



ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ СВАРКИ ВЗРЫВОМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

С. В. КУЗЬМИН, В. И. ЛЫСАК, доктора техн. наук,
С. В. ХАУСТОВ, Т. Ш. СИЛЬЧЕНКО, инженеры (Волгоград. гос. техн. ун-т, РФ)

Рассмотрены принципы расчета и оптимизации параметров сварки взрывом металлических слоистых композитов. В качестве универсального критериального параметра, увязывающего свойства свариваемых материалов и режимы сварки, выбрана энергия пластической деформации металла околошовной зоны при высокоскоростном соударении.

Ключевые слова: сварка взрывом, композиционные материалы, оптимизация режимов, многослойная композиция

При проектировании технологических процессов сварки взрывом двух- и многослойных композитов необходимо подбирать режимы, которые позволяют гарантированно обеспечивать получение требуемых физико-механических свойств соединений и отсутствие в них дефектов. Для этого параметры кинематической группы (v_c , v_k , γ), зависящие от установочных параметров (h , H , C , m_1 , m_2) (рис. 1), должны создавать в зоне соединения такие условия (p , τ , ε , T), при которых обеспечивается получение качественного сварного соединения.

Цель настоящей работы — разработка основных принципов расчета режимов сварки взрывом двух- и многослойных металлических композиционных материалов, гарантированно обеспечивающих получение прочного соединения.

К настоящему времени накоплен обширный теоретический и экспериментальный материал и установлены аналитические взаимосвязи между параметрами различных групп. Тем не менее, поставленная задача имеет ряд особенностей, обусловленных в первую очередь выбором универсального критериального параметра, который бы увязывал исходные свойства свариваемых материалов с прочностью получаемого соединения. Основателями гидродинамического подхода [2–4 и др.] в качестве такого критерия предложен критический угол соударения $\gamma_{кр}$, определяющий по сути положение нижней границы свариваемости определенной пары металлов в координатах γ – v_k . При этом для получения равнопрочного соединения необходимо выполнение условия $\gamma > \gamma_{кр}$ при $v_{к.кр} < v_k < c_0$ (здесь γ — динамический угол соединения; $v_{к.кр}$ — критическая скорость контакта; c_0 — скорость звука в металле).

По мнению ряда исследователей [5–8], для любого произвольного сочетания одно- и разнородных материалов существует некоторая критическая скорость соударения $v_{с.кр}$, зависящая от предела текучести и акустической жесткости свариваемых металлов, превышение которых обеспечивает получение прочного соединения.

Эти разные по форме, но схожие по сути критериальные подходы, не принимающие во внимание такие важные параметры, как массовые характеристики или толщина свариваемых элементов, имеют весьма ограниченное практическое применение.

По-видимому, пока единственным универсальным параметром такого рода, имеющим физический смысл, остается энергия W_2 , затрачиваемая

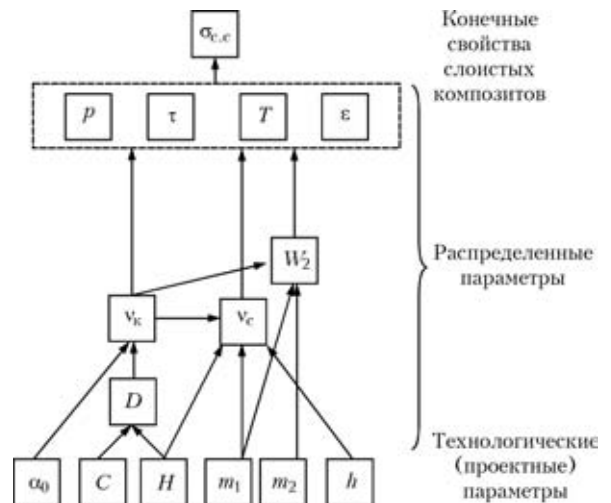


Рис. 1. Феноменологическая модель сварки взрывом двухслойного композита [1]: α_0 — установочный угол между свариваемыми пластинами; C — содержание аммонита в смеси; H — высота заряда ВВ; m_1 и m_2 — единичная масса соответственно метаемой и неподвижной пластин; h — установочный (сварочный) зазор; D — скорость детонации ВВ; v_c и v_k — соответственно скорость соударения и контакта; W_2 — энергия, затрачиваемая на пластическую деформацию металла околошовной зоны (ОШЗ); p , τ , T и ε — соответственно давление, время деформирования, температура и степень пластической деформации металла в зоне соединения; $\sigma_{с.с}$ — прочность сварного соединения



на пластическую деформацию металлов. Эта величина, с одной стороны, связывает воедино соударение и массу пластин, а с другой, четко определяет нижнюю границу свариваемости в зависимости от технологической деформируемости (критерия Астрова HB/δ — соотношение твердости металла по Бринеллю к его относительному удлинению) металлов значением критических энергозатрат $W_{2кр}$ [1, 9, 10].

Следует отметить, что наряду с W_2 и $W_{2кр}$ в качестве перспективного критериального параметра может выступать деформирующий импульс I_d [11], значения которого характеризует степень развития пластической деформации металла ОШЗ и полноту протекания активационных процессов на границе соединения. В настоящее время сдерживающим фактором для использования этого параметра является недостаточный объем экспериментального материала для взаимоувязывания $I_{д.кр}$ со свойствами широкого круга конструктивных материалов.

Итак, приняв во внимание изложенное выше, рассмотрим подробно принципиальный алгоритм вычисления режимов процесса для простейшего случая — сварки взрывом биметалла по параллельной схеме.

На первом этапе следует определить скорость точки контакта v_k , которая обычно выбирается из диапазона $(0,4...0,6)c_{0min}$ [12] (где c_{0min} — скорость звука в металле, меньшая из двух для выбранного сочетания). Как правило, v_k составляет 2000...2500 м/с, причем для ряда композиций, область свариваемости которых достаточно узка (титан + сталь, цирконий + сталь, алюминий + сталь, алюминий + медь и др.), следует стремиться к нижней границе диапазона указанных значений.

Следующим важным и ответственным этапом является выбор типа взрывчатого вещества (ВВ), подробный анализ свойств которых приведен в работах [4, 13–19 и др.]. При этом необходимо учитывать несколько обстоятельств. С позиции упрощения технологического процесса (исключением являются операции по смешиванию компонентов ВВ перед сваркой) предпочтительнее применение ВВ, которые выпускаются промышленностью, например, аммонита №6ЖВ, сварочных аммонитов типа А или АТ. Первый из них является достаточно мощным ВВ, и скорость детонации $D > 2500$ м/с реализуется уже в плоских зарядах высотой $H \approx 12...13$ мм, в связи с чем его использование оправдано при плакировании тонкими (до 1,5...2,0 мм) металлическими слоями. Два других типа аммонитов при приемлемых диапазонах скорости детонации (1200...3100 м/с) имеют весьма малый срок хранения, что сказывается на стабильности детонационных характеристик. В этой связи в большинстве случаев для решения практических задач в мировой практике используют свежепри-

готовленные смеси аммонита №6ЖВ (или его аналогов) с аммиачной селитрой, кварцевым песком, поваренной солью, тальком и другими инертными наполнителями. Эти смеси хорошо изучены, а их детонационные характеристики представлены в виде таблиц, графиков или эмпирических зависимостей, используя которые и предварительно задавшись составом смеси, определяют высоту заряда H , обеспечивающую необходимую скорость детонации $D = v_k$. Например, для смеси аммонит №6ЖВ + селитра можно использовать зависимость [1]

$$H = \left(\frac{D}{121,5C^{0,492}} \right)^{3,17} \quad (1)$$

Для выбранной смеси определяют также насыпную плотность $\rho_{ВВ}$, влияющую на скорость соударения и зависящую от состава ВВ. Для смеси аммонита с гранулированной аммиачной селитрой значение этой величины достаточно точно рассчитывают по эмпирической формуле [1]

$$\rho_{ВВ} = -1,43 \cdot 10^{-5} C^2 - 1,22 \cdot 10^{-3} C + 1. \quad (2)$$

Далее для свариваемой пары материалов определяют критическое значение энергозатрат на пластическую деформацию $W_{2кр}$ [9]

$$W_{2кр} = 0,606 + 0,184 \ln(HB/\delta) \text{ [МДж/м}^2\text{]}. \quad (3)$$

При этом из двух полученных значений выбирают меньшее, т. е. соответствующее более мягкому материалу пары, а затем минимально необходимую скорость соударения путем решения известного уравнения — слагаемого энергетического баланса сварки взрывом [20]

$$W_2 = \frac{\rho_1 \delta_1 \rho_2 \delta_2}{2(\rho_1 \delta_1 + \rho_2 \delta_2)} v_c \left[1 - \left(\frac{v_k}{c_0} \right)^2 \right] \quad (4)$$

относительно v_c и полагая $W_2 = W_{2кр}$

$$v_{с.кр} = \sqrt{\frac{2(\rho_1 \delta_1 + \rho_2 \delta_2) W_{2кр}}{\rho_1 \delta_1 \rho_2 \delta_2 [1 - (v_k/c_0)^2]}} \quad (5)$$

где ρ_1, ρ_2 — плотность материала соответственно метаемой и неподвижной пластин; δ_1, δ_2 — толщина соответственно метаемой и неподвижной пластины пакета.

По сути полученное значение $v_{с.кр}$ определяет положение нижней (критической) границы сварки выбранной пары материалов с заданной толщиной (массой) пластин.

Учитывая то, что для большинства композиций положение верхней (предельной) границы сварки в настоящее время не определено, для оценки предельных энергозатрат $W_{2пр}$ добавляют к $W_{2кр}$ не-



которую величину ΔW_2 . Обычно для таких пар материалов, как сталь + титан, титан + медь, медь + алюминий, алюминий + сталь, алюминий + титан и некоторых других она составляет 0,3...0,5 МДж/м², а для остальных материалов, отличающихся широким диапазоном свариваемости, $\Delta W_2 = 0,8...1,0$ МДж/м².

После подстановки в (5) вместо $W_{2кр}$ значения $W_{2пр} = W_{2кр} + \Delta W_2$ рассчитывают предельную скорость соударения $v_{с.пр}$. При этом любое значение v_c из диапазона

$$v_{с.кр} < v_c < v_{с.пр} \quad (6)$$

должно обеспечивать при сварке образование равнопрочного соединения.

В идеальном случае наилучшими свойствами с точки зрения минимизации структурной и химической неоднородностей будут характеризоваться соединения, полученные при $W_{2кр}$, однако при выборе скорости соударения v_c из диапазона (6) обязательно следует иметь в виду возможные случайные отклонения установочных параметров от расчетных, обусловленные, например, кривизной свариваемых листов, неточностями сборки пакета, неравномерной плотностью ВВ и т. п. Предварительные оценки показали, в частности, что погрешности значений h и H составляют всего 10 % (при зазоре 1 мм — это 0,1 мм) и могут привести к тому, что значения W_2 окажутся меньше критических значений $W_{2кр}$ на 15...20 %. Равнопрочное соединение в этом случае не образуется. Особенно сильное влияние технологических погрешностей проявляется при малых значениях отношения h/H [21]. В связи с этим для повышения надежности процесса сварки изначально в расчеты (5) следует закладывать значение W_2 на 15...20 % больше критического.

Итак, выбрав из диапазона (6) значение v_c , нетрудно рассчитать требуемый сварочный зазор h для одномерной модели метания:

$$h = H \frac{(1 - \theta)^2}{(1 + 2\eta)\theta^2 - 1}, \quad (7)$$

$$\text{где } \theta = \frac{1 + \eta(1 - v_c/D) + \sqrt{\eta^2(1 - v_c/D)^2 - 2\eta v_c/D}}{1 + 2\eta}, \quad (8)$$

$$\eta = \frac{16}{27r} = \frac{16}{27} \frac{H\rho_{ВВ}}{\rho_1 \delta_1}, \quad (9)$$

$$h = \frac{0,184H}{r \left[\frac{(\sqrt{k+1} - 1)\pi}{4 \arcsin\left(\frac{v_c}{2D}\right)} - 1 \right] - 2,71}, \quad (10)$$

где k — показатель политропы продуктов детонации [2, 3].

При этом возможна ситуация, когда подкоренное выражение в (8) окажется отрицательным. Это означает, что выбранное сочетание исходных данных (состав смеси и рассчитанная для значения D высота заряда H) не обеспечивает разгон метаемой пластины до необходимой скорости соударения v_c . В этом случае следует увеличить высоту заряда (по сути η , входящую, в частности, в (8)) с одновременным разбавлением смесового ВВ инертными компонентами для обеспечения постоянства D .

В отличие от определения режимов сварки взрывом двухслойных соединений процедура их расчета для случая многослойных композиций значительно сложнее, что связано в первую очередь с нестационарностью параметров соударения на межслойных границах, а также необходимостью учета начальных участков разгона пакета после каждого i -го акта взаимодействия.

Расчет режимов непосредственно с использованием аналитических зависимостей возможен лишь в одном частном случае, а именно при допущении, что первая метаемая пластина перед ее соударением со второй (промежуточной) не ускоряется продуктами детонации (ПД), т. е. остаточное давление ПД $p_{ост} \rightarrow 0$. Такая ситуация может быть реализована при достаточно больших значениях отношения h_1/H (здесь h_1 — зазор на первой межслойной границе свариваемого композита). В этом случае (после определения v_k) для каждой межслойной границы рассчитывают в зависимости от механических свойств свариваемых материалов критические и предельные энергозатраты, а в зависимости от их значений — скорость соударения первого (метаемого) слоя со вторым ($v_{с.кп}^{кр}$ и $v_{с.кп}^{пр}$), обеспечивающая выделение на произвольной i -й границе композита энергии W_{2i} , равной соответственно $W_{2икр}$ и $W_{2ипр}$ [1, 10]:

$$v_{с.кп}^{кр/(пр)} = \sqrt{\frac{2 \sum_{j=1}^{i+1} m_j \sum_{j=1}^i m_j W_{2икр(пр)}}{m_1^2 m_{i+1} [1 - (v_k/c_{0i})^2]}}, \quad (11)$$

где i — индекс границы соударения [1; $n - 1$]; j — индекс слоя [1; n]; m — единичная масса пластины ($\rho\delta$).

Из полученных массивов значений скорости соударения определяют максимальное значение из критических и минимальное из предельных. При этом выполнение условия «энергетической разрешимости» процесса сварки по одновременной схеме плакирования [1, 10]

$$\max(v_{с.кп}^{кр}) < \min(v_{с.кп}^{пр}) \quad (12)$$



автоматически означает, что при любом значении скорости соударения на первой границе, входящем в этот диапазон, на каждой межслойной границе композита значение энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию металла, будет превышать критический уровень энергозатрат, необходимых для образования прочного соединения.

Невыполнение же неравенства (12) означает, что при указанных исходных условиях обеспечение равнопрочности на всех границах композита проблематично, поскольку в этом случае реализуется ситуация, когда нижняя граница сварки для некоторого i -го соударения находится выше верхней границы j -го ($i \neq j$). Данную проблему можно решить двумя путями: изменить схему сварки на обратную, выбрав в качестве метаемой (верхней) пластины пакета неподвижную (нижнюю) при общей неизменной очередности слоев в композите, или скорректировать соотношения толщин слоев в пакете.

Первый путь наиболее прост в реализации, но не всегда приемлем, поскольку при изменении последовательности расположения слоев в качестве метаемого может оказаться пластина из наименее пластичного материала, что создаст дополнительные технологические трудности в плане предотвращения ее разрушения при высокоскоростном деформировании.

Улучшение энергетической ситуации в свариваемом пакете по второму пути может быть достигнуто двумя способами: либо повышением $\min(v_{c1}^{np})$ за счет увеличения толщины (массы) $i + 1$ -го слоя, либо снижением $\max(v_{c1}^{kp})$ путем уменьшения толщины $j + 1$ -го слоя композиции (в данном случае i и j — индексы границ пакета соответственно $\min(v_{c1}^{np})$ и $\max(v_{c1}^{kp})$).

По скорректированным значениям $\min^*(v_{c1}^{np})$ или $\max^*(v_{c1}^{kp})$, при которых выполняется условие (12), рассчитывают новые значения единичных масс $i + 1$ -го или $j + 1$ -го слоев [1, 10]:

$$A = \frac{W_{2ikp}}{1 - (v_k/c_{0i})^2}, \quad (13)$$

где

$$A = \frac{W_{2ikp}}{1 - (v_k/c_{0i})^2}; \quad B = \frac{W_{2inp}}{1 - (v_k/c_{0i})^2}. \quad (14)$$

С их помощью определяют новые значения толщины соответствующих слоев композита, которые и закладывают в дальнейший расчет.

В более сложном случае, когда на поверхность свариваемого пакета после соударения первых двух пластин продолжает действовать остаточное

давление ПД, определение режимов сварки взрывом путем расчета является сложной и многоальтернативной задачей. При этом в отличие от предыдущей рассмотренной ситуации, когда давление ПД заряда к моменту соударения первой (метаемой) пластины со второй стремится к нулю, а скорость соударения на второй и последующих границах (пренебрегая стадией начального разгона) однозначно определяется значением v_{c1} , параметры соударения на каждой межслойной границе тесно связаны между собой. При этом создание требуемых условий соударения на некоторой i -й межслойной границе определяется скоростью соударения и стадиями разгона на всех предыдущих. Поясним это на примере простейшего случая сварки трехслойной композиции (рис. 2).

В рассмотренном примере фиксированная скорость соударения на первой границе $v_c = 350$ м/с может быть реализована различными сочетаниями высоты заряда (соответственно и содержание аммонита в смеси C для поддержания постоянной скорости детонации) и сварочного зазора h_1 (рис. 2). При этом в зависимости от фазы разгона метаемой пластины h_1/H на второй границе могут быть достигнуты различные значения максимальной скорости соударения: в рассматриваемом примере — от 290 м/с в случае полного разгона (рис. 2, а) до 450 м/с и более при $h_1/H = 0,034$ (рис. 2, з). Иными словами, если задаться скоростью соударения на второй межслойной границе, то достичь ее в принципе можно путем различных сочетаний параметров установочной подгруппы (H, C, h_1, h_2), т. е. задача имеет множество проектных решений. Аналогично будут выглядеть рассуждения и для большего количества свариваемых по одновременной схеме слоев.

С учетом изложенного выше принципиальный алгоритм расчета установочных параметров представляется следующим образом. На первом этапе, как и для случая сварки биметалла, задаются скоростью детонации ВВ. Имея экспериментальные или расчетные зависимости $D = f(H, C)$ для выбранного типа взрывной смеси, несложно составить двумерную матрицу $2 \times n$ сочетаний H и C , соответствующих заданной D . Из технологических соображений целесообразно применять стандартные смеси (100/0, 90/10, 80/20 и т. п.).

Затем по (11) для каждой межслойной границы определяют диапазон значений критической v_{ci}^{kp} и v_{ci}^{np} предельной скорости соударения, задавшись предварительно значениями $HВ/\delta$ для материала каждого слоя свариваемого пакета.

На следующем этапе для каждого сочетания H и C составленной ранее матрицы рассчитывают значения зазоров на первой границе, обеспечи-

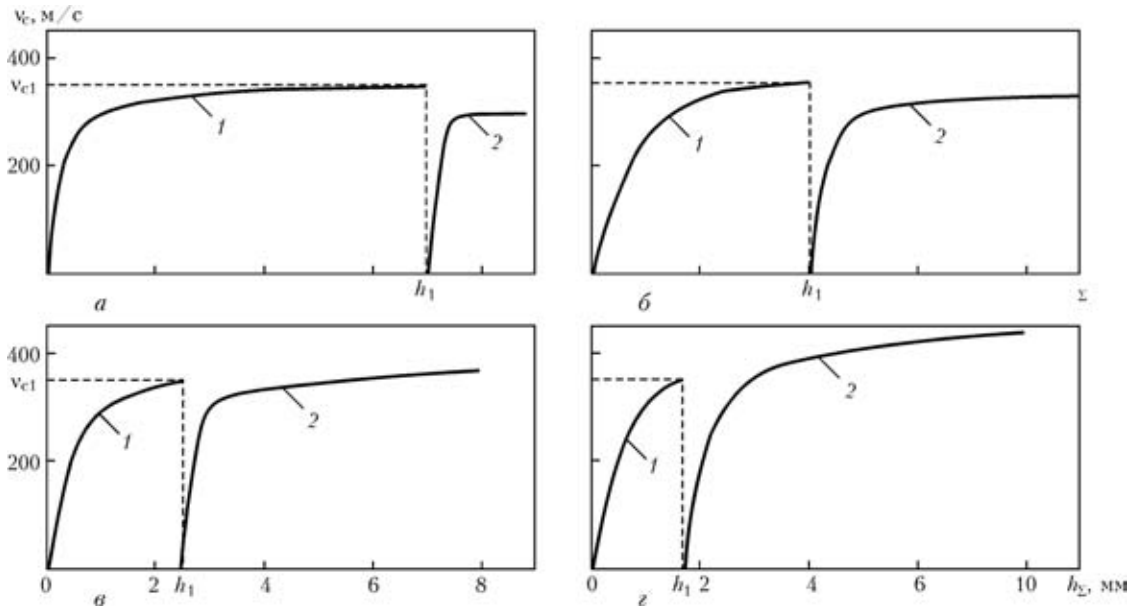


Рис. 2. Влияние фазы разгона метаеюй пластины на скорость соударения на второй межслойной границе трехслойного пакета ($\rho_1\delta_1 = 27 \text{ г/см}^2$; $\rho_2\delta_2 = 5,4 \text{ г/см}^2$, $v_k = 2500 \text{ м/с}$) при $H = 25$ (а), 30 (б), 35 (в) и 50 (г) мм: 1, 2 — кривые разгона соответственно метаеюй пластины и пакета из двух сваренных пластин

вающие реализацию на ней соответственно $v_{c1}^{кр}$ и $v_{c1}^{пр}$, определяя таким образом области допустимых значений H , C и h_1 (рис. 3). Так, для ситуации, представленной на рис. 3, приемлемыми являются смесь аммонита №6ЖВ (не более 40 об. %) с гранулированной аммиачной селитрой; для смесей 25/75, 33/67 и 40/60 критический установочный зазор на первой межслойной границе (в данном случае — между титаном $\delta = 5 \text{ мм}$ и алюминием $\delta = 2 \text{ мм}$), при котором достигается скорость соударения, соответствующая критическим энергозатратам, составляет соответственно $h_{1кр} = 3,0$; $= 4,5$ и $10,2 \text{ мм}$.

Предельное же значения $h_{1пр}$, соответствующее предельным энергозатратам $W_{2пр}$ при соударении первых двух слоев, для смеси 25/75 составляет 8,7 мм (рис. 3). Для более насыщенных смесей (33/67 и 40/60 в рассматриваемом примере) рассчитать ее невозможно, поскольку метаеюй пластина выходит на пологий участок разгона, и дальнейшее неограниченное увеличение h_1 не приводит к заметному росту v_{c1} . Обычно на практике из технологических соображений ограничивают установочный зазор значением 15 мм, которое и принимается в рассмотренном примере за $h_{1пр}$ для смесей 33/67 и 40/60.

Далее по методике, изложенной в работе [22], строят кривые разгона пластин пакета для второй межслойной границы $v_{c2} = f(h_2)$, используя ограниченный массив значений H , C и h_1 , полученный на предыдущем этапе расчета. Из построенных кривых разгона для дальнейшего рассмотрения оставляют лишь те, которые удовлетворяют условию (6), определяя для каждой из них соответствующие $h_{2кр}$ и $h_{2пр}$. Данные операции повторяются для последующих межслойных границ свариваемого композита.

В результате расчета по изложенному алгоритму может получиться либо множество проектных решений, либо ни одного. В первом случае из полученного массива режимов сварки технолог-разработчик, основываясь на своем опыте и квалификации, а также технологических возможностях, выбирает какой-то один. Во втором — необходимо произвести корректировку исходных условий, например, изменить сочетание толщин в композиции или перейти к последовательному плакированию.

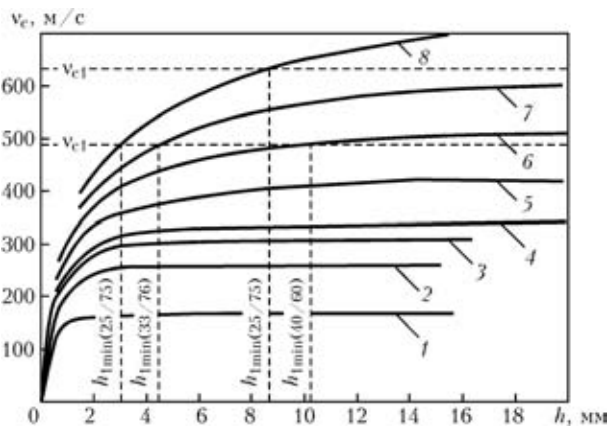


Рис. 3. Пример определения с помощью расчетов допустимых диапазонов установочных зазоров на первой границе h_1 для приемлемых составов взрывчатой смеси аммонит №6ЖВ/гранулированная аммиачная селитра (об. %) при сварке взрывом композиции титан ($\delta_1 = 5 \text{ мм}$) + алюминий ($\delta_2 = 2,0 \text{ мм}$) + АМг6: 1 — смесь 100/0; 2 — 75/25; 3 — 67/33; 4 — 60/40; 5 — 50/50; 6 — 40/60; 7 — 33/67; 8 — 25/75

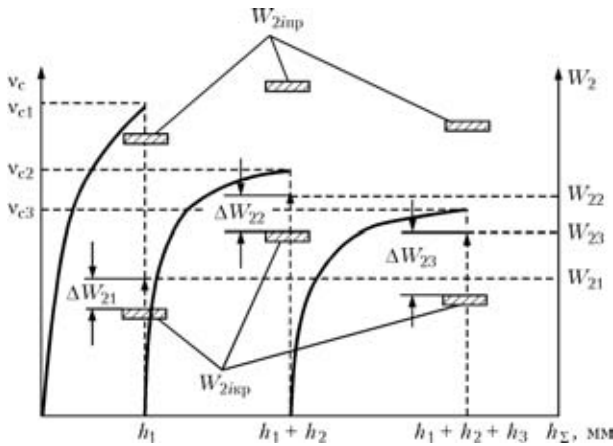


Рис. 4. Физическая модель оптимизации параметров сварки взрывом многослойных композитов [1, 10]: $v_{c1}-v_{c3}$; $W_{21}-W_{23}$ — соответственно скорость соударения и энергозатраты на пластическую деформацию металла на 1–3-й межслойных границах; $W_{2кр}$ и $W_{2л}$ — соответственно критические и предельные энергозатраты на i -й границе; $\Delta W_{21}-\Delta W_{23}$ — разность реальных и критических энергозатрат на 1–3-й границах композита

С целью выявления из множества полученных проектных решений наилучшего следует провести оптимизацию режимов, т. е. отыскать в пространстве проектных параметров (с учетом действующих ограничений) решения, реализация которых позволит получить многослойный композит с оптимальными свойствами — максимально возможная прочность при минимальных структурной и химической неоднородностях. При оптимизации задача поиска сложной совокупности большого числа параметров исследуемого процесса в условиях существенной его нестационарности сводится к минимизации целевой функции $M(\vec{X})$. Построение алгоритмической модели данной задачи большой размерности с установленными ограничениями основывается на требовании обеспечения при каждом i -м соударении в многослойном пакете энерговложений, достаточных для образования на этой границе прочного сварного соединения.

Наиболее целесообразно организованным режимом послыоного соударения в слоистых композиционных материалах, при котором энерговложение W_{2i} , реализуемое на всех границах композита, будет максимально приближено к критическим энергозатратам $W_{2кр}$, характерным для этих границ (рис. 4). Очевидно, что при таких условиях энерговложения в систему соударяющихся пластин будут минимальными, что, с одной стороны, максимально уменьшает вероятность развития на межслойных границах структурной и химической неоднородностей, а, с другой, снижает расход ВВ. В такой постановке задача оптимизации сводится к отысканию минимума целевой функции $M(\vec{X})$, являющейся суммой разностей реальных и критических энергозатрат на каждой i -й границе композита:

$$M(\vec{X}) = \sum_{i=1}^{i=n-1} (W_{2i} - W_{2кр}) = \sum_{i=1}^{i=n-1} \Delta W_{2i} \rightarrow \min \quad (15)$$

при ограничениях

$$W_{2кр} < W_{2i} < W_{2л} \quad (16)$$

В качестве проектных параметров \vec{X} удобно принять основные технологические (установочные) h_i , H и C , в зависимости от которых на каждом этапе оптимизации в соответствии с компьютерной моделью, включающей феноменологическую и кинематическую модели, а также математический аппарат расчета параметров, определяется значение $M(\vec{X})$.

С учетом производительности современной компьютерной техники для оптимизации может быть успешно применен метод случайного поиска в n -мерном пространстве проектных параметров, являющийся разновидностью метода Монте-Карло [23]. При этом на каждом этапе оптимизации с помощью генератора случайных чисел произвольно выбирается совокупность параметров: h_i и H , по которым ведется расчет кинематических и энергетических параметров процесса, а также подсчитывается значение целевой функции $M(\vec{X})$. Первое рассчитанное значение $M(\vec{X})$ выбирается в качестве критерия минимизации M , а при последующих итерациях текущее значение целевой функции сравнивается с M . Если полученное новое значение $M(\vec{X}) < M$, то происходит переименование $M = M(\vec{X})$, иначе текущий рассчитанный вариант отсеивается. Таким образом пошагово происходит улучшение целевой функции. При достаточно большом количестве итераций, исчисляющемся сотнями тысяч, можно считать, что будет получено проектное решение, близкое к глобальному оптимуму.

Следует отметить, что перед процедурой оптимизации на пространство проектных параметров накладывается ряд ограничений, например, по критической и предельной высоте зарядов ВВ, минимально и максимально допустимым сварочным зазорам и ряду других параметров, что значительно сокращает время расчета и количество итераций.

Таким образом, рассмотренные принципы расчета и оптимизации параметров сварки взрывом слоистых композитов материалов, базирующиеся на применении энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию металла ОШЗ при высокоскоростном соударении, в качестве универсального критериального параметра, увязывающего свойства свариваемых материалов и режимы сварки, служат теоретической основой для создания компьютерной модели исследуемого про-



цесса и соответствующих программных средств, позволяющих существенно уменьшить затраты на проектирование технологических процессов изготовления композиционных материалов с гарантированным качеством соединения составляющих слоев.

1. *Лысак В. И., Кузьмин С. В.* Сварка взрывом. — М.: Машиностроение, 2005. — 544 с.
2. *Дерибас А. А.* Физика упрочнения и сварки взрывом. — Новосибирск: Наука, 1980. — 220 с.
3. *Определение* параметров соударения плоских тел, металлических ВВ, в условиях сварки взрывом / А. А. Дерибас, В. М. Кудинов, Ф. И. Матвеев, В. А. Симонов // Физ. горения и взрыва. — 1967. — 3, № 2. — С. 291–298.
4. *Захаренко И. Д.* Сварка металлов взрывом. — Минск: Наука и техника, 1990. — 205 с.
5. *Соннов А. П.* Влияние исходной прочности соединяемых металлов на режимы их сварки взрывом // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. — Волгоград: ВолгПИ, 1989. — С. 3–7.
6. *Седых В. С., Соннов А. П.* Определение «нижней границы свариваемости» металлов при сварке взрывом // Там же. — Волгоград: ВолгГТУ, 1995. — С. 63–66.
7. *Роман О. В., Смирнов Г. В., Ушеренко С. М.* Динамика высокоскоростной деформации и кумулятивные эффекты при сварке металлов взрывом // Там же. — Волгоград: ВолгГТУ, 1998. — С. 51–64.
8. *Смелянский В. Я., Рыскулов М. Т., Кожевников В. Е.* К вопросу о расчете режимов сварки взрывом разнородных металлов // Там же. — Волгоград: ВолгПИ, 1986. — С. 54–62.
9. *Лысак В. И., Седых В. С., Трыков Ю. П.* Определение критических границ процесса сварки взрывом // Свароч. пр-во. — 1973. — № 5. — С. 6–8.
10. *Lysak V. I., Kuzmin S. V.* Explosive welding of metal layered composite materials. — Kiev: E. O. Paton Electric Welding Institute, 2003. — 117 p.
11. *Кузьмин С. В., Чувичлов В. А., Лысак В. И.* Временные условия формирования соединения при сварке взрывом // Перспектив. материалы. — 2005. — № 1. — С. 85–91.
12. *Седых В. С.* Классификация, оценка и связь основных параметров сварки взрывом // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. — Волгоград: ВолгПИ, 1985. — С. 3–30.
13. *Высокоскоростная деформация металлов* / В. И. Беляев, В. Н. Ковалевский, Г. В. Смирнов, В. А. Чекан. — Минск: Наука и техника, 1976. — 224 с.
14. *Комплексное исследование основных характеристик аммонита №6ЖВ с кварцевым песком применительно к сварке взрывом* / А. Д. Бабков, Ю. П. Бесшапошников, В. Е. Кожевников и др. // Физ. горения и взрыва. — 1992. — № 2. — С. 107–108.
15. *Лысак В. И., Шморзун В. Г.* Детонационные характеристики смесевых ВВ для сварки на основе аммонит №6ЖВ+наполнитель // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. — Волгоград: ВолгПИ, 1987. — С. 105–114.
16. *Сварка крупногабаритных биметаллических листов с использованием сварочных аммонитов типа АТ* / А. В. Крупин, В. Я. Соловьев, А. Г. Кобелев и др. // Тр. Всесоюз. межвуз. науч. конф. по обработке металлов взрывом, г. Москва, 9–12 сент. 1980 г. — М.: МИСИС, 1980. — С. 79–81.
17. *Аммониты для сварочных работ* / Л. В. Дубнов, Н. С. Бухаревич, А. И. Романов // Физико-хим. и взрывные процессы в машиностроении: Тр. МВТУ — М., 1973. — № 168. — С. 164–169.
18. *Лиуткин С. Н., Симонов В. А.* Особенности детонации плоских зарядов смесевых ВВ // Тр. 4-го Междунар. симп. по применению энергии взрыва для производства металлических материалов с новыми свойствами, ЧССР, Готвальдов, 1–4 окт. 1970 г. — Готвальдов, 1979. — С. 386–397.
19. *Дубнов Л. В., Бухаревич Н. С., Романов А. И.* Промышленные взрывчатые вещества. — М.: Недра, 1988. — 358 с.
20. *Седых В. С., Соннов А. П.* Расчет энергетического баланса процесса сварки взрывом // Физ. и химия обраб. материалов. — 1970. — № 2. — С. 6–13.
21. *Лысак В. И., Седых В. С., Трыков Ю. П.* Об оценке факторов, определяющих надежность процесса сварки взрывом // Свароч. пр-во. — 1979. — № 3. — С. 3–6.
22. *Расчет параметров соударения при сварке многослойных композиций* / С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, В. П. Багмутов, Т. Ш. Сильченко // Изв. Волгоград. гос. техн. ун-та. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. — 2004. — № 6, вып. 1(13). — С. 28–34.
23. *Соболев А. Г., Тимохов А. В., Федоров В. В.* Курс методов оптимизации. — М.: Наука, 1986. — 328 с.

The principles of calculation and optimization of the process of explosion welding of laminated metal composites are considered. The energy of plastic deformation of HAZ metal at high-speed collision was selected as a versatile criterial parameter correlating the properties of the materials being welded and welding modes.

Поступила в редакцию 16.10.2006,
в окончательном варианте 19.10.2006