



# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯЗВЕННЫХ ДЕФЕКТОВ В ДЕЙСТВУЮЩИХ НЕФТЕ- И ГАЗОПРОВОДАХ И РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ ДОПУСТИМЫХ РЕЖИМОВ ДУГОВОЙ ЗАВАРКИ ДЕФЕКТОВ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **В. С. БУТ**, канд. техн. наук,  
**Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО**, канд. физ.-мат. наук,  
**Г. Ф. РОЗЫНКА**, **Н. И. ПИВТОРАК**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрена возможность заварки дефектов язвенной коррозии диаметром 12...20 мм на наружной поверхности стенки трубы магистрального нефте- и газопровода из стали 17Г1С без его остановки. Изложена общая методика выбора режимов дуговой заварки дефекта, при которых исключается прожог и разрушение в зоне сварки по механизму пластической неустойчивости при высоких температурах и за счет холодных (водородных) трещин.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, термомодеформационные процессы, трубопровод, давление, язвенные дефекты, заварка дефектов, пластическая неустойчивость, микроструктурное состояние, время охлаждения, остаточные напряжения, холодные трещины

Проблема безопасной заварки отдельных коррозионных дефектов на наружной поверхности стенки трубы без остановки трубопровода привлекает пристальное внимание специалистов разных стран. На протяжении последних 30 лет в этом направлении было выполнено ряд фундаментальных разработок (например в Эдиссоновском институте сварки (США) и пр.), нашедших отражение в соответствующих документах [1 и др.]. Однако достаточно большие сложности, возникающие при воспроизведении реальной ситуации действующего трубопровода (геометрические факторы, условия обтекания внутренней поверхности транспортируемой средой и т.д.) на макете, не позволяют исчерпывающе ответить на вопросы о создании безопасной технологии заварки дефектов.

В этой связи особое значение приобретают расчетные методы, основанные на математическом моделировании термомодеформационных процессов при заварке дефектов в трубопроводах с учетом действующего давления и теплообмена с потоком нефти или газа. Следует отметить, что принятое в работе [2] допущение, что температура на внутренней поверхности стенки трубы при заварке дефекта постоянна и равна температуре транспортируемой среды, является достаточно грубым с позиций безопасности ремонта.

Более обоснован подход, в котором тепловое состояние оценивается с учетом конвективного теплообмена на внутренней поверхности трубопровода в зависимости от соответствующих параметров транспортируемой среды, как это было сделано в [3] при наплавке тонкостенных труб.

В настоящей работе при моделировании температурных полей при заварке язвенного дефекта

в стенке магистрального трубопровода под давлением используется геометрическая схема заварки каверны из [2], показанная на рис. 1, которая принята с учетом конвективного теплообмена на внутренней поверхности. Коэффициент конвективного теплообмена  $\alpha_k$  определяли, как и в [3], с помощью критериальных соотношений [4] через соответствующие числа — Рейнольдса ( $Re$ ) и Прандтля ( $Pr$ ), обобщающие экспериментальные данные об обтекании стенки потоком жидкости или газа при локальном нагреве стенки с диаметром пятна нагрева  $D$ .

Результаты расчета коэффициента теплообмена  $\alpha_k$  для случаев транспортировки нефти и газа в зависимости от скорости их транспортировки  $W$  и давления  $P$  в трубе при  $D < 50$  мм для рассматриваемых случаев приведены в табл. 1. При этом температура транспортируемой среды принималась равной  $40^\circ\text{C}$ .

Приведенный в табл. 1 диапазон скоростей не в равной степени приемлем для нефти и газа в магистральных трубопроводах с диаметром  $2R =$

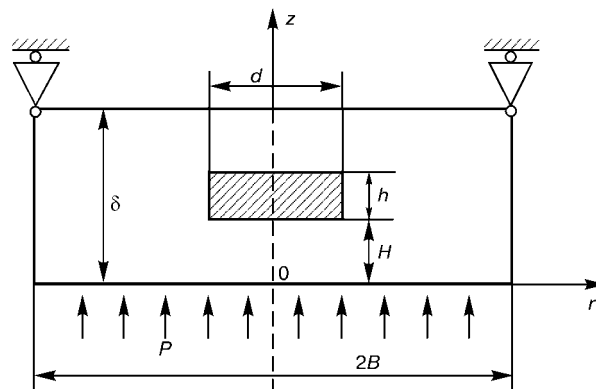


Рис. 1. Схема заварки каверны стенки трубы:  $d$  — диаметр каверны;  $h$  — толщина наплавленного слоя;  $H$  — толщина перемычки;  $\delta$  — толщина стенки трубы;  $P$  — давление в трубе;  $B$  — см. в тексте



Таблица 1. Результаты расчета коэффициента теплообмена  $\alpha_k$

W, м/с	$\alpha_k$ , Дж/(см <sup>2</sup> ·с·°C)						
	нефтепровод	газопровод					
	0...10 МПа	0,1 МПа	1,0 МПа	2,0 МПа	4,0 МПа	8,0 МПа	10,0 МПа
2	0,0650	0,0058	0,0108	0,0138	0,0167	0,0208	0,0225
6	0,1571	0,0117	0,0242	0,0304	0,0388	0,0496	0,0538
10	0,2367	0,0163	0,0354	0,0450	0,0579	0,1263	0,1367
20	—	0,0267	0,0596	0,0763	0,0996	0,1263	0,1367

= 1000 мм. Для нефти значения W обычно находятся в пределах 2...3, для газа — 6...10 м/с.

Тем не менее, данные табл. 1 дают достаточно полное представление о значениях  $\alpha_k$  при характерных скоростях нефти и газа.

Для наружной поверхности трубы использовались традиционные данные о теплообмене с воздухом при  $\alpha_k = 0,00208$  Дж/(см<sup>2</sup>·с·°C).

Тепловую мощность  $q_n$  сварочной дуги вводили через присадочный металл при заполнении им завариваемой каверны, а также с помощью распределенного потока тепла непосредственно от дуги. Значения  $q_n$  определяли по сварочным параметрам дуги

$$q_n = 0,24 U_d I_{св} \eta_n \text{ [Дж/(см}^2\text{·с·°C)]}, \quad (1)$$

где  $U_d$  — напряжение на дуге;  $I_{св}$  — сварочный ток;  $\eta_n$  — эффективный КПД нагрева изделия. В случае ручной сварки электродами с покрытием типа УОНИ принимали  $U_d = 26$  В,  $\eta_n = 0,8$ .

Тепло  $q_э$ , вносимое присадочным материалом за 1 с, определяется температурой  $T^*$  и объемной скоростью его поступления, равной

$$q_э = \frac{\alpha_n I_{св}}{3600\gamma}$$

где  $\alpha_n$  — коэффициент наплавки;  $\gamma$  — удельная масса материала.

При  $T^* \approx 2100$  °C,  $\alpha_n = 10$  г/(А·ч) и скрытой теплоте плавления  $\kappa \approx 2080$  Дж/см<sup>3</sup> получим

$$q_э = \frac{\alpha_n I_{св}}{3600\gamma} (T^* c\gamma + \kappa) = 4,576 I_{св} \text{ [Вт]}, \quad (2)$$

где  $c\gamma$  — объемная теплоемкость ( $c\gamma \approx 5,2$  Дж/(см<sup>3</sup>·°C)).

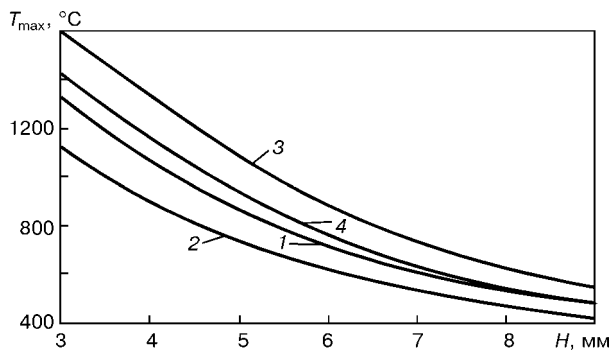


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры на внутренней поверхности трубы ( $z = 0$ ) на оси  $r = 0$  от  $H$  и режима сварки: 1, 2 —  $I_{св} = 90$ ; 3, 4 — 140 А; 1, 3 —  $W = 2$ ; 2, 4 — 6 м/с ( $D = 1020$  мм;  $\delta = 11$  мм;  $d = 29$  мм)

Таблица 2. Механические и теплофизические свойства стали 17Г1С

T, °C	Модуль Юнга $E \cdot 10^3$ , МПа	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Коэффициент относительного температурного удлинения $\alpha \cdot 10^6$ , 1/°C	Теплопроводность $\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(см·°C)	Объемная теплоемкость $c\gamma$ , Дж/(см <sup>3</sup> ·°C)
20	1,97	435	11,4	40	3,79
100	1,97	425	11,4	40	3,85
150	1,99	420	11,8	40	3,99
200	2,01	410	12,2	39	4,23
250	1,98	395	12,4	39	4,26
300	1,95	365	12,6	38	4,41
350	1,92	350	12,9	37	4,58
400	1,88	340	13,0	36	4,77
450	1,84	310	13,5	35	5,04
500	1,80	275	13,8	34	5,32
550	1,75	250	13,8	33	5,67
600	1,69	210	13,9	32	6,00
650	1,63	160	14,0	30	6,30
700	1,56	130	14,1	29	6,59
750	1,46	80	16,0	29	11,17
800	1,35	30	18,3	26	6,58
850	1,30	10	18,5	26	5,83
900	1,25	5	18,7	26	5,04
950	1,25	2	19,0	27	4,25
1000	1,25	1	19,4	28	5,04
1050	1,25	1	19,4	28	5,08
1100	1,25	1	19,5	29	5,09
1150	1,25	1	19,5	30	5,17
1200	1,25	1	19,5	30	5,25

Видно, что при  $q_n = 20,8 \cdot I_{св}$  Вт  $q_э$  составляет чуть больше 20 %, что характерно для дуговой сварки плавлением [5].

Заварка каверны (см. рис. 1) производится дискретно слоями высотой  $h$  не более 2 мм; после каждого слоя необходимо сделать перерыв до полного их остывания. Наиболее ответственным является выполнение первого слоя.

Учитывая локальность нагрева и реальную кривизну стенки трубы температурное поле определяли путем решения осесимметричной задачи теплопроводности для стальной пластины толщиной  $\delta$  с каверной диаметром  $d$  и глубиной  $\delta - H$  (см. рис. 1) при заполнении каверны слоем жидкого металла высотой  $h$  с температурой  $T^*$  в этот период времени  $t_0$  при воздействии теплового потока дуги, равного  $q_n - q_э$ .

Время  $t_0$  находилось по заданным значениям  $h, D, \alpha_n, I_{св}$ :

$$t_0 = \frac{\pi d^2 h \gamma}{4\alpha_n I_{св}} 3600 \text{ [с]}. \quad (3)$$

Решение нестационарной задачи теплопроводности при указанных условиях осуществлялось численно по программе, разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона. При этом учитывали зависимость от температуры теплофизических коэффициентов теплопроводности  $\lambda$  и объемной теплоемкости  $c\gamma$  (табл. 2).

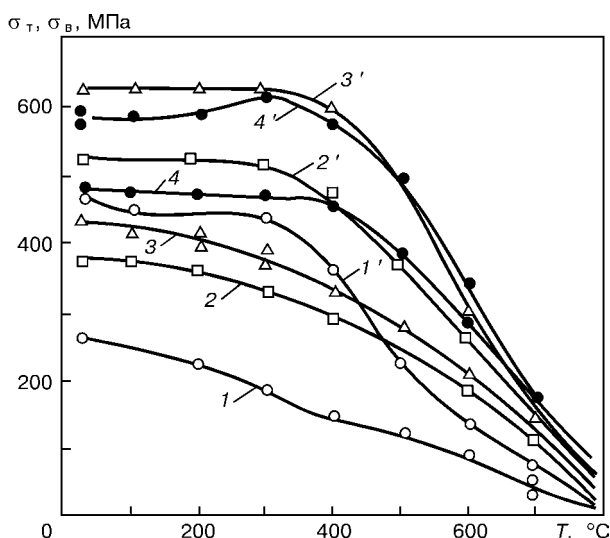


Рис. 3. Влияние нагрева на прочностные характеристики исследуемых сталей: 1, 1' – сталь 20; 2, 2' – 14ХГС; 3, 3' – 17Г1С; 4, 4' – Х60; 1-4 –  $\sigma_T$ ; 1'-4' –  $\sigma_B$

Результаты численных решений для конкретных исходных данных относительно температур  $T(r, z, t)$  в первую очередь использовали для оценки риска образования прожога при  $P = 0$ .

Критерием отсутствия такого дефекта является условие

$$T_{\max}(r, 0) < T_s,$$

где  $T_{\max}(r, 0)$  – максимальная температура на внутренней поверхности  $z = 0$ ;  $T_s$  – температура солидуса указанного сплава.

На рис. 2 приведены расчеты указанных температур  $T_{\max}(r, 0)$  для труб из стали типа 17Г1С ( $\delta = 11$  мм,  $d = 20$  мм,  $h = 2$  мм) при  $I_{св} = 90$  и 140 А в зависимости от значений минимальной толщины  $H$  в каверне и скорости прокачиваемой нефти. Определено, что условия заварки ( $h, I_{св}, H, W$ ) весьма существенно влияют на  $T_{\max}(r, 0)$ .

Если в качестве  $T_s$  принять температуру 1420 °С, то при  $I_{св} = 140$  А и  $W = 2$  м/с критические значения  $H_{кр} = 3,5$  мм, а при  $I_{св} = 90$  А  $H_{кр} = 2,5$  мм.

Для оценки критического состояния при наличии внутреннего давления рассматривали упругопластическое деформирование зоны завариваемого дефекта, связанное с нестационарным температурным полем  $T(r, z, t)$  и давлением  $P$ .

Решение велось путем последовательного развития упругопластических деформаций, начиная с момента начала нагрева до полного остывания. Также, как и в случае расчета температур, использовали схему круглой пластины толщиной  $\delta$  и диаметром  $2R$  с шарнирно опертыми кромками  $r = B$  и поперечной нагрузкой  $P$ . Радиус  $B$  выбирали из условий, что в зоне образования дефекта напряжения от давления близки к таковым в трубопроводе с толщиной стенки  $\delta$ , диаметром  $2R$  и внутреннем давлением  $P$ , т. е. по [6]

$$B = \sqrt{R\delta} \left[ \frac{8}{3(3 + \nu)} \right]^{0,5} \approx 0,9 \sqrt{R\delta},$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

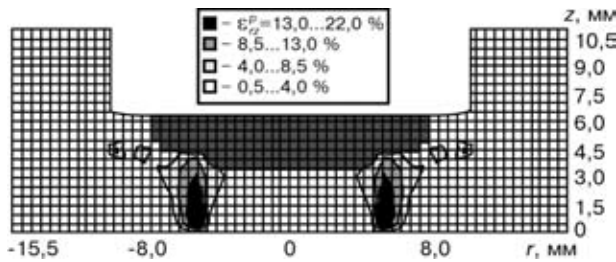


Рис. 4. Распределение пластических деформаций  $\epsilon_{ij}^p$  в момент времени, предшествующий наступлению предельного состояния для следующего варианта (труба размером 11Х1020 мм;  $d = 20$  мм;  $I_{св} = 140$  А)

В результате решения уравнения на каждом шаге прослеживания получали данные о тензорах напряжений  $\sigma_{ij}(r, z, t)$  и деформаций  $\epsilon_{ij}(r, z, t)$ , а также о векторе перемещений  $U_i(r, z, t)$  при  $i = r, z, \beta$ . При этом использовали методику из работ [7, 8].

Необходимые для расчета значения упругих характеристик  $E, \nu$  и предела текучести  $\sigma_T$  даны в табл. 2 и на рис. 3. Таким образом, прослеживается развитие напряжений  $\sigma_{ij}$  и пластических деформаций  $\epsilon_{ij}^p$  при различном давлении  $P$  (рис. 4), т. е. рассматриваются варианты заварки дефекта при  $P = 0, 2$  МПа и т. д. При некотором  $P = P_{кр}$  и времени нагрева  $t = t_{кр}$  наступает критическое состояние пластической неустойчивости, характеризуемое высоким уровнем пластических деформаций  $\epsilon_{rz}^p$  в сечении  $r = r^*$ , как показано на рис. 4. Положение сечения  $r = r^*$  определяется распределением температур и напряжений. Нетрудно видеть, что полученному предельному состоянию достаточно хорошо соответствует известная баттелевская модель [9].

На рис. 5 приведены результаты расчета критических значений  $P_{кр}$  для трубы из стали 17Г1С с толщиной стенки  $\delta = 11$  мм в зависимости от значений  $H$  при различных сварочном токе и скорости транспортировки.

Из полученных данных видно, что критическое давление  $P_{кр}$  монотонно возрастает с увеличением значений  $H$  до определенных пределов, выше которых рассматриваемый механизм разрушения при указанных значениях  $I_{св}, d, W$  в трубах из сталей типа 17Г1С не реализуется, поскольку резко снижается средняя температура по толщине  $H$  и ниже температуры 700... 800 °С возрастает предел текучести материала  $\sigma_T$ . Уменьшение диаметра каверны от 20 до 12 мм примерно на 1 мм снижает указанные значения  $H$  от 5...6 (при  $d = 20$  мм) до 4...5 мм (при  $d = 12$  мм).

Данные рис. 6 аналогичны таковым рис. 5, а, но при толщине стенки трубы  $\delta = 18$  мм. Из рисунка видно, что увеличение толщины стенки от 11 до 18 мм при неизменных прочих параметрах практически не изменяет критических значений  $P_{кр}$  и  $H$  при  $I_{св} = 90$  А и примерно на 1 мм увеличивает критические значения  $H$  при  $I_{св} = 140$  А, что связано с тепловым состоянием перемычки, т. е. в случае малых сварочных токов толщина стенки трубы не оказывает заметного влияния на температурное поле в перемычке при высоких температурах.



Т а б л и ц а 3. Расчетные данные о  $\Delta t_{8/15}$  в зоне заваренного дефекта

z, мм	Без предварительного подогрева															С предварительным подогревом при $T_0 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$														
	при различных r, мм																													
	0	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	0	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5				
11,0	6,8	6,8	6,8	6,7	6,6	6,5	6,3	6,0	5,5	4,9	4,0	6,5	0	10,3	10,3	10,3	10,3	10,2	10,1	10,0	9,8	9,5	9,0	8,2	10,5	0				
10,5	6,8	6,8	6,8	6,7	6,5	6,3	6,0	5,5	4,9	6,7	6,5	0	10,3	10,3	10,3	10,3	10,2	10,2	10,0	9,8	9,5	9,0	8,2	10,5	0					
10,0	6,8	6,8	6,8	6,8	6,7	6,5	6,3	6,0	5,6	4,9	7,8	0	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,2	10,0	9,8	9,5	9,0	8,3	10,7	0					
9,5	6,9	6,8	6,8	6,8	6,7	6,6	6,4	6,1	5,7	5,1	8,4	0	10,4	10,4	10,4	10,4	10,3	10,2	10,1	9,9	9,6	9,1	8,4	0	0					
9,0	7,0	6,9	6,9	6,9	6,8	6,7	6,5	6,2	5,8	8,8	14,0	0	10,5	10,5	10,4	10,4	10,4	10,3	10,2	10,0	9,7	9,2	12,2	0	0					
8,5	7,1	7,1	7,1	7,0	6,9	6,8	6,6	6,4	8,8	5,2	9,0	0	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,4	10,3	10,1	9,8	9,5	8,5	0	0					
8,0	7,2	7,2	7,2	7,1	7,0	6,9	6,6	6,2	5,3	6,9	0	0	10,7	10,7	10,7	10,7	10,6	10,5	10,5	10,3	10,1	9,7	8,6	0	0					
7,5	7,4	7,4	7,4	7,4	7,3	7,1	6,9	6,3	7,3	7,0	0	0	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,7	10,7	10,6	10,6	13,7	9,8	11,3	0	0				
7,0	7,8	7,8	7,8	7,8	7,5	7,3	7,0	6,5	8,8	12,1	0	0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,3	10,5	10,0	16,6	0	0				
6,5	8,3	8,3	8,4	7,7	7,7	7,6	7,4	7,2	9,5	4,6	7,2	0	0	11,3	11,3	11,3	11,3	11,4	11,6	10,9	10,7	11,6	6,8	0	0					
6,0	7,9	7,9	7,9	7,9	7,8	7,8	7,6	7,5	5,9	4,8	5,4	0	0	11,6	11,6	11,6	11,7	11,8	11,1	11,1	11,0	10,9	8,5	9,1	0	0				
5,5	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	6,6	6,0	7,4	8,0	0	0	12,1	12,1	12,2	12,4	11,2	11,2	11,3	11,3	12,7	8,6	9,6	0	0				
5,0	8,2	8,2	8,2	8,3	8,3	8,3	7,0	6,7	6,2	8,0	8,1	0	0	11,2	11,2	11,2	11,3	11,3	11,4	11,5	11,6	9,3	8,8	12,9	0	0				
4,5	8,5	8,5	8,5	8,6	8,7	7,1	7,1	6,9	8,8	0	0	0	0	11,3	11,3	11,3	11,4	11,5	11,6	11,8	9,6	9,4	11,4	0	0	0				
4,0	8,8	8,8	8,9	9,1	7,2	7,2	7,2	7,1	0	0	0	0	0	11,4	11,4	11,5	11,6	11,7	11,9	12,4	9,7	9,6	0	0	0	0				
3,5	9,6	9,6	7,1	7,2	7,2	7,3	7,4	0	0	0	0	0	0	11,6	11,6	11,6	11,7	12,0	12,3	9,6	9,8	10,0	0	0	0	0				
3,0	7,2	7,2	7,2	7,3	7,4	7,5	7,8	0	0	0	0	0	0	11,8	11,8	11,8	12,0	12,3	9,6	9,7	9,9	0	0	0	0	0				
2,5	7,2	7,2	7,2	7,3	7,4	7,7	0	0	0	0	0	0	0	12,0	12,0	12,1	12,4	9,4	9,6	9,8	10,2	0	0	0	0	0				
2,0	7,3	7,3	7,3	7,4	7,6	8,0	0	0	0	0	0	0	0	12,3	12,3	12,5	9,4	9,5	9,6	9,9	0	0	0	0	0	0				
1,5	7,3	7,3	7,4	7,5	7,7	0	0	0	0	0	0	0	0	12,8	12,8	9,3	9,4	9,5	9,6	10,0	0	0	0	0	0	0				
1,0	7,4	7,4	7,4	7,6	7,9	0	0	0	0	0	0	0	0	9,3	9,3	9,3	9,4	9,5	9,7	10,1	0	0	0	0	0	0				
0,5	7,4	7,4	7,5	7,7	8,1	0	0	0	0	0	0	0	0	9,3	9,3	9,4	9,4	9,5	9,7	10,2	0	0	0	0	0	0				
0	7,5	7,5	7,6	7,7	8,3	0	0	0	0	0	0	0	0	9,3	9,3	9,4	9,4	9,6	9,7	10,3	0	0	0	0	0	0				



**Т а б л и ц а 4. Расчетные данные об относительных массовых долях мартенсита в зоне заваренного дефекта**

z, мм	Без предварительного подогрева															С предварительным подогревом при $T_0 = 150\text{ }^\circ\text{C}$														
																при различных r, мм														
	0	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	0	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5				
11,0	0,38	0,38	0,38	0,39	0,40	0,42	0,46	0,50	0,58	0,69	0,85	0,42	0	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,13	0,16	0,22	0,08	0				
10,5	0,38	0,38	0,38	0,39	0,40	0,42	0,45	0,50	0,58	0,69	0,39	0,42	0	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,13	0,16	0,22	0,08	0				
10,0	0,38	0,38	0,38	0,38	0,40	0,42	0,45	0,50	0,57	0,69	0,26	0	0	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,13	0,16	0,21	0,08	0				
9,5	0,37	0,37	0,37	0,38	0,39	0,41	0,44	0,49	0,56	0,66	0,21	0	0	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,13	0,15	0,20	0	0				
9,0	0,35	0,35	0,36	0,36	0,38	0,40	0,43	0,47	0,53	0,18	0,02	0	0	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,12	0,14	0,04	0	0				
8,5	0,34	0,34	0,34	0,35	0,36	0,38	0,40	0,44	0,18	0,63	0,16	0	0	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,11	0,13	0,20	0	0				
8,0	0,32	0,32	0,32	0,33	0,34	0,35	0,37	0,19	0,46	0,62	0,37	0	0	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,12	0,18	0	0				
7,5	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,31	0,15	0,37	0,45	0,31	0,35	0	0	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,02	0,11	0,06	0	0				
7,0	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,29	0,32	0,35	0,43	0,17	0,04	0	0	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,08	0,10	0,01	0	0				
6,5	0,21	0,21	0,21	0,27	0,27	0,28	0,30	0,33	0,13	0,74	0,32	0	0	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,07	0,08	0,05	0,38	0	0				
6,0	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,28	0,29	0,52	0,72	0,60	0	0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,20	0,15	0	0				
5,5	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,41	0,50	0,30	0,24	0	0	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06	0,03	0,18	0,12	0	0				
5,0	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21	0,36	0,39	0,47	0,24	0,23	0	0	0	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,14	0,17	0,03	0	0				
4,5	0,20	0,20	0,20	0,19	0,18	0,33	0,34	0,37	0,17	0	0	0	0	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,12	0,13	0,06	0	0	0				
4,0	0,17	0,17	0,17	0,15	0,33	0,32	0,33	0,33	0	0	0	0	0	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,12	0,12	0	0	0	0				
3,5	0,12	0,12	0,33	0,33	0,32	0,31	0,30	0	0	0	0	0	0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,12	0,11	0,10	0	0	0	0				
3,0	0,33	0,33	0,33	0,32	0,31	0,29	0,26	0	0	0	0	0	0	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,13	0,12	0,11	0	0	0	0	0				
2,5	0,33	0,33	0,32	0,31	0,30	0,27	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0,04	0,04	0,13	0,12	0,11	0,10	0	0	0	0	0				
2,0	0,32	0,32	0,31	0,30	0,28	0,24	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,04	0,14	0,13	0,12	0,11	0	0	0	0	0	0	0				
1,5	0,31	0,31	0,30	0,29	0,27	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03	0,03	0,14	0,13	0,13	0,12	0,11	0	0	0	0	0	0				
1,0	0,30	0,30	0,30	0,28	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,12	0,10	0	0	0	0	0	0				
0,5	0,30	0,30	0,29	0,27	0,23	0	0	0	0	0	0	0	0	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,12	0,10	0	0	0	0	0	0				
0	0,29	0,29	0,28	0,27	0,21	0	0	0	0	0	0	0	0	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,12	0,09	0	0	0	0	0	0				

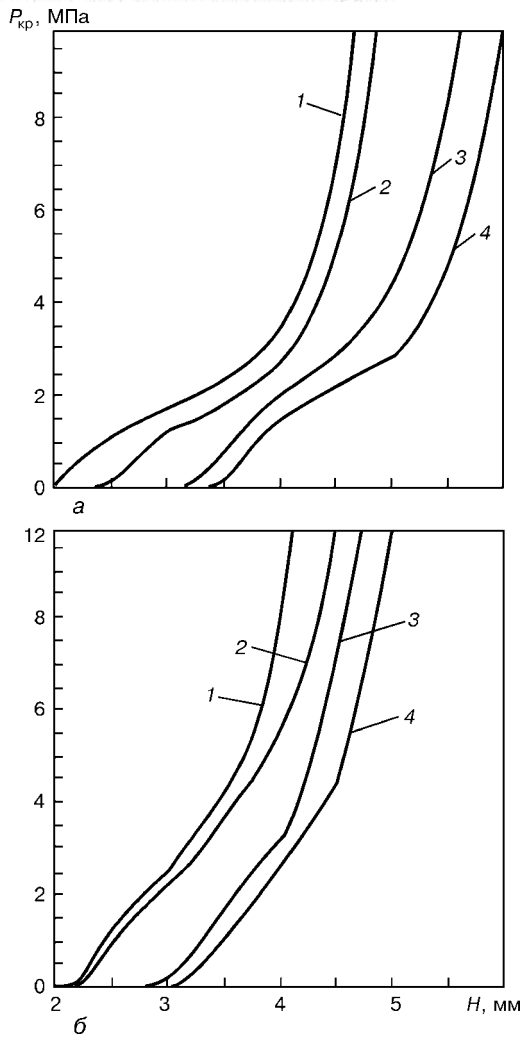


Рис. 5. Зависимость критического давления  $P_{кр}$  от  $H$  при заварке каверны  $d = 20$  (а) и 12 мм (б) в трубе нефтепровода диаметром 1020 мм с толщиной стенки  $\delta = 11$  мм: 1, 2 –  $I_{св} = 90$ ; 3, 4 – 140 А; 1, 3 –  $W = 6$ ; 2, 4 – 2 м/с

Из изложенного выше следует, что при ремонте нефтепровода под давлением, связанным с заваркой отдельных язвенных дефектов, разрушение перемычки толщиной  $H$  и диаметром  $d$  при сварке отдельными слоями высотой  $h$  по механизму пластической неустойчивости зависит от конкретных значений исходных параметров (см. рис. 3, 4), в частности от скорости потока нефти и его давления.

В газопроводах наблюдается примерно аналогичная картина. Однако в этом случае процесс усложняется из-за зависимости интенсивности теплообмена между стенкой и транспортируемой средой от давления в трубопроводе (см. табл. 1).

Приведенные на рис. 7 результаты расчетов при скорости  $W = 6$  и 20 м/с, показали, как зависит критическое давление в случае изменения значений  $H$  при различных режимах заварки ( $h = 2$  мм) и диаметрах каверны. Зависимость указанных выше условий теплоотвода от давления приводит к немонотонному изменению  $P_{кр}$  в зависимости от значений  $H$  при малых давлениях.

Наряду с рассмотренным выше следует учитывать еще возможность разрушения металла из-за так называемых водородных (холодных) трещин

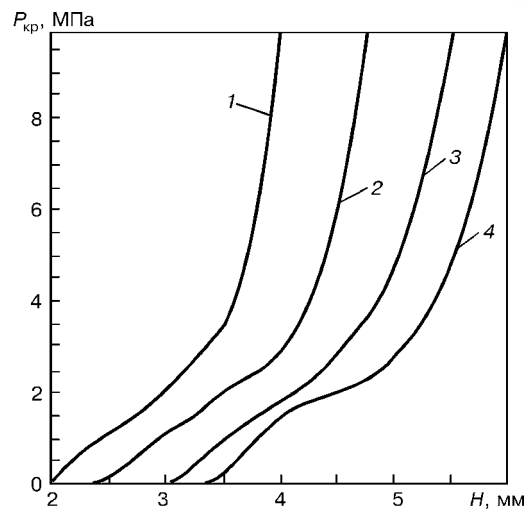


Рис. 6. Зависимость  $P_{кр}$  от  $H$  при заварке каверны  $d = 20$  мм нефтепровода диаметром 1440 мм с толщиной стенки  $\delta = 18$  мм (см. обозначения рис. 5)

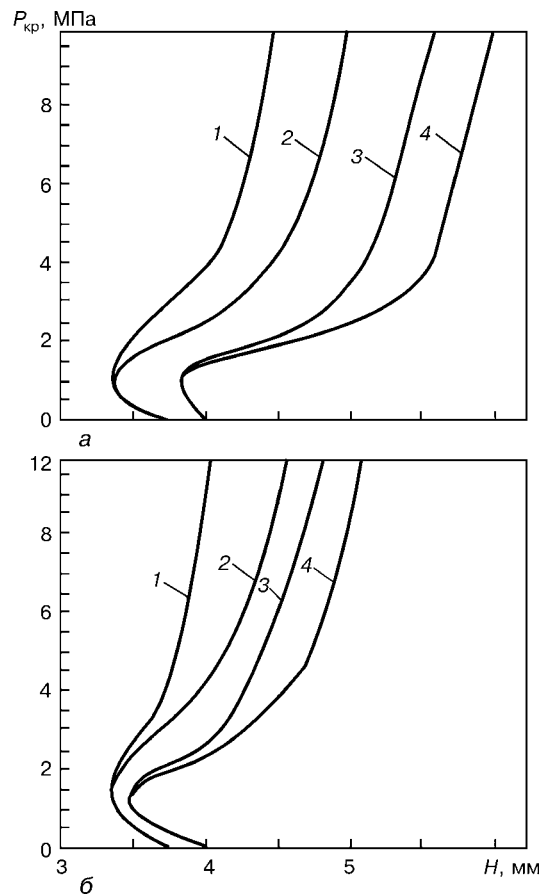


Рис. 7. Зависимость  $P_{кр}$  от  $H$  в трубе газопровода размером 18X1420 мм при заварке каверны  $d = 20$  (а) и 12 мм (б): 1, 2 –  $I_{св} = 90$ ; 3, 4 – 140 А; 1, 3 –  $W = 20$ ; 2, 4 – 6 м/с

или трещин, возникающих в результате быстрого охлаждения при сварке в указанных выше условиях.

Быстрое охлаждение металла способствует появлению закалочных структур, что в сочетании с определенным содержанием диффузионного водорода и растягивающими напряжениями может создавать условия для образования водородных трещин. С учетом значительной роли сварочных напряжений и структурного состояния в образо-

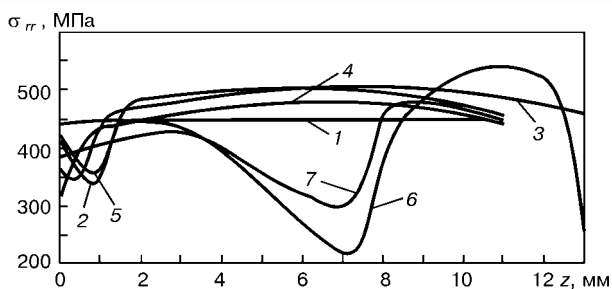


Рис. 8. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_{rr}$  в зависимости от  $z$  при  $r = 0$  при различных вариантах заварки каверны при  $2R = 1020$  мм,  $d = 20$  мм,  $\delta = 11$  мм: 1 — заполнение каверны в один слой ( $h = 6$  мм); 2 — то же в три слоя с  $h = 2$  мм каждый (основной вариант); 3 — то же в два слоя с  $h = 4$  мм каждый; 4 — заполненные каверны с предварительным подогревом при  $T_0 = 150$  °С; 5 — заполнение каверны по основному варианту при  $P = 0$ ; 6 — заполнение каверны по основному варианту после наложения отжигающего валика; 7 — то же после механического удаления отжигающего валика

вании водородных трещин рассматривались различные варианты заварки каверны, а также их влияние на уровень остаточных окружных напряжений и наличие закалочных микроструктур, определяющих риск образования холодных трещин.

При расчете микроструктурного состояния металла шва и околошовной зоны принимали, что химический состав присадочного материала и основного металла одинаков и соответствует составу стали 17Г1С (ГОСТ 19281–89), мас. %: С 0,15...0,20; Si 0,4...0,6; Mn 1,15...1,6; Cr 0,3; Ni 0,3; Cu < 0,3; P < 0,035; S < 0,040; N > 0,008; As < 0,08.

Использовали диаграмму анизотермического распада аустенита конкретной стали [10], имеющей химический состав в указанном диапазоне. Характерным параметром, определяющим термический цикл охлаждения и распада аустенита, является время  $\Delta t_{8/5}$ , соответствующее охлаждению определенной точки, нагреваемой выше  $A_{c3}$  в интервале температур 850...500 °С.

Для варианта нефтепровода  $2R \times \delta = 11 \times 1020$  мм при заварке каверны ( $d = 20$  мм,  $H = 5$  мм) без подогрева и с подогревом до  $T_0 = 150$  °С при  $h = 2$  мм,  $I_{св} = 90$  А с помощью расчетов получена информация относительно времени пребывания  $\Delta t_{8/5}$  металла шва и околошовной зоны в интервале температур 850...500 °С (табл. 3 и рис. 8), а также соответствующие микроструктуры (табл. 4). Исходная микроструктура основного материала включала 60 % бейнита и 40 % феррит-перлита. Было определено, что при заварке без подогрева для основного объема металла, нагреваемого выше 850 °С,  $\Delta t_{8/5} \approx 6...8$  с.

На поверхности трубы имеется зона  $r \approx 9,5$  мм, где  $\Delta t_{8/5} \approx 4$  с. Здесь микроструктура в основном представляет собой 70 % бейнита и 30 % мартенсита. Однако в указанных отдельных зонах содержание мартенсита достигает 70 и даже 85 %, что при значительных растягивающих остаточных напряжениях  $\sigma_{rr}$  может приводить к образованию холодных трещин вблизи границы сплавления с основным металлом ( $r \approx 6,5...10,5$  мм).

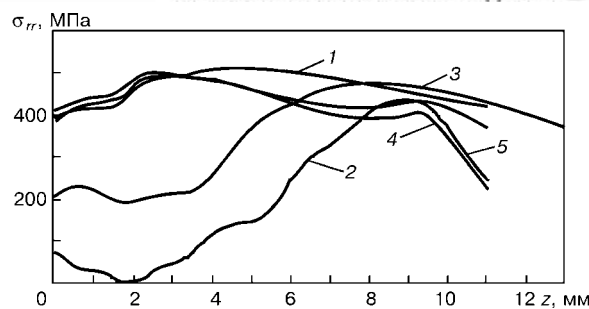


Рис. 9. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_{rr}$  в зависимости от  $z$  при  $r = 10$  мм при различных вариантах заварки каверны при  $2R = 1020$  мм,  $\delta = 11$  мм,  $d = 20$  мм: 1–3 — см. объяснения рис. 8; 4 — заполнение каверны по основному варианту после наложения отжигающего валика; 5 — то же после механического удаления отжигающего валика

Использование предварительного местного подогрева до 150 °С увеличивает  $\Delta t_{8/5}$  до 10...11 с. Минимальные значения  $\Delta t_{8/5} \approx 8$  с при  $r \approx 9,5$  мм, что существенно сказывается на микроструктуре. Содержание мартенсита не превышает 22 %. Основная масса объема в зоне заваренного дефекта имеет бейнитную структуру с содержанием мартенсита около 10...15 %. Это значительно снижает вероятность образования холодных трещин при наличии растягивающих остаточных напряжений.

Представление об изменении остаточных окружных  $\sigma_{\theta\theta}$  и радиальных  $\sigma_{rr}$  напряжений в заваренной каверне дает рис. 8 и 9. Здесь приведены значения  $\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{rr}$  по толщине  $\delta$  вдоль оси  $z$  при  $r = 0$  и 10 мм в зависимости от различных условий заварки каверны в трубе нефтепровода размером  $11 \times 1020$  мм из стали 17Г1С при  $I_{св} = 90$  А,  $d = 20$  мм,  $H = 5$  мм.

Из изложенного выше следует, что уровень остаточных напряжений при заварке каверны довольно стабилен к технологическим условиям, что характерно для сварки рассматриваемых сталей [7].

Существенно снизить остаточные напряжения возможно при начальном подогреве приблизительно до 300 °С [7], что в действующем трубопроводе нецелесообразно.

## Выводы

1. Язвенные одиночные дефекты могут быть заварены в действующих газо- и нефтепроводах с помощью ручной дуговой сварки на щадящих режимах при достаточной толщине притупления  $H$ , исключающих образование разрушения перемычки в процессе сварки по механизму пластической неустойчивости под давлением.

2. При заварке язвенного дефекта в трубопроводах из отечественных трубных сталей возникает проблема появления холодных (водородных) трещин. С целью предупреждения этих дефектов необходимо использовать технологические мероприятия для снижения содержания водорода в зоне сварки. Для снижения содержания неблагоприятных структур (мартенсита, низкотемпературного бейнита), от которых зависит образование холодных трещин, можно применять подогрев до 150 °С.

1. API Standart 1104. Welding of pipelines and related facilities. Appendix 13-Servis Welding. — American Petroleum Institute. — Sept., 1999.



2. *Разработка* режимов заварки каверн магистральных нефтепроводов под давлением / Я. И. Бурак, В. Х. Галюк, А. С. Джарджиманов и др. // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. — М., 1981. — Вып. 1. — С. 13–16.
3. *Numerical analysis of residual stress distribution in tubes with spiral weld cladding* / B. Taliat, T. Zacharia, X.-L. Wang, I. R. Keizer et al. // Welding J. — 1998. — P. 328–335.
4. *Исаченко В. П., Оситов В. А., Сухомел А. С.* Теплопередача. — М.: Энергия, 1975. — 486 с.
5. *Ерохин А. А.* Кинетика металлургических процессов дуговой сварки. — М.: Машиностроение, 1964. — 256 с.
6. *Прочность, устойчивость, колебания: Справоч.: В 2 т.* / Под ред. И. А. Биргера, Я. Г. Пановко. — М.: Машиностроение, 1968. — 832 с.
7. *Махненко В. И.* Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. — Киев: Наук. думка, 1976. — 320 с.
8. *Numerical methods of the predictions of welding stresses and distortions* / V. I. Makhnenko, E. A. Velikoivanenko, V. E. Pochinok et al. // Welding and surfacing reviews / Ed. by B. E. Paton. — Hardwood: Hardwood acad. publ., 1999. — 150 p.
9. *Даффи Ф., Эйберг Р., Макси У.* О поведении дефектов в сосудах давления // Новые методы оценки сопротивления материала хрупкому разрушению. — М.: Мир, 1972. — С. 301–332.
10. *Seuffarth P., Meyer B., Scharff A.* Großer Atlas Schweiß-ZTU-Schaubilder. — Duusseldorf: Dt. Verl. Fur Schweisstechnik, DVS-Verl., 1992. — 178 S.

The article considers the possibility of welding repair of pitting corrosion defects 12...20 mm in diameter on the outside surface of walls of a main oil pipeline of steel 17G1S without interruption of its operation. Described is the general procedure for selection of parameters of arc welding of a defect, which eliminate burn-through and fracture in the welding zone by the mechanism of plastic instability at high temperatures and due to cold (hydrogen) cracks.

Поступила в редакцию 27.10.2000



## КАХОВСКИЙ ЗАВОД ЭЛЕКТРОСВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

предлагает однопостовые однофазные трансформаторы  
для ручной электродуговой сварки

Параметр	ТДМ-259	КИ-009-315	КИ-002-500
Напряжение сети (50 Гц), В	380	380	380
Диапазон сварочного тока, А	90...250	60...315	100...500
Сварочный ток, А	ПН 20 % 250	ПН 60 % 315	ПН 60 % 500
Масса, кг	63	102	171

Тел.: (05536) 3-34-52, 3-31-65  
Факс: (05536) 4-10-41, 4-25-90  
E-mail: info@kzeso.com

Адрес:  
Украина, 74800, г. Каховка,  
ул. Пушкина, 109



ТДМ-259



КИ-009-315



КИ-002-500