



# ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЕРЕНОСА ВОДОРОДА ПРИ ПОДВОДНОЙ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **С. Ю. МАКСИМОВ**, канд. техн. наук, **Т. В. КОРОЛЕВА**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

С помощью расчетно-экспериментального метода рассматриваются особенности транспорта водорода при мокрой подводной дуговой сварке корневого прохода стыкового шва из малоуглеродистой и низколегированной стали. Показано влияние глубины сварки и типа присадочного металла на концентрацию водорода в металле шва и ЗТВ.

*Ключевые слова:* подводная сварка плавлением, математическое моделирование, транспорт водорода, концентрация водорода, холодные трещины

**Введение.** При мокрой подводной сварке электрическая дуга горит в парогазовом пузыре, который на 85...92 % состоит из водорода [1 и др.]. С увеличением глубины сварки давление в нем растет, что приводит к повышению парциального давления водорода над сварочной ванной, а это, в свою очередь, к увеличению насыщения водородом жидкого металла каплей и сварочной ванны [2 и др.]. Последнее может приводить к интенсивному порообразованию в зоне плавления (ЗП), а также к насыщению водородом зоны термического влияния (ЗТВ) и, следовательно, к увеличению риска образования водородных (холодных) трещин.

В настоящее время научились бороться с порами путем соответствующих металлургических воздействий на жидкий металл сварочной ванны [3]. Однако в ЗТВ возможности воздействия более ограничены, поэтому проблема водородных трещин здесь достаточно актуальна.

Экспериментально оценить кинетику насыщения металла ЗТВ диффузионным водородом [4, 5] довольно сложно, поэтому необходимо привлечение для этих целей расчетных методов. Известен ряд работ [6–8 и др.] применительно к условиям сварки в обычных атмосферных условиях. Для мокрой подводной сварки применение таких подходов требует соответствующей адаптации. Этому вопросу и посвящается настоящая статья.

**Постановка задачи и экспериментальные наблюдения на модельном образце.** Рассматривается конкретная задача мокрой подводной сварки стыковых соединений из сталей Ст3 и 17Г1С, химический состав которых приведен в табл. 1. Дуговая механизированная сварка порошковой проволокой на металлической остающейся подкладке (рис. 1) пластин толщиной 14 мм выполняется слоями. Наибольшее беспокойство с позиций холодных трещин в металле ЗТВ вызывает сварка корневого шва, поэтому дальнейшие рассуждения связаны только с этим слоем. В рассматриваемом случае использован следующий режим:  $I_{св} = 160...180$  А;  $U_{св} =$

$$= 30...32 \text{ В}; v_{св} = 6 \text{ м/ч}; \alpha_n = 9 \text{ г/(А·ч)}; T_{ср} = 20 \text{ }^\circ\text{C}.$$

В табл.1 для указанного химического состава приведено значение эквивалента углерода  $P_{см}$ , рассчитанного по формуле

$$P_{см} = C + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Si}{30} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B + \frac{Ni}{60}. \quad (1)$$

Там же указаны критические концентрации диффузионного водорода  $H_{кр}$ , при которых возникает риск образования холодных (водородных) трещин, для толщин 14 мм в условиях свободного  $H_{кр}^{св}$  и жесткозакрепленного образца  $H_{кр}^{зак}$  [4]:

$$\log_{10} H_{кр} = P_{\omega}^{кр} - 12P_{см}, \quad (2)$$

где  $P_{\omega}^{кр}$  — индекс чувствительности. Обычно  $P_{\omega}^{кр} = 4,1$  и  $43,6$  при сварке соответственно в свободном и закрепленном состоянии.

Видно, что критические значения  $H_{кр}$  в металле ЗТВ даже низкоуглеродистой стали Ст3 при сварке в закрепленном состоянии (что характерно для ремонтных работ под водой) достаточно низкие — порядка  $10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ , для низколегированной ста-

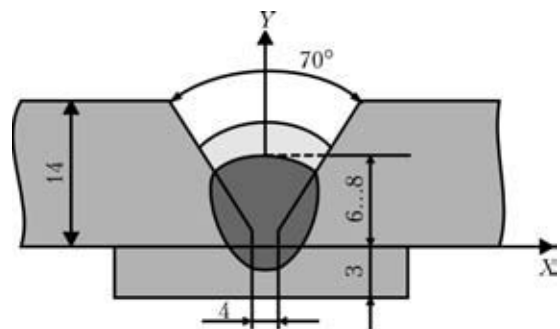


Рис. 1. Схема сварного соединения с корневым швом

Таблица 1. Химический состав сталей Ст3 и 17Г1С

Марка стали	Массовая доля элементов, %			$P_{см}$	$H_{кр}^{св}$ , $\text{см}^3/100 \text{ г}$	$H_{кр}^{зак}$ , $\text{см}^3/100 \text{ г}$
	C	Si	Mn			
Ст3	0,18	0,21	0,55	0,215	32	10
17Г1С	0,16	0,45	1,50	0,250	12	4



ли 17Г1С — 4 см<sup>3</sup>/100 г, т. е. риск появления водородных трещин достаточно велик.

В качестве модельных образцов, на которых выполняли экспериментальную часть работы, использовали образцы (размер 15×10×25 мм, ГОСТ 23338–91) для определения диффузионного водорода хроматографическим методом [9]. Сварку выполняли на указанном выше режиме в гидробарокамере с имитацией глубин от 0,1 до 100 м. Кроме  $N_{диф}$ , по этим же образцам определяли содержание остаточного водорода  $N_{ост}$  и химический состав наплавленного металла. Полученные результаты для разных глубин приведены в табл. 2.

Результаты экспериментальных наблюдений показывают, что металл ЗП достаточно интенсивно окисляется, что приводит к низкому содержанию углерода, кремния и марганца. Влияние основного металла образца незначительное. В наплавленном металле содержание диффузионного и остаточного водорода возрастает с увеличением глубины сварки. Естественно ожидать увеличения содержания водорода и в металле ЗТВ, однако измерить его стандартным методом (учитывая малые размеры ЗТВ) затруднительно. Применение методики локального анализа [5] позволило бы получить только качественные оценки, поскольку условия охлаждения исследуемого соединения (см. рис. 1) и модельного образца (рис. 2) заметно отличаются, а проводить измерения на натурном образце достаточно большого сечения затруднительно.

Полученные данные по нагреву модельного образца и результатам измерения содержания водорода в наплавленном металле позволяют в определенной степени определить граничные условия для математического моделирования.

**Моделирование температурного поля.** Для описания распределения температур в сечении  $z = \text{const}$  (см. рис. 1) использовали компьютерную программу в рамках 2D, разработанную в ИЭС им. Е. О. Патона. Распределение температуры  $T(x, y, t)$  определяется решением следующей краевой задачи:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + W(x, y, z) = c\gamma \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\text{при } t = 0 \quad T = T_0(x, y, 0) = \begin{cases} T_{сп}^{пл} \approx 1700 \text{ }^\circ\text{C} \text{ в ЗП,} \\ 20 \text{ }^\circ\text{C} \text{ за пределами ЗП,} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{при } y = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0. \quad (5)$$

На остальной границе теплообмен по закону Ньютона имеет вид

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha (T - T_{сп}) \quad (6)$$

при  $\alpha = \alpha_в$  — вне парогазового пузыря,  $\alpha = \alpha_{п.г}$  — в пределах парогазового пузыря.

Условия существования парогазового пузыря определяются температурой поверхности  $T_{п}$  и глубиной сварки  $L$ :

**Таблица 2. Результаты экспериментальных наблюдений на модельных образцах**

Глубина сварки, м	Химический состав металла ЗП	$N_{диф}$ , см <sup>3</sup> /100 г	$N_{ост}$ , см <sup>3</sup> /100 г
0,1	0,034C; 0,04Si; 0,07Mn	14,3	7,8
50	0,053C; 0,04Si; 0,04Mn	15,2	23,4
100	0,046C; 0,04Si; 0,05Mn	19,9	—

Примечание. Состав парогазового пузыря: O<sub>2</sub> < 0,52 %; H<sub>2</sub> = 85...92 %; CO + CO<sub>2</sub> = 8...15 %.

$$\begin{aligned} T_{п} &> 100 \text{ }^\circ\text{C} \text{ при } L = 0 \text{ м;} \\ T_{п} &> 120 \text{ }^\circ\text{C} \text{ при } L = 10 \text{ м;} \\ T_{п} &> 160 \text{ }^\circ\text{C} \text{ при } L = 50 \text{ м;} \\ T_{п} &> 185 \text{ }^\circ\text{C} \text{ при } L = 100 \text{ м.} \end{aligned} \quad (7)$$

В формуле (3)  $\lambda$  и  $c\gamma$  — теплофизические свойства материала. В температурном интервале кристаллизации металла ЗП используются значения  $c\gamma$  с учетом скрытой теплоты кристаллизации материала  $q_{ск}$  и эффективного коэффициента теплопроводности  $\lambda_э \cong 5\lambda(T_S)$ ;  $c\gamma_э = c\gamma(T_S) + q_{ск}/(T_L - T_S)$ , где  $T_S, T_L$  — соответственно температура солидуса и ликвидуса в ЗП.

Распределенный источник  $W$  в пределах ЗП вычисляется по формуле

$$W = \left[ \frac{q_{п}}{F_{ЗП}} - c\gamma(T_{сп}^{пр} - T_0) - q_{ск} \right] \frac{1}{t_0},$$

где  $q_{п} = \frac{I_{св} U_{св}}{v_{св}} \eta_{п}$ ;  $F_{ЗП}$  — площадь сечения ЗП;

$\eta_{п}$  — эффективный КПД;  $t_0$  — время ввода тепла.

Значения  $\eta_{п}$ ,  $\alpha_в$ ,  $\alpha_{п.г}$  определяли из опытов на модельных образцах. Хорошее согласование с экспериментом получено при  $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_в \approx \alpha_{п.г} \approx 0,208 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$  и  $\eta_{п} = 0,50; 0,45; 0,40$  соответственно при  $L = 0...10; 50; 100 \text{ м}$ .

**Математическая модель транспорта водорода.** Использована компьютерная программа, предложенная авторами [6]. Основные положения расчетного алгоритма заключаются в следующем.

Рассматривается транспорт диффузионного водорода в металле сварного соединения на основе диффузионной модели [6–8] для неоднородной среды, транспортные свойства которой характеризуются коэффициентом диффузии  $D$  и коэффициентом растворимости  $K$  (либо коэффициентом проницаемости  $KD$ ). Движущей силой транспорта является градиент потенциала концентрации  $\Pi$  (по

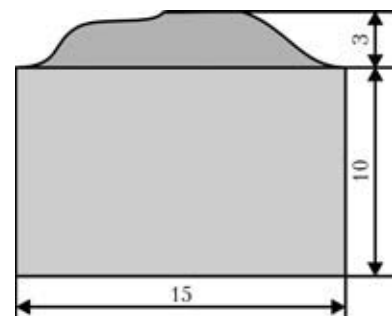


Рис. 2. Схема модельного образца



Таблица 3. Результаты расчета и экспериментальные данные измерения средних концентраций  $H_{диф}$  и  $H_{ост}$  для модельного образца в зависимости от глубины сварки

L, м	t, с	T <sub>max</sub> , °C	ЗП		ЗТВ
			H <sub>диф</sub> , см <sup>3</sup> /100 г	H <sub>ост</sub> , см <sup>3</sup> /100 г	H <sub>диф</sub> , см <sup>3</sup> /100 г
0,1	10	258	16,5	5,5	8,5
	20	78	13,5	7,9	6,8
	28	38	13,0 (14,3)	8,2 (7,8)	6,6
100	10	—	21,3	3,7	10,0
	20	—	19,03	5,6	8,5
	28	—	18,6 (19,9)	5,9	8,2

Примечание. В скобках приведены экспериментальные данные.

закону Сиверса  $P = \sqrt{P}$ , где  $P$  — парциальное давление водорода соответствующей концентрации в единице объема при температуре 20 °C [6]). Начальное состояние при  $t = 0$  характеризуется заданными средними значениями концентрации диффузионного водорода в основном металле и металле ЗП на основе модельного эксперимента. При этом не учитывается физика кратковременного процесса поступления водорода в металл ЗП.

Для рассматриваемой области определяется потенциал концентрации  $P(x, y, t)$  диффузионного водорода  $H(x, y, t)$  решением краевой задачи

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( KD \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( KD \frac{\partial P}{\partial y} \right) - Q(x, y, t) = \frac{\partial}{\partial t} (KP), \quad (8)$$

$$\text{при } t = 0 \quad P(x, y, 0) = \frac{H(x, y, 0)}{K(x, y, 0)}, \quad (9)$$

$$\text{при } x = 0 \quad \frac{\partial P}{\partial x} = 0, \quad (10)$$

где  $Q$  — изменение содержания водорода в ловушках (обратимых и необратимых), вычисляемое при 20 °C и атмосферном давлении по формуле

$$Q = \mu \frac{\partial}{\partial t} \left( \beta \frac{100 \text{ г}}{\gamma_m} \frac{P^2}{1 \text{ атм}} \frac{293}{(273 + T)} \right), \quad (11)$$

где  $\beta$  — относительный объем ловушек в единице объема;  $\gamma_m$  — плотность металла.

Коэффициент  $\mu$  определяем следующим образом:

$$\mu = 0 \text{ при } T < T_{об} \text{ и } \frac{\partial \beta}{\partial t} - \frac{2\beta}{P} \frac{\partial P}{\partial t} - \beta \frac{\partial T}{\partial t} \frac{1}{T + 273} < 0, \quad (12)$$

$$\mu = 1 \text{ во всех остальных случаях}, \quad (13)$$

$T_{об}$  — температура, ниже которой ловушка становится необратимой.

На границе с водой  $P(x, y, t) \equiv 0$ ; на границе в парогазовом пузыре  $P(x, y, t) = \sqrt{P_H}$ , где  $P_H$  — парциальное давление водорода в парогазовом пузыре. Потенциал концентрации диффузионного водорода  $H(x, y, 0) = H_0$  в ЗП, в остальной части  $H(x, y, 0) = 0,5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ .

В работе [6] предложено величины  $K(x, y, t)$ ,  $D(x, y, t)$  и  $\beta(x, y, t)$  определять в зависимости от микроструктуры в данной точке металла ЗП либо ЗТВ в виде

$$J(x, y, t) = \sum_j J_j(T) V_j(x, y, t), \quad (14)$$

где  $J = K, D, \beta$ ;  $j = a, f, p, b, m$  — соответственно для аустенита, феррита, перлита, бейнита и мартенсита;  $V_j(x, y, t)$  — массовая доля  $j$ -й микроструктуры в точке  $(x, y)$  в момент времени  $t$ . Значения  $K_j(T)$ ,  $D_j(T)$ ,  $\beta_j(T)$  определяли, используя зависимости, предложенные в работе [6].

Неопределенные в данной модели  $H_0$ ,  $\beta_j$  определяли на модельных образцах. В табл. 3 приведены результаты расчета по описанному алгоритму для модельного образца при  $H_0 = 25 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ,  $\beta_a = 0$ ;  $\beta_{fp} = 0,005$ ;  $\beta_m = 0,05$  в сопоставлении с экспериментальными данными для металла ЗП.

Выбранные параметры  $H_0$  и  $\beta_j$  позволяют получить удовлетворительное согласование расчета с экспериментом. В металле ЗТВ модельного образца содержание диффузионного водорода достаточно близко к критическому по табл. 1.

**Результаты численных исследований.** На рис. 3 представлены расчетные данные по размерам ЗП и ЗТВ для рассматриваемого соединения при режиме сварки:  $I_{св} = 180 \text{ А}$ ;  $U_{св} = 32 \text{ В}$ ;  $v_{св} = 0,17 \text{ см/с}$  (теплофизические свойства сталей Ст3 и 17Г1С примерно одинаковы, что определяет незначительное их различие по размерам ЗП и ЗТВ при сварке на разных глубинах). Видно, что с увеличением глубины  $L$  уменьшаются ЗП и ЗТВ, что естественно при постоянном режиме,

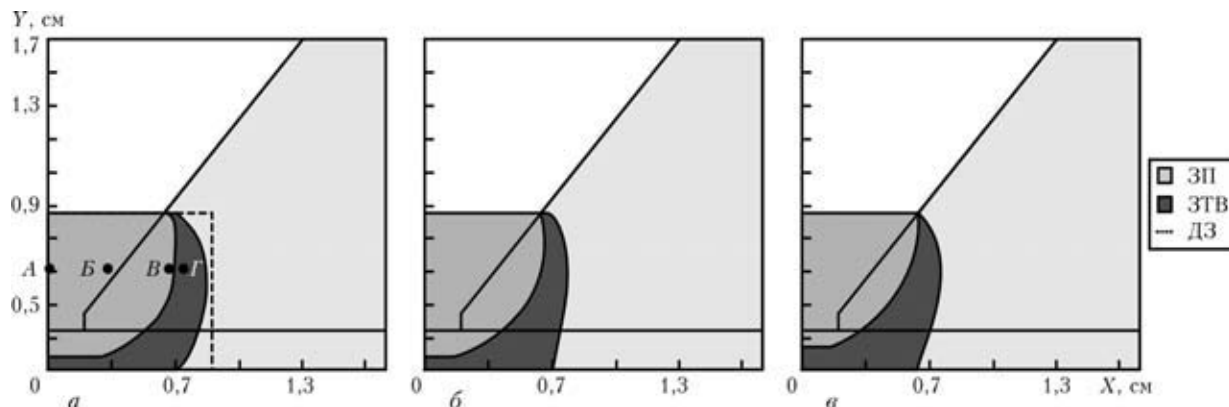


Рис. 3. ЗП, ЗТВ и диффузионная зона (ДЗ) на глубине 0,1 (а), 50 (б) и 100 м (в) (А, Б, В, Г — характерные точки)

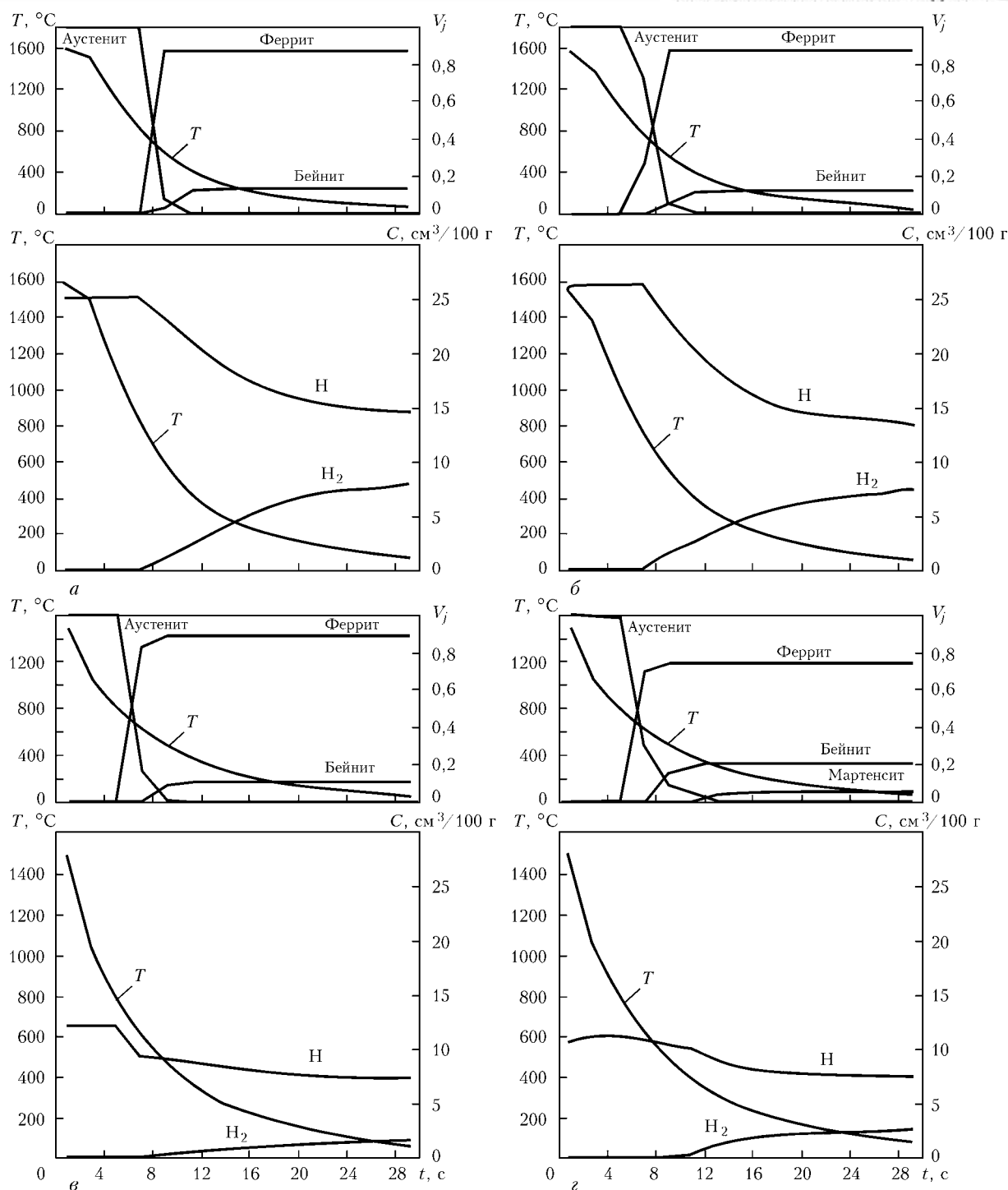


Рис. 4. Кинетика изменения во времени температур, микроструктурных составляющих  $V_j$  ( $j$  – аустенит, бейнит, феррит, мартенсит), диффузионного водорода  $H$ , водорода в ловушках  $H_2$  для сварного соединения из стали Ст3 в характерных точках А (а), Б (б), В (в), Г (г) на глубине 0,1 м

поскольку снижается  $\eta_{и}$ , увеличиваются энергетические затраты на образование парогазового пузыря вокруг дуги.

Для характерных точек А, Б, В в ЗП и Г в ЗТВ на рис. 4–7 представлены расчетные данные по кинетике изменения температур, микроструктур (использовали методику работы [6]), диффузионного водорода  $H$  и водорода в ловушках  $H_2$  при сварке на глубинах 0,1... 100 м. Данные на рис. 4, 5 относятся к стали Ст3, а на рис. 6, 7 – к 17Г1С. Анализ данных показывает, что с увели-

чением глубины  $L$  в зоне плавления (точки А–В) изменение микроструктуры (низкое содержание углерода и легирующих примесей) незначительное. Соответственно мало меняется и кинетика изменения  $H$  и  $H_2$  в точках А–В для рассматриваемых сталей. Небольшое отличие имеет точка Г в ЗТВ. Для стали Ст3 это отличие выражается в увеличении  $H$  и  $H_2$  в пределах 10 % с увеличением  $L$  от 0,1 до 100 м (рис. 4, 5). Для стали 17Г1С это отличие более заметно и выражается в увеличении  $H_2$  в точке Г с 7 до 9,5  $см^3/100 г$  (рис. 6, 7)



Таблица 4. Средние показатели концентрации Н и Н<sub>2</sub> в металле ЗП и ЗТВ в зависимости от глубины сварки L в различные моменты времени охлаждения t

L, м	t, с	Н, см <sup>3</sup> /100 г				Н <sub>2</sub> , см <sup>3</sup> /100 г			
		Ст3		17Г1С		Ст3		17Г1С	
		ЗП	ЗТВ	ЗП	ЗТВ	ЗП	ЗТВ	ЗП	ЗТВ
0,1	10	14,5	4,1	14,5	4,6	0,9	0,07	0,9	0,05
	20	9,6	3,9	9,5	3,5	3,5	0,8	3,5	1,9
	30	8,8	3,7	8,7	3,2	4,3	1,0	4,3	2,3
50	10	16,4	6	16,3	6,9	1,5	0,14	1,5	0,1
	20	11,4	5,1	11,2	4,4	4,6	1,3	4,5	3
	30	10,8	5	10,7	4,2	5,2	1,5	5,1	3,3
100	10	15,2	5,9	15	6,4	2,2	0,43	2,1	0,8
	20	11,4	5,2	11,3	4,3	4,9	1,48	4,8	3,2
	30	10,9	5	10,9	4,1	5,5	1,63	5,4	5,3

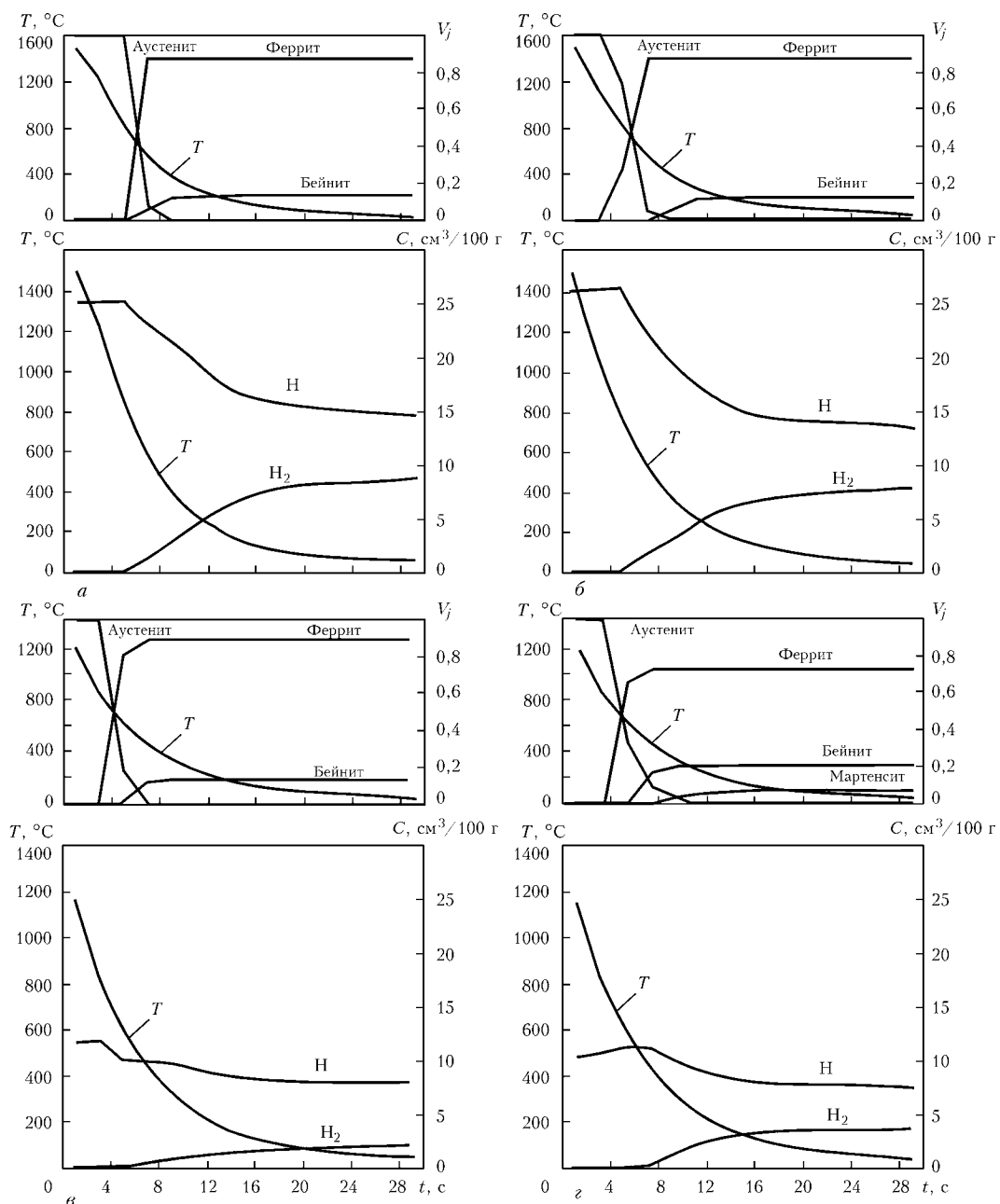


Рис. 5. Кинетика изменения во времени температур, микроструктурных составляющих  $V_j$ , диффузионного водорода Н, водорода в ловушках Н<sub>2</sub> для сварного соединения из стали Ст3 в характерных точках А (а), Б (б), В (в), Г (г) на глубине 100 мм

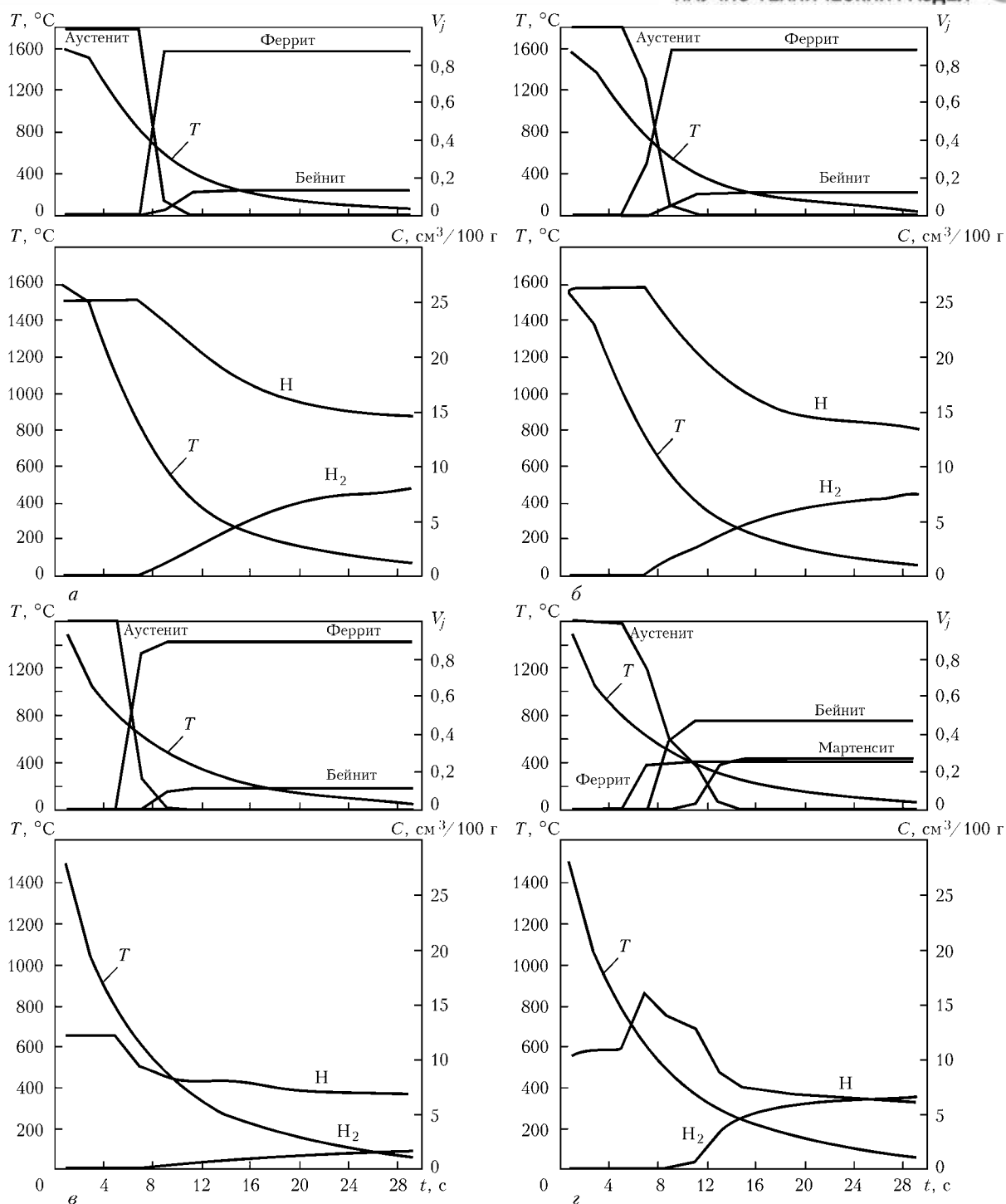


Рис. 6. Кинетика изменения во времени температур, микроструктурных составляющих  $V_j$ , диффузионного водорода Н, водорода в ловушках  $H_2$  для сварного соединения из стали 17Г1С в характерных точках А (а), Б (б), В (в), Г (г) на глубине 0,1 м

при примерно постоянном Н на уровне  $7 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ , что обусловлено более высоким содержанием мартенсита (около 30 % по сравнению со сталью Ст3, где  $V_m \approx 0,07 = 7 \%$ ).

Средние показатели концентрации  $H_{\text{диф}} = H$  и  $H_{\text{ост}} = H_2$  в металле ЗП и ЗТВ для рассматриваемых сталей в различные моменты времени охлаждения при сварке на различных глубинах приведены в табл. 4. Из этих данных также видно,

Таблица 5. Химический состав металла ЗП для варианта с аустенитным присадочным материалом

Область в ЗП	Массовая содержание элементов, %						$Cr^{eq}$	Nieq
	C	Ni	Mn	Cr	Mo	Si		
Основная масса металла ЗП	0,066	14,7	5,0	14,2	2,8	0,5	17,7	19,2
Слой у границы с основным металлом	0,066	8,74	3,85	7,32	1,86	0,45	9,7	12,8

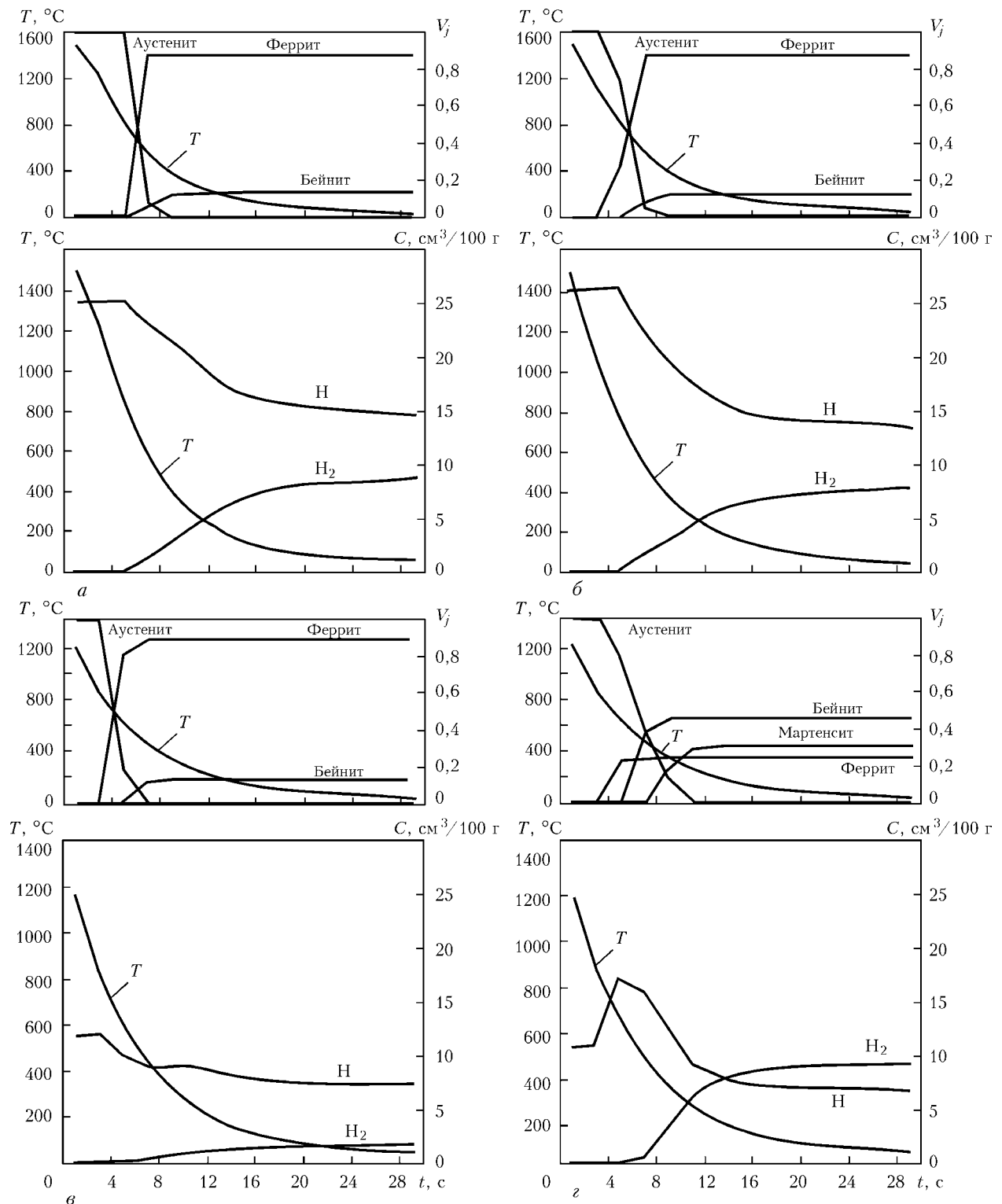


Рис. 7. Кинетика изменения во времени температур, микроструктурных составляющих  $V_j$ , диффузионного водорода Н, водорода в ловушках  $H_2$  для сварного соединения из стали 17Г1С в характерных точках А (а), Б (б), В (в), Г (г) на глубине 100 мм

что увеличение глубины приводит к возрастанию средних значений Н и  $H_2$  в металле ЗП и ЗТВ при охлаждении сварного соединения, однако при рассматриваемых режимах сварки оно не превышает 10 %.

Поскольку в рассматриваемой схеме рост поступления водорода определяется парциальным давлением последнего в парогазовом пузыре и временем существования этого пузыря в конкретном

участке сварного соединения, рассматривался вариант сварки корневого шва соединения, представленного на рис. 1, на увеличенной в 2 раза погонной энергии. Расчеты показали, что существенные различия концентрации водорода наблюдаются только в тонком поверхностном слое в моменты времени активного массообмена с парогазовым пузырем (рис. 8, 9). Видно, что общее содержание водорода увеличивается в результате

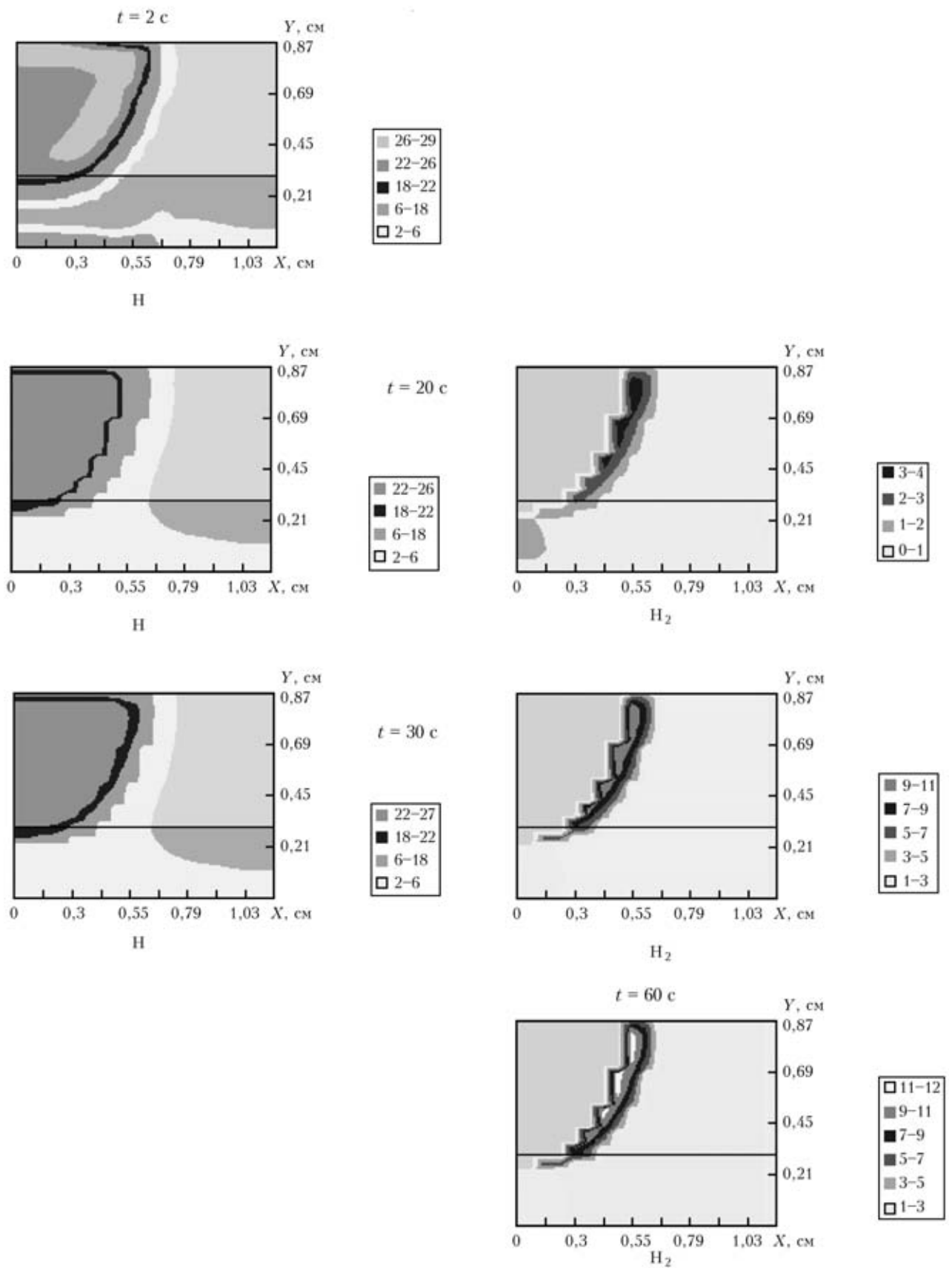


Рис. 8. Распределение H и H<sub>2</sub> в сечении корневого шва в различные моменты времени  $t$  при штатном режиме



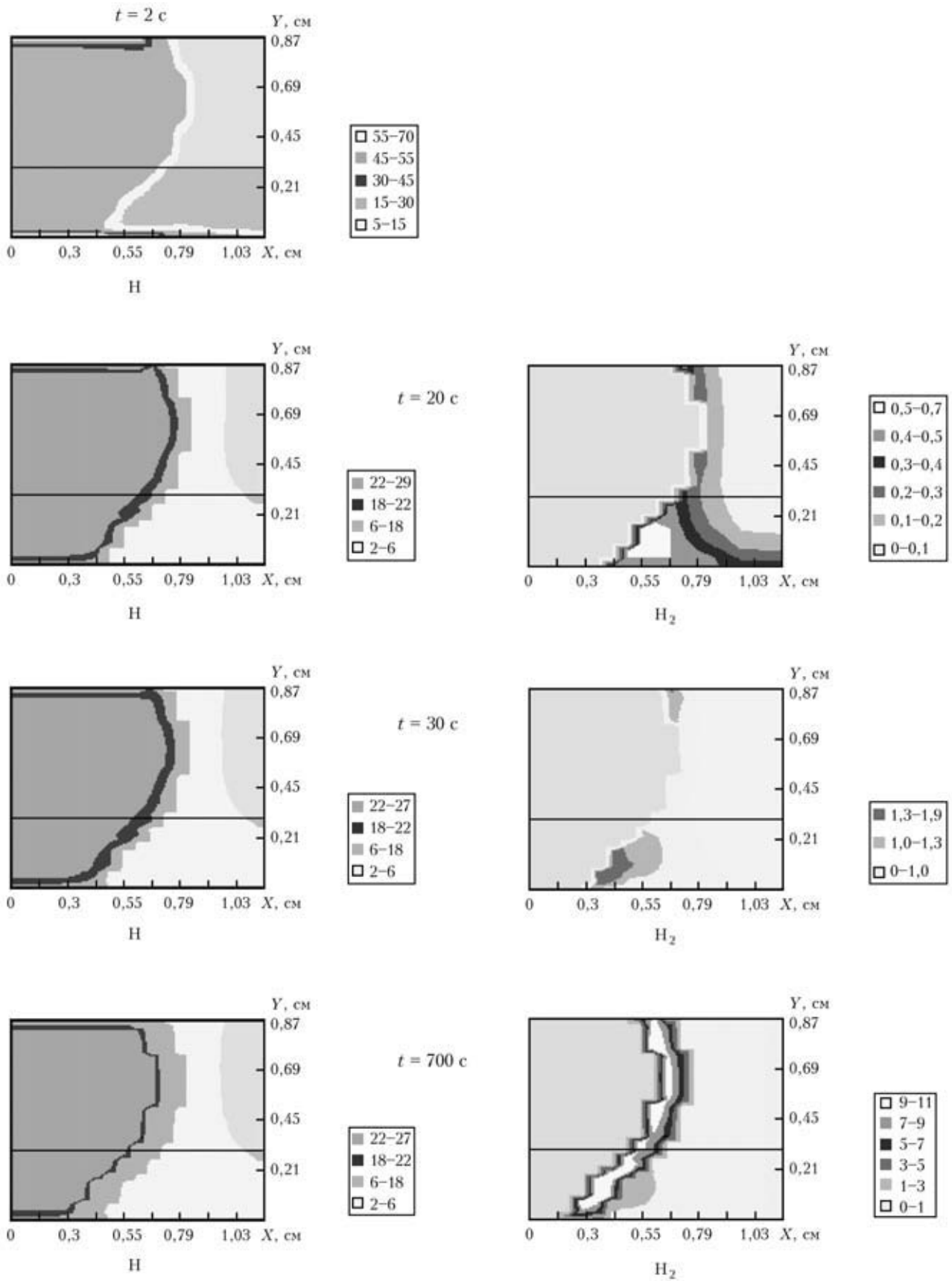


Рис. 9. Распределение H и H<sub>2</sub> в сечении корневого шва в различные моменты времени  $t$  и при увеличении погонной энергии в 2 раза

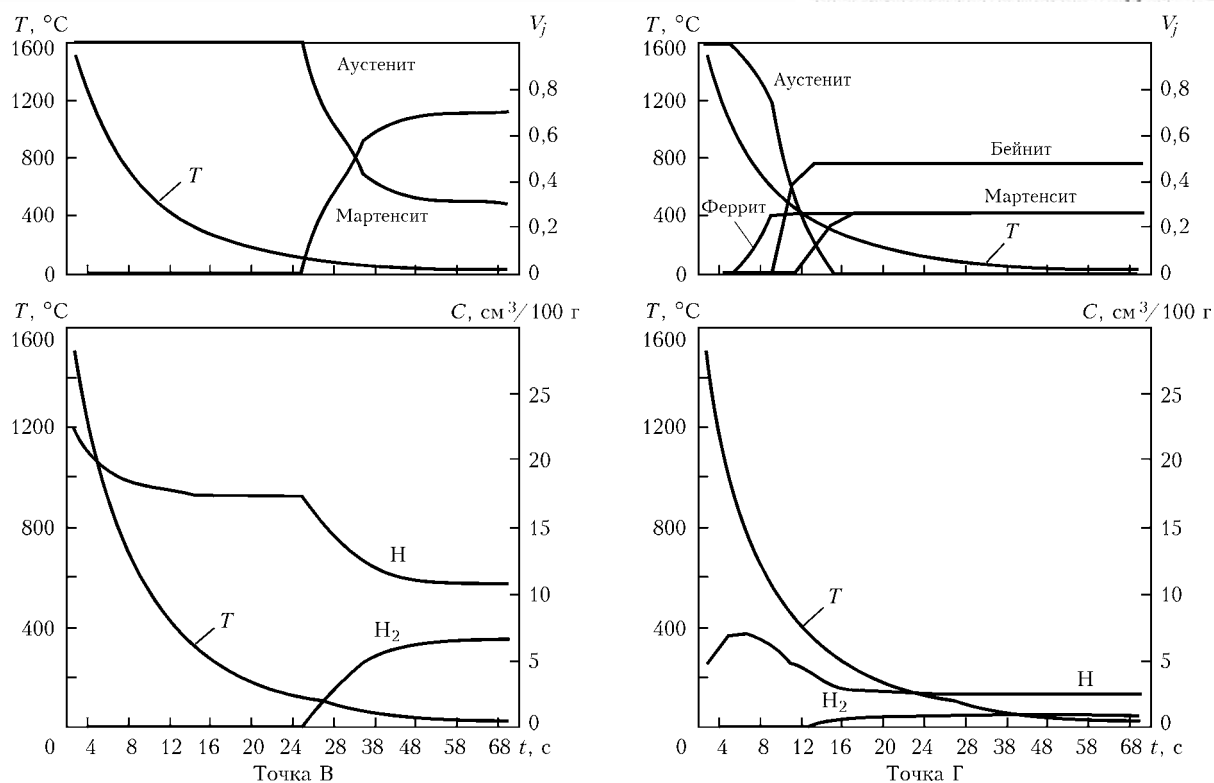


Рис. 10. Кинетика изменения во времени температуры, микроструктурных составляющих  $V_j$  ( $j$  — аустенит, бейнит, феррит, мартенсит), диффузионного водорода  $H$ , водорода в ловушках  $H_2$  в характерных точках  $B$  и  $\Gamma$  на глубине 0,1 м сварного соединения из стали 17Г1С с аустенитной присадкой

роста ЗП, средняя концентрация водорода в которой меняется незначительно, что связано с кратковременностью периода активного массообмена с парогазовым пузырем.

Из приведенных в табл. 4 данных видно, что содержание среднего диффузионного водорода  $H$  в металле ЗТВ стали 17Г1С вполне достаточно для образования холодных трещин. В этой связи рассматривали достаточно известный прием, связанный с использованием аустенитного присадочного материала для снижения концентрации диффузионного водорода в металле ЗТВ. Необходимые для расчета данные по химическому составу металла ЗП получены экспериментально на модельном образце и приведены в табл. 5.

В металле ЗП у границы с основным металлом находится небольшой слой толщиной 0,1... 0,2 мм, химический состав которого существенно отличается от среднего в металле ЗП.

В табл. 5 приведены значения  $C_{\Gamma_i^{eq}}$  и  $Ni_i^{eq}$  составов для диаграммы Шеффлера, позволяющие оценить микроструктуру после полного охлаждения (основная масса металла ЗП имеет аустенитную микроструктуру, а слой у границы — мартенситно-аустенитную). При этом начало мартенситного превращения наблюдается при температуре  $+115^\circ\text{C}$ , окончание — при  $-15^\circ\text{C}$ . В конце превращения содержание мартенсита составляет  $\sim 70\%$ , т. е.  $V_m = 0,7$ . На рис. 10 приведены расчетные данные по кинетике изменения температуры, микроструктуры и концентрации водорода  $H$  и  $H_2$  в характерных точках:  $B$  — слой с конечной мартенситно-аустенитной структурой,  $\Gamma$  — точка металла ЗТВ (см. рис. 3). Сравнивая данные на

рис. 8, 9 с аналогичными на рис. 6, видим, что концентрация диффузионного водорода в металле ЗТВ в точке  $\Gamma$  снизилась с 7,0 до 1,0  $\text{cm}^3/100\text{ г}$  за счет аккумуляции его в аустенитном металле шва, т. е. при мокрой подводной сварке применение аустенитного присадочного металла является эффективным средством снижения содержания водорода в металле ЗТВ углеродистых и низколегированных сталей.

### Выводы

1. Увеличение глубины мокрой подводной сварки малоуглеродистых и низколегированных сталей в пределах 0,1... 100 м способствует увеличению содержания диффузионного водорода в металле ЗП. Однако оно невелико (в пределах 10 %) при  $H_{\text{диф}}^{\text{cp}} \approx 9...11 \text{ cm}^3/100\text{ г}$  в металле ЗП и  $3,2...5,0 \text{ cm}^3/100\text{ г}$  в металле ЗТВ.

2. Повышение погонной энергии сварки приводит к общему увеличению содержания водорода в сварном соединении в основном за счет роста размеров ЗП. Роль массообменных процессов в парогазовом пузыре оказывает влияние на концентрацию водорода только в тонком поверхностном слое.

3. Содержание  $H_{\text{диф}}$  в металле ЗТВ стали СтЗ недостаточно для образования холодных трещин даже при сварке рассматриваемого соединения в жестких условиях.

4. Содержание диффузионного водорода в металле ЗТВ стали 17Г1С вполне достаточно для образования холодных трещин при сварке рассматриваемого соединения в жестких условиях (см. табл. 1).



5. Использование аустенитного присадочного материала является эффективным приемом снижения концентрации диффузионного водорода в металле ЗТВ низколегированных сталей при мокрой подводной сварке.

1. *Suga J., Hasui A.* On formation of porosity in underwater wet weld metal (the first report) // Trans. Jap. Weld. Soc. — 1986. — 17(1). — P. 58–64.
2. *Ando S., Asahami T.* A study on the metallurgical properties of steel welds with underwater gravity welding // Proc. conf. «Underwater welding». — Pergamon press, 1983. — P. 225–261.
3. *Rowe M. D., Liu S., Reynolds T. J.* The effect of ferroalloy additions and depth on the quality of underwater wet welds // Welding J. — 2002. — August. — P. 156–166.
4. *Welding Handbook. Materials and Applications.* — Miami: AWS, 1998. — Vol. 4, pt. 2. — 620 p.

A calculation-experimental method is used to analyze the features of hydrogen transport in wet underwater arc welding of the root pass on low-carbon and low-alloyed steel. The influence of the penetration depth and type of filler metal on hydrogen concentration in the weld metal and HAZ is shown.

5. *The determination of hydrogen distribution in high-strength steel weldments. Part 1: Laser ablation methods* / R. D. Smith, G. P. Landis, I. Maroff et al. // Welding J. — 2001. — № 5. — P. 115–122.
6. *Махиенко В. И., Королева Т. В., Лавринец И. Г.* Влияние микроструктурных изменений на перераспределение водорода при сварке плавлением конструкционных сталей // Автомат. сварка. — 2002. — № 2. — С. 7–13.
7. *Michailov V.G., Thomas K., Vohlhardt H.* Numerische Simulation der Wasserstoffverteilung in mehrlagigen Schweißverbindungen // Schweißen und Schneiden. — 1996. — № 48. — S. 47–50.
8. *An analysis of effect of microstructure, strain and stress on the hydrogen accumulation in the weld heat affected zone* / N. Jurioka, S. Ohwhita, H. Nakamura, K. Asamo. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IX-1161–80).
9. *Походня И. К., Пальцевич А. П., Явдоцин И. Р.* Хромотографический метод определения количества диффузионного водорода в сварных швах. — Киев, 1978. — [4] с. — (Информ. письмо / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона; № 37).

Поступила в редакцию 04.12.2002

#### МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

### НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ (НПМ) — 2004

20–23 сентября 2004

г. Волгоград, Россия

- Секция «Наноматериалы и технологии (НМТ)»
- Секция «Слоистые композиционные материалы (СКМ)»
- Секция «Порошковая металлургия (ПМ)»

В работе конференции, ставящей своей целью стимулировать контакты между специалистами, работающими в области наноматериалов и технологий, слоистых композиционных материалов, порошковой металлургии и других отраслях материаловедения, примут участие ведущие ученые и инженеры России и других стран.

В рамках конференции планируется работа следующих секций:

• **Наноматериалы и технологии — 2004** (подсекции: Структура металлических, керамических и композиционных наноматериалов; Прочностные, трибологические, магнитные и другие свойства наноматериалов; Методы получения наноматериалов и изделий из них). Координатор — ИМЕТ им. А. А. Байкова РАН.

• **Слоистые композиционные материалы — 2004** (подсекции: Физико-химические аспекты соединения разнородных материалов; Математическое моделирование и механика слоистых композитов; Структура, свойства и технология слоистых композиционных материалов). Координатор — ВолгГТУ.

• **Порошковая металлургия — 2004** (подсекции: Функциональные порошковые материалы; Организация производства порошковых изделий — пример эффективности инновационной деятельности). Координатор — НЦ ПМ, г. Пермь.

Планируется издание сборника трудов к открытию конференции.

#### Адрес оргкомитета конференции:

400131, Волгоград, пр. Ленина, 28, Волгоградский государственный технический университет  
+7(8442) 34-99-41 Кидалов Николай Алексеевич  
34-06-42 Кузьмин Сергей Викторович  
34-16-00 Адаменко Нина Александровна  
34-99-41 (факс)  
e-mail: weld@vstu.ru, lysak@vstu.ru  
www.vstu.ru