



Муравьев В. И., Бахматов П. В., Дебеляк А. А.  
Muravyev V.I., Bakhmatov P.V., Debelyak A.A.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАСЧЕТА ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ  
ПО ТЕПЛОВЫМ ПОЛЯМ ПРИ СВАРКЕ ТОНКИХ ПЛАСТИН ВСТЫК**

**DEFINITION OF AN OPPORTUNITY TO CALCULATE RESIDUAL DEFORMATIONS  
ON THERMAL FIELDS AT WELDING THIN PLATES END-TO-END**

**Муравьев Василий Илларионович** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре), 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: [ktsp@knastu.ru](mailto:ktsp@knastu.ru)

**Mr. Vassily I. Muravyev** – Doctor in Engineering, Professor, Chief Researcher for Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: [ktsp@knastu.ru](mailto:ktsp@knastu.ru)

**Бахматов Павел Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре), 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: [ktsp@knastu.ru](mailto:ktsp@knastu.ru)

**Mr. Pavel V. Bakhmatov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: [ktsp@knastu.ru](mailto:ktsp@knastu.ru)

**Дебеляк Алексей Александрович** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре), 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: [ktsp@knastu.ru](mailto:ktsp@knastu.ru)

**Alexei A. Debelyak** – PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: [ktsp@knastu.ru](mailto:ktsp@knastu.ru)

**Аннотация.** Представлен анализ известных ранее графорасчетных методов определения сварочных (остаточных) деформаций, неизбежно возникающих при термическом воздействии высококонцентрированных источников тепла, в частности от воздействия сварочной дуги при изготовлении сварных металлоконструкций. Отображены недостатки (допущения) каждого из методов, решение которых в настоящее время вызывает реальный интерес. Основываясь на достоверных данных, полученных Н. Н. Рыкалиным и изложенных им в труде «Расчет тепловых процессов при сварке», рассчитана и представлена трехмерная модель термического цикла сварки (распределение температур в каждой из трех систем координат) по схеме линейный быстро движущийся источник в пластине с теплоотдачей при сварке тонких пластин встык из малоуглеродистой стали марки Ст3 полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа при устойчивых режимах процесса.

**Summary:** The paper present an analysis of already known graphical methods for definition of the welding (residual) deformations inevitably arising due to the thermal influence of highly concentrated sources of heat, in particular by a welding arch at producing welded metal structures. Explained are the deficiencies (assumptions) of each of the methods, whose improvement generates interest. Based on the authentic data received by N. N. Rykalin and presented in his work: «Calculation of thermal processes at welding», a three-dimensional model of a thermal cycle of welding is proposed (distribution of temperatures in each of three systems of coordinates) as a linear fast-moving source in a hit-emitting mild-steel St3 plate while semi-automatically welding thin plates end-to-end in the environment of carbonic gas at steady modes of process.

**Ключевые слова:** листовые конструкции, коробление, сварочные деформации, тепловые поля, сектора, линии действия внутренних напряжений.

**Keywords:** sheet structures, change of geometry, welding deformations, thermal fields, sectors, lines of action of internal tension.

УДК 621.791.1

Сварка, резка, наплавка, лазерная обработка металлов сопровождается действием высоких температур, влияющих на физико-механические свойства, химический состав и геометрию обрабатываемых поверхностей и изделий. При неравномерном нагреве тела связи между нагретыми и ненагретыми участками препятствуют его свободному расширению, что влечет за собой возникновение собственных температурных напряжений, действующих при отсутствии внешних сил. Наряду с температурными деформациями и напряжениями, в теле также могут возникать деформации и напряжения, обусловленные фазовыми или структурными превращениями, происходящими с увеличением или уменьшением объема. Неравномерный нагрев и изменение объема тела вследствие температурного расширения, а также фазовых или структурных превращений приводят к возникновению упругих и пластических деформаций. Пластические деформации в теле после его полного охлаждения являются причиной действия собственных напряжений, называемых остаточными. Если температура нагрева в процессе обработки незначительна, то предел текучести металла остается без изменений и возникающие напряжения не достигают предела текучести. Практически деформирование осуществляется в упругой области. Это соответствует случаям нагрева в процессе обработки до максимальных температур  $T_{\max} < 573$  К. Реальные технологические процессы сварки и лазерной обработки проводятся при существенно более высоких температурах, и, следовательно, возникновение деформаций и напряжений происходит в условиях упругопластического деформирования. Сварочные напряжения и деформации причиняют много хлопот и трудностей при изготовлении и эксплуатации сварных конструкций, так как они могут вызвать: изменение запроектированных размеров свариваемых деталей и узлов; искривление и изменение формы (коробление) отдельных сварных узлов и целых конструкций; появление трещин и разрывов в процессе изготовления сварных конструкций; разрушение сварных конструкций в процессе эксплуатации при пониженных температурах.

Изучение сварочных напряжений и деформаций крайне необходимо для выбора рациональных конструктивных форм проектируемых сварных соединений и правильного выбора технологических вариантов изготовления сварных конструкций. Для верной оценки проектируемых конструктивных форм и для разработки оптимальных технологий изготовления сварных конструкций необходимо производить предварительные расчеты остаточных внутренних усилий, ожидаемых остаточных деформаций и остаточных напряжений.

Цель данной работы заключается в определении распределения температуры в образцах  $4 \times 50 \times 120$  мм, изготовленных из углеродистой стали обыкновенного качества марки Ст3, при сварке их встык на устойчивых режимах процесса; проектировании трехмерной модели распределения температур в системе координат OXYZ, а также процесса распространения тепла по толщине пластин вдоль и поперек оси шва, что в дальнейшем позволит визуализировать изменение геометрии сваренных заготовок, как результат действия напряжений и деформаций, возникающих вследствие теплового воздействия сварочной дуги.

**Параметры проектируемой модели:**

Листы толщиной 4 мм варят встык без скоса кромок при зазоре 1 мм. Сварку производят в среде углекислого газа на следующих режимах:

$$d_{\text{э}} = 1,2 \text{ мм (диаметр электродной проволоки);}$$

$$\delta = 0,4 \text{ см (толщина пластин);}$$

$\eta = 0,7$  (эффективный КПД дуги при сварке на постоянном токе обратной полярности);

$$I_{\text{CB}} = 125 \text{ А (сила сварочного тока);}$$

$$U_{\text{Д}} = 20 \text{ В (напряжение дуги);}$$

$$V_{\text{CB}} = 0,25 \text{ см/с (скорость перемещения источника тепла);}$$

$$Q = 453,6 \text{ кал/с (эффективная тепловая мощность дуги);}$$

$\lambda = 0,10$  кал/(см · с · °С) (коэффициент теплопроводности);

$c = 0,16$  кал/(г · °С) (теплоемкость);

$\gamma = 7,8$  г/см<sup>3</sup> (удельный вес);

$a = 0,08$  кал/см<sup>2</sup> (коэффициент температуропроводности);

$b = 3,2 \cdot 10^{-3}$  1/с (коэффициент теплоотдачи).

Для построения температурного поля предельного состояния, соответствующего выбранным режимам сварки, используем схему мощного быстродвижущегося линейного источника тепла в пластине с теплоотдачей. Процесс распространения тепла описывается следующим уравнением:

$$T(y_0, t) = \frac{q}{V \cdot \delta \sqrt{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \gamma \cdot t}} \cdot \exp\left(\frac{-y_0^2}{4 \cdot a \cdot t} - b \cdot t\right), \quad (1)$$

по которому рассчитывали распределение температуры (табл. 1).

Таблица 1

Результаты расчета температур по схеме мощного линейного быстродвижущегося источника тепла в пластине с теплоотдачей при сварке пластин встык

$y_0, \text{см}$ $t, \text{с}$	0	0,2	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5	2,0	3,0	4,0	<b>5,0</b>
1	3332	2941	2515	1526	720	265	146	76	17	-	-	-	-	-
2	2349	2207	2041	1589	1092	663	492	355	168	70	4	-	-	-
3	1912	1834	1741	1473	1147	822	675	542	329	184	30	-	-	-
4	1650	1600	1538	1357	1125	876	756	641	441	285	73	5	-	-
6	1339	1311	1278	1175	1037	878	795	713	555	415	167	15	-	-
9	1083	1068	1049	993	913	817	765	711	602	496	270	48	5	-
16	794	788	780	756	722	678	653	627	570	512	364	137	35	<b>6</b>
25	617	614	610	598	581	558	545	531	500	466	374	200	84	<b>27</b>
<b>36</b>	<b>497</b>	<b>495</b>	<b>493</b>	<b>486</b>	<b>476</b>	<b>463</b>	<b>455</b>	<b>447</b>	<b>429</b>	<b>408</b>	<b>351</b>	<b>227</b>	<b>124</b>	<b>57</b>

На рис. 1, а представлены кривые распределения температур поперек оси шва по ширине пластины  $y$  от 0 до 5 см в моменты времени  $t$  от 1 до 36 с; на рис. 1, б представлены кривые распределения температур вдоль оси шва в направлении перемещения источника тепла; на рис. 2 представлены тепловые поля на поверхности свариваемых пластин; на рис. 3 представлена трехмерная модель распределения температур в пространстве.

При построении температурных полей в процессе сварки тонких пластин, распределение температуры по их толщине в большинстве случаев не учитывается и принимается неизменным. Для получения характера распределения температур по всему объему произведены расчеты и графические построения.

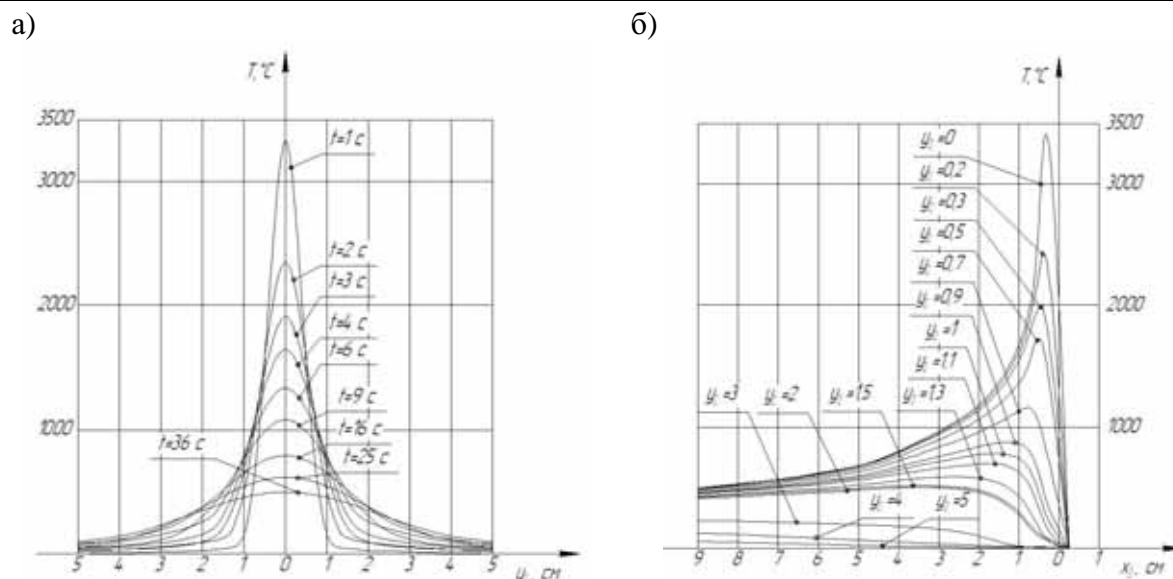


Рис. 1. Кривые распределения температур:  
а – поперек оси шва по ширине пластин; б – вдоль оси шва в направлении движения источника тепла

При построении температурных полей в процессе сварки тонких пластин распределение температуры по их толщине в большинстве случаев не учитывается и принимается неизменным. Для определения характера распределения температур по всему объему произведены расчеты и графические построения.

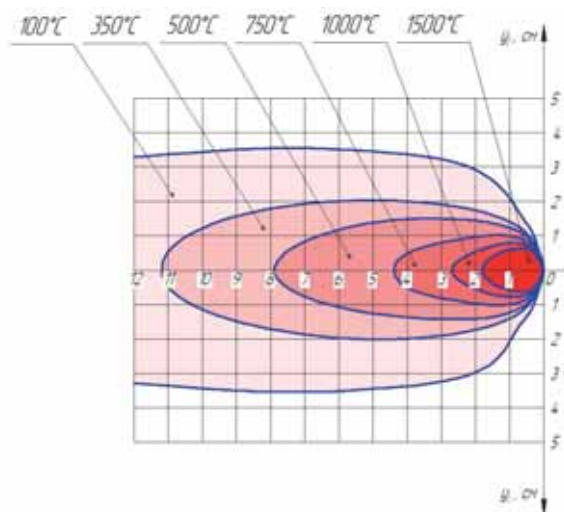


Рис. 2. Тепловые поля на поверхности свариваемых пластин

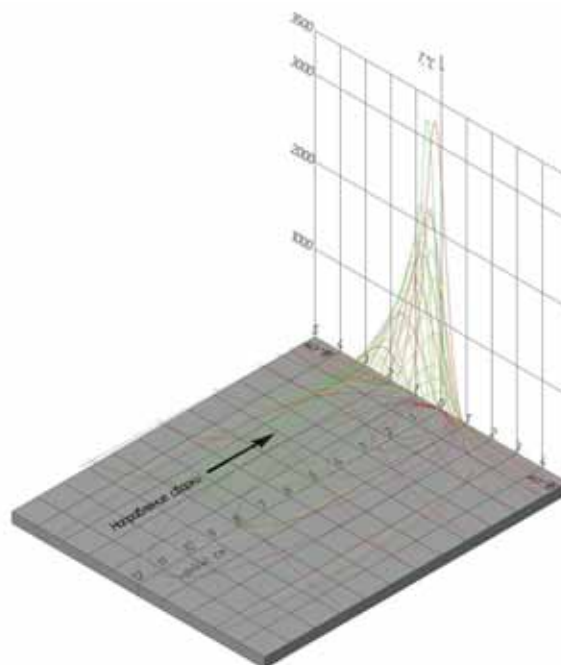


Рис. 3. Пространственная модель распределения температур

На рис. 4 представлены пластины с нанесенными на них ограничивающими верхней и нижней плоскостями, не пропускающими тепла, и точками для которых будут определены температуры по толщине свариваемых пластин в направлении движения источника тепла.

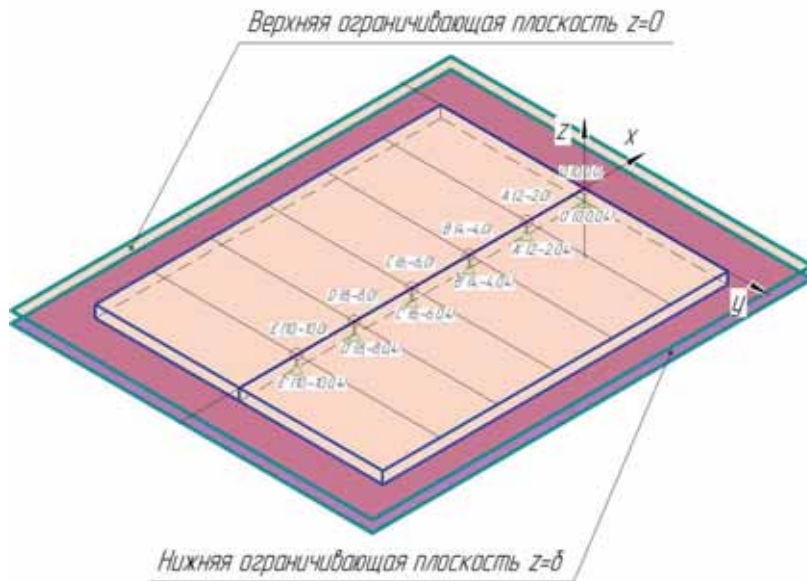


Рис. 4. Свариваемые пластины с нанесенными на них верхней и нижней ограничивающими плоскостями

В зависимости от толщины металла расчет ведут по одной из схем: если лист весьма толст – температурное поле практически затухает в массе металла, тогда влиянием нижней ограничивающей плоскости можно пренебречь и вести расчет по схеме точечного источника на поверхности полубесконечного тела. Если лист весьма тонок – температура вблизи источника практически выравнивается по толщине листа, тогда расчет ведут по схеме линейного источника в пластине. Если толщина листа мала так, что нельзя пренебречь ограничивающим влиянием нижней плоскости листа, но не настолько чтобы считать температуру равномерно распределенной по толщине, выбирают для расчета схему точечного источника на поверхности плоского слоя толщиной  $\delta$ . Ограничивающие плоскости тела считают не пропускающими тепла.

Процесс распространения тепла точечного источника мощностью  $q$ , перемещающегося со скоростью  $V$  по поверхности плоского слоя толщиной  $\delta$ , описывается уравнением:

$$T(r, x, z) = m(r, z) \cdot \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \delta} \cdot \exp\left(\frac{-V \cdot x}{2 \cdot a}\right) \cdot K_0\left(\frac{V \cdot r}{2 \cdot a}\right), \quad (2)$$

где  $r^2 = x^2 + y^2$  – радиус-вектор;

$m(r, z)$  – коэффициент, выражающий отношение температуры верхней  $z = 0$  и нижней  $z = \delta$  поверхностей плоского слоя, нагреваемого точечным источником, перемещающимся по верхней плоскости, к температуре пластины, нагреваемой линейным источником; данная зависимость представлена на рис. 5;

$K_0\left(\frac{V \cdot r}{2 \cdot a}\right)$  – функция Бесселя от мнимого аргумента второго рода, нулевого порядка (табличные значения взяты из книги Р. О. Кузьмина, Бесселевы функции, ОНТИ, 1935).

В табл. 2 представлены расчетные данные температур для каждой из точек верхней и нижней ограничивающих плоскостей в направлении движения источника тепла (рис. 6).

Рис. 5. Коэффициент  $m$ , выражающий отношение температуры верхней  $z = 0$  и нижней  $z = \delta$  поверхностей плоского слоя, нагреваемого точечным источником, перемещающимся по верхней плоскости, к температуре пластины, нагреваемой линейным источником

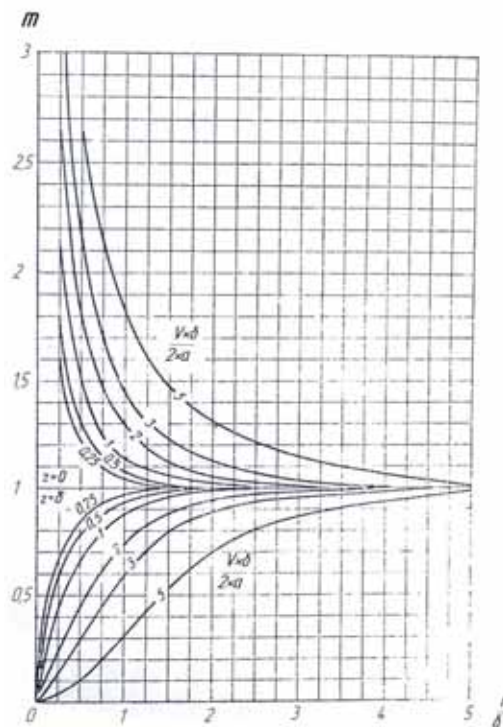


Таблица 2

Значения температур для каждой из точек верхней и нижней ограничивающих плоскостей в направлении движения источника тепла

Т, °С	Координаты точек (r, x, z)								
	(0,4; -0,4;0)	(0,8; -0,8;0)	(1,2;- 1,2;0)	(1,6; -1,6;0)	(2; -2;0)	(4; -4;0)	(6;-6;0)	(8;-8;0)	(10; -10;0)
	$\frac{V \cdot \delta}{2 \cdot a} = 0,625$								
	$U = \frac{V \cdot r}{2 \cdot a}$								
	0,625	1,25	1,875	2,5	3,125	6,25	9,375	12,5	15,625
	$K_0(U)$								
	0,72504	0,30196	0,13208	0,062348	0,03025	0,00096	0,0000341	0,0000003	0,00000001
	$\frac{r}{\delta}$								
	1	2	3	4	5	10	15	20	25
	$m(r, z)$								
	1,13/0,91	1,01/0,99	1/1	1/1	1/1	-	-	-	-
Верхней плоскости	2558	1779	1439	1269	1151	831	681	134	102
Нижней плоскости	2006	1744	1439	1269	1151	831	681	134	102



а)



б)

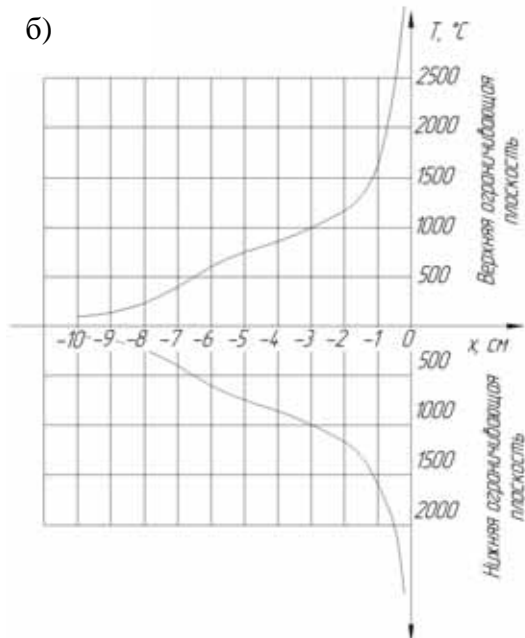


Рис. 6. Распределение температур:  
а – по толщине свариваемых пластин в направлении движения источника тепла;  
б – на верхней и нижней ограничивающих свариваемые пластины плоскостях

На рис. 7 представлены свариваемые пластины с расположенными на них точками, для которых будут определены температуры по толщине для верхней и нижней ограничивающих, не пропускающих тепла плоскостей  $z = 0$  и  $z = \delta$  в направлении, перпендикулярном движению источника тепла.

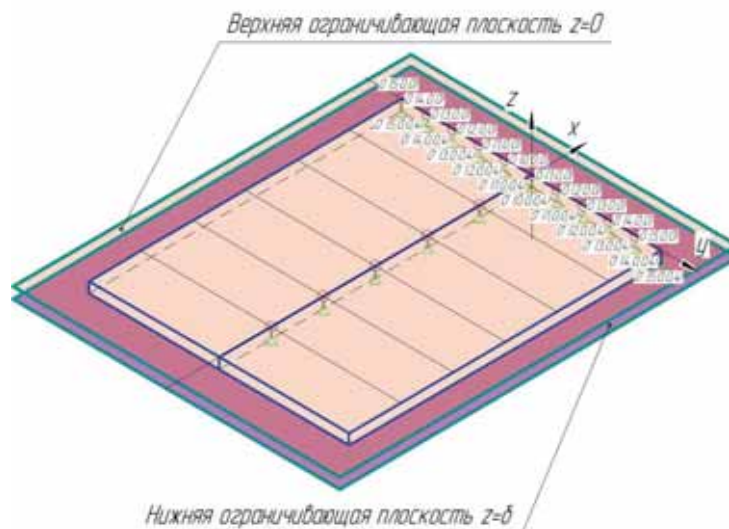


Рис. 7. Свариваемые пластины с расположенными на них точками, для которых будут определены температуры по толщине для верхней и нижней ограничивающих, не пропускающих тепла плоскостей  $z = 0$  и  $z = \delta$  в направлении, перпендикулярном движению источника тепла

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАСЧЕТА ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПО ТЕПЛОВЫМ ПОЛЯМ ПРИ СВАРКЕ ТОНКИХ ПЛАСТИН ВСТЫК

В табл. 3 представлены расчетные значения температур точек, расположенных на верхней и нижней ограничивающих плоскостях свариваемых пластин, в направлении, перпендикулярном движению источника тепла. В данном случае  $x$  принимаем равным 0, тогда  $r^2 = y^2$ . Графически расчетные данные табл. 3 представлены на рис. 8.

Таблица 3

Расчетные значения температур точек, расположенных на верхней и нижней ограничивающих плоскостях свариваемых пластин в направлении, перпендикулярном движению источника тепла

		Координаты точек (r, x, z)								
		(0,5; 0;0)	(1;0;0)	(1,5; 0;0)	(2; 0;0)	(2,5; 0;0)	(3;0;0)	(3,5; 0;0)	(4;0;0)	(4,5;0;0)
Т, °С		$\frac{V \cdot \delta}{2 \cdot a} = 0,625$								
		$U = \frac{V \cdot r}{2 \cdot a}$								
		0,781	1,563	2,344	3,125	3,906	4,688	5,469	6,25	7,031
		$K_0(U)$								
		0,583	0,198	0,0754	0,0303	0,0125	0,00525	0,002223	0,00096	0,00042
		$\frac{r}{\delta}$								
		1,25	2,5	3,75	5	6,25	7,5	8,75	10	11,25
		$m(r, z)$								
		1,07/0,95	1,01/0,98	1/1	1/1	-	-	-	-	-
	Верхней плоскости	1042	335	126	50	21	-	-	-	-
Нижней плоскости	926	324	126	50	21	-	-	-	-	

При сварке протяженных стыков малых толщин стальных габаритных конструкций существует проблема коробления как результат остаточных деформаций. Известные графо-расчетные методы [1, 52] не дают достоверной информации о самих сварочных перемещениях (изменении геометрии тел) отдельных, нагретых до разных температур и с разной скоростью объемов материала свариваемых заготовок. В данном случае представляется лишь приближенная картина распределения сварочных напряжений на стадии нагрева и полного охлаждения деталей путем построения эпюр сварочных напряжений с рядом существенных допущений: коэффициент теплопроводности материала принят неизменным; не учитывается напряженность в отдельных объемах, нагретых до различных температур и имеющих при ней различные физико-механические свойства. Метод упругих деформаций также не дает полного понимания картины возникновения сварочных «короблений» конструкций. Поэтому



актуальным является разработка методики, позволяющей прогнозировать и визуализировать коробление конструкций.

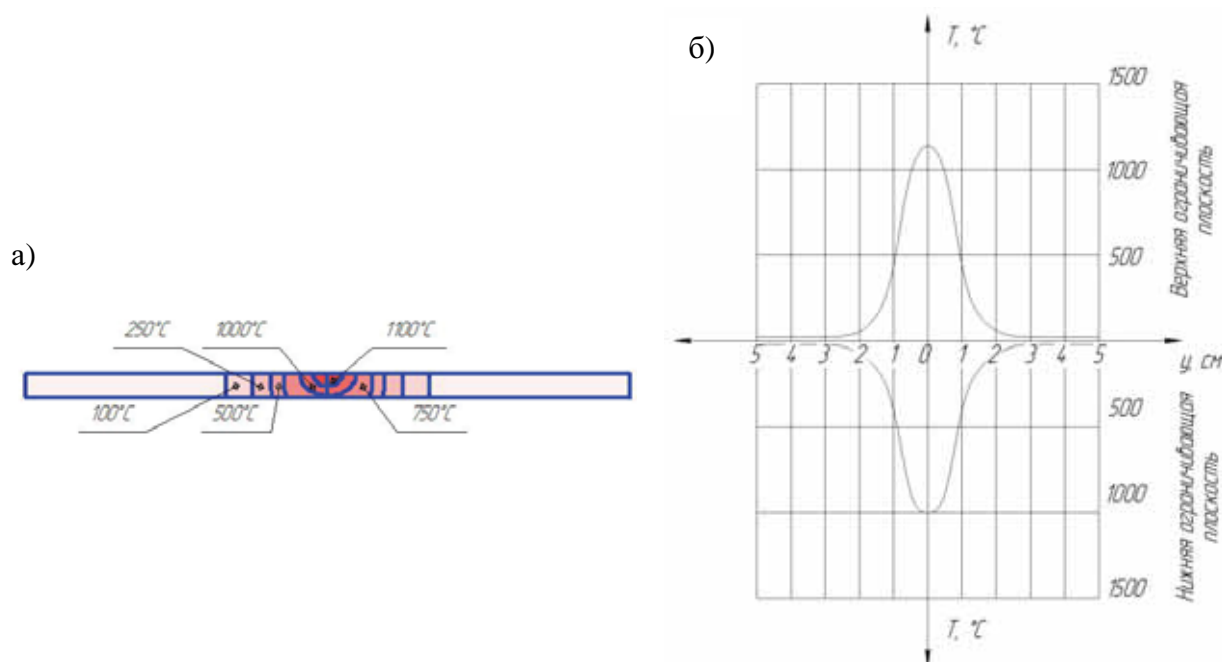


Рис. 8. Распределение температур:

а – по толщине свариваемых пластин в направлении, перпендикулярном движению источника тепла; б – на верхней и нижней ограничивающих свариваемые пластины плоскостях

В разработанной методике приняты следующие допущения и предположения.

1. Если в начальном состоянии температура пластин одинакова по всему объему и равна комнатной ( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), то все усилия, существующие внутри каждого элементарного объема, принятого при рассмотрении характера распределения внутренних напряжений, всегда уравновешены как в самом объеме, так и между сопряженными секторами, и направление действия этих усилий направлено по кратчайшему расстоянию от точки сосредоточения (равновесия каждого из объемов – центра масс) напряжений к точкам равновесия сопряженных участков.

Так как коробление связано с неравномерным распределением тепла в объеме свариваемых образцов [3], то отражение картины распределения температурных полей является первым этапом в разрабатываемой методике. На рис. 9 представлены изотермы температур пластин из углеродистой стали марки Ст3 размером  $50 \times 120$  мм толщиной 4 мм, сваренные встык без разделки кромок при следующих режимах процесса:  $I_{CB} = 125\text{ A}$ ;  $U_D = 20\text{ В}$ ;  $V_{CB} = 0,25\text{ см/с}$ . Расчет производился по схеме линейного быстродвижущегося источника тепла в пластине с учетом того, что тепловое воздействие дуги с лицевой стороны сварного соединения больше чем с обратной.

2. Учитывая, что коробление свариваемых заготовок происходит в результате неуравновешенности напряжений, вызванных изменением объема в результате неравномерного нагрева, то геометрия коробления конструкции будет совпадать с направлением действия внутренних напряжений от центра масс каждого из секторов (фантомные линии).

На рис. 9, б показаны свариваемые пластины, разбитые на сектора равного объема  $V = 64\text{ мм}^3$ , каждому из которых соответствует одно или несколько состояний температурного нагрева.

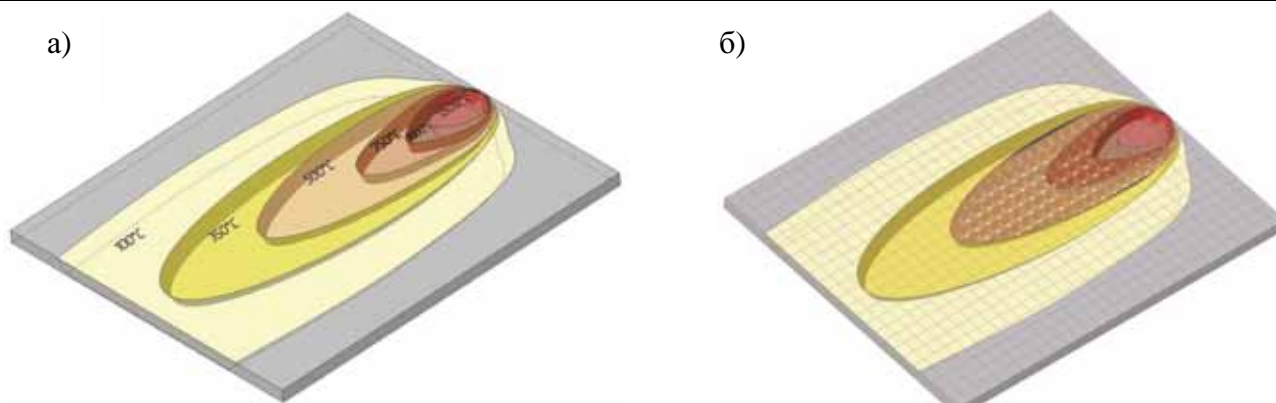


Рис. 9. Изотермы распределения температур при сварке пластин встык  
без разделки кромок:  
а – общего объема; б – с разбивкой на сектора равного объема  $V = 64 \text{ мм}^3$

Чтобы упростить построение фантомных линий действия внутренних напряжений (рис. 10) внутри всего объема свариваемых образцов, достаточно рассмотреть элементарные сектора большего объема, например полос размером  $4 \times 24 \times 100 \text{ мм}$ . Линии построены для пяти полос (рис. 11), ограниченных плоскостями, находящихся друг от друга на расстоянии 24 мм, и имеющих один или несколько температурных интервалов (например для полосы № 1:  $T = 25 \text{ °C}$  (комнатная),  $T = 100 \text{ °C}$  и  $T = 350 \text{ °C}$ ; для полосы № 2:  $25 \text{ °C}$  (комнатная),  $T = 100 \text{ °C}$ ,  $T = 350 \text{ °C}$  и  $T = 500 \text{ °C}$  и т. д.).

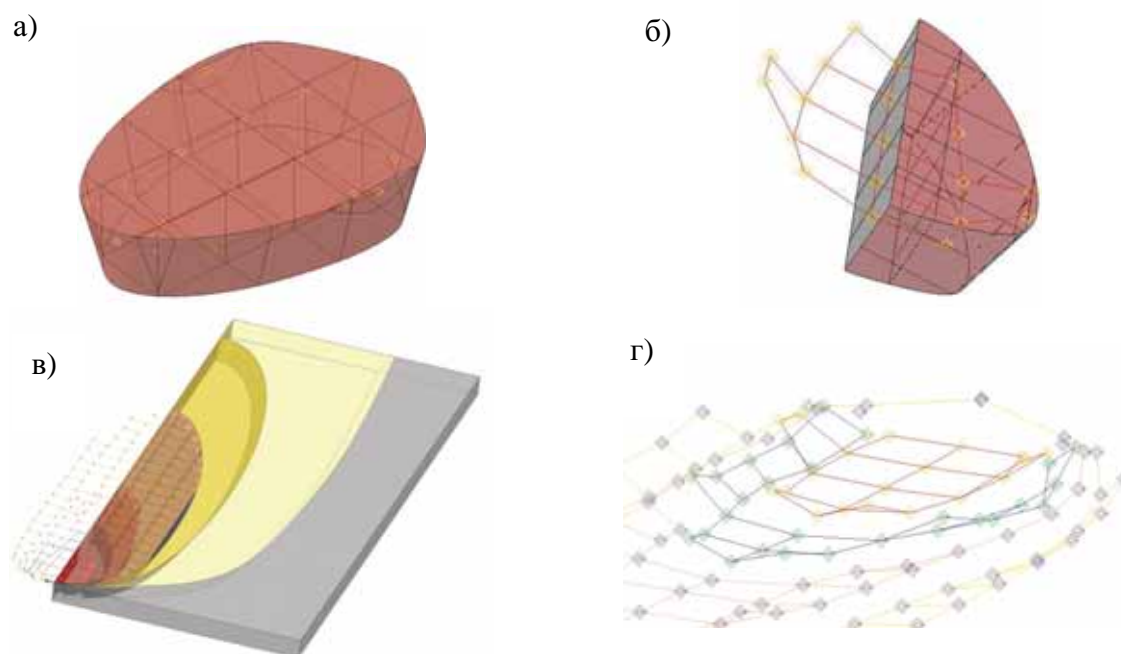


Рис. 10. Фантомы действия внутренних напряжений от центра масс  
каждого из выделенных секторов:  
а, б – на участке, нагретого до  $T = 1500 \text{ °C}$ ;  
в, г – в объеме пластин

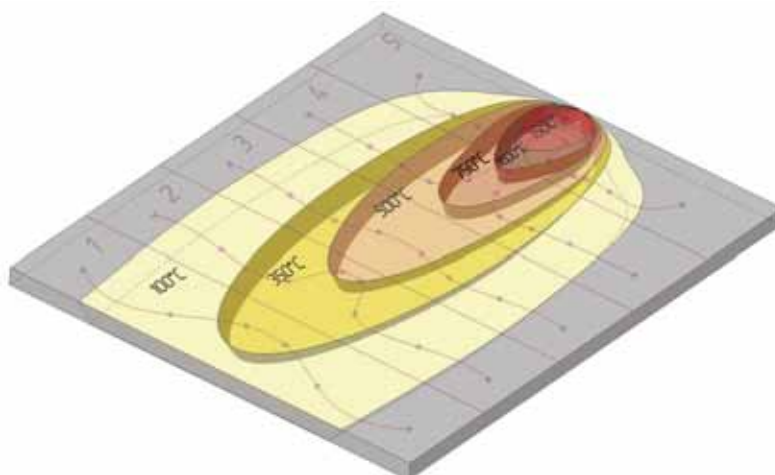


Рис. 11. Линии действия внутренних напряжений объемов тела, нагретых до различных температур

Линии действия внутренних напряжений представляют собой пространственные кривые, которые изменяют свое направление в трех плоскостях:  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ . Изменение геометрии линий действия внутренних напряжений в плоскости  $OZ$  (по толщине пластины) отражает характер изменения геометрии данного участка тела в данной плоскости – коробление конструкции; в плоскостях  $OX$  и  $OY$  отражен характер действия внутренних напряжений в направлении оси шва ( $OX$ ) и перпендикулярном ему ( $OY$ ) соответственно между смежными секторами полос, нагретых до различных температур.

Если задаться условием, что пластины после сварки сохраняют свои габаритные размеры ( $50 \times 120 \times 4$  мм), а коробление сварной конструкции будет происходить в плоскости  $OZ$  (по толщине пластины), то для определения местоположения сечений, характеризующихся изменением геометрии линий действия внутренних напряжений в плоскости  $OZ$  и отражающих характер коробления сварной конструкции достаточно провести среднюю линию для каждой из кривых, спроецированных на плоскость пластин (например, для полосы № 1 местоположение сечения, отражающего характер изменения геометрии тела, изображено на рис. 12).

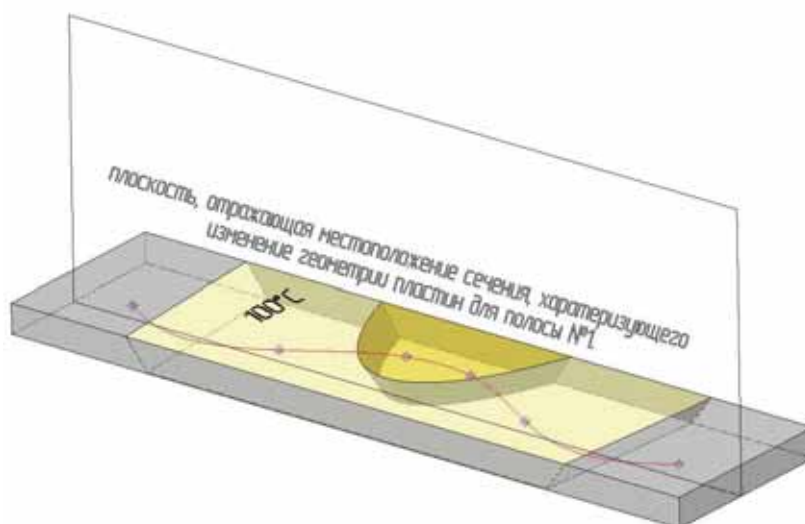


Рис. 12. Местоположение сечения, характеризующего изменение геометрии тела для полосы № 1

На рис. 13 изображены сечения для каждой из пяти полос свариваемых пластин, отражающих характер коробления сварной конструкции.

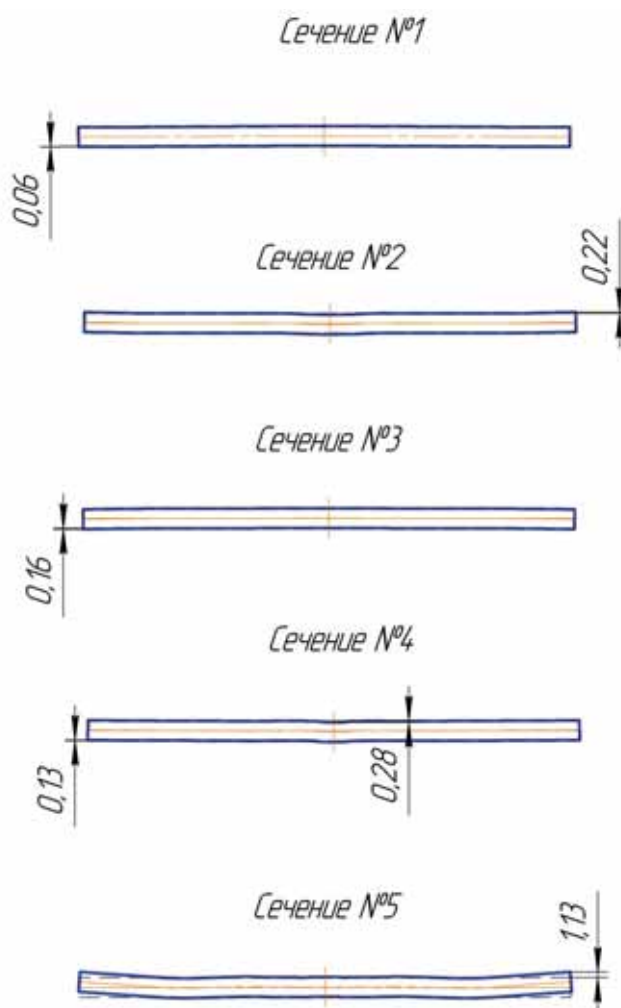


Рис. 13. Сечения для каждой из пяти полос свариваемых пластин, отражающих характер коробления сварной конструкции

Рис. 14 отражает картину деформирования пластин, вызванного термомеханическим циклом сварки.

Таким образом, методика расчета остаточных деформаций состоит из следующих этапов:

- 1) расчета распределения температурных полей для заданных режимов процесса;
- 2) разбиения на сектора (элементарные объемы);
- 3) определения положения центра масс (точка равновесия всех внутренних усилий) для каждого из секторов;
- 4) построения фантомных линий действия напряжений и сечений в плоскости OZ (по толщине пластин в направлении, перпендикулярном оси шва).

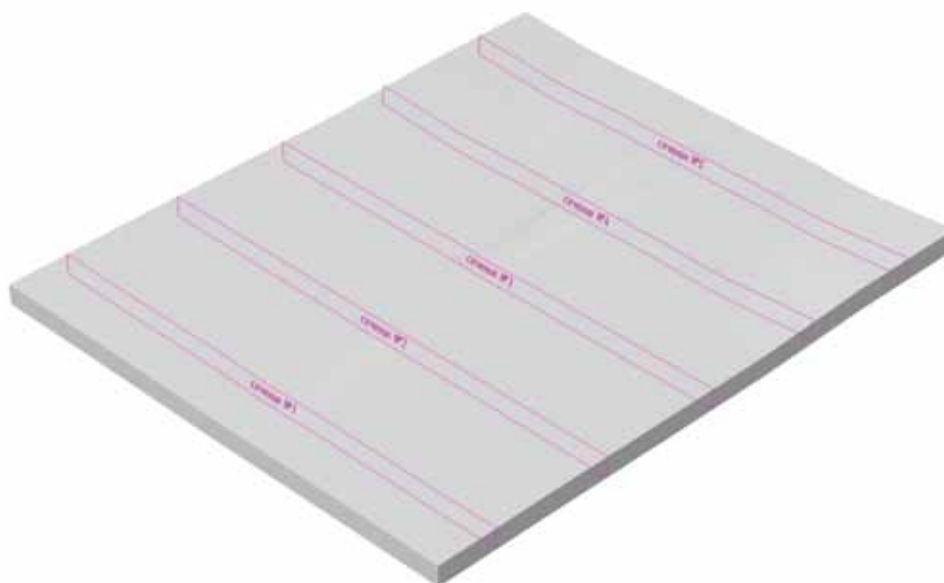


Рис. 14. Деформирование пластин, вызванное термодформационным циклом сварки

Вывод: Анализ сварочных деформаций по расчетной модели температурных полей при сварке тонких пластин встык из стали марки Ст3 позволяет выявить направление действия внутренних напряжений и оценить изменение геометрии деталей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Винокуров, В. А. Теория сварочных деформаций и напряжений / В. А. Винокуров, А. Г. Григорьянц. – М. : Машиностроение, 1984. – 280с.
2. Муравьев, В. И. Эффективность снятия остаточных напряжений в сварных титановых конструкциях / В. И. Муравьев, П. В. Череповский // Проблемы механики сплошных сред и смежные вопросы технологии машиностроения : сб. докл. третьей конференции (Владивосток – Комсомольск-на-Амуре, сентябрь 2004). – Комсомольск-на-Амуре : ИМиМ ДВО РАН, 2005. – С. 219-228.
3. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М. : Машгиз, 1951. – 296 с.