

Численное исследование высокоскоростной сварки угловым ударом методом гидродинамики сглаженных частиц

© М.Э. Ахмед Солиман

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, 630090, Российская Федерация

Рассмотрена высокоскоростная сварка угловым ударом металлических пластин, являющаяся одним из способов сварки давлением в твердом состоянии для широкого спектра сочетаний однородных и разнородных металлов. Показано, что при численном моделировании созданный волнистый узор с завихрениями поверхности контакта пластин, эжекцию металлической струи, излучаемой поверхностным слоем пластин, приводящую к их струйной обработке, и зону плавления можно рассчитать бессеточным лагранжевым методом гидродинамики сглаженных частиц (SPH) с дискретизацией на частицы. Подробный анализ соединения методом высокоскоростной сварки угловым ударом позволит проектировать металлические конструкции с заданными механическими свойствами. Задача исследования заключалась в оценке поведения метаемой и родительской пластин в условиях высокоскоростной сварки. Для проведения расчетов использовалась модель Джонсона — Кука, которая описывает напряженное состояние материала в зависимости от скорости пластической деформации и гомологической температуры. В ходе моделирования были показаны скорость соударения V_f , скорость точки контакта V_c и угол удара β при необходимом давлении. Эмиссия металлической струи и морфология поверхности сварного шва были успешно воспроизведены с использованием метода SPH.

Ключевые слова: сварка угловым ударом, струя металла, бессеточный метод Лагранжа, гидродинамика сглаженных частиц, медь Cu^{110} , окно свариваемости

Введение. Целью данного исследования является изучение ударно-волновых, деформационных и тепловых процессов при соударении двух медных металлических пластин. Для исследования процессов, происходящих при высокоскоростной сварке угловым ударом, применялось моделирование методом сглаженных частиц (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH), проводимое в многоцелевом пакете нелинейных программ LS-DYNA.

Бессеточным лагранжевым методом гидродинамики сглаженных частиц моделировались процессы высокоскоростного углового столкновения двух тонких металлических медных пластин. Механизм превращений, происходящих в зоне контакта металлических заготовок, характерен для многих скоростных технологических процессов, поэтому полученные результаты можно использовать для описания явлений, происходящих при сварке взрывом, а также при других способах

сварки, основанных на динамическом взаимодействии материалов, например, при магнитно-импульсной сварке (МИС) [1–6]. При моделировании процессов углового удара заготовок в качестве основных параметров, определяющих поведение металлических материалов, используются значения скорости и угла удара пластин.

Сварочный материал для МИС характеризуется большим многообразием, поскольку его состав может включать самые разные структурные основы и наполнители, а сам материал может быть поставлен в разной форме. Соединение деталей больших размеров этим методом сварки возможно даже при наличии деформаций и других искажений, поскольку сварочный материал растекается и заполняет пустоты между двумя деталями, которые предстоит соединить. Сварные швы могут быть непрерывными и трехмерными, благодаря чему предоставляется большая свобода при проектировании изделий, а кроме того, длинные швы и соединения, располагающиеся в нескольких плоскостях, могут быть быстро выполнены в результате всего одной операции. Не следует забывать также и о том, что МИС экономична с точки зрения потребления энергии, эффективно способствует сокращению количества отходов.

В методологии гидродинамики сглаженных частиц для интерполяции переменного поля вместо функций сетки и формы используют функцию ядра. Значение функции $f(r)$ в точке представлено интегральной формой произведения функции и весового коэффициента $W(r, h)$ функции ядра. В отличие от классических методов моделирования сетки, в методе SPH детали описываются как набор множества частиц. Физическое свойство, характерное для любой частицы, получается суммированием этого свойства для всех частиц, которые находятся на расстоянии от данной, не превышающем так называемую длину сглаживания h [4, 7]. В этом случае вклад соседних частиц в сумму описывается функцией ядра W как функция Гаусса:

$$\prod f_I(\vec{r}_i) = \int_{\Omega} f(\vec{r}_j) W(\vec{r}_i - \vec{r}_j, h) d\vec{r}_j, \quad (1)$$

где f — произвольная непрерывная функция радиус-вектора \vec{r}_i ; \vec{r}_j — радиус-вектор точки в Ω ; W — сглаживающее ядро радиусом h .

Радиус или ширина ядра — это коэффициент масштабирования, управляющий характеристиками сглаживания ядра:

$$\forall \vec{r}_i \int_{\Omega} W(\vec{r}_i - \vec{r}_j, h) d\vec{r}_j = 1, \quad (2)$$

$$\forall \vec{r}_i \lim_{h \rightarrow 0} h W(\vec{r}_i - \vec{r}_j, h) d\vec{r}_j = \delta(\vec{r}_i - \vec{r}_j).$$

Дискретным эквивалентом (1) является выражение, используемое в численных расчетах:

$$f_S(\vec{r}_i) \approx \sum_{j=1}^N f(\vec{r}_j) V_j W(\vec{r}_i - \vec{r}_j, h), \quad (3)$$

где j проходит через все соседние частицы; r_j — положение частицы j ; $f(r_j)$ — соответствующая физическая величина, определенная в частице r_j ; V_j — объем j -й частицы.

Наиболее известной функцией ядра является функция кубического В-сплайна (рис. 1):

$$W_{ij}(r, h) = k \begin{cases} \frac{1}{\pi h^{d=3}} \left(1 - \frac{3}{2} u^2 + \frac{3}{4} u^3 \right), & \text{если } 0 \leq |u| = \frac{r}{h} \leq 1; \\ \frac{1}{\pi h^{d=3}} \left(\frac{1}{4} (2-u)^3 \right), & \text{если } 1 \leq |u| = \frac{r}{h} \leq 2; \\ 0, & \text{если } |u| = \frac{r}{h} \geq 2, \end{cases} \quad (4)$$

где r — расстояние между частицами i, j ; h — длина сглаживания в SPH, изменяющаяся во времени и пространстве; k — нормировочная постоянная, зависящая от количества пространственных измерений; $d = 3$ — количество пространственных измерений.

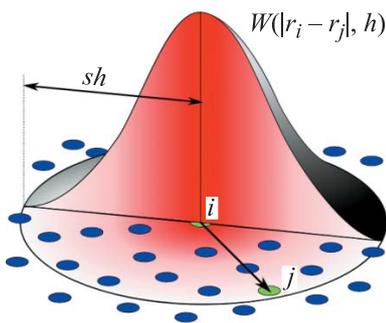


Рис. 1. Аппроксимация ядра SPH на основе сплайн-функций

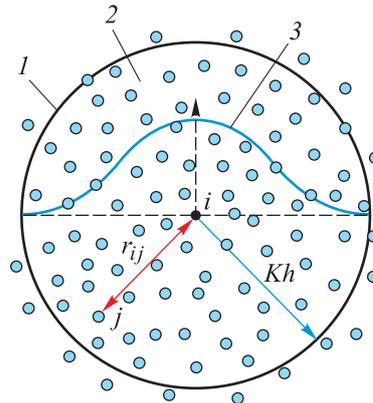


Рис. 2. Область интегрирования и вид функции ядра для частицы i :
 1 — контрольная область функции сглаживания частицы i ; 2 — интеграционная область Ω ; 3 — функция сглаживания

Область интегрирования и вид функции ядра для частицы i показаны на рис. 2.

Метод SPH более точен, чем традиционные пакеты метода конечных элементов, где значительная точность теряется из-за искажения элемента. Не требуется специальной сетки, как при лагранжевом подходе, который в основном используется для задач механики твердого тела. Хотя процессорное время для SPH велико, так как для создания функций формы требуется больше времени, и выполняется при расчетах, трудозатраты на разработку модели меньше. Кроме того, метод SPH можно использовать вместе с методом конечных элементов для достижения компромисса между точностью и временем вычислений. Для моделирования задач ударной сварки разработан модифицированный метод SPH с коррекцией градиента ядра.

Численная модель. Двумерное численное моделирование было выполнено в пакете нелинейных программ LS-DYNA для имитации удара пластины из меди Cu^{110} о другую пластину из того же материала. Размер частиц оказывает значительное влияние на способность улавливать морфологию межфазной поверхности и явление струйного распыления за разумное время вычислений. Для такого моделирования размер частиц был установлен равным 5 мкм для материалов обеих пластин, расстояние между частицами модели составляло 4 мкм. Общий размер модели SPH составил 1 256 000 узлов. В модели использовались два листа длиной 10 мм и толщиной 1 мм, этого достаточно для образования волнистой поверхности раздела (рис. 3). В качестве начальной температуры для обеих пластин была принята комнатная температура, а начальная вертикальная скорость столкновения пластины с углом косоугольного столкновения $\beta = 16^\circ$, которая необходима для перехода от гладкой поверхности к волнистой, была установлена $V_f \sim 520$ м/с. Изменяя угол и скорость столкновения, можно воспроизводить разные типы морфологии волны.

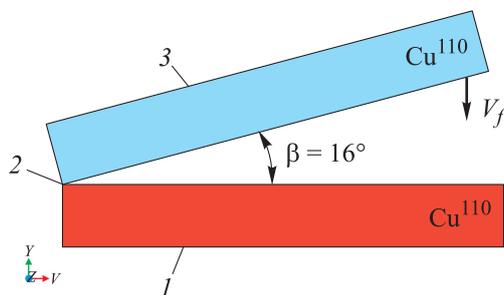


Рис. 3. Геометрия используемой численной модели SPH:
 1 — родительская пластина (зафиксирована); 2 — точка контакта;
 3 — метаемая пластина

Метод SPH использовался для прогнозирования ключевого параметра процесса сварки с высокой скоростью удара для комбинации материалов из двух медных пластин Cu¹¹⁰.

Следует отметить, что сварка не произойдет до тех пор, пока не появится волна разгрузки и скорость точки контакта, которая находится в пределах диапазона «окна свариваемости», не достигнет значения $V_c \sim 1887$ м/с [8, 9]. Единственное граничное условие — фиксация нижнего края мишени. В качестве материала заготовки использовали материал Cu¹¹⁰. Для описания состояния материала при высокой скорости деформации и повышенной температуре была выбрана модель Джонсона — Кука:

$$\sigma = \left[A + B(\epsilon^p)^n \right] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right],$$

где σ — предел текучести; ϵ^p — эффективная пластическая деформация; $\dot{\epsilon}$ — скорость пластической деформации; $\dot{\epsilon}_0$ — эталонная скорость деформации; T — температура; T_r — комнатная температура; T_m — температура плавления; A, B, C, l, m и n — константы материала.

Такая модель материала позволяет задать кривую пластичности с учетом скоростных, тепловых нагрузок и нагрузок, которые приводят к разрушению. Эта модель широко используется, и существует достаточно обширная база моделей для различных материалов. Параметры меди Cu¹¹⁰, принятые при численном моделировании, приведены ниже:

Модуль Юнга, ГПа	117
Плотность, кг/м ³	8960
Коэффициент Пуассона	0,33
Модуль сдвига, ГПа	44
Теплопроводность, Вт/(м·К)	390
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	385
Температура плавления, К	1356
Комнатная температура, К	294

Химический состав материала — согласно ГОСТ 859–2014 «Медь».

Состояние ударной сварки. В процессе деформации две пластины постепенно сближаются в течение короткого промежутка времени. Высокие скорости, давление и «эффект крючков» обеспечивают сварку в зоне сцепления двух полос. При скорости соударения 520 м/с эффект перемешивания материала в зоне контакта проявляется сильнее, что приводит к волнообразной морфологии поверхности раздела. Повышение скорости приводит к лавинообразному увеличению высоты

волны-крюка (рис. 4), что способствует лучшей свариваемости материалов, но их распределение и высота должны быть одинаковыми для формирования равномерного шва. В результате моделирования были получены три типа межфазной морфологии: прямая, волнистая и вихревая. Эти морфологические изменения соответствовали тем, которые наблюдались на границах раздела соединений внахлест при магнитно-импульсной сварке.



Рис. 4. Морфология волнистой поверхности и формирование крючков

Исследователи обычно рассматривают струйную обработку как предварительное условие для проведения сварки. На рис. 5 виден эффект струйной обработки. В соответствии с [10, 11] кумулятивная струя должна возникать при любой величине угла и любой скорости удара. Однако экспериментально установлено, что при малых углах и больших скоростях удара струеобразования не происходит. Дж.М. Уолш [10] показал, что на процесс формирования струи большое влияние оказывают волны, возникающие при ударе. В ходе исследования было установлено, что, когда скорость точки контакта V_c меньше скорости звука в металле, ударные волны движутся вперед и возможно образование струи. Волновой шов образуется по всей длине, и очень важна очистка поверхности с помощью струйной обработки.

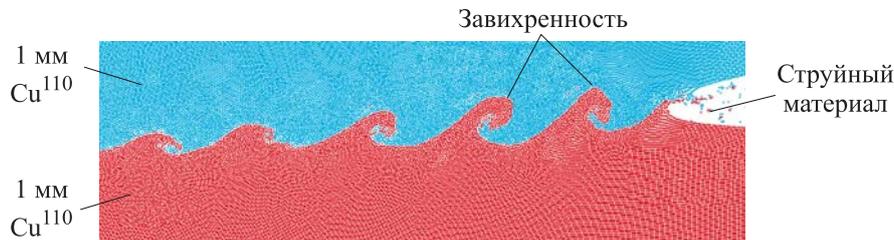


Рис. 5. Прогнозирование SPH и явление образования струи при угловой ударной сварке двух медных пластин

Струйная обработка удаляет поверхностный оксидный слой, а угловой удар соединяет две очищенные поверхности. Волновой шов, длина и амплитуда волны связаны как с толщиной метаемой

пластины δ , так и со скоростью ее удара V_f . Высокая плотность энергии приводит к большой амплитуде и длине волны, а зона плавления наблюдается вдоль волнистой границы раздела с завихрениями. Перед точкой столкновения происходит образование волны. Когда две металлические пластины значительно различаются по плотности, на металле с меньшей плотностью образуется завихренность и металлическая струя выбрасывается вдоль металла с высокой плотностью (см. рис. 5).

В соответствии с механизмом Бахрани — Блэка — Кроссленда материал метаемой пластины разделяется на две струи: «выступающую струю», которая движется влево, и «входящую струю», которая движется вправо через точку торможения S . В критической точке разделяющейся струи создается очень высокое давление (рис. 6).

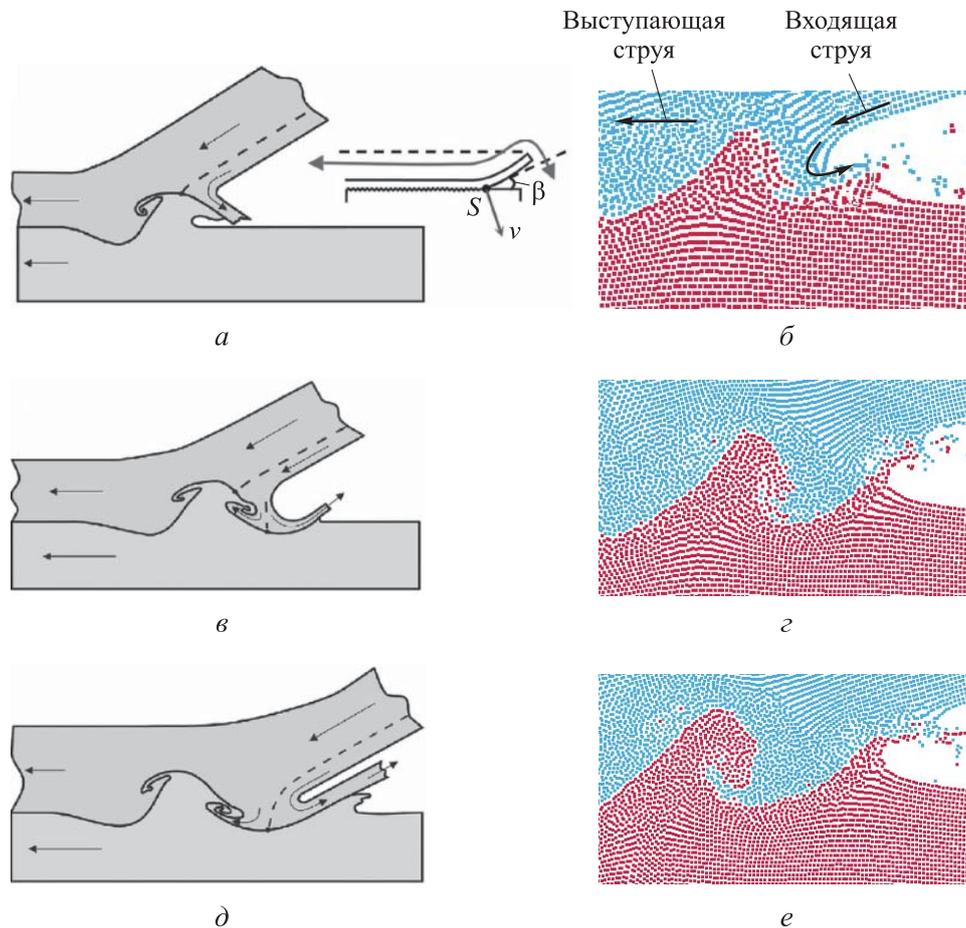


Рис. 6. Механизм Бахрани — Блэка — Кроссленда (*a, в, д*) и численное моделирование процесса (*б, г, е*) через 1,6 (*a, б*), 1,8 (*в, г*), и 2 мкс (*д, е*) после начала столкновения

Основная пластина деформируется под критической точкой, и перед точкой столкновения в основной пластине образуется крюк, который возрастает и в конце концов захватывает возвращающуюся струю. Затем точка застоя переходит на вершину крюка, опускается по нему и начинает формировать новый крючок. Таким образом формируются последовательные волны [3].

Для сравнения на рис. 7 даны результаты моделирования (слева) и эксперимента (справа), полученные в работе [12], а также показан полномасштабный вид волнообразного рисунка в процессе ударной сварки (справа на рис. 7, б). Используется моделирование для воспроизведения морфологии межфазных волн, которая является особенностью зоны соединения меди. Метод SPH охватывает зону плавления вблизи завихрений, даже если они сопоставимы с областью с невихревым волнистым узором. Если скорость вертикального столкновения слишком высока для заданного угла столкновения, вдоль границы раздела можно наблюдать зону плавления, а если она слишком низка, сварные швы образовываться не будут.

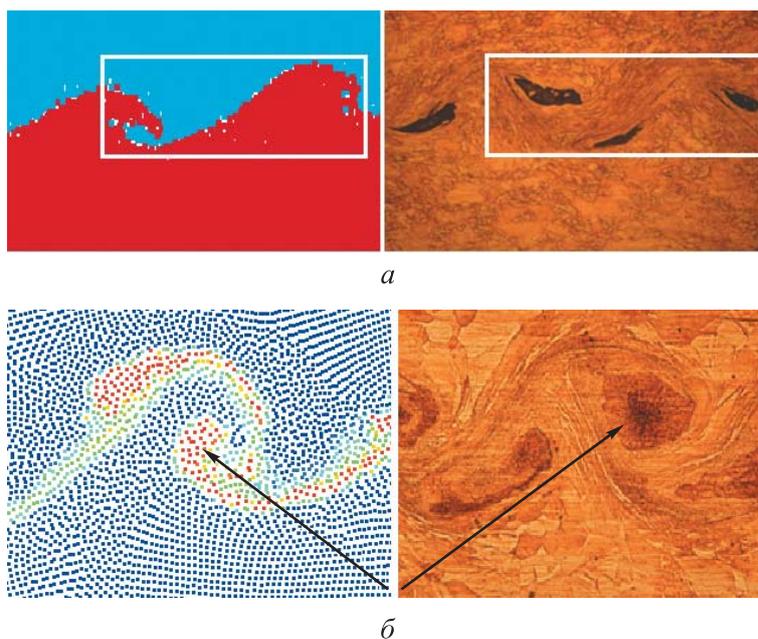


Рис. 7. Микроструктуры границ перехода зоны соединения $\text{Cu}^{110} + \text{Cu}^{110}$ в модели (слева) и эксперименте (справа):
 а — зоны расплава ($\times 100$); б — интерметаллическая фаза в вихре ($\times 200$)

Следует отметить, что: 1) зона плавления явно наблюдается вдоль волнистой границы раздела с завихрениями; 2) при моделировании методом SPH зона плавления зафиксирована в области чрезвычайно высокой температуры, где возникают завихрения с определенными частицами, имеющими более высокую температуру, чем окружающие

частицы в завихрениях. Из-за высоких скоростей в точке столкновения передний и задний вихри соединяются. В конечном счете эта полная «турбулентность» приводит к образованию однородных зон плавления. Что касается волнистого рисунка на границе раздела без завихрений, результаты численных и экспериментальных методов хорошо согласуются для случая сварки со скоростью удара ~ 520 м/с и заданным начальным углом удара $\beta = 16^\circ$.

На рис. 8, *a* показано, что в устье фронта столкновения возникает очень высокое давление (до 10 ГПа). Оно выдавливает зарождающуюся поверхность, похожую на кумулятивную струю заряда. Очищенная поверхность в дополнение к очень высокому давлению, по сути, является причиной ударной сварки; первоначальная поверхность обрабатывается струей, и очень высокое давление приводит поверхности в плотный контакт. Применение высокого давления в точке столкновения способствует прочному металлическому соединению на обновляемых поверхностях. Известно, что поверхность стыка внахлестку при ударной сварке имеет характерную волнистую морфологию [3]. Модель показывает, что основной механизм соединения — струйный материал и воздействие высокого давления, создаваемого на границе замыкания двух пластин. При этом происходит сжатие поверхностей противоположных пластин, по существу, до атомного контакта. Давление в точке контакта, которое заложено в тензоре напряжений, вычислялось по уравнению состояния Грюнайзена [13].

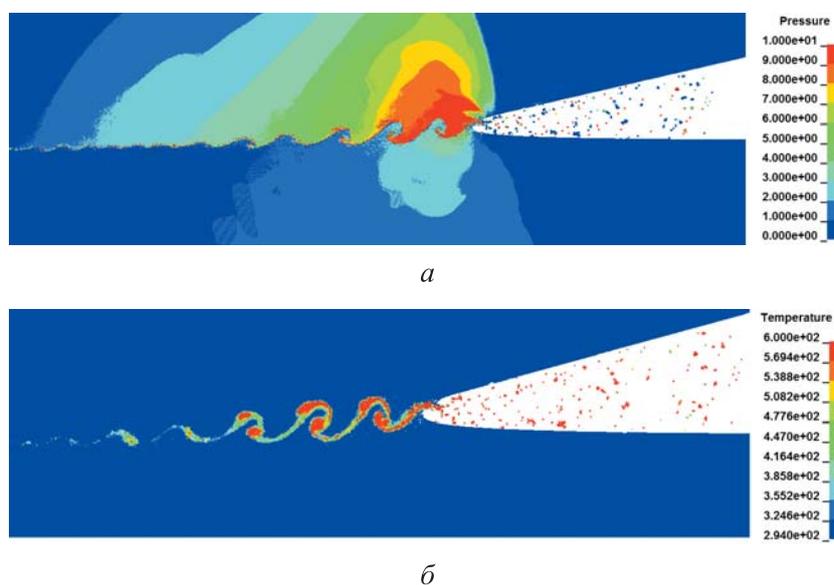


Рис. 8. Распределение давления (*a*) и температуры (*б*) в зоне образования крючков

На рис. 8, б показано распределение температуры на границе раздела: температура расплываемого материала достигает 600К, что является красной границей графика интерференции. Предполагается, что соединение представляет собой сварной шов в твердом состоянии. Показано, что некоторые области нагреваются до температуры солидуса меди, хотя наблюдается изоляция этих областей другими областями, где температура поддерживается ниже 360К. Профиль температуры возникает сразу после прекращения деформации. При моделировании методом SPH зона плавления фиксируется в области чрезвычайно высокой температуры, где возникают завихрения с некоторыми частицами, имеющими более высокую температуру, чем окружающие их частицы в завихрениях. Более сильные тепловые эффекты проявляются в вихрях волнистых связей. Обычно этот тип межфазной морфологии характеризуется прямой связью, за исключением вихрей, где при высокоскоростной турбулентности под действием большой скорости сдвига могут плавиться даже металлы с самой высокой температурой плавления. На окончательную микроструктуру влияет чрезвычайно высокая скорость охлаждения.

При использовании моделей Джонсона — Кука и Грюнайзена в модель включаются адиабатические температурные эффекты. Обычно считается, что ударная сварка связана с плавлением, поскольку повышение температуры на границе раздела часто достигает температуры плавления некоторых металлов. Однако усовершенствованное моделирование процесса ударной сварки показало, что температура может не достигать температуры солидуса в некоторых областях, где происходит меньшая деформация металлов [14–17].

В настоящем исследовании сварочного механизма основное внимание уделялось влиянию характеристик сварочной морфологической волны, окна свариваемости и параметров сварки на качество сварного шва. Однако требуется дальнейшее изучение формирования струи из-за непрерывной металлургической связи вдоль границы столкновения, основанной на непрерывном образовании струи.

Координаты скорости точки контакта V_c , угла соударения β и области, ограниченной несколькими линиями, представлены на рис. 9. Условия воздействия, соответствующие данной области, являются оптимальными для получения высококачественного соединения. Можно определить каждую из границ с помощью численного моделирования. Найдем нижний предел сварки Дерибаса. Согласно Биркхоффу, Уолшу, Козуену и Хольцману, струя всегда образуется при дозвуковых скоростях точки контакта. Однако Виттман отметил, что на практике этого не наблюдается, поскольку при низких значениях скорости и, соответственно, давления вблизи точки контакта материал ведет себя не как жидкость. Таким образом, нижний предел сварки —

линия, выше которой материал ведет себя как жидкость, что необходимо для образования струи. Виттман полагал, что материал начинает вести себя как жидкость, если давление во время столкновения в 5 раз превышает предел упругости Гюгонио. Следовательно, расчет минимального давления проводят металлографическими методами, используя уравнение зависимости давления от скорости частиц зоны расплавления между пластинами.

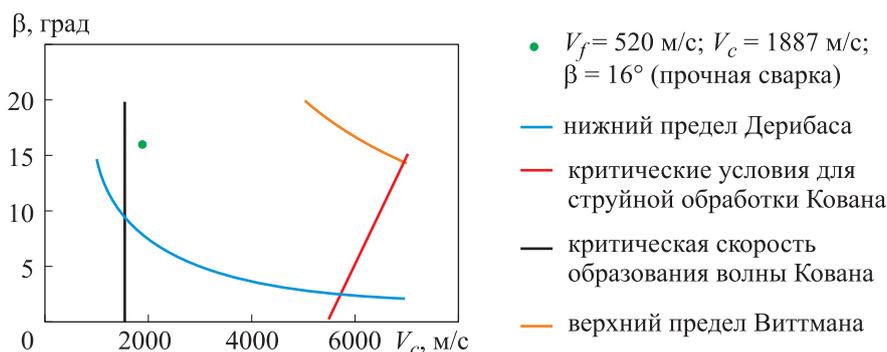


Рис. 9. Окно свариваемости (сварка возможна, когда комбинация параметров (β ; V_c) находится в пределах диапазона сварки)

Наибольшую сложность представляет определение верхней границы сварочного окна (линия верхнего предела Виттмана на рис. 9). Эта линия описывает режимы, которые характеризуются избыточным расплавлением металла. В тех случаях, когда расплавленные зоны оказываются чрезвычайно толстыми, их затвердевание не завершается до прихода растягивающих волн, что приводит к разрушению соединения. Толщина расплава l и время до прихода растягивающей волны t_1 зависят от режимов соударения V_c и β , толщины пластин и плотности материалов. Время t_2 , необходимое для охлаждения и затвердевания, определяется теплофизическими свойствами пластин [18–20]. Таким образом, поиск верхней границы сварочного окна, как правило, представляет собой попытку выразить t_1 и t_2 относительно свойств материала и режимов удара. В этом случае линия верхнего предела Виттмана будет описывать набор режимов соударения, обеспечивающих выполнение условия $t_1 = t_2$. Следует отметить, что определение l , t_1 , t_2 аналитическими методами исключительно трудно, поэтому при поиске данных параметров вводится много допущений и эмпирических критериев.

Результаты и их обсуждение. Проведенные исследования позволили получить следующие результаты.

1. Волновые структуры высокоскоростной угловой ударной сварки демонстрируют как асимметричные, так и симметричные волны.

Длины и амплитуды волн возрастают с увеличением как подводимой энергии, так и толщины образца. Процесс углового скоростного соударения металлических пластин возможен для всех масштабов длины при правильном угле соударения и скорости, и все они могут использоваться для соединения однородных и разнородных материалов. В 2D-моделях успешно воспроизведена топография межфазной морфологии и струйные явления. Все морфологические волны прошли переход от прямого интерфейса к волнистому. С помощью бессеточной методологии в пакете программного обеспечения LS-DYNA удалось избежать некоторых серьезных проблем, связанных с запутыванием и искажением сетки при больших деформациях. Методика численной реализации позволяет рассчитать скорость соударения в диапазоне приблизительно 30...800 м/с, что дает возможность изучить метод магнитно-импульсной сварки.

2. При моделировании с помощью усовершенствованного метода SPH можно эффективно описывать ускорение метаемой пластины, приводимой в движение угловой ударной сваркой, и быстрое увеличение угла сварки от начального угла между метаемой и родительской пластинами до примерно постоянного угла сварки. Чтобы подтвердить точность метода SPH, в дальнейшем состав материала будет сравниваться с материалом, выброшенным в виде струи, который будет собран в экспериментах, путем размещения контрольного блока перпендикулярно направлению сварки. Это предоставит данные, относящиеся к материалу, который выбрасывается в процессе сварки (например, оксидный слой на меди) и не является частью стыковочно-сварного шва. Собранный струйный материал будет охарактеризован с точки зрения массы и состава. Давление в стационарном режиме достигает примерно таких же значений для материала и составляет 10 ГПа.

3. Предсказание межфазной длины волны зависит от таких факторов, как угол столкновения и толщина метаемой пластины. Показано, что численное моделирование с использованием метода гидродинамики сглаженных частиц позволяет предсказать значения, близкие к реальным. Методом SPH воспроизводится процесс струйно-волнового образования, а данные численного моделирования сварки показывают хорошее совпадение с экспериментальными данными. Температура в зоне контакта достигает 600К.

Заключение. В настоящем исследовании программное обеспечение LS-DYNA для численного анализа с использованием метода SPH применялось для моделирования процесса высокоскоростной ударной сварки. В ходе моделирования были четко определены скорость соударения и угол удара при необходимом давлении, что полезно для понимания условий формирования волны. Струя является основной причиной возникновения сварки в процессе высокоскоростного удара.

При сварке в результате высокоскоростного углового удара метаемой пластины с родительской образуется струя. Без угла удара струя была бы зажата между границами столкновения. Следовательно, угол удара является одним из важных параметров для возникновения металлургического соединения. Затем поверхности сближаются на расстояние в атомном масштабе под действием кратковременного сильного ударного давления. Таким образом, SPH является новым, но вполне подходящим методом для моделирования процесса высокоскоростной ударной сварки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дерibas А.А. *Физика упрочнения и сварки взрывом*. Новосибирск, Наука, 1980, 224 с.
- [2] Hay D.R. Explosive welding: applications and techniques. *High-Pressure Science And Technology*. New York, Plenum Press, 1979, vol. 2, p. 781.
- [3] Bahrani A., Black T., Crossland B. The mechanics of wave formation in explosive welding. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1967, vol. 296 (1445), p. 123.
- [4] Батаев И.А. *Структура межслойных границ и механические свойства материалов, полученных сваркой взрывом: Дис. ... д-ра техн. наук*. Новосибирск, НГТУ, 2018, 347 с.
- [5] Patra S., Arora K.S., Shome M., Bysakh S. Interface characteristics and performance of magnetic pulse welded Copper-Steel tubes. *J. Mater. Process. Technol.*, 2017, vol. 245, p. 278.
- [6] Kore S., Date P., Kulkarni S., Kumar S., Rani D., Kulkarni M., Desai S., Rajawat R., Nagesh K., Chakravarty D. Electromagnetic impact welding of copper-to-copper sheets. *Int. J. Mater. Form.*, 2009, vol. 3, p. 117.
- [7] Liu M., Feng D., Guo Z. Recent developments of SPH in modeling explosion and impact. In: *3rd International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications, Particles 2013. Stuttgart, Germany, 18 September 2013 through 20 September 2013*. Stuttgart, 2013, p. 428.
- [8] Vivek A., Liu B., Hansen S., Daehn G.S. Accessing collision welding process window for titanium/copper welds with vaporizing foil actuators and grooved targets. *J. Mater. Process. Technol.*, 2014, vol. 214 (8), p. 1583.
- [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, vol. 140 (12), p. 1.
- [10] Walsh J.M. Limiting conditions for jet formation in high velocity collisions. *J. Appl. Sci.*, 1953, vol. 24 (3), p. 349.
- [11] Robinson J.L. The mechanics of wave formation in impact welding. *Phil. Mag.*, 1975, vol. 31 (3), p. 587.
- [12] Kuzmin E.V., Lysak V.I., Kuzmin S., Korolev M.P. Effect of parameters of high-velocity collision on the structure and properties of joints upon explosive welding with simultaneous ultrasonication. *J. Phys. Metals Metallogr.*, 2019, vol. 120 (2), pp. 197–203. DOI: 10.1134/S0031918X1902011X
- [13] Nassiri A. *Investigation of wavy interfacial morphology in magnetic pulsed welding: mathematical modeling, numerical simulations and experimental tests: PhD dissertation*. University of New Hampshire, 2015.
- [14] Gupta V., Lee T., Vivek A., Choi K. S., Mao Y., Sun X., Daehn G. A robust process-structure model for predicting the joint interface structure in impact welding. *J. Mater. Process. Tech.*, 2019, vol. 264, p. 107.

- [15] Nassiri A., Zhang S., Lee T., Abke T., Vivek A., Kinsey B., Daehn G. Numerical investigation of CP-Ti & Cu110 impact welding using smoothed particle hydrodynamics and arbitrary Lagrangian–Eulerian methods. *J. Manuf. Process*, 2017, vol. 28, p. 558.
- [16] Wang H., Wang Y. High-velocity impact welding process: A Review. *Metals*, 2019, (9) 2, p. 144. <https://doi.org/10.3390/met9020144>
- [17] Carvalho G.H.S.F.L., Galvão I., Mendes R., Leal R.M., Loureiro A. Explosive welding of aluminum to stainless steel. *J. Mater. Process Technol.*, 2018, vol. 262, pp. 340–349.
- [18] Дудин А.А. *Магнитно-импульсная сварка металлов*. Москва, Металлургия, 1979.
- [19] Grignon F., Benson D., Vecchio K.S., Meyers M.A. Explosive welding of aluminum to aluminum: Analysis, computations and experiments. *Int. J. Impact Eng.*, 2004, vol. 30, pp. 1333–1351.
- [20] Bataev I., Lazurenko D., Tanaka S., Hokamoto K., Bataev A., Guo Y., Jorge A. High cooling rates and metastable phases at the interfaces of explosively welded materials. *Acta Mater.*, 2017, vol. 135, pp. 277–289.

Статья поступила в редакцию 03.10.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ахмед Солиман М.Э. Численное исследование высокоскоростной сварки угловым ударом методом гидродинамики сглаженных частиц. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 12. EDN EGHEYD

Ахмед Солиман Мохамед Шериф Эль Сайед — канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории синтеза композиционных материалов, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН; автор более 26 научных работ в области магнитно-импульсной штамповки. e-mail: sherif1232025@gmail.com

Numerical study of high-speed angular impact welding by smoothed particle hydrodynamics method

© M.E. Ahmed Soliman

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, 630090, Russian Federation

The study considers angular impact welding of metal plates, which is one of the methods of pressure welding in the solid state for a wide range of combinations of homogeneous and dissimilar metals. It is shown that in numerical simulation, the created wavy pattern with swirls of the contact surface of the plates, the ejection of a metal jet emitted by the surface layer of the plates, leading to their jet processing, and the melting zone can be calculated by the meshless Lagrangian method of smoothed particle hydrodynamics (SPH), with discretization into particles. A detailed analysis of the joint using high-speed angular impact welding will allow designing metal structures with specified mechanical properties. A detailed analysis of the joint using high-speed angular impact welding will allow designing metal structures with specified mechanical properties. The objective of the study is to assess the behavior of the projectile and parent plates under high-speed welding conditions. For calculations, the Johnson-Cook model was used, which describes the stress state of the material depending on the rate of plastic deformation and homologous temperature. The simulation showed the impact velocity V_f , contact point velocity V_c and impact angle β with the required pressure, which is useful for understanding the requirements for wave formation. The jet is the main cause of welding in the high-speed angular impact process. In welding, a jet is formed as a result of the impact of the projectile plate with the parent plate. Without the impact angle, the jet would be trapped between the collision boundaries. Therefore, the impact angle is one of the important parameters for the occurrence of metallurgical joint. Accordingly, the emission of the metal jet and the morphology of the weld surface were successfully reproduced using the SPH method.

Keywords: angular impact welding, metal jet, meshless Lagrange method, smoothed particle hydrodynamics, copper Cu110, weldability window

REFERENCES

- [1] Deribas A.A. *Fizika uprochneniya i svarki vzryvom* [Physics of hardening and explosion welding]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980, 224 p.
- [2] Hay D.R. Explosive welding: applications and techniques. *High-pressure science and technology*. New York, Plenum Press, 1979, vol. 2, p. 781.
- [3] Bahrani A., Black T., Crossland B. The mechanics of wave formation in explosive welding. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1967, vol. 296 (1445), p. 123.
- [4] Bataev I.A. *Struktura mezhslonnykh granits i mekhanicheskiye svoystva materialov, poluchennykh svarkoy vzryvom: Dis. ... d-ra. tekhn. nauk* [Structure of interlayer boundaries and mechanical properties of materials obtained by explosion welding: Diss ... Dr. Sc. (Engineering)]. Novosibirsk, NSTU, 2018, 347 p.
- [5] Patra S., Arora K.S., Shome M., Bysakh S. Interface characteristics and performance of magnetic pulse welded Copper-Steel tubes. *J. Mater. Process. Technol.*, 2017, vol. 245, p. 278.

- [6] Kore S., Date P., Kulkarni S., Kumar S., Rani D., Kulkarni M., Desai S., Rajawat R., Nagesh K., Chakravarty D. Electromagnetic impact welding of copper-to-copper sheets. *Int. J. Mater. Form.*, 2009, vol. 3, p. 117.
- [7] Liu M., Feng D., Guo Z. Recent developments of SPH in modeling explosion and impact problems. In: *3rd International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications, Particles 2013; Stuttgart; Germany; 18 September 2013 through 20 September 2013*. Stuttgart, 2013, p. 428.
- [8] Vivek A., Liu B., Hansen S., Daehn G.S. Accessing collision welding process window for titanium/copper welds with vaporizing foil actuators and grooved targets. *J. Mater. Process. Technol.*, 2014, vol. 214 (8), p. 1583.
- [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, vol. 140 (12), p. 1.
- [10] Walsh J.M. Limiting conditions for jet formation in high velocity collisions. *J. Appl. Sci.*, 1953, vol. 24 (3), p. 349.
- [11] Robinson J.L. The mechanics of wave formation in impact welding. *Phil. Mag.*, 1975, vol. 31 (3), p. 587.
- [12] Kuzmin E.V., Lysak V.I., Kuzmin S., Korolev M.P. Effect of parameters of high-velocity collision on the structure and properties of joints upon explosive welding with simultaneous ultrasonication. *J. Phys. Metals Metallogr.*, 2019, vol. 120 (2), pp.197–203. DOI: 10.1134/S0031918X1902011X
- [13] Nassiri A. *Investigation of wavy interfacial morphology in magnetic pulsed welding: mathematical modeling, numerical simulations and experimental tests: PhD dissertation*. University of New Hampshire, 2015.
- [14] Gupta V., Lee T., Vivek A., Choi K. S., Mao Y., Sun X., Daehn G. A robust process-structure model for predicting the joint interface structure in impact welding. *J. Mater. Process. Tech.*, 2019, vol. 264, p. 107.
- [15] Nassiri A., Zhang S., Lee T., Abke T., Vivek A., Kinsey B., Daehn G. Numerical investigation of CP-Ti & Cu110 impact welding using smoothed particle hydrodynamics and arbitrary Lagrangian–Eulerian methods. *J. Manuf. Process.*, 2017, vol. 28, p. 558.
- [16] Wang H., Wang Y. High-velocity impact welding process: A Review. *Metals*, 2019, (9) 2, p. 144. <https://doi.org/10.3390/met9020144>
- [17] Carvalho G.H.S.F.L., Galvão I., Mendes R., Leal R.M., Loureiro A. Explosive welding of aluminum to stainless steel. *J. Mater. Process. Technol.*, 2018, vol. 262, pp. 340–349.
- [18] Dudin A.A. *Magnitno-impul'snaya svarka metallov* [Magnetic pulse welding of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979.
- [19] Grignon F., Benson D., Vecchio K.S., Meyers M.A. Explosive welding of aluminum to aluminum: Analysis, computations and experiments. *Int. J. Impact Eng.*, 2004, vol. 30, pp. 1333–1351.
- [20] Bataev I., Lazurenko D., Tanaka S., Hokamoto K., Bataev A., Guo Y., Jorge A. High cooling rates and metastable phases at the interfaces of explosively welded materials. *Acta Mater.*, 2017, vol. 135, pp. 277–289.

Ahmed Soliman Mohamed Sherif El Sayed, Candidate Sc. (Eng.), Researcher at the Laboratory of Composite Materials Synthesis, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS. The author has more than 26 scientific papers in the field of magnetic-pulse forming. e-mail: sherif1232025@gmail.com