

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ
ДЕТАЛЕЙ ТРУБОПРОВОДОВ¹**

Т. В. Кимстач

Национальная металлургическая академия Украины

1. Постановка проблемы.

Наличие на территории СНГ протяженных нефтегазовых магистралей, эксплуатируемых уже на протяжении 20-30 лет и требующих реконструкции, интенсивное строительство новых магистральных трубопроводов диаметром 1020-1420мм на давление до 10 МПа при условии перекачки «кислых сред», приводит к непрерывному повышению требований к качеству металла труб и соединительных деталей трубопроводов (СДТ). При этом непрерывно продолжается тенденция повышения толщины стенки труб до 30-40мм и СДТ до 60-80мм (а для трубных обечаек, из которых изготавливаются опорные блоки морских стационарных платформ – до 80...120мм) [1]. Принятые в СНГ решения о строительстве магистральных трубопроводов большого диаметра с использованием труб и СДТ с уровнем прочности не ниже K60...65 (X70...80 по американским стандартам API) привели к необходимости увеличить количество научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на создание параметров промышленных технологий, способных обеспечить металлу изделий такие требования.

2. Формулировка целей

Известно, что для достижения необходимых эксплуатационных свойств СДТ, правильный выбор способа охлаждения и охлаждающей среды при термообработке, оказывает решающее влияние.

При выполнении цикла НИОКР было проведено исследование влияния толщины стенки, вида охлаждающей среды и способа закалки на механические свойства металла сварных СДТ.

3. Обсуждение результатов

В качестве материала для проведения исследований использовали карты из стали 10Г2ФБ толщиной 20, 40 и 60 мм, которые сваривали сварочной проволокой из сталей BOEHLER Ni2-UP, BOEHLER EMS 2Mo (условно присвоили марки 07Г2М для BOEHLER EMS 2Mo и 05ГН2 для BOEHLER Ni2-UP) [2]. В качестве закалочных сред при термическом упрочнении карт применяли воду с температурой 35-40°C и с температурой $\geq 80^\circ\text{C}$, а также горячий водный раствор NaCl. Режим термического упрочнения включал объемное охлаждение металла с температуры аустенитизации с докритическими скоростями и последующий отпуск. Химический состав основного металла карт и сварочной проволоки приведен в таблице 1.

Зависимость механических характеристик стали 10Г2ФБЮ ($\sigma_{\text{в}}$, $\sigma_{\text{т}}$, δ ,

¹ Работа выполнена под руководством проф. Дейнеко Л.Н.

КСУ⁶⁰) и металла сварных соединений, выполненных с использованием различных сварочных проволок (BOEHLER EMS-2Mo и BOEHLER-Ni2-UP), от толщины свариваемой пластины и вида охлаждающих сред приведены на рисунке 1-3.

Таблица 1

*Химический состав исследуемых сталей
10Г2ФБЮ, BOEHLER Ni2-UP и BOEHLER EMS 2Mo*

Марка стали	Содержание элементов, % по массе						
	C	Mn	Si	S	P	Cr	
10Г2ФБЮ, ТУ 14-1-5339-96	0,08- -0,13	1,6- -1,8	0,15- -0,35	≤0,01	≤0,02	≤0,3	
Сварочная проволока BOEHLER Ni2-UP	0,07- -0,15	0,8- -1,3	0,05- -0,25	≤0,02	≤0,03	≤0,15	
Сварочная проволока BOEHLER EMS 2Mo	0,07- -0,15	0,8- -1,3	0,05- -0,25	0,025	0,025	0,15	
Марка стали	Содержание элементов, % по массе						
	Cu	Ni	V	Ti	Mo	Al	Nb
10Г2ФБЮ, ТУ 14-1-5339-96	≤0,03	≤0,03	0,05- -0,12	0,01- 0,035	-	≤0,02 -0,05	0,02- -0,06
Сварочная проволока BOEHLER Ni2-UP		1,8- -2,4			0,15	-	
Сварочная проволока BOEHLER EMS 2Mo		0,15			0,45- -0,65	-	

Из данных представленных на рисунке 1 видно, что наилучшими показателями предела прочности (σ_b) для исследуемых сварочных проволок обеспечивает режим термического упрочнения в холодной воде (до 40°C) и в горячем солевом растворе. Преимущество термоупрочнения в холодной (до 35-40°C) воде объясняется интенсификацией процесса охлаждения как в высокотемпературной области, так и при температурах промежуточного и мартенситного превращения аустенита. Максимум теплосъема от закаливаемых изделий для холодной воды приходится на температуру металла 280 - 300°C [3]. В этом температурном интервале металл уже находится в упругом состоянии, но дислокации еще имеют возможность перемещаться. Для горячей воды ($t_{в} \geq 80^\circ\text{C}$) характерна более длительная стадия пленочного кипения. При этом переход от стадии пленочного к пузырьковому кипению происходит резким скачком (эффект термоудара) в области температуры поверхности металла 160-180°C, что приводит к резкому возрастанию градиента температур по сечению изделия и возникновению высокого уровня напряжений [4]. Этим и объясняется пониженное значение предела текучести при закалке в горячей воде. Но при этом даже после термического упрочнения в горячей воде и последующего отпуска показатели прочности для

исследуемых составов сварочных проволок превосходят нормируемый уровень свойств для металла класса прочности К60.

Предел текучести σ_T (рис. 2) металла карт при закалке в холодной воде и горячем солевом растворе находятся на уровне требований, предъявляемых к металлу уровня прочности К60, что объясняется такими основными факторами: повышением плотности дислокаций; уменьшением количества феррита и перлита в структуре металла; увеличением количества продуктов промежуточного превращения аустенита; повышением плотности дефектов кристаллической решетки; увеличением степени пересыщения твердого раствора углеродом; измельчением зеренной структуры. Тенденция к снижению характеристик пластичности металла карт при закалке в горячей воде объясняется возникновением высокого уровня напряжений и количества дефектов решетки за счет термоудара при низких температурах металла. Уровень значений предела текучести металла карт после охлаждения в горячей воде меньше σ_T , получаемого после отпуска в области температур 350-500°C, что объясняется образованием дополнительного количества подвижных дислокаций в металле после термоудара и их закрепления после отпуска.

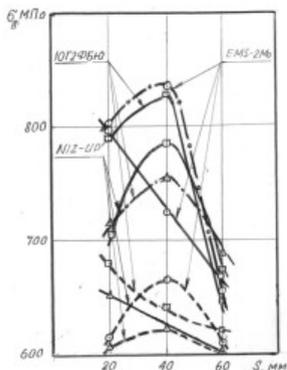


Рис. 1. Зависимость σ_b сталей от толщины свариваемых пластин (S) и типа охлаждающих сред (S) - холодная вода до 40°C; - - - - - горячая вода до 88°C; - . . . - солевой раствор (горячий)

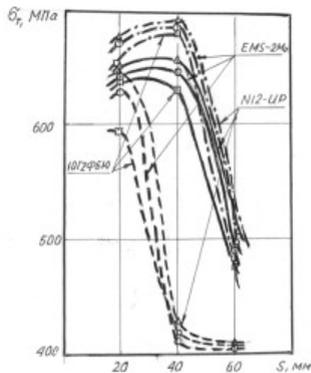


Рис. 2. Зависимость σ_T сталей от толщины свариваемых пластин (S) и типа охлаждающих сред (S) - холодная вода до 40°C; - - - - - горячая вода до 88°C; - . . . - солевой раствор (горячий).

Влияние толщины пластины и типа охлаждающих сред (особенностей закалочного охлаждения) на ударную вязкость металла при -60°C показано на рис. 3. При любых параметрах термического упрочнения (без последующего отпуска) ударная вязкость при толщине стенки $S = 20$ мм меньше ударной вязкости, нормируемой ТУ для уровня прочности К60. Это объясняется влиянием структурного и напряженного состояния металла карты толщиной 20мм на КСУ (КСУ) и порог хладноломкости металла. Для случаев

термоупрочнения в холодную воду и горячий солевой раствор ударная вязкость при -60°C больше ударной вязкости, требуемой для класса прочности К60, однако при охлаждении в горячем солевом растворе значения ударной вязкости при -60°C несколько меньше, чем при закалке в холодной воде.

Следует отметить, что высокие показатели механических свойств (кроме ударной вязкости) для СДТ при охлаждении в горячем водном растворе NaCl объясняются тем, что солевой раствор имеет только две стадии закалочного охлаждения - пузырьковый режим кипения и конвективный теплообмен. Поэтому раствор NaCl обеспечивает интенсивное охлаждение в интервале температур минимальной устойчивости переохлажденного аустенита. При этом с повышением температуры ванны происходит смещение максимума теплосъема в сторону более высоких температур закаливаемого металла.

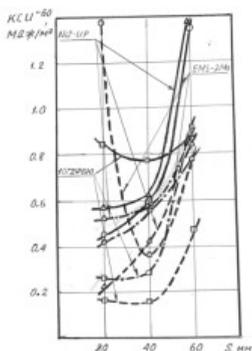


Рис. 3. Зависимость ударной вязкости при -60°C сталей от толщины свариваемых пластин (S) и вида охлаждающих сред: _____ - холодная вода до 40°C ; - - - - - горячая вода до 88°C ; _ . _ . _ - солевой раствор (горячий).

Недостатком охлаждения карт в горячем растворе NaCl является повышенная коррозионная активность данной закалочной среды и в связи с этим, необходимость применения ингибиторов коррозии.

Таким образом, наиболее приемлемой закалочной средой для термического упрочнения СДТ на уровень К60 является вода с температурой до 40°C .

Представляют практический интерес многостадийные режимы упрочняющей термообработки для свариваемых СДТ из стали 10Г2ФБЮ и сварочных проволок ВОЕНЛЕР-EMS-2Мо и ВОЕНЛЕР-Ni2-UP. Данные о механических характеристиках сварных соединений из стали 10Г2ФБЮ и ВОЕНЛЕР-EMS-2Мо и ВОЕНЛЕР-Ni2-UP для толщины пластин 60 мм и различных видов термической обработки приведены в табл. 2, 3. Из данных табл. 2 и 3, видно, что многостадийная термообработка при незначительном снижении прочностных характеристик металла карт позволяет значительно повысить ударную вязкость сварных соединений при -60°C и при -40°C .

Таблица 2

Влияние различных видов термической обработки на механические характеристики сварных соединений из стали 10Г2ФБЮ и BOEHLER-Ni2-UP (толщина пластины S = 60 мм)

Толщина пластины S, мм	Вид термообработки	σ_b , МПа	KCU ⁻⁶⁰ , МДж/м ²	KCV ⁻⁴⁰ , МДж/м ²
60	ТУ (990°C, выдержка 20 мин), охлаждение 300с в воде при температуре 88°C	643	0,34	0,21
	ТУ (990°C, выдержка 20 мин), охлаждение 300с в воде при температуре 88 С + отпуск 550°C, выдержка 1с	597	1,41	0,63
	ТУ (990°C, выдержка 20 мин), охлаждение в горячей воде при температуре $\geq 88^\circ\text{C}$ в течение 200 с до 200°C + отпуск 550°C, 1 час, охлаждение на воздухе	596	2,14	0,83
Требования по ТУ 102-488-93 (К60)		≥ 588	$\geq 0,5$	$\geq 0,343$

Таблица 3

Влияние различных видов термической обработки на механические характеристики сварных соединений из стали 10Г2ФБЮ и BOEHLER-EMS-2Mo (толщина пластины S = 60 мм)

Толщина пластины S, мм	Вид термообработки	σ_b , МПа	KCU ⁻⁶⁰ , МДж/м ²	KCV ⁻⁴⁰ , МДж/м ²
60	ТУ (980°C, выдержка 20 мин), охлаждение 300с в воде при температуре 88°C	629	0,17	0,11
	ТУ (980°C, выдержка 20 мин), охлаждение 300с в воде при температуре 88°C + отпуск 500°C, выдержка 1 час	598	0,86	0,72
	ТУ (980°C, выдержка 20 мин), охлаждение в горячей воде при температуре $\geq 88^\circ\text{C}$ в течение 200 с до 200°C + отпуск 500°C, 1 час, охлаждение на воздухе	613	1,41	0,93
Требования по ТУ 102-488-93 (К60)		≥ 588	$\geq 0,5$	$\geq 0,343$

Это происходит за счет образования в металле шва и околошовной зоны большого количества дисперсных частиц вторичной фазы (карбидов, карбонитридов), измельчения зеренной структуры и образования феррито-бейнитной структуры.

Выводы

Для достижения необходимых эксплуатационных свойств СДТ решающим фактором является правильный выбор способа охлаждения и охлаждающей среды при их термообработке.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что для металла СДТ в толщинах >36-40 мм преимущество термоупрочнения в холодной воде (до 40°C) объясняется интенсификацией процесса охлаждения. Для горячей воды характерна длительная стадия пленочного кипения и переход от стадии пленочного к пузырьковому кипению сопровождается резким скачком теплосъема, что приводит к возрастанию уровня напряжений и плотности дефектов кристаллической решетки. Следует отметить, что после термоупрочнения металла карт в горячей ($\geq 80^\circ\text{C}$) и в холодной (до 40°C) воде механические характеристики исследуемых сталей практически всегда находятся на уровне класса прочности К60.

Перспективным направлением является создание многостадийных режимов упрочняющей термообработки крупногабаритных изделий типа СДТ, что позволяет наряду с получением высоких уровней прочностных характеристик значительно повысить ударную вязкость сварных соединений при температуре испытаний -40°C и -60°C .

В результате выполненных исследований, используя комплексный подход, были созданы промышленные технологии термического упрочнения крупногабаритных высокопрочных изделий, обеспечивающие металлу уровень прочности не менее К60.

Список использованных источников

1. Марченко Л.Г., Столяров В.И. Перспективы производства труб для нефтегазового комплекса на предприятиях ТМК// Сталь 2006. № 1. С 55-57.
2. Дейнеко Л. Н., Кимстач Т.В., Клименко А.П. выбор сварочных материалов для изготовления штампосварных соединительных деталей нефтегазопроводов суровнем прочности $\geq \text{K60}$ //Новини науки Придніпров'я - №5. С. 39-48.
3. Петраш Л. В. Закалочные среды. – М.- Л.: Машгиз, 1959. -112с.
4. Дейнеко Л.Н, Большаков В.И.. Термическое упрочнение соединительных деталей магистральных нефтегазопроводов. Днепропетровск.: Gaudeamus, 2000, 120 с.