

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОРОДОСТОЙКОСТИ СТАЛИ ЭИ481-Ш (37Х12Н8Г8МФБ-Ш)

*А. Н. Дмитриенко, И. Е. Бойцов, И. П. Максимкин, Н. Ю. Туманова,  
Ю. А. Хабаров, Е. В. Шевнин, А. А. Юхимчук*

РФЯЦ – Всероссийский научно-исследовательский институт  
экспериментальной физики, г. Саров, Россия

Представлены результаты исследования механических свойств и водородостойкости стали ЭИ481-Ш, ее сварных и паяных соединений.

В первой части работы приведены результаты испытаний стандартных цилиндрических образцов на растяжение в водороде и гелии при давлении 80 МПа в интервале температур от комнатной до + 600 °С, целью которых являлось решение следующих задач:

– оценить водородостойкость стали в интервале температур от комнатной до + 600 °С;

– исследовать механические свойства и водородостойкость сварного соединения стали ЭИ481-Ш (сталь ЭИ481-Ш + сталь ЭИ481-Ш), выполненного электроннолучевой сваркой (ЭЛС), для оценки возможности ее применения для сварных конструкций, работающих в контакте с водородом;

– исследовать механические свойства и водородостойкость сварного соединения стали ЭИ481-Ш со сталью 12Х18Н10Т, выполненного ЭЛС, для оценки возможности применения сварки штуцеров из стали ЭИ481-Ш с трубками из стали 12Х18Н10Т при изготовлении трубопроводов систем высокого давления (СВД).

Вторая часть работы заключалась в исследованиях прочности и водородостойкости стали ЭИ481-Ш и ее паяных соединений с трубкой из стали 12Х18Н10Т на макетах трубопроводов СВД с несквозной пайкой штуцеров, изготовленных из стали ЭИ481-Ш.

### Введение

При контакте конструкционных материалов (КМ) с водородом и водородо-содержащими средами их свойства могут ухудшаться – явление, известное как «водородное охрупчивание» металлов и сплавов. Деградация эксплуатационных свойств КМ в результате «водородного охрупчивания» может привести к непредсказуемому разрушению конструкций. Поэтому проблема исследования воздействия водорода на механические свойства КМ является актуальной при выборе и назначении материалов конструкций СВД, контактирующих с водородом.

Исследование стали ЭИ481-Ш в качестве перспективного конструкционного материала элементов СВД, контактирующих с изотопами водорода, началось не так давно и главным образом связано с тем, что в основном часто используемые на практике стали при высоком давлении (выше 200 МПа) водорода не обладают достаточной водородной прочностью.

Проведенную работу по исследованию водородной прочности стали ЭИ481-Ш можно условно разделить на две части:

1) Первая часть работы включала исследования механических свойств и водородостойкости стали ЭИ481-Ш и ее сварных соединений по результатам сравнительных испытаний стандартных цилиндрических образцов на растяжение в водороде и гелии при давлении 80 МПа в интервале температур от комнатной до + 600 °С. В этой части работы предусматривалось решение следующих задач:

– оценить водородостойкость стали в интервале температур от комнатной до + 600 °С;

– исследовать механические свойства и водородостойкость сварного соединения стали ЭИ481-Ш (сталь ЭИ481-Ш + сталь ЭИ481-Ш), выполненного электроннолучевой сваркой (ЭЛС), для оценки возможности ее применения в качестве КМ сварных конструкций, работающих в контакте с водородом;

– исследовать механические свойства и водородостойкость сварного соединения стали ЭИ481-Ш со сталью 12Х18Н10Т, выполненного ЭЛС, для оценки возможности применения сварки штуцеров из стали ЭИ481-Ш с трубками из стали 12Х18Н10Т при изготовлении трубопроводов.

2) Вторая часть работы заключалась в определении несущей способности макетов трубопроводов (паяное соединение штуцера из стали ЭИ481-Ш с трубкой из стали 12Х18Н10Т) при нагружении давлением водорода.

### Объект и методика исследований

Исследованиям подвергалась сталь ЭИ481-Ш, которая относится к жаропрочным аустенитным сталям с карбидным упрочнением (химический состав стали ЭИ481-Ш см. табл. 1). Исследования проводились на стандартных (тип IV, № 9 ГОСТ1497-84) цилиндрических образцах с диаметром рабочей части 3 мм и на макетах трубопроводов со штуцерами из стали ЭИ481-Ш.

Таблица 1

Химический состав стали ЭИ481-Ш (в %)

C	Mn	Cr	Ni	Si	Cu	Mo	V	Nb	Fe	S	P	Ti
0,37	8,35	12,05	7,55	0,7	0,12	1,2	1,4	0,44	Основа	0,004	0,015	0,02

Прочность и водородостойкость трубопроводов СВД с паяными соединениями штуцеров из стали ЭИ481-Ш и трубок из стали 12Х18Н10Т оценивались по результатам испытаний на несущую способность давлением водорода макетов, конструкция которых представлена на рис. 1.

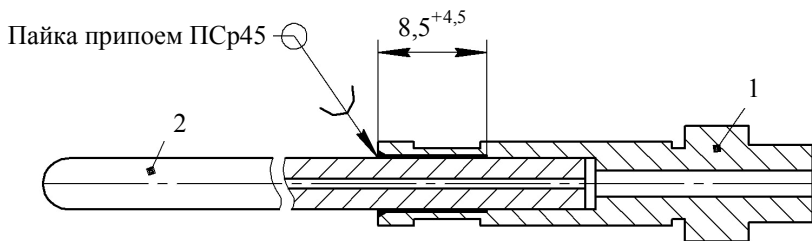


Рис. 1. Макет трубопровода: 1 – штуцер из стали ЭИ481-Ш; 2 – трубка из стали 12Х18Н10Т

Стандартные образцы испытывались на растяжение в водороде и гелии при давлении 80 МПа в интервале температур от комнатной до + 600 °. Устройство и технические характеристики установки для испытаний в газовых средах высокого давления, методика испытаний и погрешности измерений описаны в работе [1]. Скорость перемещения подвижной тяги при растяжении составляла 1,98 мм/мин, что соответствовало скорости деформации образца  $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

Растяжение цельных образцов в водороде и гелии проводилось при температурах 20, 200, 300, 400, 500 и 600 °С. Растяжение цельных образцов после их часовой выдержки в среде водорода, а также сварных образцов в водороде и гелии осуществлялись при 20, 300 и 600 °С. Для каждого вида испытаний при каждой температуре испытанию подвергалось по два образца.

По результатам испытаний в соответствии с ГОСТ 1497-84 определялись следующие характеристики механических свойств:  $\sigma_B$  – временное сопротивление;  $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести;  $\delta_5$  – относительное удлинение после разрыва;  $\psi$  – относительное сужение после разрыва.

Испытания макетов трубопроводов со штуцером из стали ЭИ481-Ш на несущую способность давлением водорода проводились на установке высокого давления в условиях, соответствующих режимам эксплуатации конкретных СВД (см. ниже п. 1.4, табл. 2).

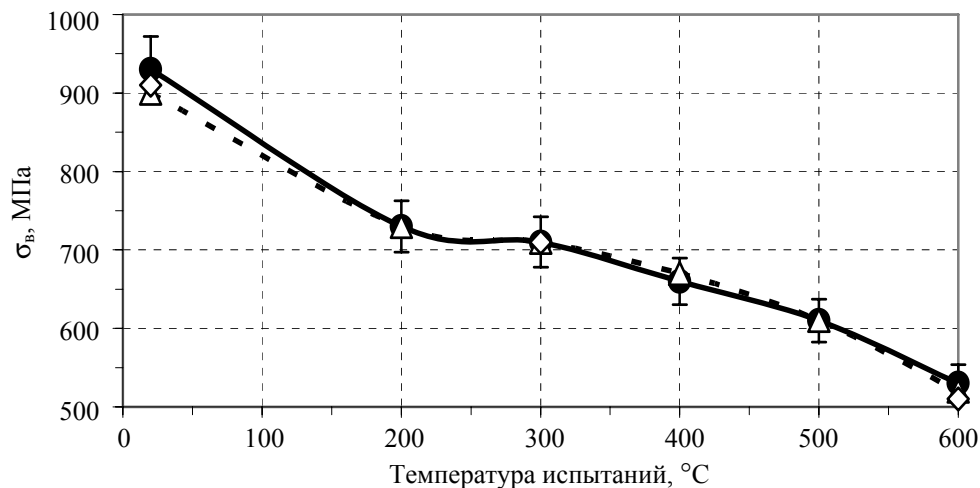
## Результаты исследований

### *Результаты испытаний цельных образцов из стали ЭИ481-Ш на растяжение*

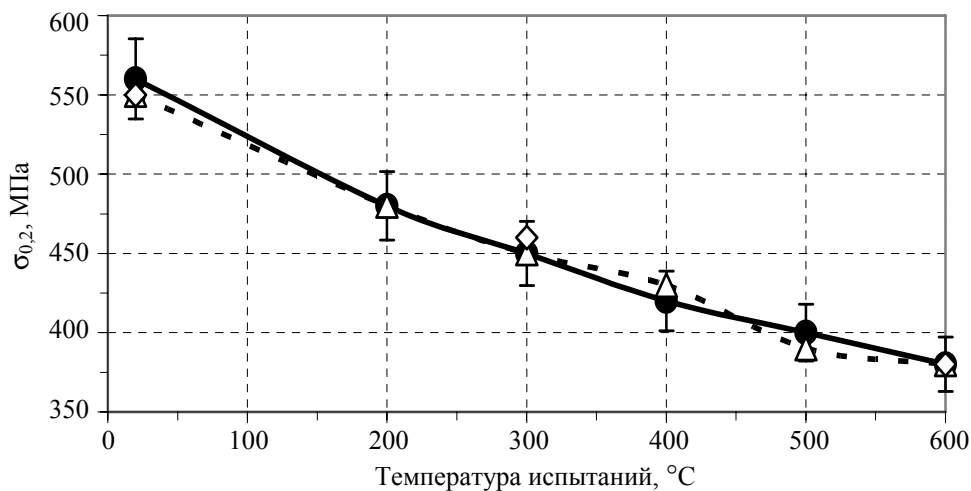
Результаты испытаний цельных образцов из стали ЭИ481-Ш на растяжение в водороде и гелии при давлении 80 МПа в интервале температур от комнатной до 600 °С приведены на рис. 2, 3.

Из рис. 2 видно, что прочностные характеристики стали монотонно снижаются с повышением температуры и имеют минимальные значения при температуре 600 °С. По сравнению с комнатной температурой, при 600 °С  $\sigma_B$  уменьшилось на 43 %, а  $\sigma_{0,2}$  – на 32 %. Воздействие водорода не оказало заметного влияния на прочностные характеристики стали во всем интервале температур, как при кратковременных испытаниях, так и после выдержки образцов

в среде водорода в течение часа. Максимальное снижение величины временного сопротивления (на 3 %), вызванное водородом, наблюдается при комнатной температуре и не превышает погрешности измерений [1].



а

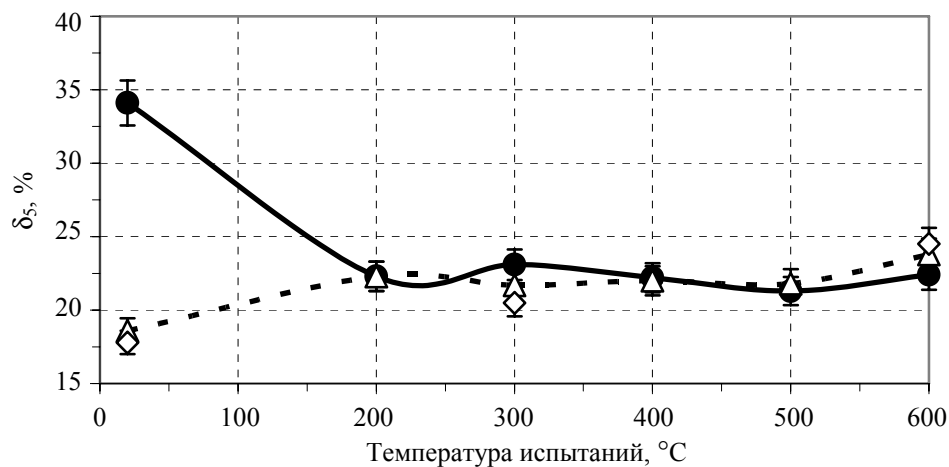


б

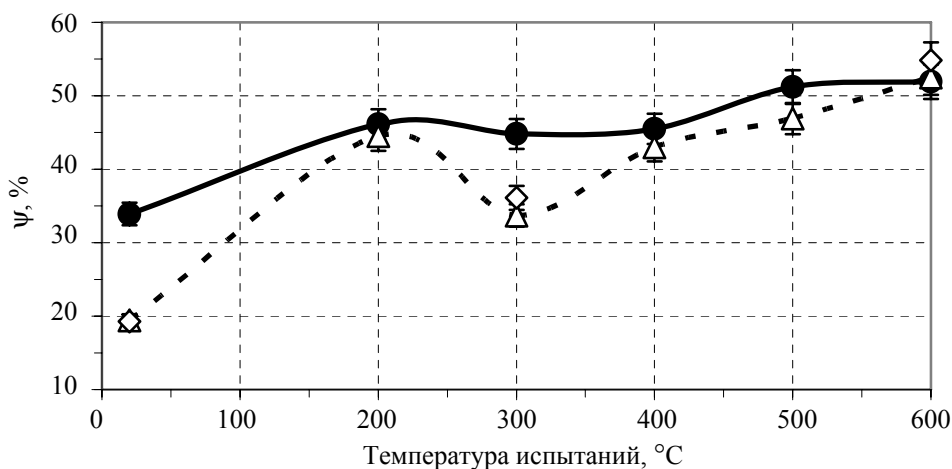
Рис. 2. Прочностные характеристики стали ЭИ481-Ш в водороде и гелии: а) временное сопротивление разрушению; б) условный предел текучести: ● — испытания в среде гелия при давлении 80 МПа; ••△•• — кратковременные (время выдержки образцов в водороде до начала их растяжения  $5^{+1}$  мин) испытания в водороде при давлении 80 МПа; ◇ — часовые (время выдержки образцов в водороде до начала их растяжения 1 ч) испытания в водороде при давлении 80 МПа

Также воздействие водорода на сталь ЭИ481-Ш практически не повлияло и на характеристики пластичности (рис. 3) при температурах 200, 400, 500 и 600 °C. Лишь при температурах 20 и 300 °C наблюдается вызванное водородом

дом снижение пластичности стали. В наибольшей степени водородное охрупчивание стали проявилось при комнатной температуре – относительное удлинение уменьшилось на 46 %, а относительное сужение на 43 %. При этом по величине характеристики пластичности в водороде при комнатной температуре остаются на достаточно высоком уровне –  $\delta_5$  и  $\psi \approx 19$  %. Также следует отметить, что увеличение времени воздействия водорода на образцы с пяти минут до одного часа не повлияло на степень водородного охрупчивания стали.



а



б

Рис. 3. Характеристики пластичности стали ЭИ481-Ш в водороде и гелии: а) относительное удлинение; б) относительное сужение после разрыва: ● – испытания в среде гелия при давлении 80 МПа; ▲ – кратковременные (время выдержки образцов в водороде до начала их растяжения 5<sup>+1</sup> мин) испытания в водороде при давлении 80 МПа; ◇ – часовые (время выдержки образцов в водороде до начала их растяжения 1 ч) испытания в водороде при давлении 80 МПа

**Результаты испытаний на растяжение сварных образцов  
из стали ЭИ481-Ш**

Результаты испытаний на растяжение сварных образцов из стали ЭИ481-Ш (сталь ЭИ481-Ш + сталь ЭИ481-Ш) в водороде и гелии при давлении 80 МПа и температурах 20, 300 и 600 °С приведены на рис. 4. Для сравнения на рис. 4 приведены характеристики механических свойств цельных образцов из стали ЭИ481-Ш, полученные в гелии (см. п. 3.1).

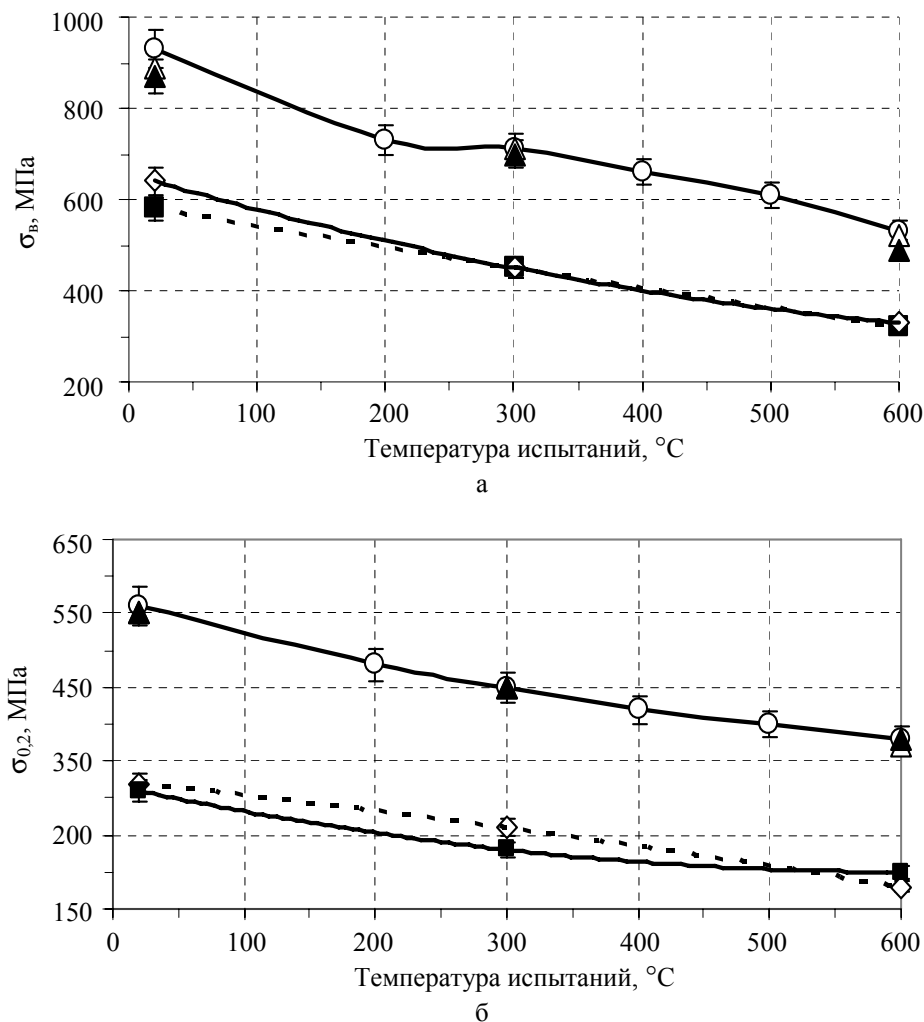


Рис. 4. Прочностные характеристики сварных образцов в водороде и гелии: а) временное сопротивление разрыву; б) условный предел текучести: ○ – цельные образцы из стали ЭИ481-Ш, испытания в гелии при 80 МПа; Δ – сварные образцы (сталь ЭИ481-Ш + сталь ЭИ481-Ш), в гелии при 80 МПа; ▲ – сварные образцы (сталь ЭИ481-Ш + сталь ЭИ481-Ш), в водороде при 80 МПа; ◇ – сварные образцы (сталь ЭИ481-Ш + сталь 12X18Н10Т), в гелии при 80 МПа; ■ – сварные образцы (сталь ЭИ481-Ш + сталь 12X18Н10Т), в водороде при 80 МПа

При растяжении сварных образцов этого типа их разрушение происходило по сварному шву. Тем не менее, как видно из рис. 4, прочностные характеристики сварных образцов в пределах погрешности их определения совпадают с аналогичными характеристиками цельных образцов. Воздействие водорода также не оказало заметного влияния на  $\sigma_B$  и  $\sigma_{0,2}$  сварных образцов. Максимальное снижение временного сопротивления, вызванное водородом, наблюдается при комнатной температуре и составляет  $\approx 2\%$  (если сравнивать результаты испытаний сварных образцов в водороде и гелии).

Характеристики пластичности сварных образцов также практически совпадают с аналогичными характеристиками цельных образцов при температурах 300 и 600 °С (рис. 5). Расхождение наблюдается лишь при комнатной температуре – у сварных образцов  $\delta_5$  меньше почти в два раза (на 46 %), а  $\psi$  больше на 39 %, чем у цельных образцов. Как и при испытаниях цельных образцов, охрупчивающее воздействие водорода у сварных образцов не наблюдается при температуре 600 °С, в незначительной степени проявляется при 300 °С (вызванное водородом снижение  $\delta_5$  и  $\psi$  составляет 8 %) и максимально при комнатной температуре (при испытаниях в водороде  $\delta_5$  на 26 %, а  $\psi$  на 43 % меньше, чем при испытаниях в гелии). Однако даже при комнатной температуре характеристики пластичности сварных образцов в водороде остаются на достаточно высоком уровне –  $\delta_5 \approx 14$  и  $\psi \approx 27\%$ .

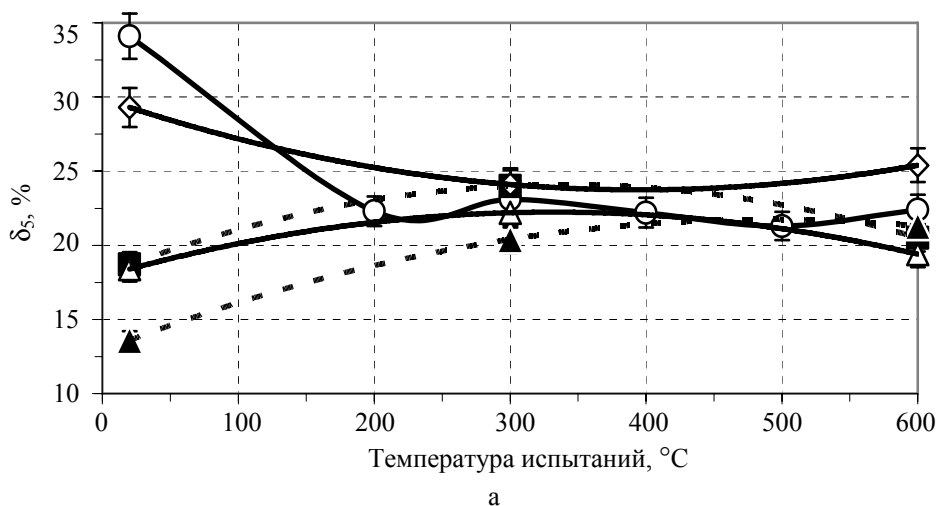


Рис. 5. Характеристики пластичности сварных образцов в водороде и гелии: а) относительное удлинение; б) относительное сужение после разрыва: о – цельные образцы из стали ЭИ481-Ш, испытания в гелии при 80 МПа; Δ – сварные образцы (сталь ЭИ481-Ш + сталь ЭИ481-Ш), в гелии при 80 МПа; ▲ – сварные образцы (сталь ЭИ481-Ш + сталь ЭИ481-Ш), в водороде при 80 МПа; ◇ – сварные образцы (сталь ЭИ481-Ш + сталь 12Х18Н10Т), в гелии при 80 МПа; ■ – сварные образцы (сталь ЭИ481-Ш + сталь 12Х18Н10Т), в водороде при 80 МПа. Окончание рисунка на с. 550

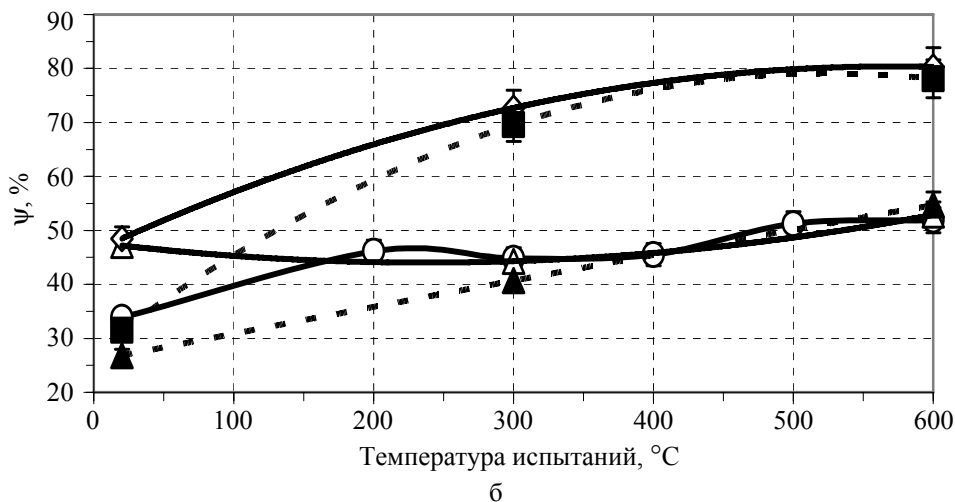


Рис. 5. Окончание

### ***Результаты испытаний на растяжение сварных образцов из сталей ЭИ481-Ш +12Х18Н10Т***

Результаты испытаний на растяжение сварных образцов (сталь ЭИ481-Ш + сталь 12Х18Н10Т) приведены на рис. 4 и 5.

Прежде всего, следует отметить характер разрушения сварных образцов этого типа. Их разрушение при всех испытательных температурах, как в водородной среде, так и в гелии, происходило не по сварному шву, а по основному металлу стали 12Х18Н10Т. То есть, прочность сварного соединения стали ЭИ481-Ш со сталью 12Х18Н10Т оказалась выше временного сопротивления разрушению стали 12Х18Н10Т.

Фактически испытания этого типа образцов свелись к определению механических свойств и оценке водородостойкости стали 12Х18Н10Т, что не являлось целью данных исследований. Кроме того, стойкость стали 12Х18Н10Т к воздействию водорода всесторонне исследовалась различными авторами (например, [2]). Поэтому не имеет смысла подробно анализировать полученные результаты и, исходя из цели данных исследований, можно сделать следующий вывод: прочностные характеристики и водородостойкость сварного соединения стали ЭИ481-Ш со сталью 12Х18Н10Т не ниже, чем у стали 12Х18Н10Т.

### ***Результаты испытаний макетов трубопроводов***

Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Как следует из полученных результатов, штуцеры из стали ЭИ481-Ш при принятых условиях испытаний имеют несущую способность выше 490 МПа и практически не чувствительны к воздействию водорода.



Таблица 2

## Результаты испытаний макетов

№ п/п	Режим испытаний	Кол. макетов	$P_{пр,*}$ МПа	Характер разрушения
1.	1. Пятикратное нагружение давлением водорода 200 МПа с выдержкой при каждом нагружении в течение $20^{+10}$ с. 2. Нагружение до разрушения.	15	492–521	Без разрушения – 12 штук
				Разрушение штуцера – 3 штуки**
2.	1. Нагружение давлением водорода 200 МПа с выдержкой в течение 10 ч. 2. Нагружение до разрушения.	21	493–530	Без разрушения – 12 штук
				Разрушение штуцера – 9 штук

Примечание. \* – диапазон зафиксированных предельных давлений; \*\* – характер разрушения штуцера см. рис. 6.

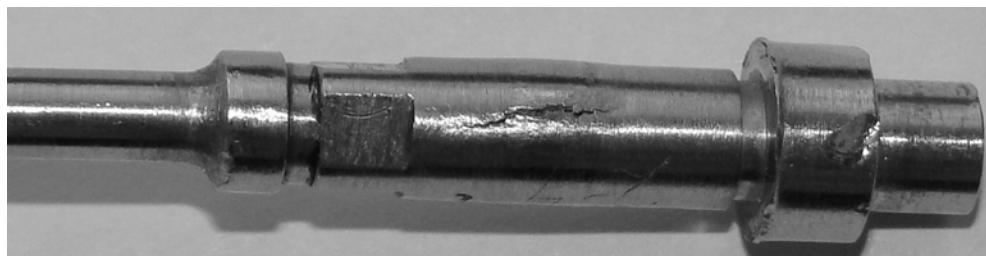


Рис. 6. Характер разрушения штуцера из стали ЭИ481-Ш

**Вывод**

Проведены сравнительные испытания на растяжение в водороде и гелии при давлении 80 МПа в интервале температур от комнатной до  $+600$  °С стандартных образцов из стали ЭИ481-Ш и ее сварных соединений, которые показали следующее.

– Воздействие водорода на сталь ЭИ481-Ш не оказало влияния на ее прочностные характеристики во всем интервале температур и на пластичность при температурах 200, 400, 500 и 600 °С. Водородное охрупчивание стали в незначительной степени наблюдается при температуре 300 °С, а в наибольшей степени (характеристики пластичности снижаются на 43–46 %) проявилось при комнатной температуре, однако, по величине они находятся на высоком уровне ( $\delta_5$  и  $\psi \approx 19$  %).

– Сталь ЭИ481-Ш обладает хорошей свариваемостью ЭЛС. Механические свойства и водородостойкость ее сварного соединения (сталь ЭИ481-Ш + сталь ЭИ481-Ш) не ниже, чем у основного металла.

– Сталь ЭИ481-Ш хорошо сваривается со сталью 12Х18Н10Т при помощи ЭЛС. Механические свойства и водородостойкость такого сварного соединения оказались выше, чем у стали 12Х18Н10Т.

### **Список литературы**

1. Basunov A. V., Boitsov I. E., Grishechkin S. K. et al. Physical and mechanical properties of structural materials in gaseous media containing hydrogen isotopes // J. Moscow Phys. Society. 1999. Vol. 9, N 3. P. 237–243.

2. Ткачев В. И., Холодный В. И., Левина И. Н. Работоспособность сталей и сплавов в среде водорода. Львов, 1999. С. 29–39.