 2 раза ниже, чем у трубной стали типа 17ГС ферритно-перлитного класса в горячекатаном или нормализованном состоянии с содержанием углерода (0,16–0,19%) и азота (0,006–0,008%). Это очевидно связано с исходно более низким содержанием примесей внедрения в твердом растворе исследуемой стали и особенностями технологии контролируемой прокатки. Известно, что максимум Сноека на кривых ТВЗТ наблюдается в том случае, когда содержание примесей внедрения больше  $2 \cdot 10^{-4}$  % [8, 9]. В результате трубного передела высота пика Сноека в металле в области подгиба кромки и “90°” практически не изменяется, а в области “дна” снижается до  $3,2 \cdot 10^{-4}$ . Можно отметить смещение положения пиков Сноека и Кестера в сторону повышения температуры.

Значительно сильнее трубный передел влияет на пик Кестера. Его среднее значение возрастает примерно на 30 %, но по периметру трубы высота пика Кестера различается более, чем в 2 раза: максимум достигается в зоне “дна”, а минимум — в

зоне “90°”. Рост высоты деформационного пика Кестера, по-видимому, является следствием увеличения плотности дислокаций и появления локальных остаточных микронапряжений [11].

После искусственного старения в металле трубы пик Сноека сохраняется только в металле “кромки”, но его высота составляет всего  $2,4 \cdot 10^{-4}$ . Высота пика Кестера в результате старения снижается примерно вдвое, причем как в металле листа, так и в металле трубы. Максимум высоты пика Кестера достигается в зоне “дна” и составляет  $6 \cdot 10^{-4}$ .

Таким образом, трубный передел по схеме формовки в вальцах труб большого диаметра и последующее старение существенным образом влияют на комплекс физико-механических свойств стали класса прочности К60. Установлено, что трубный передел не оказывает существенного влияния на прочностные и пластические показатели, за исключением предела текучести, который вследствие трубного передела снижается в среднем на 5 %. По периметру готовой трубы показатели прочности и пластичности различаются незначительно. Вследствие высокой накопленной деформации в области “кромка” получены минимальные значения временного сопротивления, относительного удлинения и сужения и максимальные значения предела текучести.

В целом, трубный передел несколько повышает ударную вязкость относительно уровня листа в среднем на 10%. При испытании образцов с трещиной трубный передел повышает среднее значение ударной вязкости относительно уровня листа на 20 Дж/см<sup>2</sup>. В результате старения возникает существенный разброс значений ударной вязкости по периметру трубы и снижение его среднего значения на 5 %. Максимум значений КСТ при температуре испытания  $-40$  °C достигается в области “кромки”, при этом при температуре испытания  $-80$  °C в области “кромка” зафиксированы минимальные значения.

Испытания на статический изгиб выявили снижение прочностных показателей на 6–8 %. При этом



в среднем на 12 % возросла суммарная работа разрушения.

Интересно отметить обнаруженный необычный результат повышения сопротивления разрушению, в основном за счет увеличения работы распространения трещины в ходе трубного передела способом деформации листовой заготовки в вальцах. Казалось бы, деформация трубной стали при формовке трубы должна не повышать, а понижать сопротивление разрушению вследствие исчерпания пластичности металла. Однако на самом деле этого не наблюдается.

Можно полагать, что некоторое повышение сопротивления распространению трещины в результате формовки трубы в вальцах происходит по следующим причинам. Прежде всего следует учесть, что при формовке трубы степень деформации мала (не более 2 %), то есть металл подвергается малым пластическим деформациям. Можно предположить, что достаточно низкий уровень пластической деформации при формовке в вальцах способствует отрыву дислокаций от атмосфер атомов внедрения и повышает их подвижность. Малая степень деформации при переделе лист-труба недостаточна для массового генерирования новых дислокаций и протекания процесса деформационного упрочнения. Повышение подвижности дислокаций подтверждается ростом пика Кестера на кривой температурной зависимости внутреннего трения. При этом наблюдается некоторое снижение предела текучести, на диаграмме растяжения пропадает площадка текучести, и, что самое важное, возрастает предел общей текучести и работа распространения трещины при испытаниях на статический изгиб, то есть фактически облегчается процесс локальной пластической деформации перед концентратором напряжений.

Известно, что сопротивление распространению трещины зависит от величины интенсивности напряжений в ее вершине и возможность протекания процессов их релаксации [12]. Таким образом, некоторое повышение сопротивления распространению трещины в результате формовки трубы в вальцах, по-видимому, является следствием обеспечения релаксации напряжений перед вершиной, связано с повышением подвижности дислокаций.

Из полученных результатов следует, что трубный передел при формовке в вальцах оказывает неоднозначное влияние на сопротивление разрушению металла трубы. Причем влияние это меняется в зависимости от места вырезки образцов по периметру трубы. По ряду показателей, особенно в условиях жестких методов испытания (образцы с трещиной, низкие температуры) в наибольшей

степени трубный передел оказывает влияние на металл в области "кромка" и "90°".

Металл листа имеет очень низкое значение прироста предела текучести в результате деформационного старения. Трубный передел повышает  $\Delta\sigma_y$ , примерно, в 2 раза. Также наблюдается рост отношения  $\sigma_y/\sigma_b$ , до уровня 0,92 – 0,93 относительно исходного состояния — 0,81 – 0,85. Столь высокое значение  $\sigma_y/\sigma_b$ , вероятно, является одной из особенностей трубных сталей контролируемой прокатки. Наиболее склонен к деформационному старению металл в области "кромки".

Можно полагать, что интенсивность деградационных процессов (деформационное старение, старение, микродеформация, накопление локальных внутренних микронапряжений и дефектов) в ходе длительной эксплуатации труб, изготовленных методом формовки в вальцах, будет зависеть от степени деформационного воздействия в разных участках по сечению трубы. Наиболее уязвимым с этой точки зрения участком в трубе, по-видимому, являются области "кромки" и "дна", где возникшие при формовке особенности структурного состояния наследуются при дальнейшем трубном переделе.

## Выводы

1. С учетом геометрии профилированного рабочего инструмента, условий контактного взаимодействия инструмента и трубной заготовки на линии формовки в вальцах выявлены три экстремальных сечения по периметру трубы, условно обозначенные: "кромка", "90°" и "дно".
2. Трубный передел по схеме формовки в вальцах снижает предел текучести на 5 % и не оказывает отрицательного влияния на временное сопротивление и пластичность (относительное удлинение и сужение).
3. Трубный передел по схеме формовки в вальцах незначительно увеличивает ударную вязкость, в среднем на 10% относительно листового проката. Максимальное увеличение отмечено на образцах с предварительно созданной трещиной, которое составляет 18 Дж/см<sup>2</sup>, что свидетельствует о повышении работы распространения трещины. При этом работа зарождения трещины изменяется в меньшей степени. Чувствительность к надрезу в результате трубного передела практически не изменяется, при переходе с круглого к острому надрезу снижение составляет 20 – 30 %. Трехкратное снижение наблюдается на образцах с усталостной трещиной.
4. Показано, что при стандартных испытаниях формовки в вальцах не оказывает существенного

влияния на свойства по сечению трубы. Однако при нестандартных испытаниях (образцы с трещиной, деформационное старение) наиболее неблагоприятными являются области "кромка" и "дно".

5. Установлено, что трубный передел увеличивает в два раза прирост предела текучести после деформационного старения и повышает отношение  $\sigma_t/\sigma_b$  от 0,83 до 0,93, что является следствием повышения склонности к деформационному старению. Это подтверждается снижением или исчезновением пика Сноэка на кривых температурной зависимости внутреннего трения после старения.

6. Высказано предположение, что развитие деградационных процессов при длительной эксплуатации труб, изготовленных методом формовки в вальцах, должно зависеть от степени деформационного воздействия в локальных областях по сечению трубы в ходе ее деформации.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-08-02119.*

#### Литература

1. Будзуляк Б.Ф. Вступительное слово. / В кн.: Материалы семинара по коррозионному растрескиванию трубопроводов под напряжением. М.: ИРЦ ОАО "Газпром". 1999. С. 3 – 5.
2. Шабалов И.П., Самусев С.В., Соловьев Д.М., Филиппов Г.А. Определение экстремальных сечений трубной заготовки различных технологических схем производства для проведения исследований потребительских свойств труб магистральных газопроводов. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2012. № 2. С. 94 – 100.
3. Шабалов И.П., Самусев С.В., Соловьев Д.М., Филиппов Г.А. Оценка максимально нагруженных участков трубной заготовки при ее производстве в линиях с пошаговой схемой формовки. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2012. № 3. С. 94 – 100.
4. Самусев С.В., Фортунатов А.Н. Методы расчета напряженно-деформированного состояния при производстве сварных труб в линии ТЭСА: сборник задач. М.: ВФ МИСиС, 2008, 135 с.
5. Голованенко С.А., Чевская О.Н. Влияние контролируемой прокатки на характер разрушения мало-перлитных сталей для сварных труб большого диаметра. // Сталь 1984. № 12. С. 51 – 55.
6. Самусев С.В., Величко А.А., Люскин А.В., Андреев Ю.П., Воронцов А.Н., Бельдт В.В. Технологические режимы процесса формоизменения заготовки в линии ТЭСА 1420 ЗАО "Ижорский трубный завод". // Изв. Вуз. Черная металлургия. 2009. № 9. С. 18 – 21.
7. Филиппов Г.А., Ливанова О.В. Деградационные процессы и их влияние на трещиностойкость трубных сталей после длительной эксплуатации. /В кн.: Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов: Сб. трудов научно-практ. семинара. Н. Новгород: Университетская книга. 2006. С. 196 – 209.
8. Головин С.А., Пушкар А. Микропластичность и усталость металлов. М.: Металлургия, 1980, 239 с.
9. Суворова С.О., Саррак В.И., Энтин Р.И. Исследование деформационного старения технического железа. // ФММ. 1964. Т. 17. № 1. С. 105 – 111.
10. Шинкин В.Н., Коликов А.П. Моделирование процесса формовки заготовки для труб большого диаметра. // Сталь. 2011. № 1. С. 54 – 58.
11. Левин Д.М., Чуканов А.Н., Муравлева Л.В. Исследование повреждаемости трубных сталей по эффектам неупругой релаксации. // Вестник Тамбовского унив. 1998. № 3. С. 315 – 318.
12. Мишин В.М., Филиппов Г.А. Физика замедленного разрушения сталей. Миниральные воды: Полиграф-пром, 2013, 455 с.