

УДК 621.791.13

НЕУСТОЙЧИВЫЕ ВОЛНЫ, ФОРМИРУЕМЫЕ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Б. С. Злобин¹, В. В. Киселев¹, А. А. Штерцер²¹Конструкторско-технологический филиал Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН 630090 Новосибирск²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, asterzer@mail.ru

Исследованы причины возникновения неустойчивых крупных и мелких волн в зоне соединения при сварке взрывом. Такие волны возникают, когда на метаемой пластине имеются области даже с небольшим (10 ÷ 16 %), но резким (ступенчатым) изменением толщины в виде пазов, получаемых механической обработкой. Неустойчивые волны в окрестности ступенек образуются только в случае, когда ширина паза больше толщины метаемой пластины. Если пазы выполняются на неподвижной пластине, то неустойчивые волны не возникают. Анализ экспериментальных данных показывает, что на размеры волн, образующихся в биметалле в окрестности ступенек на метаемой пластине, влияет резкое изменение угла соударения, связанное с перегибом пластины в местах ступенек.

Ключевые слова: сварка взрывом, параметры соударения, волнообразование, неустойчивые волны.

DOI 10.15372/FGV20220113

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] на основе экспериментальных данных и модели Ландау [3], описывающей неустойчивость стационарного течения вязкой жидкости, было показано, что длина устойчивых волн λ , генерируемых в зоне соединения при сварке взрывом, находится в диапазоне между минимальным ($\lambda_{\min}$) и максимальным ($\lambda_{\max}$) значениями, для которых получены соотношения

$$\lambda_{\min} = \frac{2}{\pi} \sqrt{1 - \frac{v_c^2}{c^2} \frac{\delta_1 \delta_2}{\delta_1 + \delta_2}} \times \sin^2 \left(\frac{\gamma}{2} \right) (0.73R - 1.70), \quad (1)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{2}{\pi} \sqrt{1 - \frac{v_c^2}{c^2} \frac{\delta_1 \delta_2}{\delta_1 + \delta_2}} \times \sin^2 \left(\frac{\gamma}{2} \right) (0.76R + 18.5), \quad (2)$$

где

$$R = \frac{(\rho_1 + \rho_2)v_c^2}{2(HV_1 + HV_2)} \quad (3)$$

— безразмерная величина, которую в литературе по сварке взрывом принято называть числом Рейнольдса; δ_1 и δ_2 — толщины свариваемых пластин; v_c — скорость точки контакта; $c = (c_1 + c_2)/2$ — осредненная скорость звука свариваемых материалов; γ — угол соударения; ρ_1 и ρ_2 — плотности, HV_1 и HV_2 — твердости (по Виккерсу) свариваемых материалов.

Однако при формировании устойчивых волн на начальном этапе волнообразования или при изменении условий соударения в точке контакта могут возникать неустойчивые крупные либо мелкие волны, не попадающие в диапазон $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$. В [2] отмечается, что крупные неустойчивые волны возникают в случае жесткого возбуждения, связанного с резким изменением толщины метаемой пластины; мелкие же волны обычно появляются на начальном этапе формирования устойчивой волны, если нет источников жесткого возбуждения колебаний (ступенек на пластинах или препятствий в сварочном зазоре, вызывающих возмущение [4]).

Цель настоящей работы заключалась в определении условий формирования неустойчивых волн, которые могут приводить к трещинообразованию при сварке малопластичных материалов вследствие чрезмерной деформации в зоне соединения.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для экспериментальной сварки использовали стальные, разной твердости, и медные пластины. Сварка взрывом проводилась по параллельной схеме, в качестве взрывчатого вещества (ВВ) применялись смеси аммонита 6ЖВ с аммиачной селитрой. Скорость детонации измерялась контактным методом с использованием четырехлучевого цифрового запоминающего осциллографа Tektronix TDS2014. Угол соударения, который в параллельной схеме сварки равен углу поворота пластины при метании скользящей детонационной волной, рассчитывался с использованием апробированной формулы из [5]

$$\gamma = \left(\sqrt{\frac{k+1}{k-1}} - 1 \right) \frac{\pi}{2} \frac{r}{r + 2.71 + 0.184/y}, \quad (4)$$

где r — отношение массы ВВ к массе метаемой пластины, k — показатель адиабаты продуктов взрыва за фронтом детонации, y — отношение величины сварочного зазора между пластинами к толщине заряда ВВ. Значения k для разных ВВ известны; в частности, для применявшейся смеси аммонита 6ЖВ с аммиачной селитрой 50/50 $k = 2.2$.

В целях возбуждения неустойчивых волновых течений на свариваемых пластинах механической обработкой формировали неглубокие пазы или выступы. Толщина метаемых пластин составляла $3 \div 5$ мм, глубина пазов/выступов была $0.3 \div 0.5$ мм. Пазы выполнялись как на метаемой, так и на неподвижной пластине. Из сваренных пластин вырезали образцы, изготавливали шлифы и измеряли параметры волн с применением оптического микроскопа МБС-10.

На рис. 1 показана фотография шлифа зоны сварки медной пластины толщиной 3.0 мм, твердостью 84.5 НВ, в которой был вырезан паз глубиной 0.5 мм, с пластиной из стали 30ХГСА толщиной 25 мм, твердостью 35 HRC. На рис. 2 изображены схема расположения пластин перед сваркой в этом эксперименте и характерная картина изменения размеров волн по длине образца L .

На рис. 1, а и рис. 2 видно, что на расстоянии $15 \div 20$ мм перед пазом (точка В на рис. 2) размеры волн начинают постепенно уменьшаться и в итоге волны полностью исчезают. После ступеньки за точкой В начина-

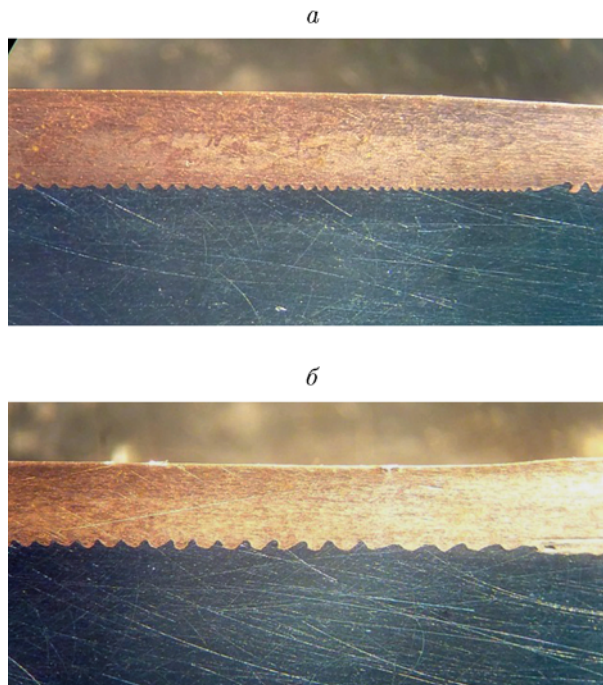


Рис. 1. Зона сварки медной и стальной пластин: волны перед пазом (а) и на протяжении паза (б) (движение фронта детонации слева направо)

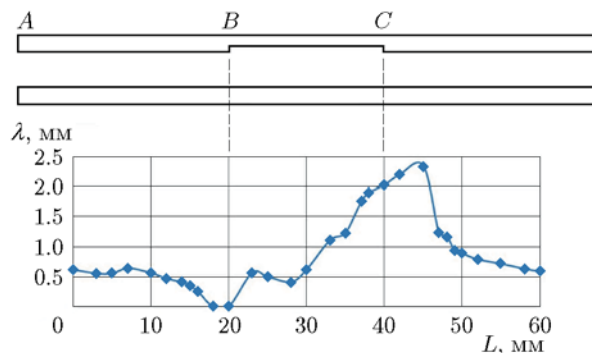


Рис. 2. Изменение размеров волн в зоне соединения при наличии паза на поверхности метаемой медной пластины

ется рост размеров образующихся волн с достижением максимума ($\lambda \approx 2.4$ мм) в районе второй ступеньки в точке С. После этого длины волн спадает до стационарного размера ($\lambda = 0.5 \div 0.6$ мм).

Подобные показанным на рис. 1, 2 результаты были получены в разных экспериментах, с разными соотношениями толщин метаемой и неподвижной пластин, независимо от того, расположен ли паз на поверхности соударения или на противоположной стороне метаемой пласти-

ны, а также в случаях, когда неподвижная пластина была расположена на массивном основании или подвешена в воздухе.

Характерно, что изменение (уменьшение) размеров волн на границе соединения на некоторой длине перед пазом фиксировалось только в том случае, когда ширина паза становилась сравнимой и превышала толщину метаемой пластины. На рис. 3 показан характер изменения длины волн при приближении к пазам различной ширины при толщине метаемой пластины 3 мм и глубине паза 0.5 мм. Сварка проводилась при скорости точки контакта $v_c = 2.54$ км/с и расчетном угле соударения $\gamma = 12^\circ$. Как видно из рис. 3, при ширине паза 1 мм длина волн перед пазом при приближении к ступеньке несколько возрастает (кривая 1). При дальнейшем увеличении ширины паза на расстоянии ≈ 15 мм перед ступенькой длина волны начинает уменьшаться (кривые 2–4), и при ширине 10 мм волнообразование непосредственно перед ступенькой полностью прекращается (кривая 5). В отличие от ширины паза, варьирование глубины паза в диапазоне $0.5 \div 2.0$ мм при толщине метаемой пластины 3 мм не привело к изменению размеров волн перед точкой B (см. рис. 2).

Были также проведены эксперименты с метаемой пластиной, на которой формировали выступ вместо паза. На рис. 4 показана зона соединения метаемой пластины из меди М1 размерами 80×300 мм, твердостью 84.5 НВ с пластиной из стали Ст3 размерами $5.5 \times$

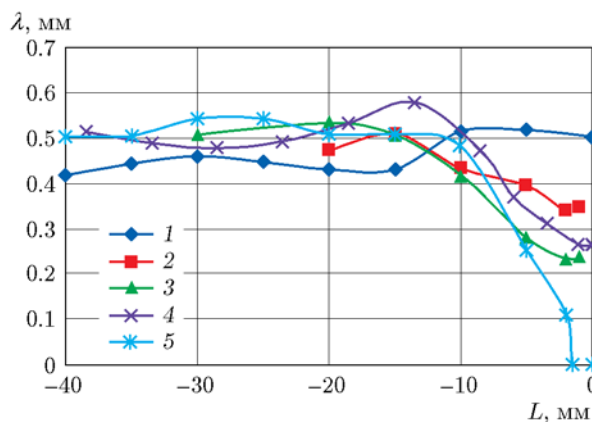


Рис. 3. Влияние ширины паза на характер изменения длины волны при приближении к нему:

ширина паза: 1 — 1 мм, 2 — 2 мм, 3 — 4 мм, 4 — 5 мм, 5 — 10 мм

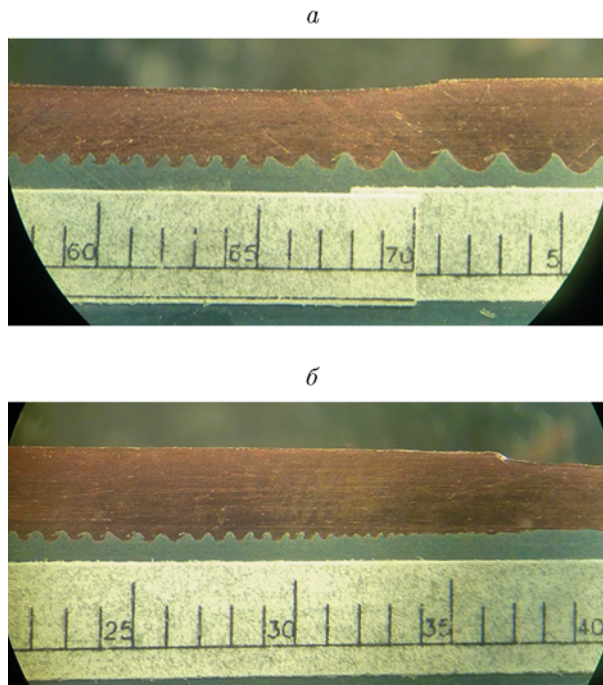


Рис. 4. Зона сварки медной и стальной пластин: волны перед выступом и сразу за ним (а), волны перед обратной ступенькой выступа (б) (движение фронта детонации слева направо)

50×220 мм, твердостью 138 НВ. Толщина медной пластины 2.5 мм, в месте выступа — 3 мм. Параметры сварки: ВВ — смесь аммонита с аммиачной селитрой 50/50, плотность ВВ 0.85 г/см³, толщина заряда 22 мм, зазор 10 мм ($y = 0.45$), $r = 0.85$ (в месте выступа 0.7), $D = v_c = 2.58$ км/с, $\gamma = 12^\circ$.

На рис. 5 показана диаграмма, иллюстрирующая характер изменения длины волны в

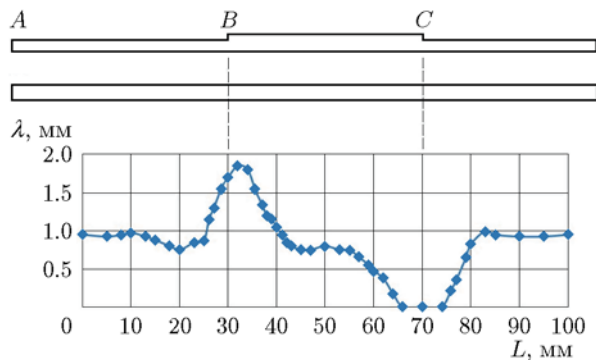


Рис. 5. Изменение размеров волн в зоне соединения при наличии выступа на поверхности метаемой медной пластины

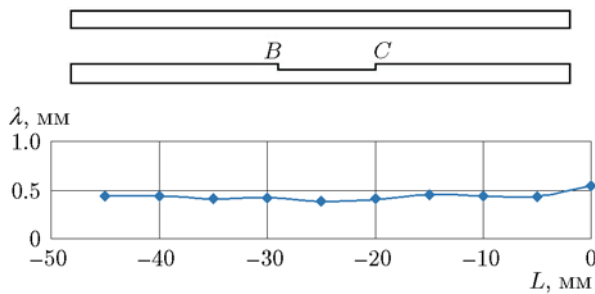


Рис. 6. Изменение длины волн в зоне соединения при наличии паза на поверхности неподвижной пластины перед точкой B

зоне сварки, изображенной на рис. 4. В отличие от ситуации с пазом, размер волн с приближением к выступу (точка B) сначала увеличивается и достигает максимального значения сразу за точкой B . Далее длина волны уменьшается и в окрестности точки C волнообразование прекращается, затем длина растет и на расстоянии 15 мм от точки C достигает размера стационарной волны ($\lambda \approx 1$ мм).

Во всех описанных выше экспериментах толщина метаемой пластины была намного меньше или равна толщине неподвижной пластины. При этом неподвижная пластина, как правило, располагалась на массивном металлическом основании. Чтобы получить более полную картину появления неустойчивых волн, были проведены эксперименты, в которых толщина метаемой пластины с пазом была больше, чем толщина неподвижной. При этом неподвижная пластина подвешивалась над основанием на расстоянии, которое обеспечивает сварку по всей длине до соударения с основанием. Оказалось, что характер изменения размеров волн перед точкой B был такой же, как и при метании тонких пластин с пазами на толстые пластины.

Были также проведены эксперименты по сварке пластин с пазами на неподвижной пластине. На рис. 6 показана диаграмма изменения длины волны перед пазом для случая, когда сваривались две пластины одинаковой толщины, метаема стальная и неподвижная медная с пазом. Обе пластины были подняты над основанием. Видно, что в этом случае изменения размеров волн перед точкой B не происходит.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Описанные выше эксперименты показали, что затухание волн и резкое увеличение их

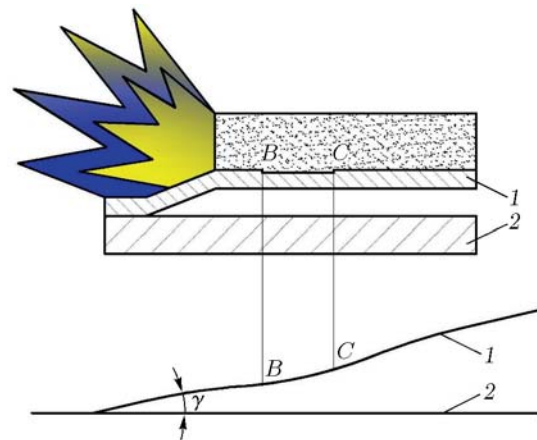


Рис. 7. Схема сварки и профили поверхностей соударения:

1 — метаема пластина, 2 — неподвижная пластина

длины перед ступенькой происходит только в случае расположения пазов на метаемой пластине, но не на неподвижной. Это означает, что появление нестационарных волн связано пусть даже с небольшим, но резким изменением угла соударения свариваемых пластин, т. е. с перегибом метаемой пластины в местах изменения ее толщины (ступеньки пазов). Объяснить это можно следующим образом. При уменьшении толщины метаемой пластины после точки B (рис. 7) увеличивается параметр r и, соответственно, скорость метаемой пластины. Создается ситуация при которой участки пластины слева и справа от точки B двигаются с разной скоростью. По этой причине происходит перегиб пластины и фактический угол соударения перед точкой B уменьшается, как показано на рис. 7. Уменьшение угла приводит к снижению размеров волн.

В окрестности точки C происходит обратный процесс — толщина пластины увеличивается. Пластина при разгоне перегибается в обратном направлении и угол соударения возрастает, что приводит к увеличению размеров волн. Характерно, что возникающие в окрестностях ступенек волны являются неустойчивыми, их длина не попадает в диапазон, определяемый уравнениями (1) и (2). На достаточном удалении от точек B и C устанавливаются устойчивые волны, соответствующие толщине метаемой пластины и углу соударения в этих местах. На наш взгляд, перегиб возникает на начальном этапе разгона по механизму, описанному в [6].

Что касается неглубоких пазов ($0.3 \div 0.5$ мм) на неподвижной пластине, то изменение размеров волн в районе ступенек не наблюдается (см. рис. 6). В то же время, если неподвижная пластина состоит из двух плоских частей, соединенных под углом, так что метаема пластина соударяется с разными ее частями под разными углами, то перед местом состыковки пластин возникает всплеск волн. Данный результат был получен в работе [7] численным моделированием процесса соударения пластин методом конечных элементов в эйлеровых координатах с описанием движения среды, основанном на упругопластической модели Джонсона — Кука. Это подтверждает высказанное выше предположение о том, что появление неустойчивых волн связано с резким изменением угла соударения свариваемых пластин.

В работе [8] представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований волнообразования при сварке взрывом. Расчеты проводились в эйлеровых координатах с использованием программного пакета AUTODYN-2d, версия 4.1 13, размер ячейки расчетной сетки в области соударения 0.02 мм. В табл. 2 статьи [8] приведены расчетные и экспериментальные размеры волн, возникающих при сварке титана толщиной 3 мм с малоуглеродистой сталью толщиной 30 мм, наблюдается очень хорошее совпадение расчета с экспериментом. В одной из строк табл. 2 [8] для случая с углом соударения $\gamma = 15^\circ$ и скоростью точки контакта $v_c = 2476$ м/с указаны волны двух размеров — $\lambda = 0.6$ и 1.2 мм в эксперименте и $\lambda = 0.6$ и 1.25 мм в расчете. Расчет по приведенным выше формулам (1)–(3) для указанного режима соударения и с учетом представленных в [8] свойств титана и стали дает $\lambda_{\min} = 0.13$ мм и $\lambda_{\max} = 0.67$ мм. Таким образом, исходя из изложенных в [2] соображений зафиксированные в [8] волны с $\lambda = 0.6$ мм попадают в диапазон между $\lambda_{\min}$ и $\lambda_{\max}$ и их можно отнести к устойчивым, а волны с $\lambda = 1.25$ мм относятся к крупным неустойчивым.

В последнее время, наряду с широко известными технологиями сварки взрывом и магнитоимпульсной сварки, для соединения металлов применяются также такие методы, как сварка путем испарения фольги и сварка воздействием лазерного импульса [9–11]. Поскольку во всех этих способах соединение металлов происходит за счет косоугольного соударения пла-

стин, для них применяется общее название — сварка соударением. В последних двух способах разгон метаемой пластины происходит соответственно за счет давления паров, возникающих при пропускании импульса тока по фольге, и за счет давления плазмы, возникающей на поверхности метаемой пластины при лазерной абляции нанесенного на нее светопоглощающего слоя [9, 10]. Эти способы позволяют наносить плакирующие слои толщиной в десятые и даже сотые доли миллиметра. В работе [9] путем испарения фольги сваривали пластины из алюминиевого сплава 1100-О со сталью AISI 1018. Алюминиевые пластины толщиной от 0.127 до 1.06 мм металли на стальное основание толщиной 6.35 мм, в котором сделаны треугольные углубления с разным наклоном граней, так чтобы косое соударение происходило под различными углами — 8, 12, 16, 20, 24 и 28° . Было замечено, что устойчивые волны на поверхностях всех треугольных углублений формируются не сразу, а на некотором удалении от начала соударения. Аналогичная картина с постепенным увеличением размера волн получается и в других работах с численными расчетами процесса соударения пластин [11, 12]. Экспериментально это было обнаружено еще в ранних исследованиях сварки взрывом, например, в [5] указывалось, что длина волн постепенно возрастает, достигая стационарных значений на некотором расстоянии от начала соударения. В этой же работе на неподвижной пластине делали уступ высотой порядка размера амплитуды волны, что приводило к ускоренному установлению стационарной волны. Очевидно, это связано с неустойчивостью безволнового течения и любое малое возмущение приводит к развитию волнообразования. Согласно [5] таким слабым возмущением может быть, например, волна разрежения, отраженная от свободной поверхности наиболее тонкой из соударяющихся пластин. Размер возникающих волн зависит от жесткости возбуждения, как это наглядно показано в [4], где источником сильного возбуждения была установленная в зазор между соударяющимися пластинами медная проволока диаметром 2.5 мм.

Надо отметить, что расчет течений, проводившийся в [7, 8, 11, 12] на основе методов Эйлера, Лагранжа и SPH, обладает недостатком, который, вообще говоря, затрудняет интерпретацию картины волнообразования по результатам расчетов. Как указано в [13], этот

недостаток связан с высокой схемной вязкостью, присущей указанным методам вычислений и приводящей к искажению результатов в местах высоких градиентов параметров у контактной границы. По этой причине к результатам, касающимся волнообразования и полученным расчетным путем с применением указанных выше методов, нужно относиться с известной осторожностью и по мере возможности сравнивать с экспериментом. Метод молекулярной динамики, примененный в [13, 14] к описанию волнообразования, свободен от этого недостатка. Однако надо иметь в виду, что размеры рассматриваемых в этом методе областей ограничены сотнями нанометров и для правильной интерпретации результатов расчетов необходимо использовать теорию размерностей (π -теорема). Описанные в [13, 14] исследования свидетельствуют о том, что волны на контактной поверхности образуются в результате автоколебаний, развивающихся в окрестности точки контакта. При этом часть кинетической энергии сталкивающихся пластин переходит в энергию колебаний и диссипирует в пластинах. В [14] отмечается, что в случае мягкого возбуждения колебаний развитие неустойчивости происходит постепенно, от малых возмущений до возмущений конечной амплитуды. Если же режим возбуждения жесткий, то крупные волны возникают быстро, как, например, в случае искусственного возмущения в виде проволоки, расположенной между пластинами. При этом проволока должна располагаться несимметрично относительно биссектрисы угла между пластинами.

Можно предположить, что слабое (мягкое) возбуждение в конечном итоге приводит к формированию стационарной волны со значением λ , близким к $\lambda_{\min}$, определяемым по формуле (1), а сильное (жесткое) — к установлению волны со значением λ , близким к верхней границе $\lambda_{\max}$ (см. формулу (2)). Описанные в данной статье эксперименты указывают на то, что ступеньки на метаемой пластине являются источником сильного возбуждения, связанного с резким изменением угла соударения пластин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты по сварке взрывом пластин с проделанными на них пазами показали, что уступы и выступы являются источниками возбуждения колебаний в точке

контакта, приводящими к появлению неустойчивых волн, которые затем переходят в устойчивые. При этом ступеньки на метаемой пластине являются источником сильного возбуждения колебаний и инициируют появление волн увеличенных размеров, а ступеньки на неподвижной пластине — источник слабого возбуждения. Сильное возбуждение колебаний связано с перегибом метаемой пластины в районе ступенек и резким изменением угла соударения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Злобин Б. С., Киселев В. В., Штерцер А. А., Пластинин А. В. Использование эмульсионных взрывчатых веществ в экспериментальных исследованиях течений в зоне соединения при сварке взрывом // Физика горения и взрыва. — 2018. — Т. 54, № 2. — С. 114–121. — DOI: 10.15372/FGV20180212.
2. Злобин Б. С., Киселев В. В., Штерцер А. А. О влиянии механических свойств материалов на волнообразование при сварке взрывом // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 4. — С. 74–81. — DOI: 10.15372/FGV20190410.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: учеб. пособие: в 10 т. Т. VI: Гидродинамика. — 4-е изд., стер. — М.: Наука, 1988.
4. Пай В. В., Лукьянов Я. Л., Кузьмин Г. Е., Яковлев И. В. Волнообразование при высокоскоростном симметричном соударении металлических пластин // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 5. — С. 132–137.
5. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. — 2-е изд., доп. и перераб. — Новосибирск: Наука, 1980.
6. Киселев В. В. Оценка параметров метания металлических пластин скользящей детонацией зарядов конденсированных ВВ в начальной фазе процесса // Физика горения и взрыва. — 1995. — Т. 31, № 1. — С. 138–142.
7. Cheng J.-H., Hu X.-H., Sun X., Vivek A., Daehn G., Cullen D. Multi-scale characterization and simulation of impact welding between immiscible Mg/steel alloys // J. Mater. Sci. Technol. — 2020. — V. 59. — P. 149–163. — DOI: 10.1016/j.jmst.2020.04.049.
8. Akbari Mousavi A. A., Al-Hassani S. T. S. Numerical and experimental studies of the mechanism of the wavy interface formations in explosive/impact welding // J. Mech. Phys. Solids. — 2005. — V. 53. — P. 2501–2528. — DOI: 10.1016/j.jmps.2005.06.001.
9. Lee T., Zhang S., Vivek A., Kinsey B., Daehn G. Flyer thickness effect in the impact welding of aluminum to steel // J. Manuf. Sci. Eng. — 2018. — V. 140, N 12. — 121002. — DOI: 10.1115/1.4041247.

10. **Zhang Y., Babu S. S., Prothe C., Blake-ly M., Kwasegroch J., LaHa M., Daehn G. S.** Application of high velocity impact welding at varied different length scales // J. Mater. Proc. Technol. — 2011. — V. 211. — P. 944–952. — DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.01.001.
11. **Sapanathan T., Raoelison R. N., Padayodi E., Buiron N., Rachik M.** Depiction of interfacial characteristic changes during impact welding using computational methods: Comparison between arbitrary Lagrangian — Eulerian and Eulerian simulations // Mater. Des. — 2016. — V. 102. — P. 303–312. — DOI: 10.1016/j.matdes.2016.04.025.
12. **Wang X., Zheng Y. Y., Liu H. X., Shen Z. B., Hu Y., Li W., Gao Y. Y., Guo C.** Numerical study of the mechanism of explosive/impact welding using smoothed particle hydrodynamics method // Mater. Des. — 2012. — V. 35. — P. 210–219. — DOI: 10.1016/j.matdes.2011.09.047.
13. **Киселев С. П.** Численное моделирование методом молекулярной динамики деформации пластин при их косом соударении // Физ. мезомеханика. — 2013. — Т. 16, № 3. — С. 45–53.
14. **Киселев С. П.** Численное моделирование методом молекулярной динамики образования волн при косом соударении пластин // ПМТФ. — 2012. — Т. 53, № 6. — С. 121–133.

Поступила в редакцию 01.03.2021.

После доработки 19.04.2021.

Принята к публикации 21.04.2021.
