

О ВОЗМОЖНОМ ВОЗГОРАНИИ ВЫБРАСЫВАЕМЫХ В ЗАЗОР ЧАСТИЦ ПРИ СВАРКЕ ТИТАНА ВЗРЫВОМ

А. А. Бердыченко, Б. С. Злобин*, Л. Б. Первухин, А. А. Штерцер**

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, 656099 Барнаул

*Научно-производственное предприятие «МАТЕМ», 630058 Новосибирск, matem@mail.nsk.ru

**Конструкторско-технологический институт гидроимпульсной техники СО РАН, 630090 Новосибирск

Проанализированы процессы, происходящие в сварочном зазоре при сварке взрывом. Показано, что частицы металла, вылетающие в зазор вследствие кумулятивного эффекта, способны воспламениться в среде сжатого ударной волной воздуха. Для большинства металлов выделяемая при этом энергия невелика и не оказывает существенного влияния на образование соединения. При сварке титана на больших площадях удаленные от места инициирования детонации участки поверхности, находящиеся под длительным воздействием потока горячего воздуха, могут растворять в себе большое количество кислорода и азота. В случае попадания в зазор частиц из этих участков возможно протекание в них химических реакций с образованием TiO_2 и TiN по механизму внутреннего горения. При этом энергия, выделяемая в зазоре на единицу площади, сравнима и даже превышает кинетическую энергию метаемой пластины. Наблюдающиеся на практике локальные вздутия и разрывы металла можно объяснить воспламенением и горением находящихся в сварочном зазоре газонасыщенных частиц титана.

Ключевые слова: титан, сварка взрывом, сварочный зазор, кумулятивный эффект, частицы, газонасыщение, воспламенение, горение.

ВВЕДЕНИЕ

До некоторых пор влияние среды сварки на образование соединения при сварке взрывом не учитывалось, хотя при любом традиционном процессе сварки оно неоспоримо. Использование этой технологии в промышленном производстве крупногабаритных листов биметалла выявило необходимость дальнейшего исследования процессов в сварочном зазоре (объеме между свариваемыми поверхностями). Накопленный опыт показывает, что при получении сварных соединений на большой площади воздух в сварочном зазоре отрицательно влияет на качество соединения. Особенно отчетливо это наблюдается при сварке титана с титаном, сталью и другими сплавами. Например, при плакировании листов стали марки Ст. 3 размером $40 \times 700 \times 3800$ мм титаном ВТ1-0 толщиной 4 мм с удалением от точки инициирования заряда взрывчатого вещества прочность биметалла на отрыв падает с 300 до 1 МПа, растут амплитуда волн и количество оплавленных участков в зоне соединения [1]. Кроме того, при сварке больших листов пары сталь — титан наблюдаются также хаотично расположенные непривары, имеющие вид вздутий, а также повреждения плакирующего слоя в виде разрывов и свищей [1]. Заполнение зазора легкими газа-

ми (гелием и водородом) позволяет улучшить качество соединения. В частности, при использовании гелия получали соединение стального листа размером $18 \times 950 \times 3900$ мм с титаном толщиной 3 мм с прочностью $150 \div 280$ МПа по всей площади [2].

Исследования показывают, что в зазоре происходят сложные процессы. Впереди точки контакта движется ударная волна (УВ), которая сжимает и разогревает газ до высокой температуры (до 5000 К при скорости точки контакта $V_k = 3500$ м/с [3]). В свою очередь, разогретый и движущийся с высокой скоростью газ нагревает поверхность металла еще до соударения пластин. Этот эффект усиливается с удалением от места инициирования [3]. Картина усложняется тем, что в зазор за счет кумулятивного эффекта «впрыскиваются» частицы металла соударяющихся пластин [4]. Кроме того, на начальном участке сварки ударно-волновую конфигурацию в зазоре нельзя рассматривать как простую в том смысле, что фронт УВ не является перпендикулярной пластинам плоскостью, движущейся вдоль зазора. Сначала метаема пластина генерирует наклонную УВ, которая при взаимодействии с нижней пластиной может привести к образованию маховской ножки [5, 6]. Обнаружено, что

при $V_k = 3300$ м/с маховая ножка двигалась со скоростью $V_{УВ} = 4300$ м/с [6]. При такой скорости параметры воздуха за фронтом УВ следующие: давление $p = 20$ МПа, температура $T \approx 5600$ К, плотность $\rho \approx 12,0$ кг/м³ ($\rho/\rho_0 \approx 9,2$). Опираясь на эти данные, в расчетах будем предполагать, что скорость УВ в зазоре превышает значение V_k в $4300/3300 = 1,3$ раза (в [3] при $V_k = 4500$ м/с скорость УВ составила 6300 м/с, т. е. $V_{УВ}/V_k = 1,4$).

Процессы в зазоре могут оказывать существенное влияние на качество соединения. Отметим, что нигде в литературе не отмечалась возможность химической реакции между частицами металла и газом в зазоре. Вместе с тем известно, что некоторые металлические порошки исключительно взрывоопасны. Например, мелкодисперсный титановый порошок легко возгорается в воздухе при температуре несколько сот градусов [7]. Это дает основание предполагать, что выбрасываемые из точки контакта частицы могут возгораться при взаимодействии с кислородом и азотом воздуха с соответствующим выделением тепла. Такое предположение естественно, поскольку даже тонкие титановые пластины способны гореть в самоподдерживающемся режиме при обдувании потоком воздуха [8–10]. Возможно, что наблюдавшиеся в [1, 11] при сварке титана со сталью газовые поры, литые включения, пузыри и разрывы металла могут быть связаны с горением частиц титана. В то же время при сварке стали со сталью и других пар металлов эти эффекты отсутствуют. Также известно, что в воздухе, содержащем распыленные частицы алюминия, УВ может перерасти даже в детонационную волну [12–14]. Поэтому можно предположить, что вероятность возгорания частиц алюминия в сварочном зазоре весьма высока. Тем не менее при сварке алюминия со сталью эффектов, свидетельствующих о сильном нагреве, не наблюдалось, хотя алюминий, как и титан, имеет сильное сродство к кислороду. Эти эффекты не наблюдались даже при сварке циркония со сталью, хотя его порошки чрезвычайно взрывоопасны и температура воспламенения частиц циркония иногда составляет всего 293 К, в то время как для титана она находится в интервале $573 \div 873$ К [7, 15].

В настоящей работе сделана попытка объяснить причины появления некоторых упомянутых выше дефектов, возникающих при сваривании титана.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для исследования влияния газа, находящегося в объеме между свариваемыми поверхностями, на образование сварного соединения при плакировании взрывом крупногабаритных листов были поставлены эксперименты по сварке между собой пластин из титана марки ВТ1-0 размером $5 \times 300 \times 2000$ мм. Сварочный зазор заполняли воздухом, кислородом, азотом, аргоном и гелием [16].

Изучение сварного соединения показало, что газ в зазоре активно влияет на процессы в зоне контакта и на получаемые структуру и свойства соединения. На шлифе видны вихревые участки, являющиеся зонами повышенной концентрации газа, содержание кислорода и азота в которых в виде твердых растворов, нитридов и оксидов растет с удалением от начальной точки сварки и увеличивается в несколько десятков раз по сравнению с концентрацией в исходном металле. Отметим, что указанные газы могут попадать в титан только из воздушного зазора. Исследование металла сварного соединения на содержание газа (кислород, азот, аргон и гелий) проводили методом масс-спектрального анализа на лазерном масс-спектрографе ЭМАЛ-2. Наличие оксидов и нитридов определяли качественно методами металлографии (визуально оксиды — это округлые включения, нитриды — многогранники). В литературе имеются значения микротвердости, по которым можно идентифицировать нитриды и карбиды. Кроме того, фазовый состав определялся с помощью дифрактометра ДРОН-1УМ.

Снижение скорости точки контакта несколько понижает насыщение металла в вихревых зонах газами, но с удалением от начальной точки сварки рост концентрации газов в них остается стабильным и уже на удалении порядка $0,3 \div 0,5$ м превышает допустимые значения (0,04 % азота и 0,20 % кислорода по ГОСТ 19807 для сплава ВТ1-0). С удалением от начальной точки сварки наблюдается периодический рост размеров вихревых зон, которые иногда сливаются, в результате чего образуется соединение со сплошной прослойкой из металла с повышенной в десятки раз концентрацией кислорода и азота.

Исследования показали, что осредненная (по экспериментальным точкам) толщина слоя оплавленного металла $\delta_{пл}$ растет с увеличени-

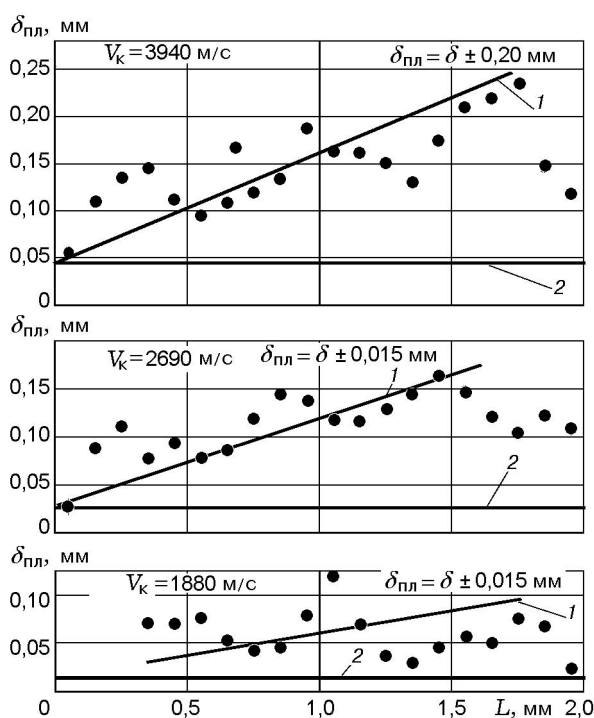


Рис. 1. Изменение осредненной толщины слоя оплавленного металла ($\delta_{пл}$) с удалением L от начальной точки сварки и в зависимости от скорости точки контакта (V_k) при получении соединения титан — титан в воздухе:

1 — линейное приближение экспериментальной средней толщины слоя оплавленного металла по методу наименьших квадратов; 2 — средняя толщина слоя оплавленного металла, рассчитанная по [4] из условия выделения в зоне соединения «мгновенного тепла»

ем длины сварки L при сварке в воздухе, при этом расположение экспериментальных точек носит ярко выраженный волнообразный характер (рис. 1). В непосредственной близости к начальной точке сварки толщина оплавленного металла хорошо совпадает с расчетными значениями, полученными по формуле из [4], учитывающей так называемое «мгновенное тепло», выделяющееся в процессе деформации металла в области образования сварного соединения. Скорость роста $\delta_{пл}$ ($d\delta_{пл}/dL$) слабо зависит от скорости точки контакта V_k (см. рис. 1), но сильно зависит от вида газа, заполняющего объем между свариваемыми плоскостями (см. на рис. 1 графики при $V_k = 2690$ м/с и рис. 2). Расположение экспериментальных точек над линией, рассчитанной по модели источника «мгновенного тепла», может свидетельствовать о том, что существует какой-то дополнительный источник тепла, не учтенный в [4],

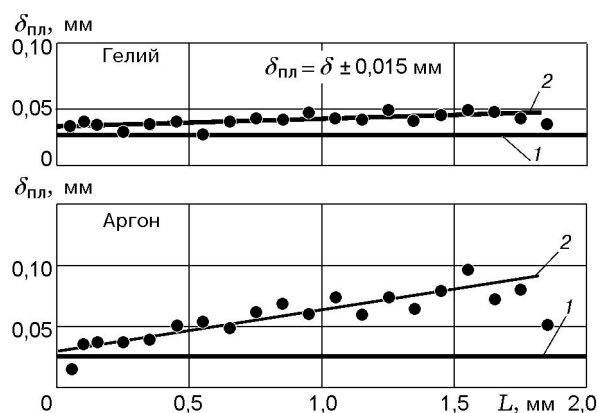


Рис. 2. Изменение средней толщины слоя оплавленного металла сварного соединения титан — титан ($\delta_{пл}$), полученного в аргоне и гелии, с удалением L от начальной точки сварки при $V_k = 2690$ м/с:

• — экспериментальная средняя толщина слоя оплавленного металла; 1 — толщина слоя оплавленного металла, рассчитанная по [4] из условия выделения в зоне соединения «мгновенного тепла»; 2 — линейное приближение экспериментальной средней толщины слоя оплавленного металла по методу наименьших квадратов

воздействие которого на образование сварного соединения растет с увеличением длины сварки.

Экспериментальные данные по сварке в кислороде и азоте носят тот же характер, что и полученные при сварке в воздухе, поэтому в настоящей статье они не приводятся.

Прочность сварных соединений, полученных в аргоне и гелии, не уменьшалась с ростом L . Зона соединения по всей площади сварки не имела значительных химических и структурных неоднородностей. При сварке в гелии значение $\delta_{пл}$ по всей площади практически постоянно (см. рис. 2), а в среде аргона $\delta_{пл}$ росло с увеличением L , но периодические всплески значений $\delta_{пл}$, наблюдаемые при сварке в воздухе, исчезли, а структура расплавов была близка к структуре основного металла, и химическая неоднородность отсутствовала. Такие изменения характера соединения могут быть связаны только с химической активностью газа, заполняющего сварочный зазор, так как все остальные параметры сварки оставались прежними.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ

Чтобы ответить на вопрос, почему именно при сварке титана с другими металлами

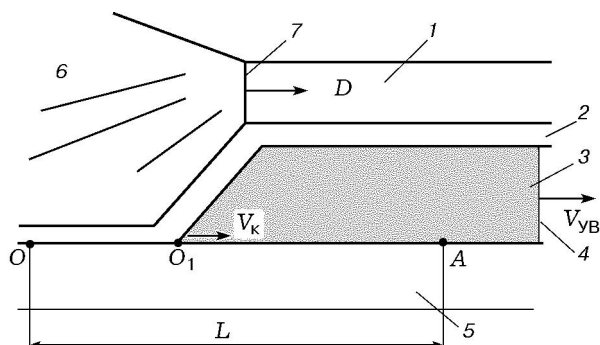


Рис. 3. Соударение пластин при сварке взрывом: 1 — слой ВВ; 2 — метаемая пластина; 3 — область сжатого воздуха за фронтом УВ; 4 — фронт УВ; 5 — нижняя пластина; 6 — продукты детонации; 7 — фронт детонации; O — начальная точка сварки; O_1 — точка контакта; A — рассматриваемая точка

на больших площадях возникают указанные особенности, сделаем некоторые оценки. Будем считать скорость V_k постоянной, фронт УВ в зазоре прямым, а скорость УВ, как оговорено выше, $V_{УВ} = 1,3V_k$. Пусть некоторый участок поверхности A свариваемой пластины находится на расстоянии L от начальной точки сварки (рис. 3). Очевидно, что время, в течение которого этот участок находится под воздействием высокотемпературного газового потока (до прихода точки контакта), можно определить как

$$t_A = \frac{L}{V_k} - \frac{L}{V_{УВ}} = 0,23 \frac{L}{V_k}. \quad (1)$$

Отсюда ясно, что степень воздействия на пластину обтекающего ее горячего газа растет пропорционально расстоянию L от начальной точки сварки. Это касается не только увеличения степени предварительного прогрева поверхности с ростом L , но и увеличения возможности растворения газов в поверхностном слое металла и протекания химических реакций.

В таблице приведены расчетные параметры сварки пластин из титана для приведенных выше экспериментов при $V_k = 2690$ м/с. Приняты следующие обозначения: $\delta_{п}$ — толщина метаемой пластины, $\rho_{п}$ — плотность материала пластины, $\delta_{ВВ}$ — толщина слоя ВВ, r — отношение массы ВВ к массе пластины, h — сварочный зазор, D — скорость детонации ВВ ($V_k = D$), β — угол поворота метаемой пластины, $V_{п}$ — скорость соударения пластин, δ_c — расчетная толщина кумулятивной струи, V_c — скорость струи (частиц), $\delta_{ч}$ — размер частиц,

$\rho_{ч}$ — массовая концентрация частиц в зазоре, n — числовая концентрация частиц в зазоре, l — среднее расстояние между частицами в зазоре, χ — доля объема, занимаемая частицами в зазоре. Параметры УВ в зазоре: $V_{УВ}$ — скорость фронта УВ, p, ρ, T, U — соответственно давление, плотность, температура и массовая скорость газа за фронтом УВ, ρ_0 — начальная плотность воздуха, E — внутренняя энергия, c — скорость звука, Pr — число Прандтля, γ — показатель адиабаты, c_p — удельная теплоемкость, λ — теплопроводность, a — температуропроводность, η — вязкость сжатого воздуха, μ — масса грамм-моля (грамм-атома) вещества.

Угол поворота, скорость метаемой пластины, толщина и скорость кумулятивной струи получены с помощью следующих формул из [4, 17, 18]:

$$\beta = \frac{0,99r}{r + 2,71 + 0,184\delta_{ВВ}/h}, \quad (2)$$

$$V_{п} = 2D \sin \frac{\beta}{2}, \quad (3)$$

$$V_c = \frac{V_{п}}{\sin \beta} \left[\cos \frac{\beta}{2} + \sqrt{\cos^2 \frac{\beta}{2} - \frac{2\sigma_T}{\rho V_{п}^2}} \right], \quad (4)$$

$$\frac{\delta_c}{\delta_{п}} = \sin^2 \frac{\beta}{2}, \quad (5)$$

где σ_T — предел текучести материала пластины. В случае $\sigma_T = 0$ (гидродинамическое приближение) $V_c = 2D$ и кинетическая энергия пластины полностью переходит в кинетическую энергию струи. Для титана ВТ1-0 взято $\sigma_T = 370$ МПа [19].

Расчет размера частиц $\delta_{ч}$ проводился с использованием данных работы [20], где было показано, что при сварке алюминия толщиной 3 мм со сталью при угле соударения 8° и вакуумированном сварочном зазоре кумулятивная струя представляет собой поток частиц алюминия размером $\approx 0,5$ мкм. Рассчитанная по (5) толщина струи в этом случае составляет 15 мкм, поэтому $\delta_c/\delta_{ч} \approx 30$. Это соотношение было использовано для получения указанного в таблице значения $\delta_{ч}$. Давление, плотность, температура, показатель адиабаты и массовая скорость за фронтом УВ в зазоре определены по табличным данным, приведенным в

Характеристики режима сварки биметалла ВТ1-0+ВТ1-0

Параметры сварки								
$\delta_{\text{П}}$, мм	$\delta_{\text{ВВ}}$, мм	r	h , мм	D , м/с	β , град	$V_{\text{П}}$, м/с		
5	40	1,78	5	2690	17	795		
$\delta_{\text{Ч}}$, мм	$\delta_{\text{С}}$, мкм	$V_{\text{С}}$, м/с	$\rho_{\text{Ч}}$, кг/м ³	n , 10 ¹⁰ 1/м ³	l , мкм	χ , %		
4	109	4990	115 ÷ 326	10,6 ÷ 3,8	210 ÷ 297	2,6 ÷ 7,2		
Параметры УВ и воздуха в зазоре								
$V_{\text{УВ}}$, м/с	p , МПа	ρ , кг/м ³	ρ/ρ_0	E , кДж/кг	T , К	U , м/с		
3497	13,1	10,3	8,39	5022	4330	3080		
c , м/с	Pr	γ	c_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	a , м/с	η , Па·с		
1250	0,70	1,26	560	0,08	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$10 \cdot 10^{-5}$		
Параметры воздуха при нормальных условиях								
ρ , кг/м ³	μ , г	c , м/с	Pr	γ	c_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	a , м ² /с	η , Па·с
1,225	28,8	330	0,73	1,4	$1,01 \cdot 10^3$	$257 \cdot 10^{-4}$	$1,98 \cdot 10^{-5}$	$1,72 \cdot 10^{-5}$
Параметры титана								
ρ , кг/м ³	σ_{T} , МПа	μ , г	c , м/с	c_v , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	a , м ² /с		
4500	370	48	4850	880	21,0	$5,3 \cdot 10^{-6}$		

[21] по заданной скорости УВ ($V_{\text{УВ}} = 1,3V_{\text{К}}$). Вязкость, теплопроводность и число Прандтля для сжатого воздуха взяты из [22]. Теплоемкость и температуропроводность определены соответственно по формулам $c_p = \text{Pr} \cdot \lambda/\eta$ и $a = \lambda/(\rho c_p)$. Концентрацию частиц в зазоре оценивали из следующих соображений. Если точка контакта за время t прошла расстояние $V_{\text{К}}t$, то УВ прошла расстояние $1,3V_{\text{К}}t$. При этом масса металла метаемой пластины, выброшенного в виде частиц, будет $\rho_{\text{П}}\delta_{\text{С}}V_{\text{К}}t$. Если считать, что частицы вследствие торможения не опережают фронта УВ, то эта масса будет выброшена в объем $(1,3V_{\text{К}}ht - V_{\text{К}}ht) = 0,3V_{\text{К}}ht$. Соответственно, массовая концентрация частиц в зазоре составляет

$$\rho_{\text{Ч}} = \frac{\rho_{\text{П}}\delta_{\text{С}}V_{\text{К}}t}{0,3V_{\text{К}}ht} = 3,33\rho_{\text{П}}\frac{\delta_{\text{С}}}{h}. \quad (6)$$

Если же предположить, что частицы не тормозятся вовсе, т. е. все время летят со скоростью $V_{\text{С}}$, то получим минимально возможное значение плотности частиц в зазоре

$$\rho_{\text{Ч}} = \frac{\rho_{\text{П}}\delta_{\text{С}}V_{\text{К}}t}{(V_{\text{С}} - V_{\text{К}})ht} = \frac{\rho_{\text{П}}\delta_{\text{С}}V_{\text{К}}}{(V_{\text{С}} - V_{\text{К}})h}. \quad (7)$$

В таблице для плотности частиц и связанных с ней параметров указаны диапазоны

значений с границами, рассчитанными по (6) и (7). Остальные величины находятся по формулам $\chi = \rho_{\text{Ч}}/\rho_{\text{П}}$, $n = 6\chi/\pi\delta_{\text{С}}^3$, $l = (1/n)^{1/3}$.

Для определения возможности возгорания выбрасываемых в зазор частиц металла важно знать их начальную температуру, которую можно полагать равной температуре металла в зоне сварного шва. В таком случае она должна составлять сотни градусов [17, 23]. Например, при соударении стали с никелем при $V_{\text{К}} = 2200$ м/с и угле соударения 17° температура в зоне шва на глубине ≈ 50 мкм составит ≈ 973 К [17]. При сварке пары медь — константан с $V_{\text{К}} = 1000$ м/с и углом соударения 18° максимальная температура в зоне шва составляет 1023 К, а в паре манганин — константан при $V_{\text{К}} = 1340$ м/с и угле соударения 18° $T = 1293$ К [23]. Принимая во внимание значительно более низкую, чем у стали и алюминия, теплопроводность титана, можно заключить, что температура впрыскиваемых в зазор частиц титана будет не ниже 973 К.

Температура вылетевших в зазор частиц повышается как за счет теплообмена с окружающим их более горячим воздухом, так и за счет торможения. Из приведенных в таблице данных видно, что доля занимаемого частицами объема в зазоре невелика, однако их

масса значительно превышает массу сжатого воздуха. Можно ожидать, что внутренней энергии воздуха, даже прогретого в ударной волне до температуры ≈ 4330 К, недостаточно для того, чтобы значительно увеличить температуру частицы титана за счет теплообмена. Это и подтверждается следующими оценками. Полагая, что увеличение внутренней энергии частиц титана равно уменьшению таковой у воздуха и взяв в качестве начальной температуры частиц температуру в зоне соединения $T_2 = 973$ К, для минимального содержания частиц, когда $\rho_{\text{ч}} = 115$ кг/м³, получим $T = 1154$ К, т. е. прирост температуры составляет 181 К. Если же полагать, что все частицы затормозились и движутся со скоростью сжатого воздуха, что соответствует максимальному содержанию частиц ($\rho_{\text{ч}} = 326$ кг/м³), то получим $T = 1039$ К, т. е. прирост составляет 66 К. Вторая оценка более правдоподобна, так как выравнивание скоростей происходит очень быстро. Оценки показывают, что частицы тормозятся от скорости струи $V_c = 4990$ м/с до массовой скорости воздуха за фронтом УВ $U = 3080$ м/с на расстоянии $\approx 10 \div 20$ мм. На самом деле, реальный прирост температуры еще ниже, так как для завершения теплообмена между частицей титана и приходящимся на нее объемом воздуха требуется значительное время: $\tau \sim l^2/2a = 4,4 \cdot 10^{-3}$ с. В то же время летящая со скоростью 3080 м/с частица проходит расстояние 2 м (длина свариваемых пластин) за $6,5 \cdot 10^{-4}$ с.

Чтобы оценить прирост температуры частицы за счет торможения рассмотрим две возможные ситуации. В первом случае частицы опережают фронт УВ и тормозятся в невозмущенном воздухе от $V_c = 4990$ м/с до $V_2 = 0$, а во втором случае частица тормозится за фронтом УВ, не успевая его догнать, от $V_c = 4990$ м/с до массовой скорости газа за фронтом $U = 3080$ м/с. Оценку проведем с использованием формулы [24]

$$Q = \frac{mV_0^2}{2} \left(\frac{1}{2} \frac{c_{\tau}}{c_{\tau} + c_x} \right), \quad (8)$$

где Q — суммарное количество тепла, подведенного к поверхности тела массой m во время аэродинамического торможения, V_0 — начальная скорость тела, c_{τ} — сопротивление вязкого трения газа о поверхность тела, c_x — сопротивление сил нормального давления. Соотношение $c_{\tau}/(c_{\tau} + c_x)$ зависит от формы те-

ла. Например, в случае обтекания очень тонкой пластины ($c_x = 0$) половина кинетической энергии идет на нагрев пластины. Для шара $c_{\tau}/(c_{\tau} + c_x) = 0,01$. Считая частицы сферическими и взяв разницу кинетических энергий в начале и конце торможения, получим из (8) формулу для расчета прироста температуры частицы:

$$\Delta T = \frac{0,0025(V_1^2 - V_2^2)}{c_v}. \quad (9)$$

Подставив приведенные выше значения скоростей, находим $\Delta T \approx 71$ К для торможения в невозмущенном газе и $\Delta T \approx 44$ К в газе за фронтом УВ. Таким образом, можно считать, что прирост температуры частицы после ее вылета из точки контакта составляет ≈ 100 К и ее способность к возгоранию определяется в основном начальной температурой, т. е. температурой материала в точке контакта.

Из данных работы [25] известно, что температура воспламенения таких взрывоопасных порошков, как Mg, Al, Ti и Zr, составляет соответственно $T_{\text{в}} = 823, > 1073, 573 \div 873, 453 \div 473$ К (по [15] Zr может воспламеняться и при 293 К). Температура воспламенения сильно зависит от размера частиц. Например, если для алюминиевого порошка АСД-4 с размером частиц < 20 мкм $T_{\text{в}} = 1143$ К, то для ультрадисперсного порошка алюминия с размером частиц 0,12 мкм $T_{\text{в}} = 693$ К [26]. Кроме того, $T_{\text{в}}$ зависит от плотности порошка (количества частиц в заданном объеме). Упомянутые выше данные из [25] получены для порошков насыпной плотности, в то же время порошок алюминия с размером частиц 30 мкм, распыленный в воздухе (аэровзвесь), воспламеняется при 918 К [27]. Титановый порошок с размером частиц менее 50 мкм во взвешенном состоянии при $\rho_{\text{ч}} = 40 \div 300$ г/м³ и в насыпном состоянии воспламеняется при температуре $603 \div 1013$ К, причем температура воспламенения титановой пыли в насыпном состоянии составляет всего 493 К [7]. Эти данные показывают, что воспламенение частиц, образующихся в результате кумулятивного процесса и попадающих в область ударно-сжатого газа, вполне возможно.

Оценим теперь полноту сгорания частиц за счет химической реакции с кислородом и азотом воздуха и максимально возможный при этом тепловой эффект. При сварочном зазоре

$h = 5$ мм объем между свариваемыми поверхностями площадью 1 м^2 равен $0,005 \text{ м}^3$. При этом в нем содержится приблизительно 12 г O_2 и 38 г N_2 . Теплота образования TiO_2 составляет 944,5 кДж на грамм-моль оксида [28], а TiN — 323 кДж на грамм-моль нитрида [29]. Первым в реакцию с титаном вступает кислород, а если его не хватает, титан начинает реагировать с азотом. Для полного протекания химических реакций при имеющемся в объеме (соответствующем 1 м^2 сварочного зазора) количестве кислорода и азота необходимо 148 г титана (18 г для реакции с кислородом и 130 г для реакции с азотом). Количество титановых частиц, выбрасываемых кумулятивным процессом в область ударно-сжатого газа, оцененное как произведение $\rho_c h$, составляет $575 \div 1630 \text{ г/м}^2$, что говорит о достаточном количестве титана для полного протекания реакции с точки зрения использования всего имеющегося кислорода и азота. Таким образом, тепловой эффект реакций может достигать 1230 кДж/м^2 (354 кДж/м^2 при реакции с кислородом и 875 кДж/м^2 при реакции с азотом). Доля прореагировавшего титана составляет при этом $9 \div 25 \%$ в зависимости от насыщенности зазора частицами.

Для сравнения укажем, что кинетическая энергия метаемой пластины в нашем случае составляет 7110 кДж/м^2 , кинетическая энергия выбрасываемых частиц 6114 кДж/м^2 и внутренняя энергия сжатого ударной волной воздуха 259 кДж/м^2 . Таким образом, выделенное тепло составляет 17,3 % кинетической энергии пластины. Такое количество энергии, притом рассчитанное по самой максимальной оценке, когда не учитывались другие реакции (например, реакции окисления азота и рекомбинации молекул кислорода и азота), вряд ли может привести к значительным дефектам при образовании сварного соединения.

Ситуация резко меняется, если учесть уникальную способность титана к поглощению таких газов, как кислород и азот. Если в таких металлах, как Fe, Cu и Zr, максимальная растворимость кислорода составляет $2 \cdot 10^{-3}$, $4 \cdot 10^{-2}$ и 8 ат. % соответственно, а в алюминии кислород практически не растворим, то титан способен содержать в себе до 30 ат. % кислорода и 20 ат. % азота [30]. В соответствии с формулой (1) удаленные участки поверхности свариваемых пластин имеют возможность погло-

тить больше газов, чем расположенные на начальном участке сварки. Представим себе, что на некоторой длине L газонасыщенность поверхностного слоя достигает указанных выше предельных значений. С приходом в это место точки контакта в зазор начинают вылетать насыщенные кислородом и азотом частицы. Далее, поскольку температура частиц достаточно высока, начинается их возгорание с поверхности. Такое возгорание наиболее вероятно, так как поверхность частиц дополнительно нагревается при контакте с воздухом. Вследствие большого тепловыделения происходит резкое повышение температуры частицы вплоть до ее плавления, и начинается внутреннее горение за счет растворенных в частице кислорода и азота. Оценим тепловой эффект для этого случая. Указанные выше значения растворимостей газов означают, что в частицах на 1 кг титана приходится 200 г кислорода и 120 г азота (76, 15 и 9 % соответственно). С кислородом может прореагировать 300 г и с азотом 411 г титана, т. е. 71 % общего количества. Тепловыделение составит 5903 кДж при образовании оксида и 2769 кДж при образовании нитрида. Всего выделится 8672 кДж на 1 кг титана. Далее, учитывая, что в выбрасываемых в зазор частицах содержится 76 % титана, получим концентрацию этого металла в зазоре: $87 \div 248 \text{ кг/м}^3$ или $435 \div 1240 \text{ г/м}^2$. Значит, тепловыделение может составить $3700 \div 10750 \text{ кДж/м}^2$ или 52 ÷ 150 % кинетической энергии пластины. Отметим также, что реакция «внутреннего» горения протекает значительно быстрее, чем «внешнего», происходящего за счет диффузии кислорода и азота из окружающего воздуха внутрь частицы. Если на некотором участке сварки произойдет «внутреннее» горение насыщенных газом частиц, то процесс может пройти в виде локального взрыва, а выделившейся энергии вполне хватит, чтобы образовались наблюдавшиеся в экспериментах вздутия, разрывы металла и свищи.

Возможно также возгорание самой титановой пластины, подвергаемой воздействию сжатого ударной волной горячего воздуха в зоне между точкой контакта O_1 и фронтом УВ (см. рис. 3). Однако вероятность возгорания вылетающих из точки контакта частиц гораздо выше, поскольку, во-первых, они имеют более высокую, чем пластина, температуру, во-вторых, инициировать процесс самоподдерживающегося горения пластины, толщина которой значи-

тельно превышает размер кумулятивных частиц, гораздо труднее. Определенная в [10] требуемая для инициирования возгорания даже тонкой (0,3 мм) титановой пластины пороговая энергия составляет $5000 \div 10000$ кДж/см². В то же время внутренняя энергия воздуха за фронтом УВ, как указано выше, составляет всего 259 кДж/м².

ВЫВОДЫ

1. Уникальная способность титана к поглощению кислорода и азота из воздуха приводит к тому, что при сварке взрывом под воздействием генерируемого в сварочном зазоре высокотемпературного газового потока удаленные от места инициирования участки поверхности металла насыщаются этими элементами. Степень насыщения растет с длиной сварки и достигает предельных значений на расстоянии $0,3 \div 0,5$ м от места инициирования.

2. Выбрасываемые в сварочный зазор вследствие кумулятивного эффекта частицы металла способны воспламениться за счет взаимодействия с кислородом и азотом воздуха. При большой длине свариваемых поверхностей в зазор попадают газонасыщенные частицы титана, способные гореть за счет реакции с растворенными в них кислородом и азотом. Выделяемое при этом тепло становится сравнимым с кинетической энергией метаемой пластины и даже превышает ее. Локальный взрыв газометаллической смеси может привести к разрушению сварного соединения.

3. Сварка в среде инертных газов позволяет кардинально улучшить качество крупногабаритных сварных соединений титана с различными металлами за счет предотвращения насыщения титана кислородом и азотом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов В. М., Коротеев А. Я. Сварка взрывом в металлургии. М.: Металлургия, 1978.
2. Richter U. und Roth J. F. Grundlagen und Anwendung des Sprengplattierens // Die Naturwissenschaften. 1970. Н. 10. S. 487–493.
3. Ишуткин С. Н., Кирко В. И., Симонов В. А. Исследование теплового воздействия ударно-сжатого газа на поверхность соударяющихся пластин // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 6. С. 69–73.
4. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980.
5. Васильев С. М., Кирко В. И. Исследование процесса формирования газодинамического течения в условиях остроугольной геометрии сталкивающихся пластин // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 1. С. 88–92.
6. Адамец М., Злобин Б. С., Штерцер А. А. Ударно-волновая конфигурация в воздушном зазоре при косом соударении металлических пластин // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 2. С. 128–130.
7. Недин В. В., Алексеев А. Г., Костина Е. С. Пирофорность и взрываемость порошков титана // Предупреждение внезапных взрывов газодисперсных систем: Сб. статей. Киев: Наук. думка, 1971. С. 57–66.
8. Ефимов Б. Г., Клюкин С. С., Кузьев П. Н., Ложкин Т. Ю. Влияние потока воздуха на горение титановых пластин // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 2. С. 29–34.
9. Борисова Е. А., Верникова Н. Г., Ефимов Б. Г. и др. Влияние состава титановых сплавов на характер горения в потоке воздуха // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 3. С. 35–40.
10. Ефимов Б. Г., Заклязьминский Л. А. Иницирование горения титановых пластин в потоке воздуха импульсным излучением // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 2. С. 46–51.
11. Конон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д. Сварка взрывом. М: Машиностроение, 1987.
12. Федоров А. В., Хмель Т. А. Численное моделирование ударно-волнового инициирования гетерогенной детонации аэрозвеси частиц алюминия // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 3. С. 81–88.
13. Гостеев Ю. А., Федоров А. В. Воспламенение облака металлических частиц в непрерывном режиме. II. Неадиабатическое течение // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 6. С. 91–96.
14. Борисов А. А., Хасаинов Б. А., Вейссьер Б. и др. О детонации взвесей алюминия в воздухе и кислороде // Хим. физика. 1991. Т. 10, № 2. С. 250–272.
15. Schichter G. Die Explosionsneigung von Titan und Zirkon // Neue Huette. 1958. Bd. 3, H. 3. S. 187–188.
16. Бердыченко А. А., Первухин Л. Б. Закономерности изменения структуры сварного соединения, полученного сваркой взрывом, с увеличением габаритов на примере титана // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. / ВолГГТУ. Волгоград, 2000. С. 102–114.
17. Захаренко И. Д. Сварка металлов взрывом. Минск: Наука и техника, 1990.
18. Кинеловский С. А., Тришин Ю. А. Физические аспекты кумуляции // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 5. С. 26–40.

19. **Краткий справочник металлиста** / Под общ. ред. П. Н. Орлова, Е. А. Скороходова. М.: Машиностроение, 1987.
20. **Злобин Б. С.** Сварка взрывом стали с алюминием // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 3. С. 137–140.
21. **Физика взрыва** / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович, Р. П. Чельшев, Б. И. Шехтер. М.: Наука, 1975.
22. **Гинзбург И. П.** Теория сопротивления и теплопередачи. Л.: Изд-во ЛГУ, 1970.
23. **Ишуткин С. Н., Кузьмин Г. Е., Пай В. В., Фруммин Л. Л.** Об измерении поля температуры при плоском установившемся течении металла // ПМТФ. 1992. № 2 (192). С. 157–165.
24. **Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б.** Тепловая защита. М.: Энергия, 1976.
25. **Шидловский А. А.** Основы пиротехники. М.: Машиностроение, 1964.
26. **Иванов В. Г., Гаврилюк О. В.** Закономерности окисления и самовоспламенения на воздухе электровзрывных ультрадисперсных порошков металлов // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 6. С. 53–60.
27. **Горение** порошкообразных металлов в активных средах / П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев, Ю. В. Фролов и др. М.: Наука, 1972.
28. **Самсонов Г. В., Борисова А. Л. и др.** Физико-химические свойства окислов: Справочник. М.: Metallургия, 1978.
29. **Рабинович В. А., Хавин З. Я.** Краткий химический справочник. 2-е изд., испр. и доп. Л.: Химия, 1978.
30. **Фромм Е., Гебхардт Е.** Газы и углерод в металлах / Пер. с нем. М.: Metallургия, 1980.

*Поступила в редакцию 24/XII 2001 г.,
в окончательном варианте — 20/VIII 2002 г.*
