

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ САМООЧИЩЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ В РЕЗУЛЬТАТЕ ДЕЙСТВИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

А. А. Бердыченко, М. Х. Флат

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

В настоящее время одним из наиболее широко применяемых способов получения биметаллов является сварка взрывом. Однако, несмотря на большое количество теоретических и экспериментальных исследований этого метода сварки, некоторые его особенности пока не получили однозначного объяснения.

Фактором, осложняющих получение сварных соединений любым способом сварки, является наличие загрязнений на свариваемой поверхности. Одной из главных особенностей сварки взрывом является самоочищение свариваемых поверхностей в результате образования потока массы впереди точки контакта, который неоднократно регистрировался при исследовании процесса сварки взрывом. Однако вопрос о механизме образования этого потока массы не до конца ясен. Так как открытие сварки взрывом связано с исследованием кумулятивного процесса, считается, что очищение свариваемых поверхностей происходит в результате кумулятивного процесса при их косом соударении, но зафиксировать стабильную кумулятивную струю при скорости точки контакта порядка 2000–3000 м/с, позволяющей получать качественные сварные соединения различных металлов, не удаётся.

Появившиеся в последнее время работы дают основание предположить, что кумулятивный процесс не единственный возможный механизм самоочищения свариваемых поверхностей при сварке взрывом. Исходя из выводов работы [1] можно считать, что на металл перед процессом образования сварного соединения оказывает влияние сгусток ударно-сжатого газа, движущегося впереди точки контакта по зазору между свариваемыми поверхностями. Температура этого газа при скорости точки контакта 2000–3000 м/с по оценкам, сделанным в работах, может достигать 2500–6000 °С, причём время воздействия этого газа на свариваемые поверхности растёт с удалением от начала процесса сварки и на расстоянии 1 м достигает десятков микросекунд. Таким образом, свариваемые поверхно-

сти могут находиться в условиях теплового удара. Из практики очистки поверхности стали от окалина известно, что при кратковременном воздействии на поверхность стали пламени газовой грелки окалина отслаивается от неё [5]. Это явление связано с большим градиентом температур в поверхностных слоях металла при тепловом ударе и значительной разницей коэффициентов термического расширения металла и его окислов.

В связи с этим, была поставлена цель теоретически оценить возможность разрушения оксидной плёнки и приповерхностных слоёв металла за счёт возникновения температурных напряжений в результате разогрева поверхностей свариваемых пластин ударно-сжатым газом, движущимся впереди области образования сварного соединения при сварке взрывом.

Вследствие большой скорости протекания процессов при сварке взрывом, представляется допустимым моделировать воздействие разогрева атмосферы между пластинами в качестве теплового удара по поверхности. Исходя из этого, за основу исследования было взято решение динамической задачи термоупругости о тепловых напряжениях в упругом полупространстве при тепловом ударе на его поверхности, приведённое в трудах А. Д. Коваленко [2, 3]. Используя это решение, исследуем пары полупространств, металлов и их окислов, и определим, при какой температуре эквивалентные температурные напряжения $\sigma_{экв}$ в рассматриваемых материалах превысят предел прочности σ_B . После чего, сравним результаты в парах металл-окисел и определим, какой из материалов (металл или его окисел) разрушится первым в случае «одновременного» нагрева полупространств. Для процесса сварки взрывом представляют интерес такие металлы как сталь, титан, алюминий и др. Поэтому целесообразно рассматривать полупространства, обладающие свойствами этих металлов и полупространства, обладающие свойствами окислов этих металлов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ САМООЧИЩЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ В РЕЗУЛЬТАТЕ ДЕЙСТВИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

В работах [2, 3] для описания решения данной задачи используются безразмерные величины:

ξ – безразмерная координата

$$\xi = \frac{x \cdot c_1}{a},$$

где x – координата полупространства (рисунок 1),

$$c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \text{ – скорость}$$

распространения упругой волны в полупро-

странстве, $a = \frac{\lambda_T}{c}$ – коэффициент темпера-

туропроводности, c – удельная объёмная теплоёмкость вещества полупространства,

λ_T – коэффициент теплопроводности, λ и μ –

коэффициенты Ляме, ρ – плотность материала,

E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона;

t – безразмерное время

$$\tau = \frac{t \cdot c_1^2}{a},$$

где t – время; β – параметр, характеризующий условия теплообмена на поверхности $x = 0$,

$$\beta = \frac{c_1 \cdot \lambda_T}{a \cdot \alpha},$$

где α – коэффициент теплоотдачи от среды к границе полупространства, λ_T – коэффициент теплопроводности.

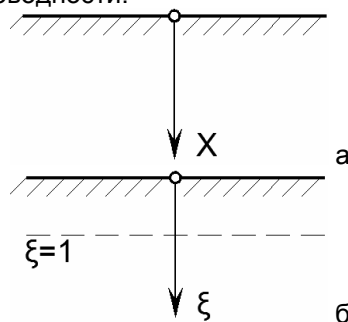


Рисунок 1 – Полупространства с координатной осью x (а) и безразмерной координатой ξ (б)

В случае мгновенного повышения температуры поверхности полупространства, соответствующего $\gamma = \infty$ и $\beta = 0$, решение для σ_x выглядит следующим образом [2]:

$$\frac{\sigma_x}{K} = e^{\tau-\xi} \left[H(\tau-\xi) - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2} \frac{\xi}{\sqrt{\tau}} - \sqrt{\tau} \right) \right] - \frac{1}{2} e^{\tau+\xi} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2} \frac{\xi}{\sqrt{\tau}} + \sqrt{\tau} \right),$$

где $H(t)$ – единичная функция Хевисайда, определяемая условиями

$$H(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ 1 & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

Для функций $\operatorname{erf}(x)$ и $\operatorname{erfc}(x)$, используются следующие соотношения

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{erf}(x) &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx; \\ \operatorname{erf}(0) &= 0; \quad \operatorname{erf}(\infty) = 1; \quad \operatorname{erf}(-x) = -\operatorname{erf}(x); \\ \operatorname{erfc}(x) &= 1 - \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-x^2} dx; \\ \frac{d}{dx} \operatorname{erf}(x) &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2}. \end{aligned} \right\}$$

В. И. Даниловская исследовала изменение динамического напряжения σ_x в фиксированном сечении $\xi = 1$. На рисунке 2 приводится изменение напряжения σ_x в этом сечении в зависимости от безразмерного времени t при различных значениях параметра β , характеризующего условия теплообмена на поверхности $x = 0$. В результате действия сил инерции в сечении $\xi = 1$ при $t < 1$ возникает сжимающее напряжение σ_x . Так, в случае мгновенного повышения температуры поверхности полупространства, когда $\beta = 0$ (при $\alpha \rightarrow \infty$), сжимающее напряжение в $\xi = 1$ возрастает от нуля при $t = 0$ до значения $-0,89K$ при $t = 1$. В момент времени $t = 1$ ($t = x/c_1$) под действием упругой волны расширения происходит скачкообразное изменение напряжения σ_x на величину K . После прохождения волны расширения напряжение σ_x становится растягивающим и быстро уменьшается до нуля, приближаясь к квазистатическому [3].

Параметр K рассчитывается как [2]

$$K = \frac{E \cdot \alpha_T \cdot (T - T_0)}{1 - 2\nu}. \quad (1)$$

Нормальные напряжения σ_y и σ_z рассчитываются по формуле [3]

$$\sigma_y = \sigma_z = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_x - \frac{1}{1 - \nu} \alpha_T \cdot E \cdot (T - T_0) \quad (2)$$

Используя приведённые зависимости, рассчитаем эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$ согласно энергетической теории прочности, принимая расчётные напряжения σ_x , σ_y , σ_z в качестве главных напряжений

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2]} \quad (3)$$

По проведённым расчётам, результаты которых сведены в таблицу 1, построены графики зависимостей эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экв}}$ от температуры T поверхностных слоёв металла в условиях теплового удара для стали, титана, алюминия и их окислов (рисунки 2–5).

В расчётах использовались механические характеристики материалов при повышенных температурах. Так, для стали 10 взяты характеристики при 600°C , для оксида железа FeO при 800°C [4, 6].

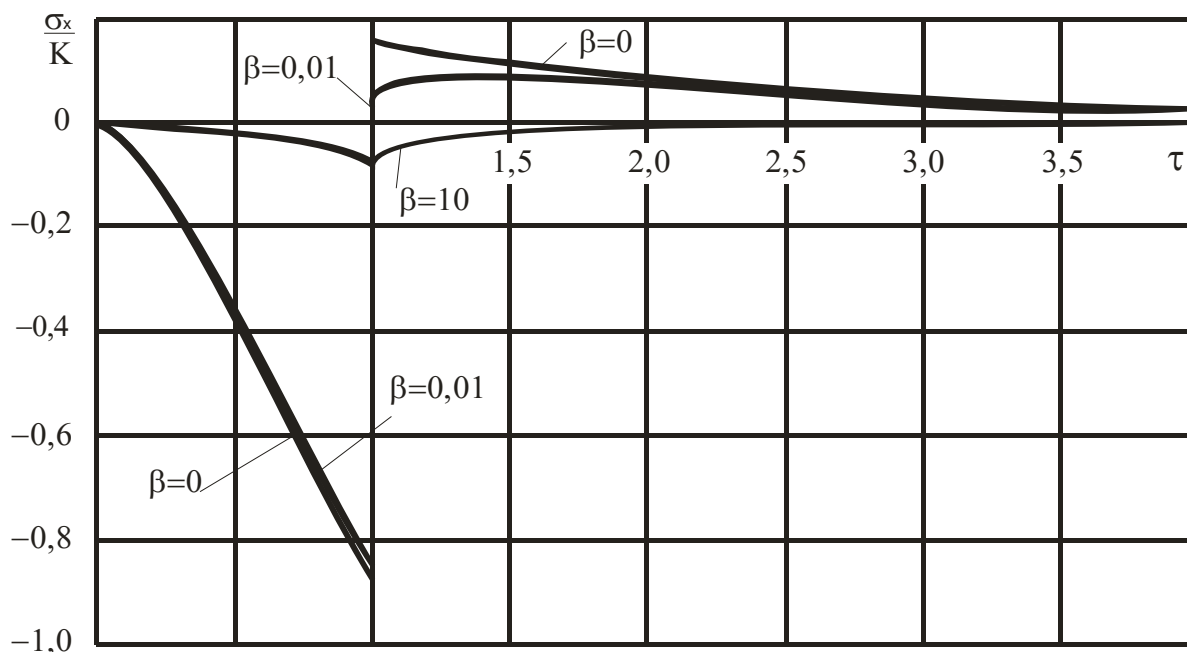


Рисунок 2 – Диаграмма зависимости относительного напряжения σ_x/K от безразмерного времени τ , где $\beta = 0$ ($\sigma_x = -0,89K$); $\beta = 0,01$ ($\sigma_x = -0,86K$); $\beta = 10$ ($\sigma_x = -0,06K$)

Таблица 1 – Результаты расчёта напряжений, возникающих в приповерхностных слоях металлов в условиях теплового удара по формулам (1) – (3)

Условия	Характеристики	Материал					
		Сталь 10	FeO	Ti	TiO	Al	Al ₂ O ₃
$\beta = 0$, $\sigma_x = -0,89K$	$T_{кр}^*$, °C	133,0		248,4		127,4	
	K , МПа	764	3,3	1198	60	146	236
	σ_x , МПа	- 680	- 2,9	- 106	- 535	- 130	- 210
	σ_y , МПа	- 572	- 3,1	- 110	- 594	- 280	- 232
	σ_z , МПа	- 572	- 3,1	- 110	- 594	- 280	- 232
	$\sigma_{экв}$, МПа	108	0,2	43	59	150	22
$\beta = 0,01$, $\sigma_x = -0,86K$	$T_{кр}^*$, °C	151,7		199,4		125,9	
	K , МПа	890	3,8	941	472	144	232
	σ_x , МПа	- 766	- 3,3	- 809	- 406	- 124	- 200
	σ_y , МПа	- 658	- 3,6	- 852	- 465	- 274	- 227
	σ_z , МПа	- 658	- 3,6	- 852	- 465	- 274	- 227
	$\sigma_{экв}$, МПа	108	0,3	43	59	150	28
$\beta = 10$, $\sigma_x = -0,06K$	$T_{кр}^*$, °C	58,8		46,8		97,2	
	K , МПа	262	1,1	141	71	105	169
	σ_x , МПа	- 16	- 0,1	- 8	- 4	- 6	- 10
	σ_y , МПа	- 124	- 0,8	- 52	- 63	- 156	- 145
	σ_z , МПа	- 124	- 0,8	- 52	- 63	- 156	- 145
	$\sigma_{экв}$, МПа	108	0,7	43	59	150	135
	σ_b , МПа	108	36,25	150	58,8	150	193,2

* $T_{кр}$ – критическая температура, при которой напряжения в приповерхностных слоях металла достигают предела прочности самого металла или его окисла.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ САОООЧИЩЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ В РЕЗУЛЬТАТЕ ДЕЙСТВИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

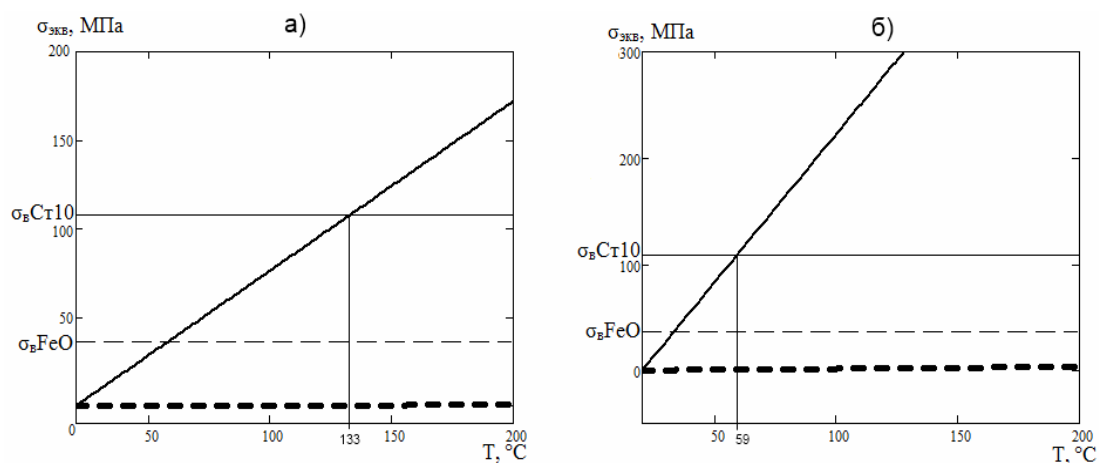


Рисунок 3 – Диаграммы зависимостей эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экр}}$ от температуры T для стали 10 и оксида железа FeO при: а) $\beta = 0$ ($\sigma_x = -0,89\text{K}$); б) $\beta = 10$ ($\sigma_x = -0,06\text{K}$)

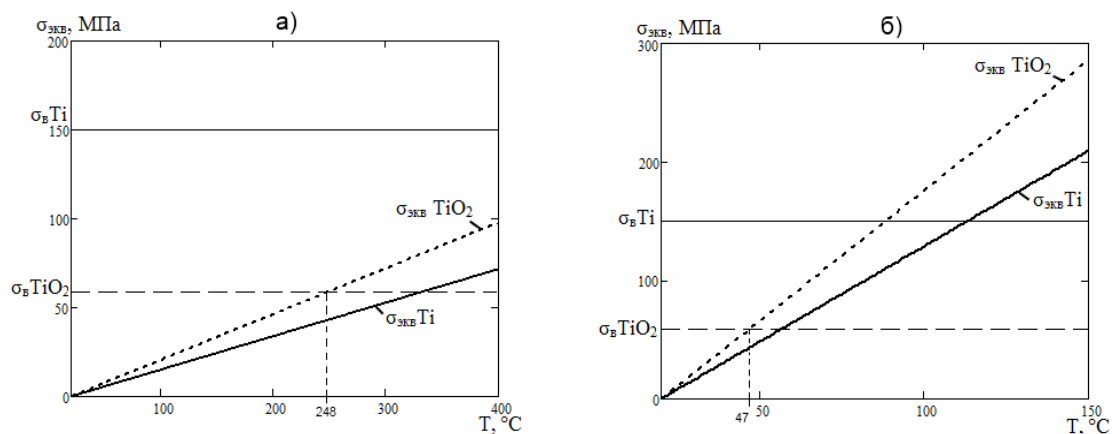


Рисунок 4 – Диаграммы зависимостей эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экр}}$ от температуры T для титана Ti и диоксида титана TiO_2 при: а) $\beta = 0$ ($\sigma_x = -0,89\text{K}$); б) $\beta = 10$ ($\sigma_x = -0,06\text{K}$)

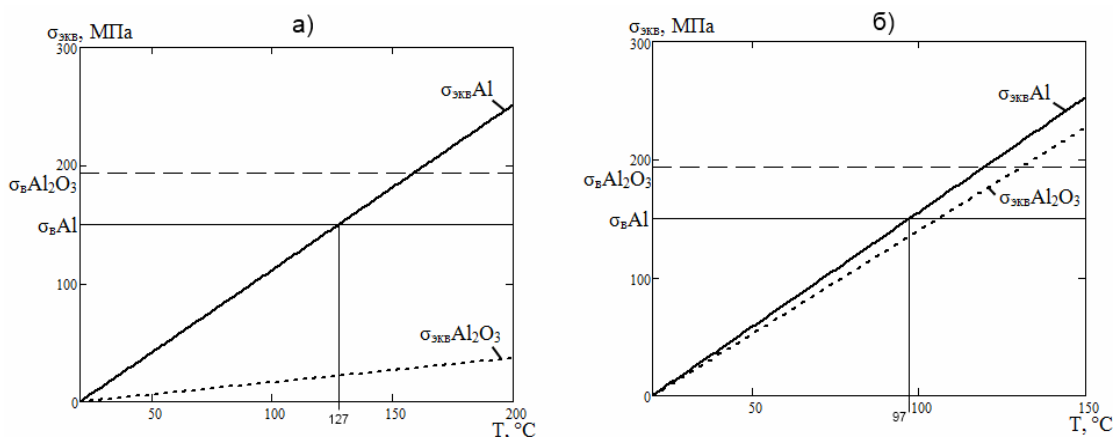


Рисунок 5 – Диаграммы зависимостей эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экр}}$ от температуры T для алюминия Al и оксида алюминия Al_2O_3 при: а) $\beta = 0$ ($\sigma_x = -0,89\text{K}$); б) $\beta = 10$ ($\sigma_x = -0,06\text{K}$)

Анализ полученных результатов показал, что:

1. Для стали 10 и оксида железа FeO при температурах, для которых эквивалентное напряжение в полупространстве стали 10 достигает предела прочности, эквивалентное напряжение в полупространстве FeO достигает всего лишь 1 % предельного.

2. Для титана и оксида титана TiO при температурах, для которых эквивалентное напряжение в полупространстве оксида титана TiO достигает предела прочности, эквивалентное напряжение в полупространстве титанового сплава достигает 29 % предельного.

3. Для алюминия и оксида алюминия Al₂O₃ при температурах, для которых эквивалентное напряжение в полупространстве алюминия достигает предела прочности, эквивалентное напряжение в полупространстве оксида алюминия Al₂O₃ достигает 11...70 % предельного.

4. Полученные значения температур, при которых возникают критические напряжения, укладываются в интервал 45...250 °C (при начальной температуре 20 °C), в то время как температура ударно-сжатого газа, движущегося по сварочному зазору впереди точки контакта при сварке взрывом достигает 2500...7000 °C [1].

Таким образом, проведённые теоретические исследования позволяют сделать вывод о возможности очистки от слоя окислов металла при сварке взрывом ударно-сжатым газом, движущимся впереди области образования сварного соединения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бердыченко, А. А. О возможном возгорании выбрасываемых в зазор частиц при сварке титана взрывом [Текст] / А. А. Бердыченко, Б. С. Злобин Л. Б. Первухин, А. А. Штерцер // Физика горения и взрыва – 2003. – № 2. – с. 128–136.
2. Коваленко, А. Д. Введение в термоупругость [Текст] / А. Д. Коваленко. – Киев: Наукова думка, 1965. – с.180-185.
3. Коваленко, А. Д. Основы термоупругости [Текст]: учебное пособие / А. Д. Коваленко.–Киев: Наукова думка, 1970. – с.253-257.
4. Марочник сталей и сплавов [Текст]: справочное издание / Под ред. А. С. Зубченко – М.: Машиностроение, 2003. – 780 с.
5. Ткачёв, А. Г. Технология аппаратостроения [Текст] / А. Г. Ткачёв – М.: Машиностроение, 2001. – 110 с.
6. Физико-химические свойства окислов [Текст]: справочное издание / Г. В. Самсонов, А. Л. Борисова, Т. Г. Жидкова и др. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.