

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.

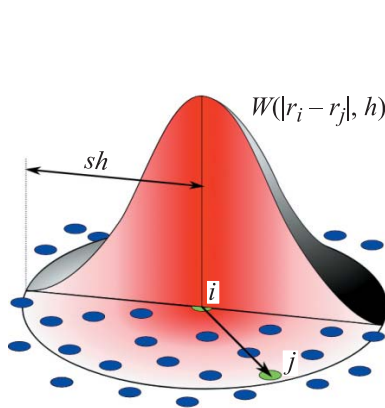


Рис. 1. Аппроксимация ядра SPH на основе сплайн-функций

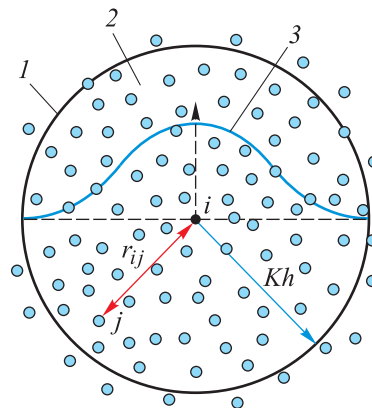


Рис. 2. Область интегрирования и вид функции ядра для частицы i :
1 — контрольная область функции сглаживания частицы i ; 2 — интеграционная область Ω ; 3 — функция сглаживания