

тодікою Бринелля-Хаурта при питомому тиску на зразок 17,5 МПа. Також наведено результати мікрофрактографічного аналізу зламів. Зроблено висновок про ефективність застосування плазмового поверхневого зміцнення ріжучих кромок ґрунтообробного інструменту.

**Ключові слова:** ґрунтообробний інструмент, плазмовий струмінь, зміцнення

SAMOTUGIN S., LITVINENKO D., MAZUR V., GAGARIN V. Plasma hardening of cutting edges of soil-cultivating tool

*The article presents a method of surface hardening the cutting edge of tool by high concentrated plasma stream. Results of testing the samples on the abrasive wear resistance by the method Brinell-Howorth with the specific pressure on the sample in 17,5 MPa. Also, the results of the analysis mikrofraktografic breaks were given. The conclusion about the effective of plasma surface hardening of the cutting edge of soil-cultivating tools was done.*

**Keywords:** soil-cultivating, tool, plasma stream, hardening

УДК 621.7

### С. З. Стасюк

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев

## РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ХРОМОМОЛИБДЕНОВЫХ СТАЛЕЙ В КОНСТРУКЦИИ ПЕЧНЫХ ЗМЕЕВИКОВ ТРУБЧАТОЙ ПЕЧИ УСТАНОВКИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА И ГИДРООЧИСТКИ

*Исследованы механические свойства основного металла и сварных соединений труб змеевика трубчатой печи установки каталитического риформинга, выполненных из хромомолибденовых сталей марок 12CrMo19.5 и 15X5M-U. Показано, что длительная эксплуатация материала в условиях взаимодействия с водородсодержащей средой привела к резкому падению ударной вязкости сварных швов и их хрупкому разрушению при комнатной температуре.*

**Ключевые слова:** хромомолибденовые стали, водородная коррозия, трубчатая печь, лабораторные исследования, механические характеристики, основной металл, сварные соединения

Установки каталитического риформинга представляют собой комплекс процессов, включающих гидроочистку сырья, каталитический риформинг и стабилизацию конденсата. В состав установок входит большое количество разнообразного и сложного оборудования, в том числе реакторные блоки с отделением трубчатых печей, эксплуатирующиеся при повышенных давлениях и температурах. Это оборудование подвергается воздействию агрессивных газовых сред, содержащих водород и сероводород. Такое воздействие в определенных условиях приводит к водородной коррозии, проявляющейся в изменении структуры металла, деградации механических характеристик [1-3], что повышает опасность возникновения разрушения конструкции при гидравлических или пневматических испытаниях во время технических освидетельствований.

Трубчатые печи являются одним из основных аппаратов, определяющих производительность установок. Тепловой режим работы трубчатых печей колеблется в пределах от 350 до 450 °С для змееви-

ков сырьевых печей и повышается до 470-515 °С для змеевиков промежуточных печей процессов риформинга.

Радиантно-конвекционная трубчатая печь П-1 установки каталитического риформинга и гидроочистки ЛГ-35-11/300 состоит из четырех рядом расположенных радиантных камер и примыкающей к ним общей конвекционной камеры. В каждой радиантной камере размещено по два змеевика из десяти труб размером 219x12 мм, соединяемых между собой коллекторами Ду 200; материал труб радиантной камеры и коллекторов – сталь марки 15X5M. Змеевик конвекционной камеры выполнен из стали марки 12CrMo19.5 TGL 15089 (немецкий аналог стали отечественного производства марки 15X5 M); размер труб змеевика 219x12 мм. Заметим, что в трубчатых печах производится нагрев смеси сырья с циркулирующим газом и, кроме того, промежуточный подогрев парогазовых потоков между реакторами. Тепловой режим работы трубчатой печи приведен в табл. 1.

Среднелегированные хромомолибденовые

**Рабочие условия эксплуатации печных труб печи П-1 установки каталитического риформинга и гидроочистки ЛГ-35-11/300**

Таблица 1

изучения характера изменения физико-механических свойств материала в процессе его эксплуатации.

С этой целью были проведены лабораторные исследования материала контрольных участков труб, вырезанных из змеевика конвекционной камеры и коллектора радиантной камеры III, содержащие сварные швы. Химический состав металла исследуемых элементов печного змеевика приведен в табл. 2, здесь же указаны требования стандартов к химическому составу данных марок сталей.

Комплекс механических характеристик основного металла и сварных соединений получен при комнатной и высоких температурах, которые соответствовали рабочим условиям – 365 °С для стали марки 12CrMo19.5 и 525 °С для стали марки 15X5M (табл. 3).

Прочность и пластичность определяли при статическом растяжении пятикратных гладких образцов диаметром 5 мм. Анализ данных табл. 3 показал, что характеристики прочности и пластичности находятся в пределах норм, установленных стандартами для данных марок сталей, следовательно, воздействие рабочей среды с содержанием водорода при высоких температурах и давлениях не проявилось. Сварные соединения материала коллектора практически равнопрочны основному металлу. Заметим, что полученные механические свойства стали коллектора соответствуют нормам стандарта для горячедеформированных труб из стали марки 15X5M-У (ГОСТ 550-75) в состоянии после нормализации и отпуска, согласно которым при 20 °С характеристики прочности и пластичности должны быть не мень-

жаропрочные стали, к числу которых относятся сталь марок 15X5M и 12CrMo19.5, по сложившейся в нефтепереработке практике используются в виде труб в печных змеевиках и обвязочных трубопроводах реакторного блока, поскольку хорошо зарекомендовали себя в гидрогенизационных процессах. Жесткие условия эксплуатации трубчатой печи П-1 с наработкой материала в течении 200 тыс. ч, при парковом ресурсе в 100 тыс. ч поставили задачу определить работоспособность материала труб для оценки возможности продления срока службы печи, поскольку надежность и безопасность оборудования, выработавшего нормативный (расчетный) срок службы, зависят от состояния металла и вопросы возможности дальнейшей эксплуатации решаются на основании

Наименование	Температура, °С		Давление газопродуктовой смеси (пары бензина и водородосодержащий газ), МПа	
	вход	выход	вход	выход
Конвекционная камера	250	350	5,0	4,55
Радиантные камеры: I	420-450	520	4,0	4,0
II	- -	- -	- -	- -
III	473	- -	- -	3,8
IV	500	- -	- -	3,6

Таблица 2

**Химический состав (%) исследуемого металла**

Химические элементы	Наименование			
	Труба конвекционной камеры из стали 12CrMo19.5	Сталь 12CrMo19.5 по стандарту TGL 15089	Коллектор III радиантной камеры из стали 15X5M	Сталь 15X5M по ГОСТу 200072-74
C	0,120 / 0,108	0,08-0,15	0,12 / 0,085	0,15
Mn	0,42 / 0,41	0,30-0,60	0,47 / 1,4	0,5
Si	0,23 / 0,23	0,30-0,50	0,25 / 0,45	0,5
Cr	4,80 / 4,73	4,0-6,0	5,6 / 4,6	4,5-6,0
Mo	0,56 / 0,56	0,45-0,65	0,53 / 0,59	0,45-0,60
Ni	0,09 / 0,09	—	0,15 / 0,11	0,6
S	0,016 / 0,025	0,020	0,0075 / 0,069	0,025
P	0,010 / 0,010	0,025	0,026 / 0,065	0,030
Al	0,04 / 0,04	—	—	—
Cu	0,12 / 0,13	—	0,14 / 0,77	0,20
W	0,05 / 0,05	—	0,01 / 0,01	0,3
V	0,05 / 0,05	—	0,02 / 0,13	0,05
Ti	0,05 / 0,05	—	0,005 / 0,03	0,03

Примечание: над чертой приведены данные для основного металла, под чертой – сварной шов

## Механические характеристики исследуемого металла

Температура испытаний, °С	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	$S_k$ , МПа	KCV, Дж/см <sup>2</sup>
труба конвекционной камеры из стали марки 12CrMo19.5						
20	807/558	702/369	20,1/17,1	72/78	1550/1516	208/11,3
365	682/445	603/324	16,0/14,8	67/74	1245/1012	192/137
коллектор радиантной камеры III из стали марки 15X5M						
20	669/665	600/549	21,0/16,8	77/77	1505/1438	267/3,8
525	446/431	435/403	18,5/16,1	83/80	900/825	235/106

Примечание: над чертой приведены данные для основного металла, под чертой – сварного соединения

ше следующих величин:  $\sigma_b$  – 600 МПа,  $\sigma_{0,2}$  – 420 МПа,  $\delta$  – 16 %,  $\Psi$  – 65 %.

Ударная вязкость основного металла получена на образцах типа II с концентратором вида V по ГОСТу 9454-78, а сварных соединений – на образцах типа IX по ГОСТу 6996-66. Ударная вязкость KCV основного металла исследуемых материалов при комнатной и высоких температурах имеет высокие значения, соответствующие требованиям стандарта (не менее 100 Дж/см<sup>2</sup>). Для сварных соединений при 20 °С получено неудовлетворительное значение KCV как для материала трубы конвекционной камеры, так и коллектора, равное 11,3 и 3,8 Дж/см<sup>2</sup> соответственно. При этом металл швов находится в хрупком состоянии и на поверхности излома полностью отсутствует вязкая составляющая. Иллюстрацией этого могут служить электронные фрактограммы: в зоне старта динамической трещины в изломе наблюдается большое количество вторичных протяженных и клиновидных микротрещин, плоские безрельефные фасетки перемежаются цепочками или скоплениями мелких ямок с гребнями отрыва (рис. 1).

Эффект резкого снижения ударной вязкости металла шва свидетельствует о протекании процессов водородной коррозии. Это согласуется с результатами структурных исследований, подтвердивших изменения микроструктуры вследствие длительной эксплуатации при высоких температурах. Так, в металле швов возникло ослабление границ зерен вследствие сегрегации неметаллических включений, что привело к его охрупчиванию.

Основываясь на полученных выше данных, значительный интерес представляет определе-

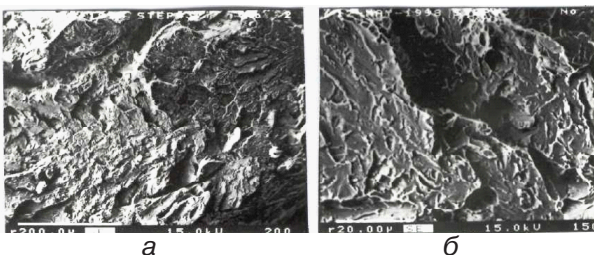


Рис. 1. Микростроение излома образца сварного соединения стали марки 12CrMo19,5, испытанного при 20 °С:  $\times 200$  (а);  $\times 1500$  (б)

ние критической температуры хрупкости  $T_k$ , по величине которой следует назначать температуру испытаний на прочность змеевиков при их техническом освидетельствовании. С этой целью проводили испытания образцов на ударный изгиб в выбранном интервале температур таким образом, чтобы в него входили следующие точки, °С:

$T_k$ ,  $T_k \pm 10$ ;  $T_k \pm 20$ ;  $T_k \pm 30$ ;  $T_k \pm 40$ . Графики зависимости ударной вязкости и вязкой составляющей в изломе от температуры испытаний представлены на рис. 2 и рис. 3. Используя критериальные значения ударной вязкости (KCV = 34 Дж/см<sup>2</sup>) и 50 % вязкой составляющей, находили величину  $T_k$ .

Из экспериментальных данных следует, что критическая температура хрупкости, определенная по двум критериальным значениям, составляет: 54 и 33 °С – для стали марки 12CrMo19.5; 12 °С – для стали марки 15X5M-У.

Характеристики трещиностойкости получены при испытании на трехточечный изгиб плоских прямоугольных образцов с краевой трещиной (тип 4 по ГОСТу 25.506-85). Для оценки вязкости разрушения использовали критерий нелинейной механики разрушения – критическое раскрытие острия трещины  $\delta_c$ . Полученные при этом данные интерпретировались с учетом того, что хрупкое или квазихрупкое разрушение без предварительного подрастания трещины (вязкость разрушения обозначено  $\delta_c$ ) носит нестабильный характер. Оно является достаточно опасным, поскольку приводит к мгновенному развитию трещины по всему сечению образца. В отдельных случаях квазихрупкое разрушение наступает после инициирования и незначительного подрастания трещины. В вязком состоянии процесс разрушения многостадийный: после раскрытия острия трещины, ее подрастания (вязкость разрушения обозначено  $\delta_c$ ) происходит ее стабильное развитие (на определенную величину  $l$ ), переходящее в пластическую неустойчивость, и окончательное разрушение при максимальной нагрузке на образец (вязкость разрушения обозначено  $\delta_m$ ). Как показали исследования (табл. 4 и рис. 4), металл трубы из стали марки 12CrMo19.5 и коллектора из стали марки 15X5M находится в вязком состоянии как при комнатной, так и рабочих температурах. Характеристики трещиностойкости сварного соединения стали марки 12CrMo19.5 находятся на уровне основного металла. Сварные соединения разрушаются квазихрупко при комнатной температуре, но при достаточно высоком значении критического раскрытия острия трещины  $\delta_c$ , составляющего 0,1 мм. При 365 °С разрушение носит вязкий характер, при этом сопротивление сварного соединения иници-

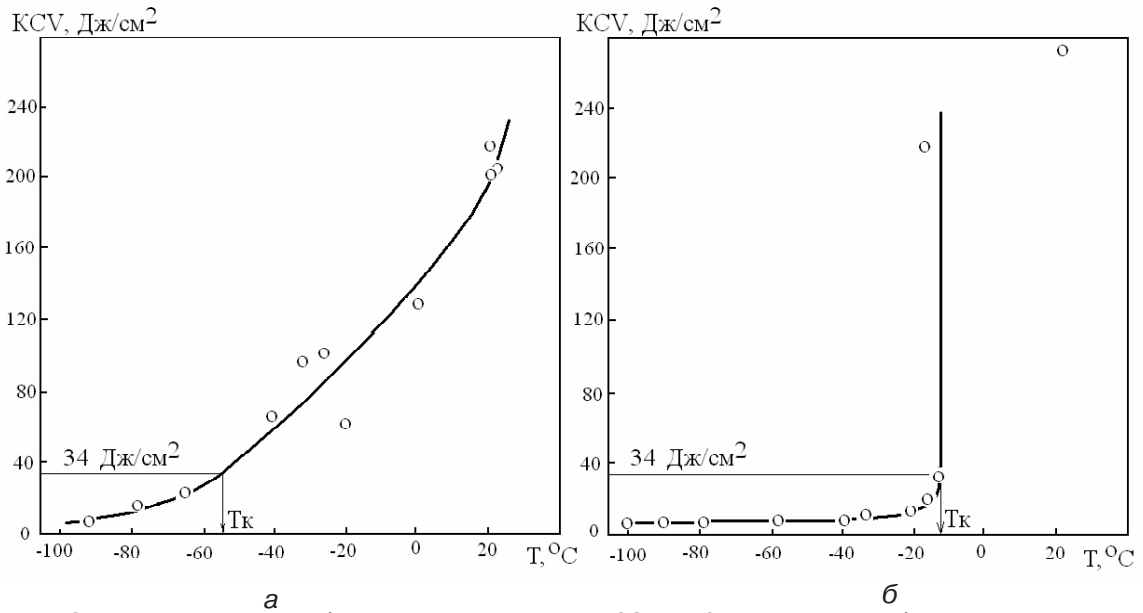


Рис. 2. Ударная вязкость образцов из стали марок 12CrMo19.5 (а) и 15X5M (б)

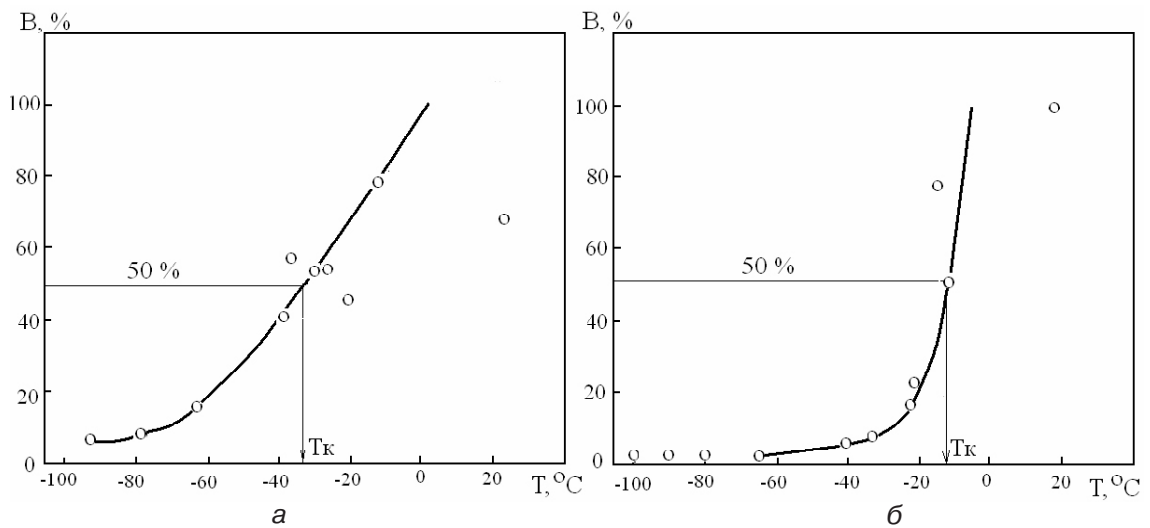


Рис. 3. Вязкая составляющая в изломе образцов из стали марок 12CrMo19.5 (а) и 15X5M (б)

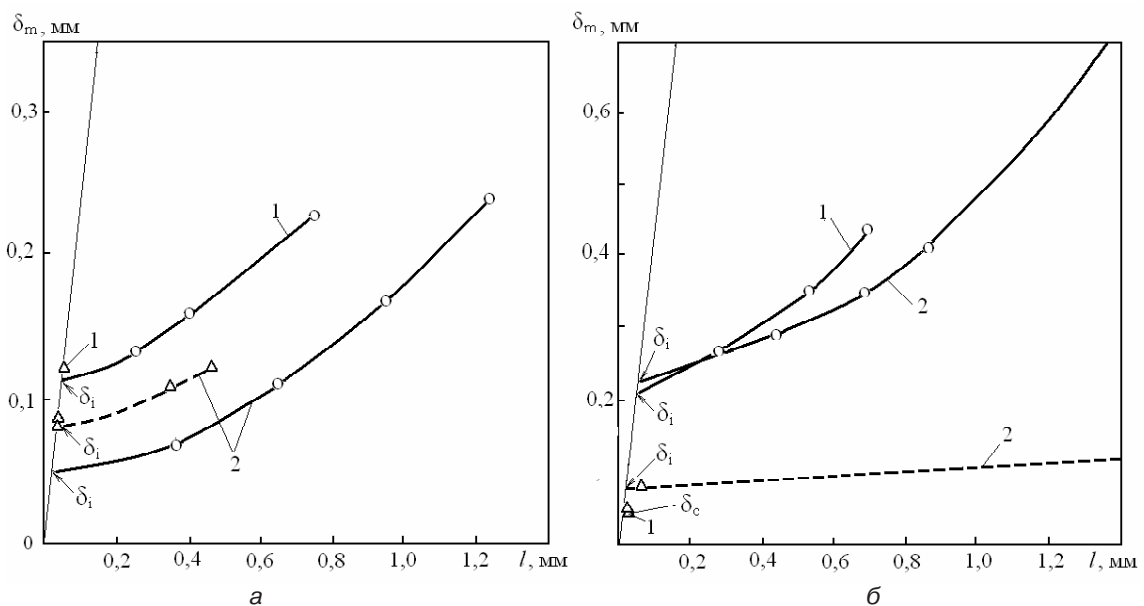


Рис. 4. Сопротивление разрушению и стабильному развитию вязкого разрушения образцов основного металла (сплошные линии) и сварных соединений (штриховые линии) стали марки 12CrMo19.5 (а) и стали 15X5M (б) при 20 °С (1) и рабочей температуре (2)

Таблица 4 лей, причем в большей степени отрицательное воздействие проявляется на сварных соединениях.

### Характеристики трещиностойкости, мм

Температура испытаний, °С	Основной металл		Сварное соединение		
	$\delta_i$	$\delta_m$	$\delta_c$	$\delta_i$	$\delta_m$
труба конвекционной камеры из стали 12CrMo19.5					
20	0,11	0,17	0,10	-	-
365	0,05	0,11	-	0,09	0,10
коллектор радиантной камеры III из стали 15X5M-U					
20	0,21	0,48	0,03	-	-
525	0,23	0,42	-	0,06	0,07

ированию вязкого разрушения выше, чем у основного металла.

Данные испытаний образцов сварного соединения из стали 15X5M-U показали, что при 20 °С разрушение носит хрупкий характер. Величина  $\delta_c$  критического раскрытия острия трещины составила 0,03 мм. При рабочей температуре 525 °С после зарождения вязкой трещины и ее незначительного подрастания наступает квазихрупкое разрушение. Отметим, что вязкость разрушения сварных соединений на порядок ниже таковой основного металла.

Таким образом, результаты исследования трещиностойкости также указали на эффект влияния технологической среды с содержанием водорода высоких параметров на свойства исследуемых ста-

лей, причем в большей степени отрицательное воздействие проявляется на сварных соединениях.

### Выводы

- Изучено состояния металла змеевиков печи П-1 установки каталитического риформинга и гидрооистки ЛГ-35-11/300, длительность эксплуатации которых составила 200 тыс. ч в условиях действия высоких температур и давлений водородосодержащей рабочей среды.

- Показано, что начавшиеся процессы водородной коррозии привели к резкому падению ударной вязкости сварных швов исследуемых материалов и хрупкому механизму разрушения при комнатной температуре.

- Работоспособное состояние печи П-1 обеспечивается при рабочих температурах вследствие высокого уровня вязких свойств материала. Однако для предотвращения опасности разрушения трубчатой печи, отработавшей нормативный срок службы, испытания на прочность змеевиков при периодических технических освидетельствованиях, следует проводить при повышенных температурах.



### ЛИТЕРАТУРА

1. Гельд П. В., Рябов Р. А. Водород в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1974. – 273 с.
2. Арчаков Ю. И. Современные проблемы водородной коррозии сталей и надежность эксплуатации оборудования гидрогенизационных процессов // Водородная обработка материалов: Тез. докл. – Донецк, 2001. – С. 482-491.
3. Стасюк С. З. Об эксплуатации сварных соединений технологических трубопроводов и змеевиков печей нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств // Материалы и механизмы морского транспорта. Методы исследования и упрочнения. Технология производства: Тез. докл. – Севастополь, 2008. – С. 109-116.

### СТАСЮК С. З. Працездатність хромомолібденових сталей в конструкції пічних змійовиків трубчастої печі установки каталічного рифомінга та гідроочищення

*Досліджено механічні властивості основного металу і зварних з'єднань труб змійовиків трубчастої печі установки каталічного риформінга, що виконані із хромомолібденової сталі марок 12CrMo19.5 і 15X5M. Показано, що тривала експлуатація матеріалу в умовах взаємодії з середовищем із вмістом водню призвела до різкого падіння ударної в'язкості зварних з'єднань та їх крихкому руйнуванню за кімнатної температури*

**Ключові слова:** хромомолібденові сталі, воднева корозія, трубчаста піч, лабораторні дослідження, механічні характеристики, основний метал, зварні з'єднання

### STASIUK S. Capacity of Cr-Mo-steels constrictions of the stove-worm-pipes for catalyst reforming and hydrofining unit

*A study mechanical properties of parent metal end welding connections of pipes worm-pipes of tubular stove a catalytic reformer unit, executed from Cr-Mo-steels. Its is demonstrated that a long-term operation of the material in contact with hydrogen-containing caused it's in the chirp falling of shock viscosity of welding stitches end their fragile destruction et room temperature.*

**Keywords:** Cr-Mo-steel, hydrogen corrosion, tubular stove, laboratory researches, mechanical descriptions, parent metal, welded connections