



УДК 621.791.75:620.191.33.001:621.57

# КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА «ПРИВАРКА ТРУБОК К ТРУБНОЙ РЕШЕТКЕ ТЕПЛООБМЕННИКОВ»

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО**, канд. физ.-мат. наук,  
**О. В. МАХНЕНКО**, канд. техн. наук, **Г. Ф. РОЗЫНКА**, **Н. И. ПИВТОРАК**, инженеры  
 (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**П. ЗАЙФФАРТ**, проф. (SLV M/V GmbH), **К. БАУЦМАН**, инж. («Infracog», Германия)

Описана компьютерная программа и показаны ее возможности при оценке как локальных явлений, связанных с приваркой отдельных трубок (скорости охлаждения, микроструктурные изменения, остаточные напряжения), так и общих деформаций трубной решетки в зависимости от свойств материалов, геометрических размеров, типа соединения, порядка приварки трубок к трубной решетке.

*Ключевые слова:* компьютерная программа, математическое моделирование, расчетные алгоритмы, электродуговая приварка, трубки, трубная решетка, теплообменник, банк данных, температурные поля, химический состав, микроструктура, диаграмма АРА, диаграмма Шеффлера, околосварная зона, качество технологического процесса, кинетика деформаций, остаточные напряжения, холодные трещины

Сварные узлы типа «трубная решетка–трубки» являются весьма характерными для современных теплообменных аппаратов. Очень часто трубки и решетки изготавливаются из различных сталей, что создает определенные сложности в получении качественного соединения. В ряде случаев при приварке трубок могут возникнуть проблемы деформаций трубной решетки. Обычно они решаются экспериментально, что требует достаточно больших затрат средств и времени. В этой связи возникает потребность в использовании математического моделирования для частичного решения указанных вопросов с помощью современной компьютерной техники, что позволит сократить объем дорогостоящих экспериментальных исследований при отработке технологии. В результате сотрудничества Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, SLV (Мекленбург) и фирмы «Infracog» (Германия) была создана компьютерная программа, в основу которой положены расчетные алгоритмы математического моделирования основных физических явлений, сопровождающих процесс электродуговой приварки трубок к трубной решетке, в сочетании с банком данных основных расчетных характеристик (теплофизические свойства, характеристики микроструктурных превращений, механические свойства) для типовых материалов труб и трубных решеток, используемых в теплообменниках. Краткому описанию этой программы и демонстрации ее возможностей посвящена данная статья.

## Краткое описание компьютерной программы.

«Дружеский интерфейс» позволяет оперативно использовать программу разработчикам технологии без поиска дополнительных сведений, выходящих за рамки технологической информации.

На рис. 1 приведено изображение экрана при вводе исходных данных, включающих выбранный материал, геометрические размеры, режимы и условия сварки. При назначении материалов пользователь может ознакомиться со списком наименований материалов в банке данных, а также с конкретным содержанием информации по данному материалу (табл. 1, 2). При выборе геометрических параметров сварного соединения предварительно выбирают тип соединения (один из пяти, приведенных на рис. 2) и указывают геометрические размеры  $a$ ,  $x$ . Вводятся основные конструктивные геометрические размеры (рис. 1), в том числе и

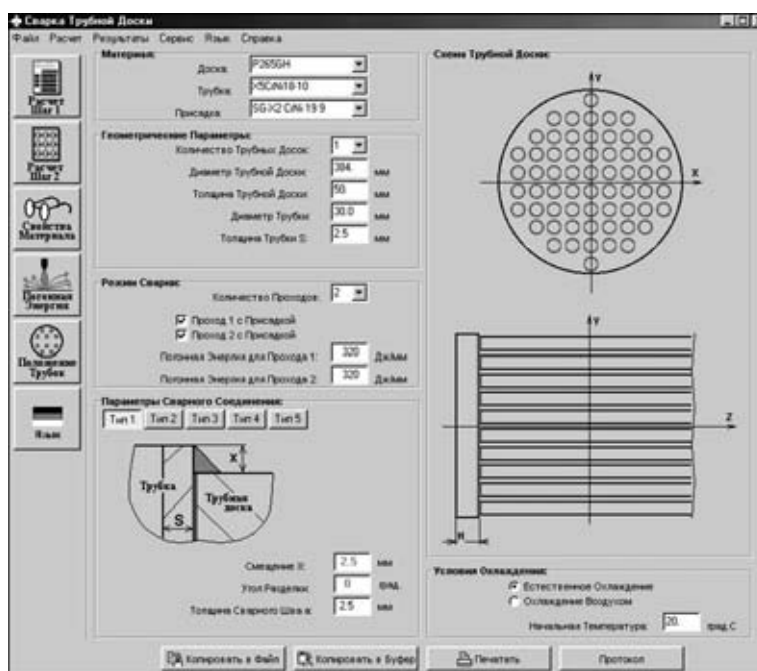


Рис. 1. Изображение экрана при вводе исходных данных

© В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко, О. В. Махненко, Г. Ф. Розынка, Н. И. Пивторак, П. Зайффарт, К. Бауцман, 2002



Таблица 1. Наименование сталей, расчетные характеристики которых содержатся в банке данных

Материал трубной доски и трубок по EN (отечественные аналоги)	Присадочный материал по DIN 8557 (отечественные аналоги)
10CrMo9-10 (14X3M)	SG2 (09Г2)
11CrMo9-10 (15X3M)	SCMo (09ГМ)
13CrMo4-5 (18XM)	SGCrMo1 (10XГМ)
16Mo3 (сталь 20 с 0,3%Mo)	SGCrMo2 (10XГМ2)
P235GH (16ГФТ)	SG-X5CrNiMoNb 19 12 (08X19H12M)
P235G2TH (16Г2ФТ)	SG-X5CrNiNb 19 9 (08X19H9H)
P265GH (20ГФТ)	SG-X15CrNiMn 18 8 (15X20H9Г6)
P295GH (20Г2ФТ)	FLUXOFIL M 8 (06ГС)
P355GH (20Г2ФТ)	FLUXOFIL M 10 (06ГС)
X2CrNiMoN22-5-3 (08X22H5M3)	
X5CrNi18-10 (08X18H10)	
X6CrNiMoTi17-12-2 (10X17H12M2T)	
X6CrNiTi18-10 (08X18HT)	

Таблица 2. Распечатка из банка данных информации относительно расчетных характеристик стали P265GH

Тип стали (1- аустенитная, 2- ферритно-перлитная сталь):  
2  
P265GH

Предел текучести  $\sigma_T(20^\circ\text{C})$ , МПа при 20 °C в зависимости от толщины D:

Dmin, мм	Dmax, мм	$\sigma_T(20^\circ\text{C})$ , МПа
0	16	265
16	40	255
40	60	245
60	100	215
100	150	200

T, °C	E, МПа	$\frac{\sigma_T(T)}{\sigma_T(20^\circ\text{C})}$	$\alpha$ , 1/°C	$\lambda$ , Дж/см·с·°C	$\sigma_f$ , Дж/см <sup>3</sup> ·°C
20	198000	1.000	.0000122	.515	3.79
100	184000	.918	.0000130	.510	3.85
200	176000	.867	.0000144	.485	4.12
300	167000	.836	.0000158	.444	4.41
400	158000	.775	.0000168	.427	4.77
500	134000	.704	.0000168	.393	5.32
600	115000	.551	.0000163	.356	6.01
700	105000	.285	.0000158	.319	6.59
800	92000	.132	.0000158	.259	6.57
900	70000	-	-	-	5.06
1000	52000	-	-	-	5.06
1100	24000	-	-	-	5.09
1200	7000	-	-	-	5.26

Химический состав:

C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V
.20	.40	1.4	0.03	0.025	0.02	0.3	.3	0.08	0.01	0.3	0.03	0.02

$T_{\text{жидкост}}(^\circ\text{C})$ : 1450  
 $T_{\text{сольнатуре}}(^\circ\text{C})$ : 1480  
 Скрытая теплота плавления (Дж/кг): 2.10

мартенсит		бейнит		феррит-перлит	
Tn	Tk	Tn	Tk	Tn	Tk
415	250	650	415	750	650

dt - время охлаждения от 800 до 500 °C, соответствующие 85% и 50% превращения в мартенсит (m) и феррито-перлит (fp)  
 dt (m85)    dt (m50)    dt (fp85)    dt (fp50) [сек]  
 2                    3                    250                    25

координаты положения центров трубок на трубной доске.

Для последней операции имеется специальная подпрограмма, с помощью которой компьютер автоматически сначала вчерне «размещает» трубки по заданному шагу  $t = \text{const}$  между центрами трубок, а затем пользователь по чертежу вносит отдельные коррективы. В случае необходимости пользователь может решать с помощью обращения «help» возникшие отдельные вопросы. По желанию пользователя программа работает на одном из трех языков (русский, английский, немецкий).

Предусмотрены два характерных варианта теплообменника: с одной трубной доской, когда вход и выход трубки на одной доске, и с двумя трубными досками и прямыми трубками с учетом того, что приварка концов каждой трубки идет одновременно. Приварка концов к трубной решетке производится дуговой сваркой неплавящимся электродом (с присадкой и без присадки) с пульсацией сварочного тока. Параметры пульсации тока задаются исходными данными так же, как скорость вращения сварочной головки.

Температурные поля при такой сварке рассчитываются [1, 2]. Определяются размеры и форма зоны проплавления трубки, трубной доски и предыдущего слоя (при двухслойной сварке). На основе этих данных оценивается средний химический состав расплавленной зоны, что является основой для дальнейших расчетов ее микроструктурного состояния. Последнее рассчитывается с использованием диаграммы Шеффлера для высоколегированной стали либо с использованием соответствующих диаграмм АРА для низколегированных ферритных сталей [3, 4]. Диаграммы АРА используются и для околошовной зоны в трубной доске. Соответствующие характеристики для параметрических уравнений, связывающих количество ожидаемой фазы в микроструктуре со временем охлаждения  $t_{8/5}$  в интервале 800... 500 °C, приведены в банке данных (табл. 2). Там же приведены температуры  $T_n^j$  и  $T_k^j$ , определяющие начало и конец появления соответствующей фазы в  $j$ -микроструктуре при характерных для такой сварки (малые погонные энергии) значениях  $t_{8/5}$ . Знание температурных полей и объемных изменений, связанных с температурным расширением и микроструктурными изменениями, позволяет проследить развитие упругопластических деформаций вплоть до остаточного состояния [5].



Рис. 2. Типы геометрии сочетания трубки с трубной решеткой, предусмотренные программой

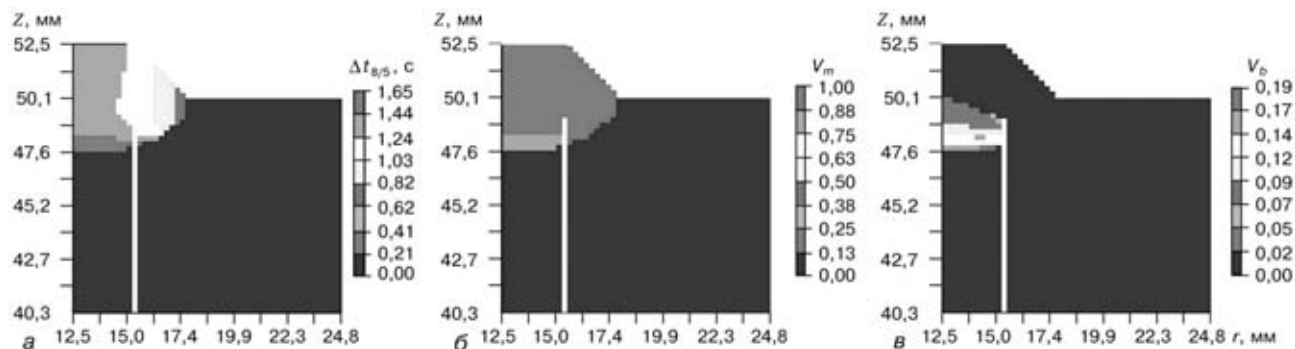


Рис. 3. Длительность охлаждения  $\Delta t_{8/5}$  (а) и результаты расчета содержания мартенсита (б) и бейнита (в) в зоне сварного шва для соединения типа № 1 (первая серия)

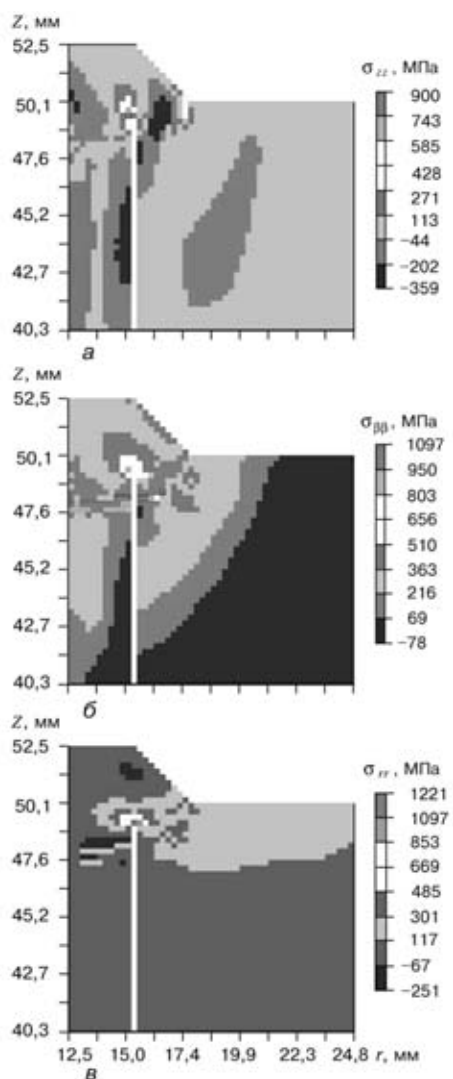


Рис. 4. Результаты расчета остаточных напряжений в зоне сварного шва  $\sigma_{zz}$  (а),  $\sigma_{\phi\phi}$  (б) и  $\sigma_{rr}$  (в) для соединения типа № 1 (первая серия)

Величина и распределение остаточных напряжений в сочетании с данными относительно микроструктурного состояния в шве и околошовной зоне является одной из характеристик качества технологического процесса с позиций, например, образования холодных (водородных) трещин.

Кроме того, получаемые локальные данные относительно кривизны трубной доски затем используются в приближенном методе «функции усадки» (inherent strain method) [6, 7] для получения данных относительно кинетики изгибных дефор-

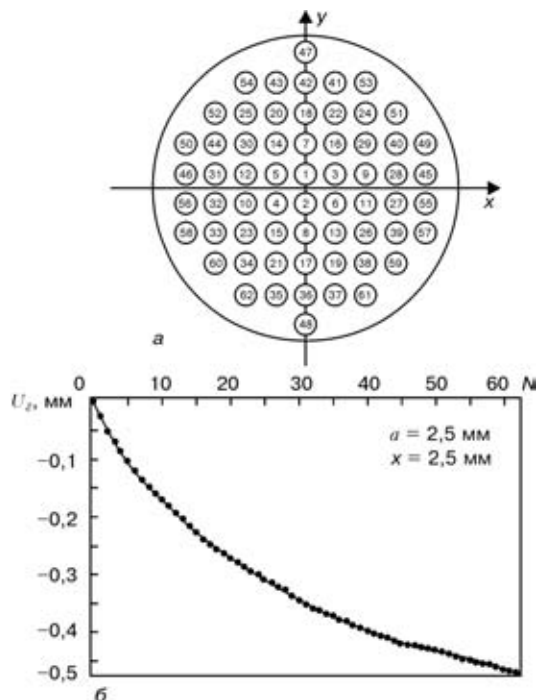


Рис. 5. Последовательность приварки трубок (а) и кинетика изменения прогиба центра трубной доски после приварки очередной трубки (б) для соединения типа № 1 (первая серия) ( $N$  – номер привариваемой трубки)



Таблица 3. Химический состав материалов, используемых в расчете

Материал	Массовая доля элементов, %												
	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V
P265GH (трубная доска)	0,20	0,40	1,40	0,030	0,025	0,02	0,30	0,30	0,08	0,01	0,30	0,03	0,02
P235G2TH (трубки)	0,17	0,35	0,60	0,040	0,040	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SG2 (присадочный материал)	0,080	0,85	1,50	0,025	0,025	—	—	—	—	—	—	—	—
X5CrNi18-10 (трубки)	0,060	0,45	1,58	0,023	0,019	0,0	18,02	0,0	0,0	0,0	9,8	0,0	0,0
SG-X2CrNi 19 9 (присадочный материал)	0,025	0,90	1,70	0,023	0,020	—	—	—	—	—	—	—	—

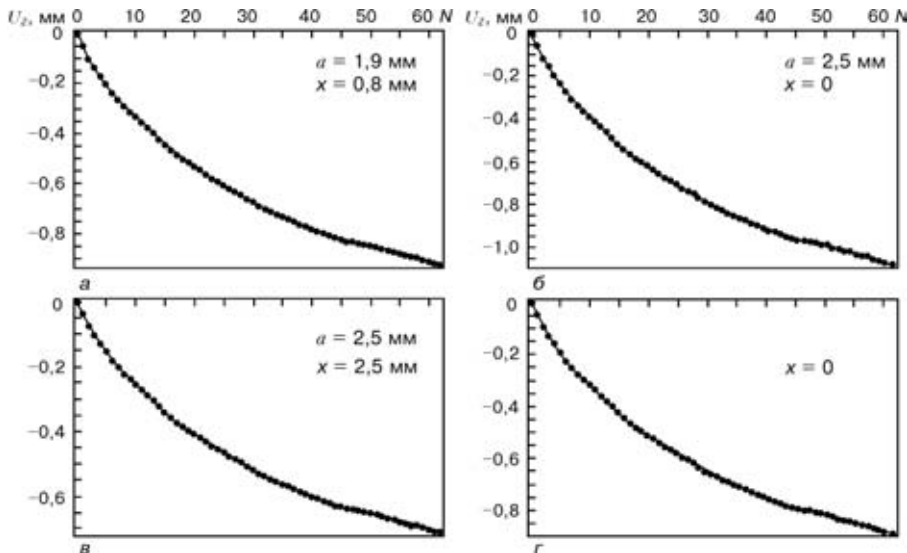


Рис. 6. Кинетика изменения прогиба центра трубной доски после приварки очередной  $N$ -й трубки для соединений соответственно типа № 2–5 ( $a-x$ )

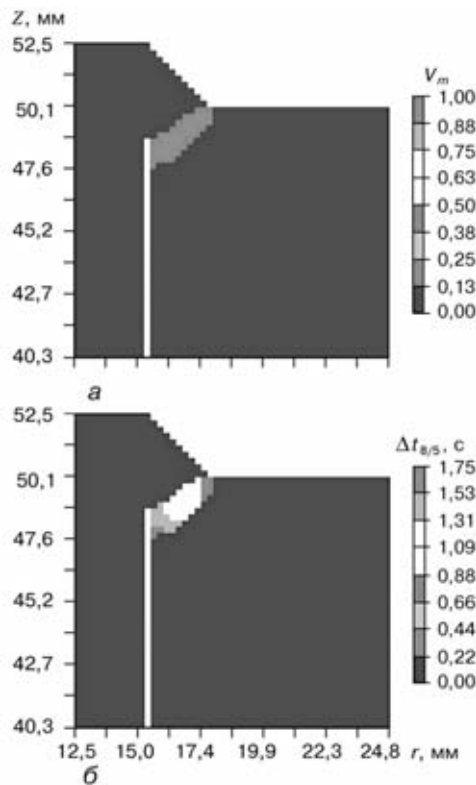


Рис. 7. Результаты расчета содержания мартенсита ( $a$ ) и длительности охлаждения  $\Delta t_{8/5}$  ( $б$ ) для соединения типа № 1 (вторая серия)

маций трубной доски от последовательной приварки всех трубок.

**Примеры использования.** Рассмотрим несколько примеров использования описанной программы для получения информации, необходимой при оценке альтернативных вариантов технологии. Узел теплообменника из трубной доски (см. рис. 1) диаметром 384 мм из ферритной стали P265GH по EN 10028-2 1992 с 58 отверстиями для концов трубок диаметром 30 мм (толщина стенки 2,5 мм). В первой серии расчетов принимали материал трубки

сталь P235G2TH по EN 100281-2. Во второй серии материал трубок — аустенитная сталь X5CrNi18-10 по DIN 8556. В качестве присадки в первой серии использовали материал SG2, а во второй — SG-X2CrNi 19 9.

Химический состав основного и присадочного материалов приведен в табл. 3. Сварку выполняли за два прохода в аргоне неплавящимся электродом с пульсацией сварочного тока. Средняя погонная энергия по длине кольцевого шва на каждом проходе  $q_{II} \cong 320$  Дж/мм. Рассматривался вариант теплообменника с одной трубной доской и различными типами соединений (см. рис. 2), а также вариант с двумя трубными досками и различной длиной трубок  $L$ , привариваемых одновременно с обоих торцов.

На рис. 3–5 представлены результаты расчета для первой серии опытов, когда трубки выполнены из ферритно-перлитной стали P235G2TH, а сварное соединение соответствует типу № 1 на рис. 2. Сварка без предварительного подогрева.

Обращает внимание обилие закалочных микроструктур (мартенсита) в зоне сварного шва, что обусловлено достаточно быстрым охлаждением этой зоны  $\Delta t_{8/5} \approx 1,5...1,6$  с (рис. 3,  $a$ ) и относительно высоким содержанием углерода и марганца.

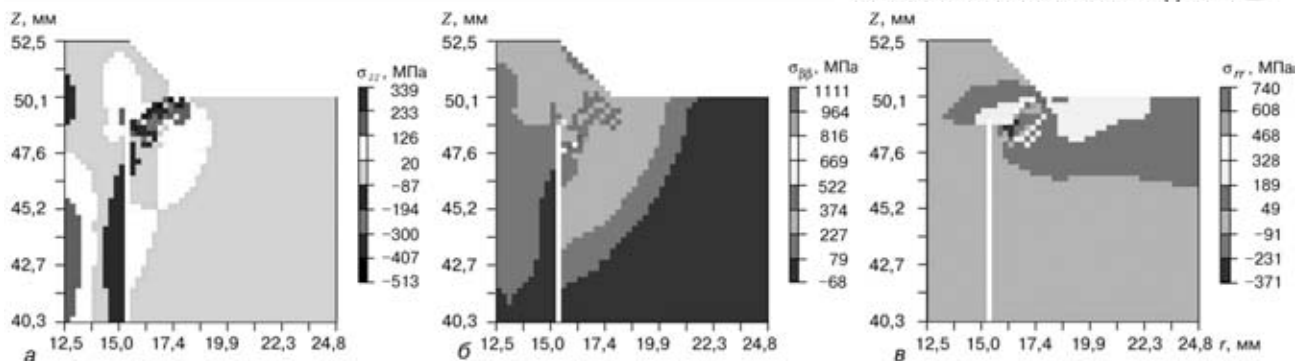


Рис. 8. Результаты расчета остаточных напряжений в зоне сварного шва  $\sigma_{zz}$  (а),  $\sigma_{\phi\phi}$  (б) и  $\sigma_{rr}$  (в) для соединения типа № 1 (вторая серия)

Наличие твердых микроструктур в зоне сварного соединения обуславливает появление достаточно высоких пиков остаточных напряжений (рис. 4). Однако размеры зон с высокими остаточными напряжениями невелики — это небольшие вкрапления. Такие напряжения могут способствовать образованию холодных трещин, однако их протяженность будет незначительной. Тем не менее считаться с такой угрозой следует.

Данные на рис. 5, б демонстрируют кинетику изменения прогиба центра трубной доски по мере приварки трубок (порядок приварки указан на рис. 5, а) первой серии сварного соединения типа № 1 при одной трубной доске. Видно, что максимальный прогиб в конце приварки всех трубок составляет примерно 0,47 мм. Следует отметить, что этот результат достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными для такого варианта сочетания геометрических размеров, материалов и режимов сварки.

Аналогичные данные получены и для других типов сварных соединений, приведенных на рис. 2. Не имея возможности подробно останавливаться на особенностях для каждого типа сварного соединения, отметим только их влияние на деформации трубной решетки. Данные на рис. 6 демонстрируют это влияние. Сравнивая их с данными на рис. 5, б видим, что наиболее рационален с этих позиций тип соединения № 1, указанный на рис. 2.

Вторая серия вариантов расчета с трубками из аустенитной стали X5CrNi18-10 с присадкой SG-X2CrNi 19 9 представлена отдельными результатами на рис. 7–10.

Данные на рис. 7–9 соответствуют типу № 1 сварного соединения согласно рис. 2. Сравнивая их с данными на рис. 3–5, видим, что наличие закалочных структур для такого вари-

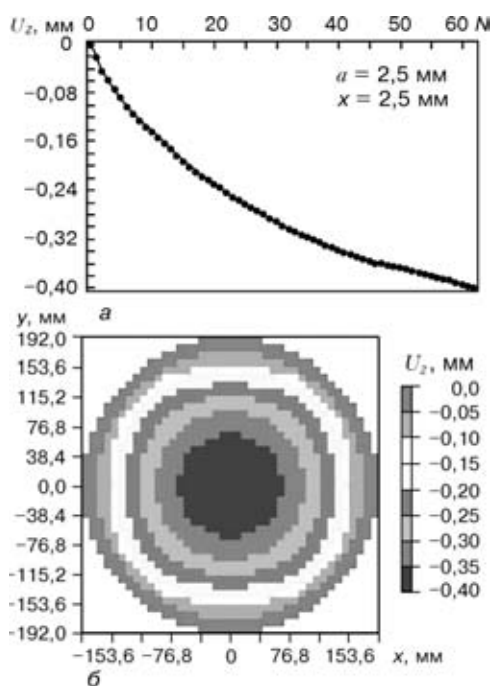


Рис. 9. Результаты расчета кинетики изменения прогиба центра трубной доски в процессе приварки трубок (а) и распределение остаточных прогибов в различных точках трубной доски (б) для сварного соединения типа № 1 (вторая серия) (порядок приварки трубок по рис. 5, а)

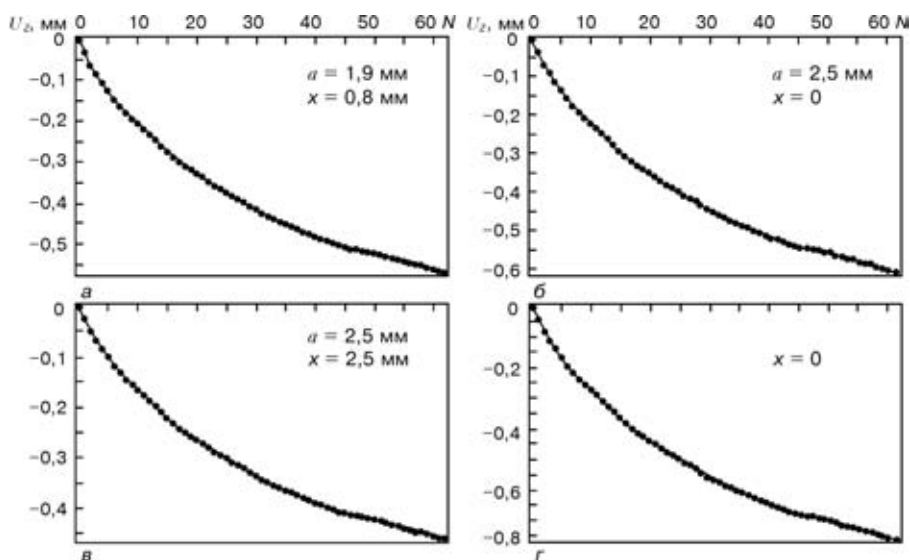


Рис. 10. Кинетика изменения прогиба центра трубной решетки для соединений соответственно типа № 2–5 (а–г) (вторая серия)

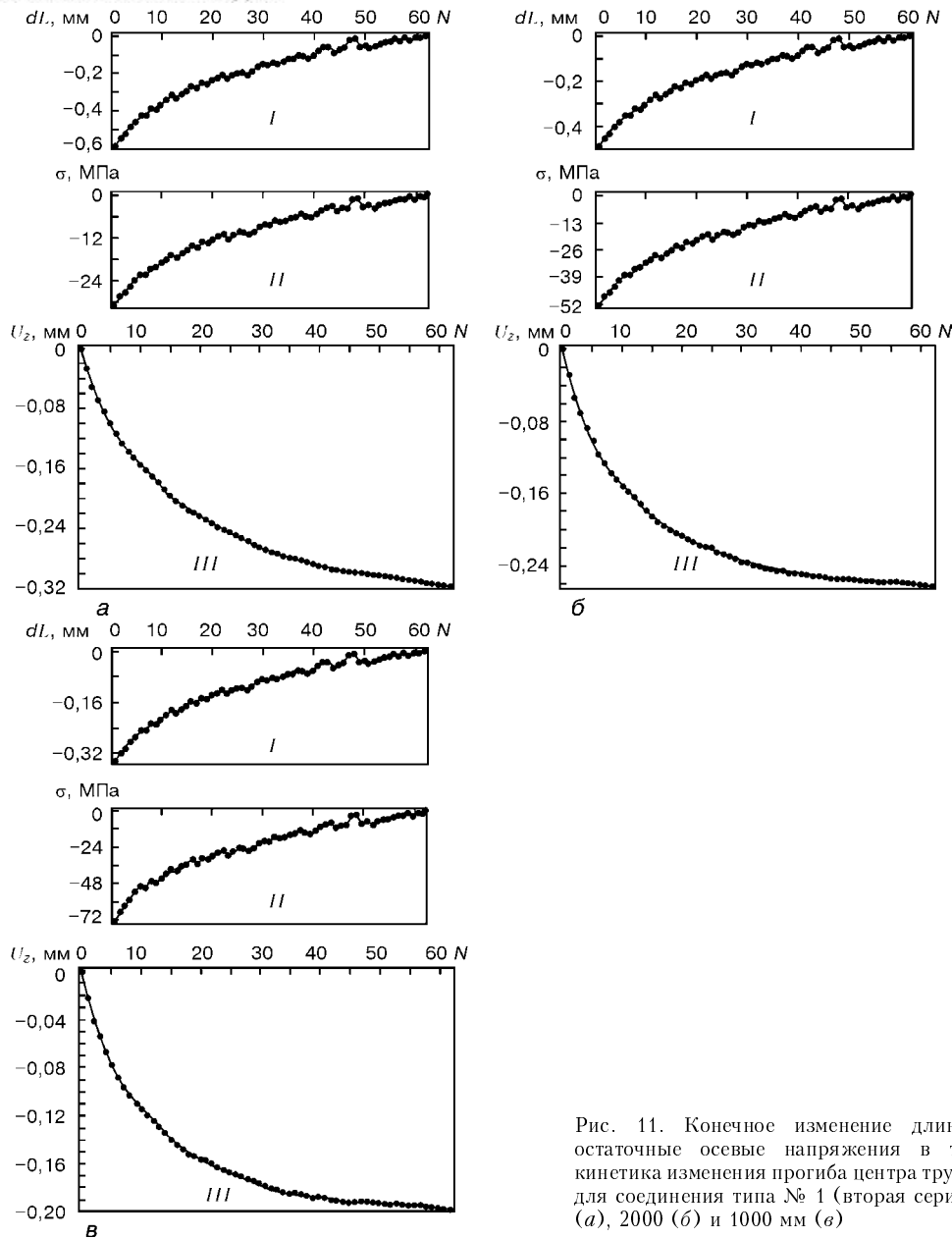


Рис. 11. Конечное изменение длины трубок (I), остаточные осевые напряжения в трубках (II) и кинетика изменения прогиба центра трубной доски (III) для соединения типа № 1 (вторая серия) при  $L = 4000$  (а), 2000 (б) и 1000 мм (в)

анга наблюдается только в околошовной зоне в трубной доске, где имеются небольшие вкрапления высоких растягивающих напряжений  $\sigma_{rr}$ , с которыми, очевидно, также следует считаться с позиций холодных трещин.

Однако, если для первой серии наиболее опасным является околошовная зона в трубке с высокими пиками ( $\sim 1000$  МПа) напряжений  $\sigma_{\beta\beta}$  (рис. 4, б), то здесь зоной риска является околошовная зона трубной решетки с высокими пиками ( $\sim 700$  МПа) напряжений  $\sigma_{rr}$ .

Сравнивая деформации трубной решетки на рис. 5, б и рис. 9, а, видим, что во второй серии эти деформации примерно на 15 % ниже для соединений типа № 1. Для других типов соединений (см. рис. 6 и 10) эта разница еще более значительная: для типов № 2 и 3 на 40 %, для типа № 4 на 35 и № 5 на 16 %. Указанное снижение общих деформаций трубной решетки вызвано тем, что во второй серии

усадочные явления при приварке трубок в значительной степени происходят в аустенитной зоне (трубка и зона проплавления), где материал обладает большей податливостью, что обуславливает более низкий уровень остаточных напряжений и деформаций трубной решетки. Наиболее существенно указанное явление заметно для соединений типа № 2 и 3 (см. рис. 2), когда за счет разделки значительная часть активной зоны усадки имеет аустенитный металл.

Влияние длины трубок  $L$  на прогибы и уровень напряжений в трубках при конструкции теплообменника с двумя трубными досками показано на примере соединения типа № 1 второй серии. Порядок приварки трубок тот же. На рис. 11 приведены данные по влиянию длины  $L$  на прогиб центра трубной решетки и осевые напряжения в трубках. Видно, что при  $L > 4000$  мм взаимное влияние трубных досок незначительное, а при  $L <$

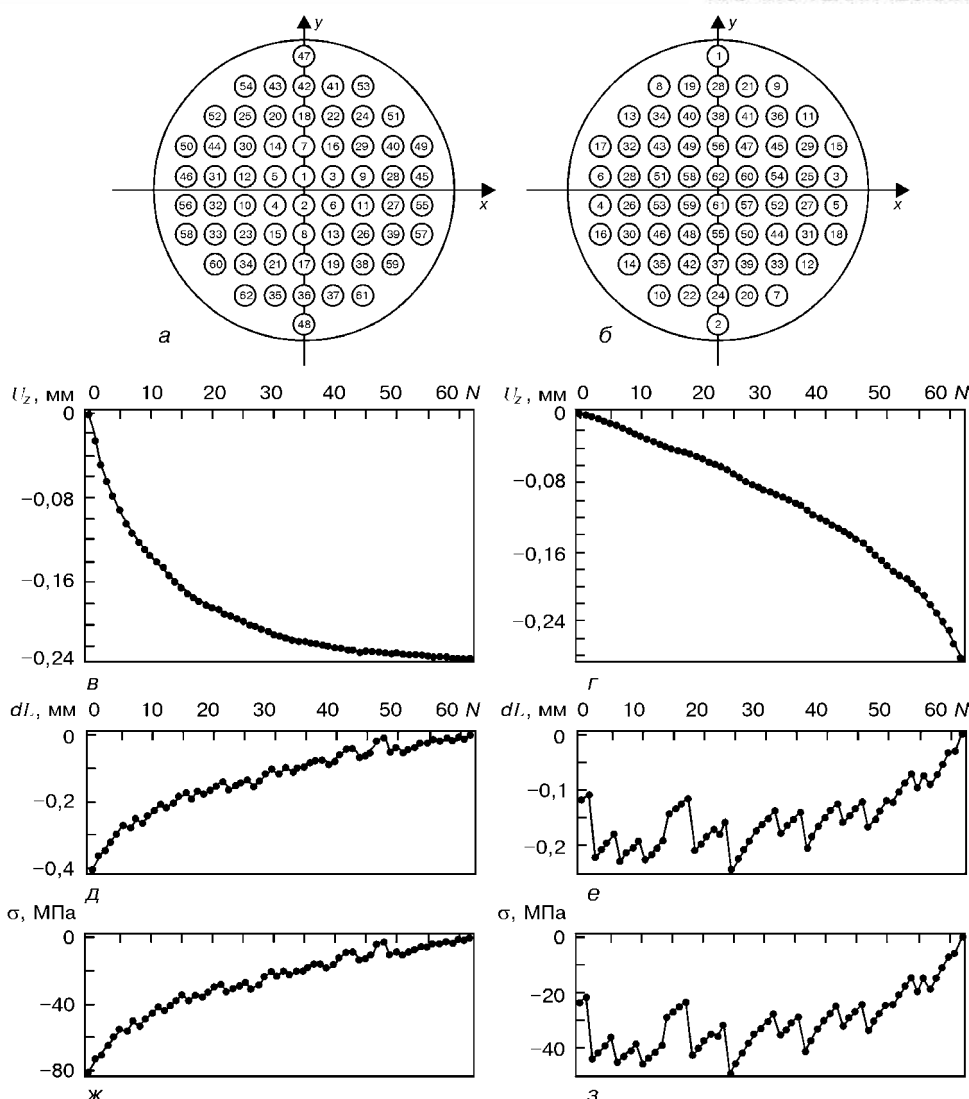


Рис. 12. Деформации трубной доски и трубок в случае соединения типа № 1 двух трубных досок (длина трубок 1 м) и для двух вариантов последовательности сварки: *a* — первый вариант — от центра к краям; *б* — второй вариант — от краев к центру; *в, г* — кинетика прогиба центра трубной доски по мере приварки трубок соответственно для первого и второго варианта; *д-з* — изменения длины трубок и напряжений в трубках после приварки всех трубок соответственно для первого и второго варианта (первая серия)

< 1000 мм деформации заметно уменьшаются, но при этом возрастают осевые напряжения в трубках. Распределение напряжений между трубками здесь существенно зависит от порядка их сварки с трубной решеткой (рис. 12).

Максимальные осевые сжимающие напряжения возникают при данном порядке выполнения сварки (см. рис. 5, *a*) в центральных трубках, заваренных в первую очередь. Это эффективно с позиций снижения деформаций трубной решетки, однако способствует значительной осевой нагрузке центральных трубок, что может привести к потере устойчивости. Действительно, критическую нагрузку для идеально прямой трубки с жестко заделанными концами можно определить по зависимости

$$\sigma_{кр} = -\frac{4\pi^2 E}{\lambda^2},$$

где  $\lambda$  — продольная жесткость, равная  $\lambda = L/i$ ;  $i$  — радиус момента инерции сечения трубки, в данном случае  $i = 3,88$  мм.

Согласно расчету величина  $\sigma_{кр}$  для труб длиной 1000, 2000, 4000 мм соответственно составляет -118,5; -29,6; -7,4. Сравнивая данные рис. 11, видим, что при порядке приварки трубок, указанном на рис. 5, *a*, при  $L = 2000$  мм и более риск потери устойчивости центральных трубок весьма значителен.

**Заключение.** Разработанная компьютерная программа позволяет прогнозировать при сварке характерного узла теплообменников (трубная решетка с трубками) размеры зоны проплавления, ее средний химический состав и микроструктуру, изменение микроструктуры в околошовной зоне основного металла, остаточные локальные напряжения в зоне соединения, общие деформации трубной решетки и остаточные осевые усилия в трубках.



Программа оснащена базой данных по теплофизическим, механическим и металлофизическим (характеристики диаграммы АРА и Шеффлера) свойствам типовых материалов для рассматриваемых узлов и имеет «дружеский интерфейс» пользователя.

Результаты апробирования программы на конкретном сочетании геометрических размеров, механических свойств и режимов сварки, взятых из опыта, показывают следующее:

— имеет место удовлетворительное согласование расчетных данных с экспериментом по наиболее сложному показателю прогнозирования — деформациям трубной решетки;

— из пяти рассмотренных типов сварных соединений (см. рис. 2) трубной решетки с трубками наименьшие деформации при прочих равных условиях дает соединение типа № 1;

— применение аустенитной стали для трубок и присадки позволяет по сравнению с вариантом ферритной стали получить более низкие остаточные локальные напряжения в зоне соединения, соответственно снизить риск образования холодных трещин, и более низкие остаточные общие деформации трубной решетки;

— для конструкций с двумя трубными досками и короткими прямыми трубками приварка в определенной последовательности одновременно концов трубок может существенно снизить деформации трубных решеток, особенно при ограниченных толщинах последних; однако при этом следует считаться с риском потери устойчивости при осевом сжатии трубок, привариваемых в первую очередь.

1. *Компьютерное моделирование сварочных процессов как средство прогнозирования дефектов в сварных соединениях* / В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко, О. В. Махненко и др. // Автомат. сварка. — 1999. — № 12. — С. 10–19.
2. *Численное исследование термомеханических процессов при наплавке валов судовых механизмов и устройств* / В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко, Т. Г. Кравцов и др. // Там же. — 2001. — № 1. — С. 3–10.
3. *Seyffarth P., Kasatkin O. G. Calculation of structural transformations of the welding process.* — S. l., [1982]. — 21 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IX-1228-82).
4. *Atlas of time-temperature diagrams for irons and steels* / Ed. C. V. Vander Voort. — ASM publ., 1991. — 80 p.
5. *Махненко В. И.* Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. — Киев: Наук. думка, 1975. — 320 с.
6. *Ueda Y., Murakawa H., Nakacho K., Ma N.* Establishment of Computational Welding Mechanics // Trans. of JWRJ. — 1995. — 24, № 2. — P. 73–86.
7. *Махненко В. И., Лобанов Л. М., Махненко О. В.* Прогнозирование общих деформаций сварных узлов на основе банка данных по поперечной и продольной усадке и угловым деформациям соответствующих образцов // Автомат. сварка. — 1991. — № 10. — С. 1–5.

The paper describes a computer program and demonstrates its capabilities in evaluation of both the local phenomena related to welding-on separate tubes (cooling rates, microstructural changes, residual stresses), and of total deformations of the tubesheet, depending on the properties of materials, geometrical dimensions, type of the joint, and sequence of welding tubes to tubesheets.

Поступила в редакцию 27.11.2001