



# МЕХАНИЗМЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ГРАНИЦ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Ю. И. ФАДЕЕНКО, канд. физ.-мат. наук, Л. Д. ДОБРУШИН, д-р техн. наук, С. Ю. ИЛЛАРИОНОВ, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложена новая классификация режимов сварки взрывом и соответствующих им форм границы соединения по отношению инерционных сил к силам прочности в зоне формирования сварного соединения. С помощью этого отношения возможен учет динамических характеристик прочности свариваемых пар металлов при оптимизации режимов сварки взрывом и формы границ получаемого соединения.

*Ключевые слова:* сварка взрывом, область свариваемости, зона формирования соединения, инерционные силы, силы прочности, границы соединения

Сварка взрывом (СВ) осуществляется при косых соударениях металлических тел под малыми углами со скоростью в сотни метров в секунду. Опытным путем установлено, что главными параметрами, определяющими режим сварки, являются угол соударения  $\gamma$  и скорость перемещения точки контакта  $v_k$ . В плоскости параметров  $\gamma-v_k$  определяется область возможности осуществления СВ — так называемое окно свариваемости (ОС) (рис. 1).

Течение металла, возникающее в зоне формирования соединения (ЗФС) при СВ, относится к тому же классу, что и течение с образованием кумулятивных струй. В плоскости  $\gamma-v_k$  область сварки ОС граничит с областью кумуляции. При СВ так же, как и при кумуляции, имеет место концентрация кинетической энергии металла течения вблизи точки контакта соударяющихся поверхностей, хотя значения коэффициентов концентрации энергии и не столь велики. Прямые экспериментальные измерения подтверждают, что в ЗФС выделяется основная доля кинетической энергии метаемой пластины [1]. Образование прочного сварного соединения возможно, если избыточная кинетическая энергия будет удалена из ЗФС путем рассеяния ее в тепло за счет работы, затрачиваемой на пластическую деформацию металла, либо каким-то иным способом.

Целью настоящей работы являются анализ и физическое обоснование классификации диссипативных процессов, протекающих в ЗФС, на основании отношения инерционных сил к силам прочности.

Плотность кинетической энергии течения металла в ЗФС можно охарактеризовать величиной  $\rho v_k^2/2$ . Объемная плотность выделившейся тепловой энергии характеризуется произведением динамического предела текучести  $\sigma$  на среднее значение пластической деформации  $\epsilon$  металла в ЗФС.

Безразмерная величина

$$B = \rho v_k^2 / 2\sigma\epsilon, \quad (1)$$

являющаяся отношением объемной плотности кинетической энергии и работы пластических деформаций, характеризует способность механизмов пластического деформирования рассеивать кинетическую энергию метаемой пластины. Для каждого фиксированного значения  $\gamma$  изменение  $v_k$  сопровождается определенным изменением  $\sigma\epsilon$  и  $B$ . Поэтому ОС разбивается на области I–IV (рис. 1) с различной эффективностью поглощения энергии удара пластическим деформированием ЗФС.

На левом фланге ОС значения скорости  $v_k$  малы, поэтому  $B < 1$ . В этой области ОС толщина ЗФС минимальна и определяется той же зависимостью, что и толщина кумулятивной струи [2, 3]. В частности, при симметричном соударении двух пластин толщина кумулятивной струи и ЗФС равны

$$\delta_{к.с} = 2\delta[1 - \cos(\gamma/2)], \quad (2)$$

где  $\delta$  — толщины каждой из соударяющихся пластин. Для обычно используемых при СВ малых углов соударения это выражение можно заменить упрощенным

$$\delta_{к.с} = \delta\gamma^2/4. \quad (3)$$

При малой  $v_k$  толщина пластин (2) и (3) оказывается вполне достаточной для диссипации кинетической энергии. Постепенное увеличение плотности кинетической энергии при возрастании  $v_k$  компенсируется повышением среднего значения

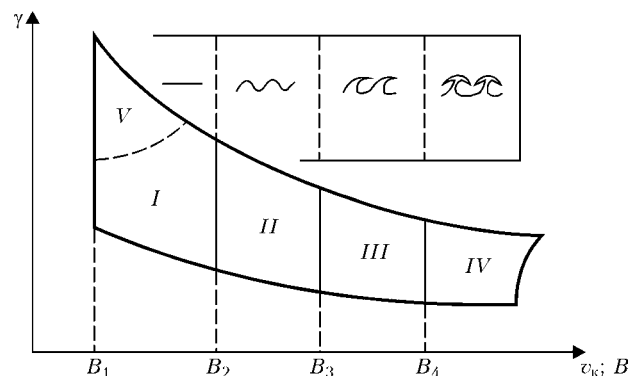


Рис. 1. Области различных диссипативных структур в ОС (сверху показаны формы контактных поверхностей, соответствующие областям I–IV)

пластической деформации ЗФС. В этом диапазоне значений  $v_k$  (рис. 1, I область) формируется соединение с гладкой (безволновой) границей. Однако способность ЗФС толщиной, определяемой (2) и (3), к диссипации кинетической энергии ограничена тем, что по мере возрастания деформации  $\epsilon$  металл разогревается, и его сопротивление деформированию уменьшается. На правой границе I области могут выполняться соединения с очень большими (до сотен процентов) значениями  $\epsilon$ , соответствующими нагреву практически до температуры плавления, падению сопротивления деформированию до нуля и образованию гладкой «затопленной струи» [4], движущейся вслед за точкой контакта. В работе [5] выдвигается предположение о потере устойчивости однородного поля скорости деформаций при СВ в I области и образовании значительно деформированной полосы, похожей на полосу адиабатического сдвига. Эта полоса образуется при некоторой критической скорости  $v_k$ , зависящей от размера зерна. Ее наличие рассматривается как условие получения прочного соединения.

За правой границей I области толщина ЗФС, определяемая (2) и (3), недостаточна для полной диссипации кинетической энергии. Избыточная кинетическая энергия расходуется на образование периодических волновых возмущений границы соединения, при этом его поверхность становится волнообразной. В результате толщина ЗФС возрастает на значение, равное удвоенной амплитуде волны 2a. В диапазоне волнообразных поверхностей соединения II области ОС увеличение  $v_k$  и сопутствующее ему возрастание плотности кинетической энергии компенсируется ростом a, а вместе с ним толщины ЗФС и средней деформации  $\epsilon$ . Увеличение значений  $\epsilon$  и температуры разогрева металла, так же, как и в предыдущем случае, приводит к качественным изменениям. Режим линейного возрастания правильных волновых возмущений границы (II область) сменяется режимом нелинейных волновых возмущений с образованием на гребнях волн «барашков» и завихрений и, наконец, участков расплава в III области (рис. 2, a).

С дальнейшим возрастанием  $v_k$  возможности увеличения интенсивности диссипации кинетической энергии за счет прочностных сил исчерпываются ( $B \gg 1$ ). В IV области ОС избыточная кинетическая энергия сообщается коротким отрезкам кумулятивных струй, поочередно испускаемых одной из поверхностей и ударяющихся о противоположную поверхность соединения (рис. 2, б). Особенности режима образования соединения в IV области описаны в работе [6]. Угол  $\phi$  поворота течения в отрезках кумулятивных струй в этом режиме (рис. 2, б) достигает  $120^\circ$  (угол  $180^\circ$  соответствовал бы идеальной кумуляции). Скорость, при которой происходит встреча головы отрезка струи с противоположной поверхностью соединения, превышает  $v_k$  и может достигать  $4...5$  км/с. Основным механизмом рассеяния энергии в IV области становится возбуждение ударных волн при высокоскоростных соударениях; скорость выноса энергии

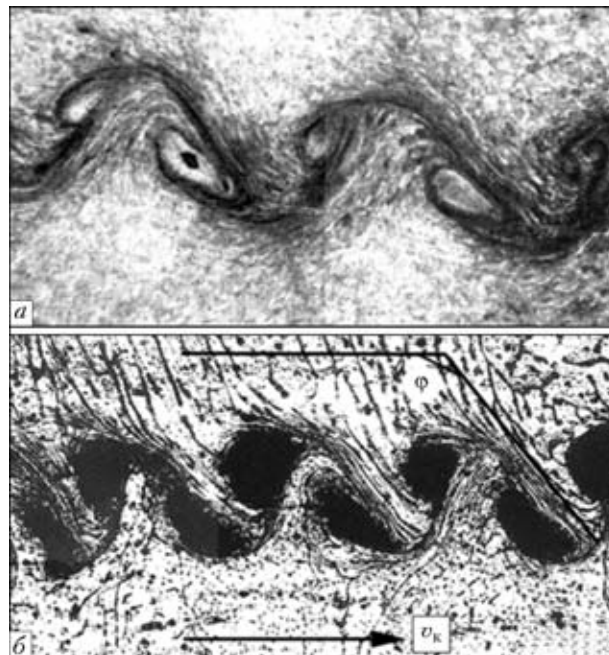


Рис. 2. Диссипативные структуры, формирующиеся на поверхности сварного соединения при  $B > 1$ : а – III область, X70; б – IV, X200 (см. рис. 1)

из ЗФС ударными волнами превышает скорости движения отрезков струй и звука в металле. Для этого режима типичны следующие параметры диссипационной зоны: толщина слоя начального энерговыделения —  $20...100$  мкм; нормальный и тангенциальный компонент скорости соударения — до  $3...4$  км/с; давление — до  $100$  ГПа ( $1$  Мбар); температура до температуры плавления; скорость охлаждения — более  $1 \cdot 10^8$  °C/с. Характер пластической деформации в этой зоне напоминает сдвиг под давлением в наковальнях Бриджмена. Однако в отличие от статических наковален Бриджмена при СВ скорость деформации очень велика. Этим условиям соответствуют характерные особенности микроскопических диссипативных структур, возникающих на субзеренном уровне (ячеистые структуры, микрорзерна) [7–9].

Отдельного обсуждения заслуживает вопрос о достигаемых в ЗФС значениях динамического предела текучести металла. Известно, что предел текучести металлов возрастает с увеличением скорости деформирования  $\dot{\epsilon}$ . Зависимость  $\sigma = \sigma(\dot{\epsilon})$  обычно истолковывают как проявление вязкостных сил

$$\sigma = \sigma_0 + \mu_{эф} \dot{\epsilon}, \quad (4)$$

где  $\sigma_0$  — напряжение квазистатического деформирования;  $\mu_{эф}$  — эффективная вязкость металла.

Характер зависимости  $\mu_{эф} = f(\dot{\epsilon})$  в случае высокой скорости деформации изучен экспериментально, вплоть до  $\dot{\epsilon} \cong 1 \cdot 10^4...1 \cdot 10^5$  с<sup>-1</sup>. В работах Г. В. Степанова и его сотрудников [10, 11] установлена зависимость  $\mu_{эф}$  от скорости деформации в сталях и алюминиевых сплавах. Выявлено существование трех характерных диапазонов скорос-



ти. При  $\dot{\epsilon} < 30 \text{ с}^{-1}$  вклад вязкости в сопротивление деформированию почти не зависит от деформации и весьма мал. При  $\dot{\epsilon} = 30$  и  $3 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  вязкость увеличивается скачками, после чего плавно уменьшается (второй скачок связывается с переходом от подбарьерного режима скольжения дислокаций к надбарьерному). При  $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  вклад вязкостных сил является преобладающим. В таком диапазоне скорости динамический предел текучести некоторых металлов может быть в несколько раз больше статического [12]. Согласно данным работы [11], при  $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^2 \dots 1 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  значения  $\mu_{\text{эф}}$  для сталей различной прочности уменьшаются примерно от 30 000 до 1500 Па·с. Ввиду отсутствия экспериментальных данных экстраполяция на еще большие значения  $\dot{\epsilon}$  ненадежна. Однако нет сомнений в том, что сопротивление деформированию продолжает возрастать, вплоть до теоретического предела прочности  $\sigma_{\text{теор}}$ , по достижении которого сопротивление деформированию остается постоянным. Это может быть истолковано как отсутствие вязкости (если определить вязкость дифференциальным соотношением  $\mu_{\text{диф}} = d\sigma/d\dot{\epsilon}$ , то в области течения при теоретическом пределе прочности  $\mu_{\text{диф}} = 0$ ).

При типичных технологических режимах СВ вблизи границы I и II областей ОС давление скоростного напора  $\rho v_k^2/2$  имеет тот же порядок величины, что и  $\sigma_{\text{теор}}$ . Для сталей, например, границе I и II областей соответствует  $v_k \cong 2,5 \text{ км/с}$ . Давление скоростного напора  $\rho v_k^2/2 \cong 25 \text{ ГПа}$  здесь имеет тот же порядок величины, что и  $\sigma_{\text{теор}}$  для кристаллической решетки железа. Если при этом напряжения сопротивления деформированию оказываются способными нейтрализовать инерционные силы, то, следовательно, они имеют тот же порядок величины.

В ЗФС достигается весьма высокая скорость деформаций — приблизительно  $\dot{\epsilon} = v_k/\delta_{\text{к.с}}$  (I области) и  $\dot{\epsilon} = v_k/(\delta_{\text{к.с}} + 2a)$  (II области). При типичных технологических режимах СВ значения  $\dot{\epsilon}$  могут превышать  $1 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ . При такой скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  вязкое сопротивление  $\mu_{\text{эф}}$  достигает теоретического предела прочности уже при значениях около сотен паскаль на секунду, что на порядок меньше измеренных в работах [11] при  $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ .

Таким образом, течение металла в ЗФС в I и II областях осуществляется при напряжениях, стремящихся к  $\sigma_{\text{теор}}$  и низких значениях эффективной вязкости  $\mu_{\text{эф}}$ . Диссипативные структуры, реализующиеся в III и IV областях, визуально напоминают течения идеальной невязкой жидкости [13]. Представляется вероятным, что в указанных областях деформирование ЗФС осуществляется при предельных напряжениях  $\sigma_{\text{теор}}$ , а также при  $\mu_{\text{эф}} \rightarrow 0$  и  $\mu_{\text{диф}} = 0$ . (Более определенное утверждение невозможно, поскольку в области значительных дефор-

маций причиной гидродинамического характера течения может быть нагрев до высоких температур.)

Проведенные рассуждения обеспечивают простейшее физическое обоснование классификации диссипативных структур, возникающих в ЗФС, по значению только одного безразмерного параметра  $B$ . Реальное разнообразие наблюдаемых диссипативных структур [14] несколько сложнее рассмотренного в настоящей статье. Это означает, что процесс образования диссипативных структур зависит не только от параметра  $B$ . Вероятно существование некоторой зависимости и от других параметров, вследствие чего упрощенное представление границ областей ОС на рис. 1 прямыми линиями  $B_i = \text{const}$  может быть усложнено. В пользу этого свидетельствует обнаружение особой области «аномальных волн»  $V$  в верхней части I области [14]. ( $V$  область выпадает из приведенного выше рассмотрения, так как в ней не выполняется условие малости углов  $\gamma$  и не оправдано отдельное от объема пластины рассмотрение процессов в ЗФС). Поэтому предложенное разбиение ОС следует рассматривать как первое приближение к физически обоснованной классификации диссипативных структур при СВ.

## Выводы

1. Необходимое для образования прочного сварного соединения освобождение ЗФС от кинетической энергии может осуществляться либо рассеянием в тепло путем стационарного пластического деформирования поверхностных слоев металла, либо формированием периодических диссипативных структур. Возникновение последних приводит к интенсификации пластического деформирования ЗФС или к генерации ударных волн, уносящих энергию за пределы ЗФС.

2. В пределах области свариваемости существует последовательность диссипативных структур, перекрывающих разрыв между областью неупругого косоугольного соударения твердых тел и областью гидродинамической кумуляции. Каждой из диссипативных структур соответствует один из хорошо известных технологам вариантов формы границы сварного соединения — прямолинейная, волновая, волновая с частичным оплавлением, отрезки кумулятивных струй.

1. Производство металлических слоистых композиционных материалов / А. Г. Кобелев, В. И. Лысак, В. Н. Чернышев и др. — М.: Интермет Инжиниринг, 2002. — 495 с.
2. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. — 2-е изд. — Новосибирск: Наука, 1980. — 188 с.
3. Кудинов В. М., Коротеев А. Я. Сварка взрывом в металлургии. — М.: Металлургия, 1978. — 166 с.
4. Суrow В. С. Косое соударение металлических пластин // Физика горения и взрыва. — 1988. — 24, № 6. — С. 115–120.
5. Бондарь М. П. Тип локализации пластической деформации на контактах, определяющий образование прочного соединения // Там же. — 1995. — № 5. — С. 122–128.
6. Добрушин Л. Д., Фадеев Ю. И., Петушков В. Г. Особый режим формирования соединения при сварке металлов ударной волной // Автомат. сварка. — 2002. — № 2. — С. 28–32.



7. Бондарь М. П. Особенности формирования структуры при больших высокоскоростных деформациях // Физ. мезомеханика. — 1998. — 1, № 1. — С. 37–55.
8. Бондарь М. П. Структурообразование и свойства материалов, создаваемых высокоскоростными методами // Там же. — 2000. — 3, № 6. — С. 75–87.
9. Бондарь М. П. Эволюция микроструктуры при динамическом нагружении металлов // Там же. — 2002. — 38, № 2. — С. 125–134.
10. Степанов Г. В. Упруго-пластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. — Киев: Наук. думка, 1991. — 288 с.
11. Зубов В. И., Степанов Г. В., Широков А. В. Влияние скорости деформации на предел текучести сталей различной прочности // Пробл. прочн. — 2003. — № 5. — С. 113–121.
12. Петушков В. Г., Кудинов В. М., Фадеенко Ю. И. Обработка взрывом сварных соединений металлоконструкций. — М.: Металлургия, 1993. — 161 с.
13. Стратифицированные следы за «точечными» импульсными источниками / С. И. Воропаев, С. Л. Смирнов, И. А. Филиппов и др. // Изв. Рос. АН. Физика атмосферы и океана. — 2002. — 38, № 3. — С. 402–410.
14. Анализ формирования соединения при сварке металлов взрывом / С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Е. А. Чугунов, А. П. Пеев // Автомат. сварка. — 2000. — № 11. — С. 25–29.

New classification is offered for explosion welding conditions and corresponding shapes of joint boundaries, based on the ratio of inertia forces to strength forces within the welded joint formation zone. This indicator can be used to allow for dynamic characteristics of strength of the mating metal pairs with optimisation of the explosion welding conditions and shapes of the resulting joint boundaries.

Поступила в редакцию 24.03.2005

## ПОДВИЖНОЕ РАБОЧЕЕ МЕСТО ОПЕРАТОРА-КОСМОНАВТА

*Выполнение работ на внешних поверхностях космических объектов требует соответствующей организации рабочего места оператора, снаряженного в скафандр, в связи с его ограниченной подвижностью и условиями пониженной гравитации.*

*Для проведения технологических экспериментов с аппаратурой «Универсал» в ИЭС им. Е. О. Патона разработан комплекс вспомогательного оборудования, в состав которого входит подвижное рабочее место оператора. Оно содержит основание с поворотной площадкой и вертикальную стойку с рукоятками и клавишами управления перемещением и вращением, а также прижатием ног оператора к поворотной площадке. Для перемещения рабочего места вдоль направляющей на основании имеются подпружиненные ролики с тормозом; устройство, обеспечивающее поворот оператора вокруг своей оси, также снабжено тормозом.*

*Использование такого рабочего места с направляющей позволяет оператору, выбрав удобное положение и зафиксировав ноги, освободить обе руки для выполнения различных (в том числе и сварочных) технологических операций. Это имеет важное значение в «безопорных» условиях пониженной гравитации, поэтому применение такого рабочего места может быть эффективным при выполнении самых разнообразных работ в открытом космосе.*

### Контакты:

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины  
03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11  
Отд. № 35 Аснис Ефим Аркадьевич  
Тел.: (38044) 287 10 77; факс: (38044) 289 91 15  
E-mail: dep35pwi@g.com.ua



Рабочее место



Рабочая станция