

УДК 621.791.76: 621.7.044.2

С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, С. В. Хаустов, Т. Ш. Сильченко

ОБ ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ СВАРКИ ВЗРЫВОМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

Волгоградский государственный технический университет

При проектировании технологических процессов сварки взрывом двух- и многослойных композитов необходимо подбирать режимы, которые позволяют гарантированно получать прочноплотные и бездефектные соединения. 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), которые обеспечат получение качественного сварного соединения.

Целью настоящей работы явилось создание основных принципов расчета режимов сварки взрывом двух- и многослойных металлических композиционных материалов, гарантированно обеспечивающих получение прочного соединения.

Учитывая накопленный к настоящему времени обширный теоретический и экспериментальный материал и установленные аналитические взаимосвязи между величинами параметров различных групп, подобная задача, тем не менее, имеет ряд особенностей, обусловленных, в первую очередь, выбором универсального критериального параметра, который бы взаимоувязывал исходные свойства свариваемых материалов с прочностью получаемого соединения.

В качестве такого критерия основателями гидродинамического подхода [2 ... 4 и др.] был предложен критический угол соударения $\gamma_{кр}$, определяющий, по сути, положение нижней границы свариваемости определенной пары металлов в координатах $\gamma - V_k$, при этом для реализации равнопрочного соединения необходимо выполнение условия $\gamma > \gamma_{кр}$ (при $V_{к.кр} < V_k < c_0$):

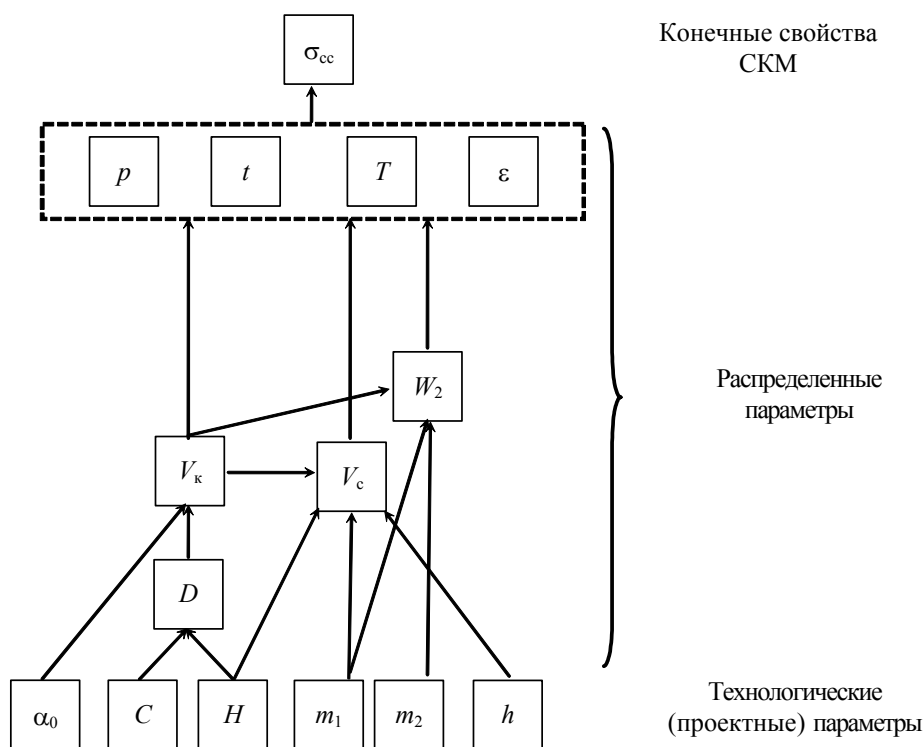


Рис. 1. Феноменологическая модель сварки взрывом двухслойного композита [1]:

α_0 – установочный угол между свариваемыми пластинами; C – состав взрывчатой смеси; H – высота заряда взрывчатого вещества (ВВ); m_1 и m_2 – соответственно единичные массы метаемой и неподвижной пластин; h – установочный (сварочный) зазор; D – скорость детонации ВВ; V_c и V_k – соответственно скорости соударения и контакта; W_2 – энергия, затрачиваемая на пластическую деформацию металла околошовной зоны; p , t , T и ε – соответственно давление, время деформирования, температура и степень пластической деформации металла в зоне соединения

$$\gamma_{кр} = 1,14 \sqrt{\frac{HV}{\rho V_k^2}}; \quad (1)$$

[3]

$$\gamma_{кр} = (0,6 \dots 1,2) \sqrt{\frac{HV}{\rho V_k^2}}; \quad (2)$$

[4]

$$\gamma_{кр} = \sqrt{\frac{\sigma_T}{\rho V_k (1-a)}}; \quad (3)$$

По мнению ряда других исследователей [6 ... 9] для любого произвольного сочетания одно- и разнородных материалов существует некоторая критическая скорость соударения $V_{с.кр}$, зависящая от пределов текучести и акустических жесткостей свариваемых металлов, превышение которой обеспечивает получение прочного соединения:

$$V_{с.кр} = \left[\frac{\rho_1 c_{01} + \rho_2 c_{02}}{\rho_1 c_{01}} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{0,2}}{\rho} \right)_2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{0,2}}{\rho} \right)_1} \right] \times$$

$$\times \frac{\rho_1 c_{01} + \rho_2 c_{02}}{\rho_1 c_{01} + 2\rho_2 c_{02}} \quad (4)$$

[5]

$$V_{с.кр} = \left[\frac{\rho_1 c_{01} + \rho_2 c_{02}}{\rho_1 c_{01}} \sqrt{\left(\frac{2\sigma_{0,2}}{\rho} \right)_2} + \sqrt{\left(\frac{2\sigma_{0,2}}{\rho} \right)_1} \right] \times$$

$$\times \frac{\rho_1 c_{01} + \rho_2 c_{02}}{\rho_1 c_{01} + 2\rho_2 c_{02}} \quad (5)$$

[6]

$$V_{с.кр} = \sqrt{\frac{2\sigma_T (\rho_1 \delta_1 + \rho_2 \delta_2)}{\rho_1 \delta_1 (\delta_1 + \delta_2)}}; \quad (6)$$

[7]

$$V_{с.кр} = \left(1 + \frac{\rho_1 c_{01}}{\rho_2 c_{02}} \right) \sqrt{\frac{S_{к1}}{2\rho_1}}. \quad (7)$$

[8]

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

По-видимому, пока единственным универсальным параметром такого рода, имеющим физический смысл, остается величина энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию металлов, W_2 , связывающая воедино параметры соударения и массы пластин, с одной стороны, и четко определяющей нижнюю границу свариваемости в зависимости от технологической деформируемости (критерия Астрова HV/δ) металлов значением $W_{2кр}$ [1, 10, 11] – с другой.

Следует отметить, что наряду с W_2 и $W_{2кр}$ достаточно перспективным критериальным параметром может выступать величина деформирующего импульса I_d [12], характеризующая степень развития пластической деформации металла околосшовной зоны и полноту протекания активационных

процессов на границе соединения. Сдерживающим обстоятельством в ее сегодняшнем использовании является недостаточное пока количество экспериментального материала для «увязывания» $I_{д.кр}$ со свойствами широкого круга конструкционных материалов.

Итак, приняв во внимание изложенное, 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 $(0,4 \dots 0,6)c_{0min}$ [13] (где c_{0min} – скорость звука в металле, меньшая из двух для выбранного сочетания). Наиболее часто V_k составляет 2000 ... 2500 м/с, причем для «трудносвариваемых» композиций, таких как титан + сталь, цирконий + сталь, алюминий + сталь, алюминий + медь и ряда других, следует стремиться к нижней границе этого диапазона.

Следующим важным и ответственным этапом является выбор типа ВВ, подробный анализ свойств которых приведен в работах [4, 5, 14...19 и мн. др.]. Здесь надо иметь в виду несколько обстоятельств. С позиции упрощения технологического процесса (исключение операции смешивания компонентов ВВ перед сваркой) предпочтительно применение взрывчатых веществ, выпускаемых промышленно, например, аммонита бЖВ, сварочных аммонитов типа А или АТ. Однако первый из них является достаточно мощным ВВ, и скорость детонации более 2500 м/с реализуется уже в плоских зарядах высотой ~12 ... 13 мм, в связи с чем, его использование оправдано при плакировании тонкими (до 1,5 ... 2 мм) металлическими слоями. Два других типа аммонитов при приемлемых диапазонах D (1200 ... 3100 м/с) имеют весьма малый срок хранения, что сказывается на стабильности детонационных характеристик. В этой связи в подавляющем большинстве случаев для решения практических задач в мировой практике используют свежеприготовленные смеси аммонита бЖВ (или его аналогов) с аммиачной селитрой, кварцевым песком, поваренной солью, тальком и др. 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 аммонита бЖВ + селитра можно использовать зависимость [1]

$$H = \left(\frac{D}{121,5 C^{0,492}} \right)^{3,17}, \quad (8)$$

где C – процентное содержание аммонита в смеси.

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 ее величина достаточно точно рассчитывается по эмпирической формуле [1]:

$$\rho_{ВВ} = -1,43 \cdot 10^{-5} C^2 - 1,22 \cdot 10^{-3} C + 1. \quad (9)$$

Далее для свариваемой пары материалов рассчитывают критическую величину энергозатрат на пластическую деформацию $W_{2кр}$ в МДж/м² [10]

$$W_{2кр} = 0,606 + 0,184 \ln(HB/\delta), \quad (10)$$

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

$$W_2 = \frac{\rho_1 \delta_1 \rho_2 \delta_2}{2(\rho_1 \delta_1 + \rho_2 \delta_2)} V_c \left[1 - \left(\frac{V_k}{c_0} \right)^2 \right] \quad (11)$$

относительно V_c и полагая $W_2 = W_{2кр}$:

$$V_{с.кр} = \sqrt{\frac{2(\rho_1 \delta_1 + \rho_2 \delta_2) W_{2кр}}{\rho_1 \delta_1 \rho_2 \delta_2 \left[1 - (V_k/c_0)^2 \right]}}, \quad (12)$$

где $\rho_1, \rho_2, \delta_1, \delta_2$ – соответственно плотности материала и толщины метаемой и неподвижной пластин; c_0 – скорость звука в металле.

По сути, полученное значение $V_{с.кр}$ определяет положение нижней (критической) границы сварки выбранной пары материалов с заданными толщинами (массами) пластин.

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

личину ΔW_2 . Обычно она составляет: для таких пар материалов, как сталь + титан, титан + медь, медь + алюминий, алюминий + сталь, алюминий + титан и некоторые другие – 0,3 ... 0,5 МДж/м²; для остальных материалов, имеющих широкий диапазон свариваемости, – 0,8 ... 1,0 МДж/м².

Подставив в (5) вместо $W_{2кр}$ значение $W_{2пр} = W_{2кр} + \Delta W_2$, рассчитывают предельное значение скорости соударения $V_{с.пр}$. При этом любое значение V_c из диапазона

$$V_{с.кр} < V_c < V_{с.пр} \quad (13)$$

должно обеспечивать при сварке образование равнопрочного соединения.

В идеальном случае наилучшими свойствами с точки зрения минимизации структурной и химической неоднородностей будут обладать соединения, полученные при $W_{2кр}$, однако при выборе 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 величин h и H всего 10% (это при зазоре 1 мм составляет всего 0,1 мм) способны «вывести» W_2 за нижнюю границу сварки на 15...20%. Особенно сильно влияние технологических погрешностей проявляется при малых отношениях h/H [21]. В связи с этим обстоятельством для повышения надежности процесса сварки изначально в расчеты (12) следует закладывать W_2 на 15 ... 20% больше критической.

Итак, выбрав из диапазона (13) значение V_c , нетрудно по уравнениям (14) с учетом (15) и (16) для одномерной модели метания или по (17) – для двумерной, рассчитать величину требуемого сварочного зазора h .

$$h = H \frac{(1 - \theta_V)^2}{(1 + 2\eta)\theta_V^2 - 1}, \quad (14)$$

$$\theta_V = \frac{1 + \eta(1 - V_c/D)}{1 + 2\eta} + \frac{\sqrt{\eta^2(1 - V_c/D)^2 - 2\eta V_c/D}}{1 + 2\eta}. \quad (15)$$

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

$$h = \frac{0,184H}{r \left[\frac{\left(\sqrt{\frac{k+1}{k-1}} - 1 \right) \pi}{4 \arcsin\left(\frac{V_c}{2D}\right)} - 1 \right] - 2,71}. \quad (17)$$

При этом возможна ситуация, когда подкоренное выражение в (15) окажется отрицательным. Это означает, что выбранное сочетание исходных данных (состав смеси и рассчитанная для выбранной D высота заряда H) не обеспечивают разгон метаемой пластины до необходимой V_c . В этом случае следует увеличить высоту заряда [по сути – η , входящую, в частности, в (15)] с одновременным «разбавлением» смесового ВВ 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 «напрямую» возможен лишь в одном частном случае при допущении, что метаемая пластина перед ее соударением со второй «вышла» на стационарный режим полета и не ускоряется продуктами детонации, т.е. остаточное давление $p_{ост} \rightarrow 0$. Близкая к такой ситуация в принципе может быть реализована при достаточно больших отношениях h_1/H (здесь h_1 – зазор на первой межслойной границе свариваемого композита). В этом случае (после определения V_c) для каждой меж-

слоистой границы рассчитывают в зависимости от механических свойств свариваемых материалов критические и предельные энергозатраты, а в зависимости от их значений – скорости соударения первого (метаемого) слоя со вторым (V_{cli}^{kp} и V_{cli}^{np}), обеспечивающие выделение на произвольной i -той границе композита энергий W_{2i} , равных соответственно W_{2ikp} и W_{2inp} [1, 11]:

$$V_{cli}^{kp(np)} = \sqrt{\frac{2 \sum_{j=1}^{i+1} m_j \sum_{j=1}^i m_j W_{2ikp(np)}}{m_1^2 m_{i+1} [1 - (V_k/c_{0i})^2]}} \quad (18)$$

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

Из полученных массивов значений скоростей определяют максимальное (из критических) и минимальное (из предельных). При этом выполнение условия «энергетической разрешимости» процесса сварки по одновременной схеме плакирования [1, 11]:

$$\max(V_{cl}^{kp}) < \min(V_{cl}^{np}) \quad (19)$$

автоматически означает, что при любом значении скорости соударения на первой границе, входящем в этот диапазон, на каждой межслойной границе композита будет выполнено «энергетическое» условие образования прочного соединения.

Невыполнение же неравенства (19) будет означать, что при данных исходных условиях реализация равнопрочности на всех границах композита проблематична, так как 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 разрешить двумя путями: изменить схему сварки на «обратную» или скорректировать соотношение толщин слоев в пакете.

Первый путь наиболее прост в реализации, но не всегда приемлем, так как 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.

Устранение «перекрывтия» диапазона $\max(V_{cl}^{kp}) \dots \min(V_{cl}^{np})$ по второму пути может быть достигнуто, в свою очередь, двумя способами: либо повышением $\min(V_{cl}^{np})$ за счет увеличения толщины (массы) $i+1$ -го слоя, либо снижением $\max(V_{cl}^{kp})$ путем уменьшения толщины $j+1$ -го слоя композиции [в данном случае i и j – индексы границ пакета, соответствующие $\min(V_{cl}^{np})$ и $\max(V_{cl}^{kp})$].

По скорректированным значениям $\min^*(V_{cl}^{np})$ или $\max^*(V_{cl}^{kp})$, при которых выполняется условие (19), рассчитывают новые значения единичных масс $i+1$ -го или $j+1$ -го слоев [1, 11]:

$$A = \frac{W_{2ikp}}{1 - (V_k/c_{0i})^2}, \quad (20)$$

где

$$A = \frac{W_{2ikp}}{1 - (V_k/c_{0i})^2}; B = \frac{W_{2jnp}}{1 - (V_k/c_{0i})^2}, \quad (21)$$

из которых определяют новые толщины соответствующих слоев композита, закладываемые в дальнейший расчет.

В более сложном случае, когда на поверхность свариваемого пакета после соударения первых двух пластин продолжает действовать остаточное давление продуктов детонации (ПД), расчетное определение режимов сварки взрывом является сложной и многоальтернативной задачей. При этом в отличие от предыдущей рассмотренной ситуации, когда заряд к моменту соударения метаемой пластины со второй (промежуточной) практически полностью «выработался», а скорости соударения на второй и последующих границах (пренебрегая стадией начального разгона) однозначно определяются величиной V_{cl} , здесь параметры соударения на каждой межслойной границе тесно связаны между

собой, и создание требуемых условий соударения на некоторой i -той межслойной границе определяется скоростной и «разгонной» ситуациями на всех предыдущих. Поясним это на примере простейшего случая сварки трехслойной композиции (рис. 2).

В рассмотренном примере фиксирования скорость соударения на первой границе $V_c = 350$ м/с может быть реализована различными сочетаниями высоты заряда (соответственно и состава смеси C для поддержания постоянной скорости детонации) и сварочного зазора h_1 (см. рис. 2, а ... з).

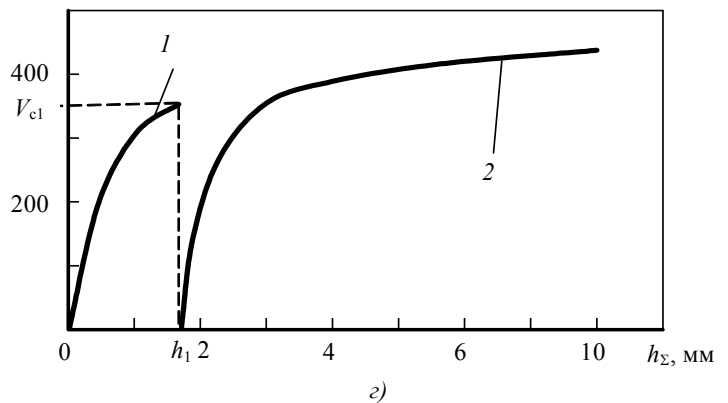
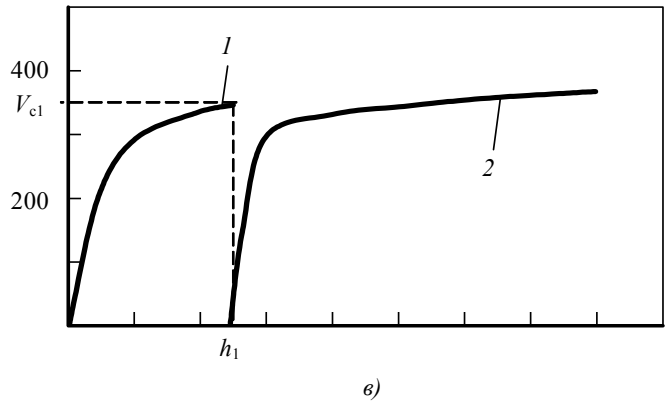
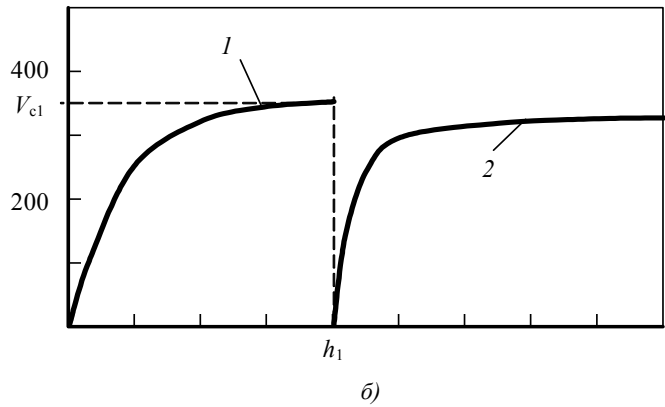
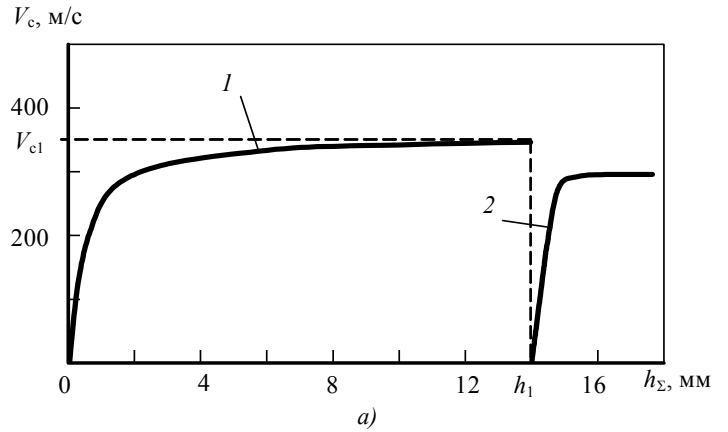


Рис. 2. Влияние фазы разгона метаемой пластины на характер изменения скорости соударения на второй межслойной границе трехслойного пакета ($\rho_1\delta_1 = 27$ г/см²; $\rho_2\delta_2 = 5,4$ г/см²):
 а – $H = 25$ мм; б – $H = 30$ мм;
 в – $H = 35$ мм;
 з – $H = 50$ мм; $V_k = 2500$ м/с

При этом в зависимости от фазы разгона метаемой пластины h_1/H на второй границе могут быть достигнуты различные по уровню максимальные скорости соударения: в рассматриваемом примере – от 290 м/с в случае полного разгона (см. рис. 2, а) до 450 м/с и более при $h_1/H = 0,034$ (см. рис. 2, з). Иными словами, если задаться скоростью соударения на второй межслойной границе, то достичь ее в принципе возможно множеством сочетаний параметров установочной подгруппы: H , C , h_1 , h_2 , т.е. задача имеет множество проектных решений. Аналогичным образом будут выглядеть рассуждения и для большего количества свариваемых по одновременной схеме слоев.

С учетом наших рассуждений принципиальный алгоритм расчета установочных параметров выглядит 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 смесового ВВ, несложно составить двумерную матрицу $2 \times n$ сочетаний H и C , соответствующих заданной D^* .

Затем по формуле (18) для каждой межслойной границы определяют диапазон значений критических (V_{ci}^{kp}) и предельных (V_{ci}^{np}) скоростей соударения, задавшись предварительно значениями $HВ/\delta$ для материала каждого слоя свариваемого пакета.

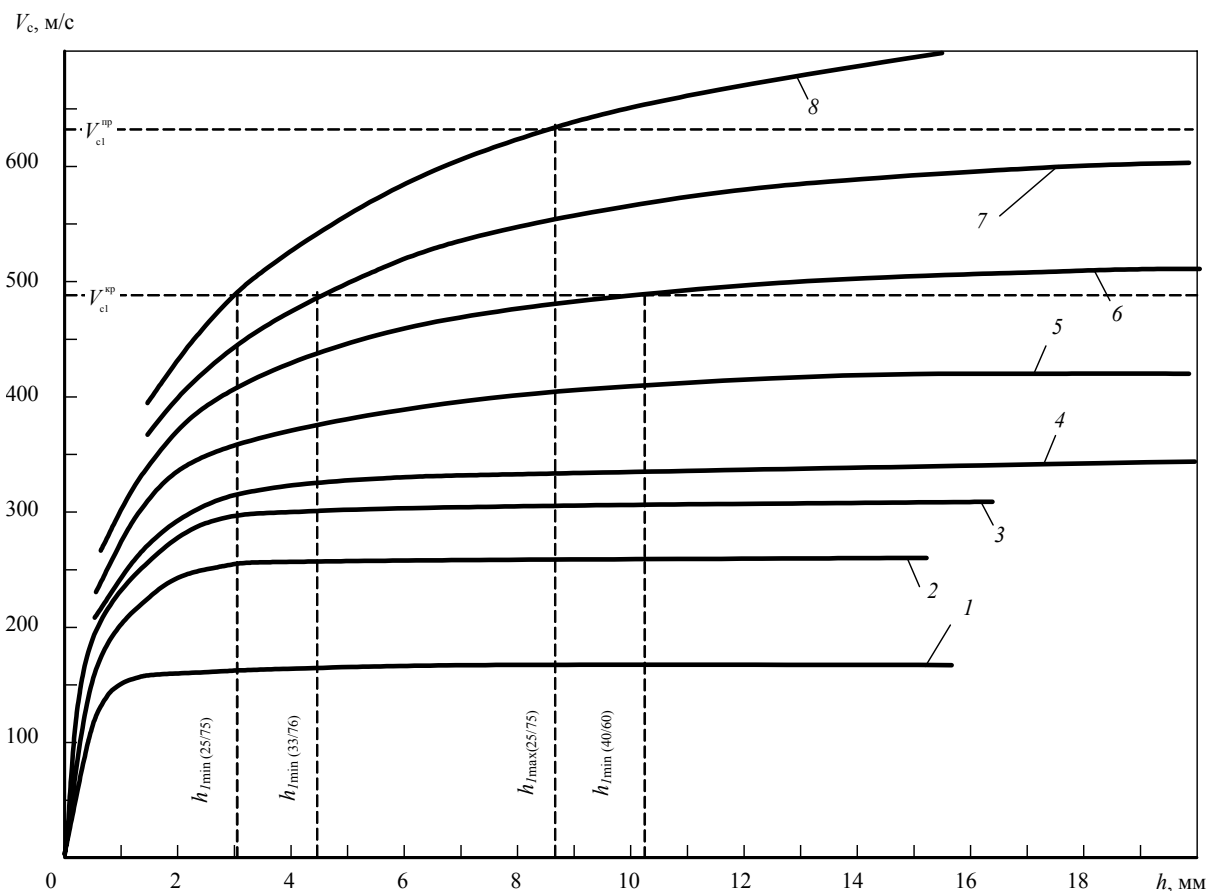


Рис. 3. Пример расчетного определения допустимых диапазонов установочных зазоров на первой границе h_1 для приемлемых составов взрывчатой смеси (аммонит 6ЖВ/гранулированная аммиачная селитра) при сварке взрывом композиции титан ($\delta = 5$ мм) + алюминий ($\delta = 2,0$ мм) + АМг6:

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

На следующем этапе рассчитывают для каждого сочетания H и C составленной ранее матрицы значения зазоров на первой границе, обеспечивающие реализацию на ней соответственно (V_{cl}^{kp}) и (V_{cl}^{np}), получая таким образом области допустимых значений H , C и h_1 (рис. 3). Так для ситуации, изображенной на рис. 3, приемлемыми являются смеси аммонита 6ЖВ с гранулированной аммиачной селитрой, содержащие не более 40% 6ЖВ; для смесей 25/75, 33/67 и 40/60 критическая величина ус-

* Следует отметить, что из технологических соображений целесообразно применять «стандартные» смеси, такие как 100:0, 90:10, 80:20 и т.п.

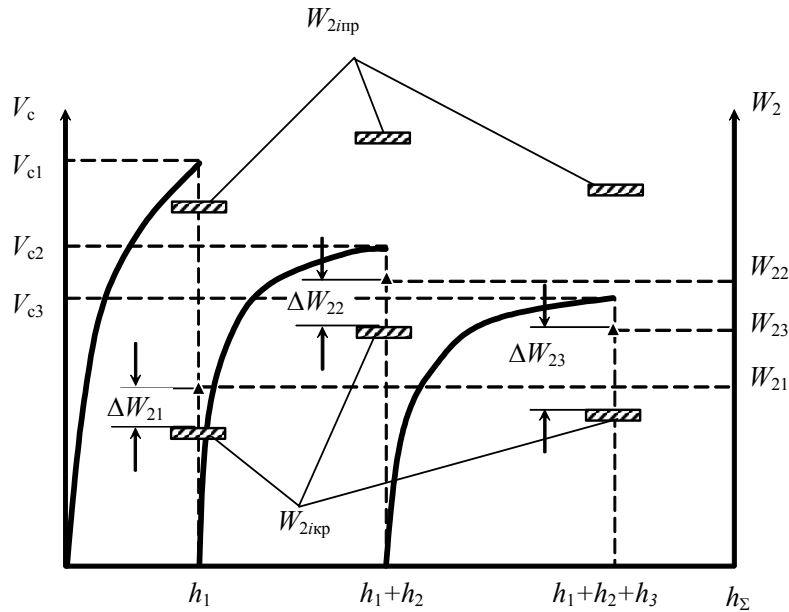


Рис. 4. Физическая модель оптимизации параметров сварки взрывом многослойных композитов [1, 11]

тановочного зазора на первой межслойной границе $h_{1кр}$ (в данном случае – между титаном толщиной 5 мм и алюминием толщиной 2,5 мм), при котором достигается скорость соударения, соответствующая критическим энергозатратам, составляет соответственно 3,0; 4,5 и 10,2 мм.

Предельная же величина зазора $h_{1пр}$, соответствующая предельным значениям энергозатрат при соударении первых двух слоев $W_{2пр}$ (о ее определении ранее было уже сказано), для смеси 25/75 составляет 8,7 мм (см. рис. 3). Для более насыщенных смесей (33/67 и 40/60) (для рассматриваемого примера) рассчитать ее невозможно, поскольку метаемая пластина выходит на пологий участок разгона, и дальнейшее неограниченное увеличение h_1 не приводит к заметному росту скорости V_{c1} *

Далее, по методике, изложенной в [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 оставляют для дальнейшего рассмотрения лишь те, которые удовлетворяют условию (13), 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 множество проектных решений либо ни одного. В первом случае из полученного массива режимов сварки технолог-разработчик выбирает какой-либо один, основываясь на своем опыте и квалификации, а также технологических возможностях. Во втором – необходимо произвести корректировку исходных условий, например, изменить сочетание толщин в композиции или перейти к последовательному плакированию.

С целью выявления из множества полученных проектных решений наилучшего необходимо провести оптимизацию режимов, т.е. отыскать в пространстве проектных параметров (с учетом действующих ограничений) решения, реализация которых в технологии позволяет получать оптимальные свойства многослойного композита – максимально возможную прочность при минимальном развитии структурной и химической неоднородностей. При оптимизации задача отыскания сложной совокупности большого числа параметров исследуемого процесса в условиях существенной его нестационарности сводится к минимизации целевой функции $M(\bar{X})$. Построение алгоритмической модели данной задачи большой размерности с установленными ограничениями основывается на требовании обеспечения при каждом i -м соударении в многослойном пакете энерговложения, достаточного для образования на этой границе прочного сварного соединения.

Наиболее целесообразно организованным режимом послойного соударения в слоистом композиционном материале (СКМ) можно признать такой, при котором реализуемое на всех границах композита энерговложение W_{2i} будет максимально приближено к величинам критических энергозатрат $W_{2икр}$, характерным для этих границ (рис. 4). Очевидно, что при таких условиях в систему соударяю-

* Обычно на практике из технологических соображений ограничивают величину установочных зазоров значением 15 мм, которое и принимается в рассмотренном примере за $h_{1пр}$ для смесей 33/67 и 40/60.

щихся пластин будет «введено» минимальное количество энергии, что, с одной стороны, до предела уменьшает вероятность развития на межслойных границах структурной и химической неоднородности, а, с другой, снижает расход взрывчатых материалов. В такой постановке задача оптимизации сводится к отысканию минимума целевой функции $M(\bar{X})$, являющейся суммой разностей реальных и критических энергозатрат на каждой i -той границе композита:

$$\begin{aligned} M(\bar{X}) &= \sum_{i=1}^{i=n-1} (W_{2i} - W_{2i\text{кр}}) = \\ &= \sum_{i=1}^{i=n-1} \Delta W_{2i} \rightarrow \min \end{aligned} \quad (22)$$

при ограничениях

$$W_{2i\text{кр}} < W_{2i} < W_{2i\text{пр}}. \quad (23)$$

В качестве проектных параметров (\bar{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 $M(\bar{X})$.

С учетом производительности современной компьютерной техники для оптимизации может

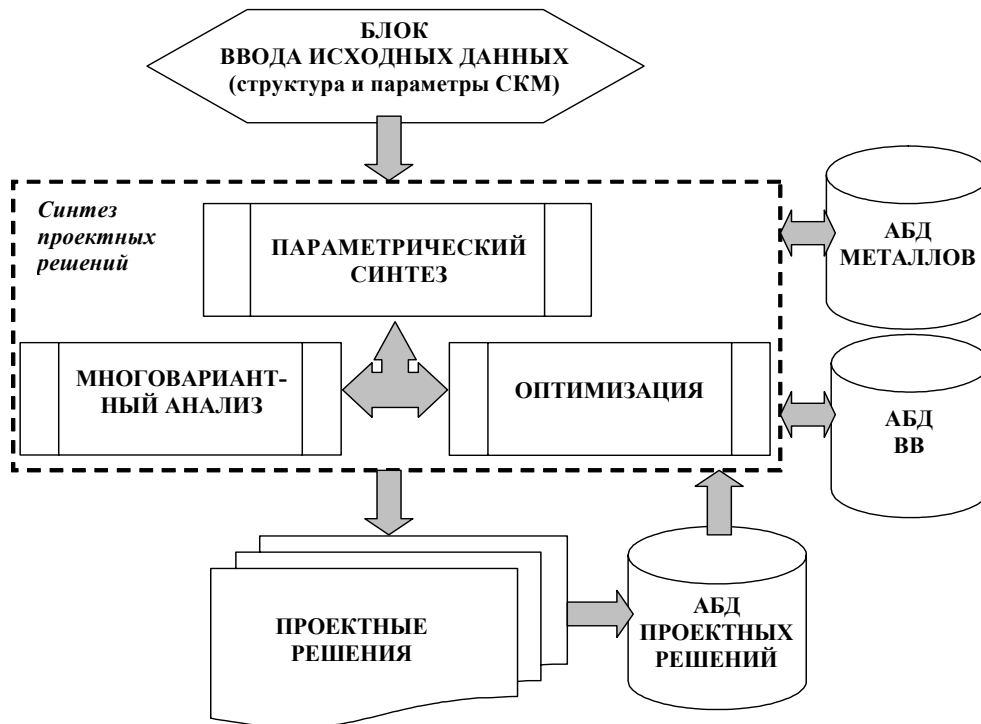


Рис. 5. Укрупненная структура автоматизированной системы *EW Calc*

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 произвольным образом выбирается совокупность параметров: h_i и H , по которым ведется расчет кинематических и энергетических параметров процесса, а также подсчитывается значение целевой функции $M(\bar{X})$. Первое рассчитанное значение $M(\bar{X})$ выбирается в качестве критерия минимизации M , и при последующих итерациях текущее значение целевой функции сравнивается с M .

Первое рассчитанное значение $M(\bar{X})$ выбирается в качестве критерия минимизации M , и при последующих итерациях текущее значение целевой функции сравнивается с M . Если полученное новое значение $M(\bar{X}) < M$, то происходит переназначение $M = M(\bar{X})$, иначе текущий рассчитанный вариант отсеивается. Так пошагово происходит улучшение целевой функции. При достаточно большом количестве итераций, исчисляющемся сотнями тысяч, можно считать, что будет получено про-

ектное решение, близкое к глобальному оптимуму. Следует отметить, что перед процедурой оптимизации на пространство проектных параметров накладывается ряд ограничений, например, по критическим и предельным высотам зарядов ВВ, минимально и максимально допустимым сварочным зазорам и ряд др., что значительно сокращает время расчета и количество итераций. Изложенные принципы расчета и оптимизации режимов сварки взрывом легли в основу автоматизированной компьютерной системы EW Calc, укрупненная структура которой представлена на рис. 5, а основной функциональный экран приведены на рис. 6.

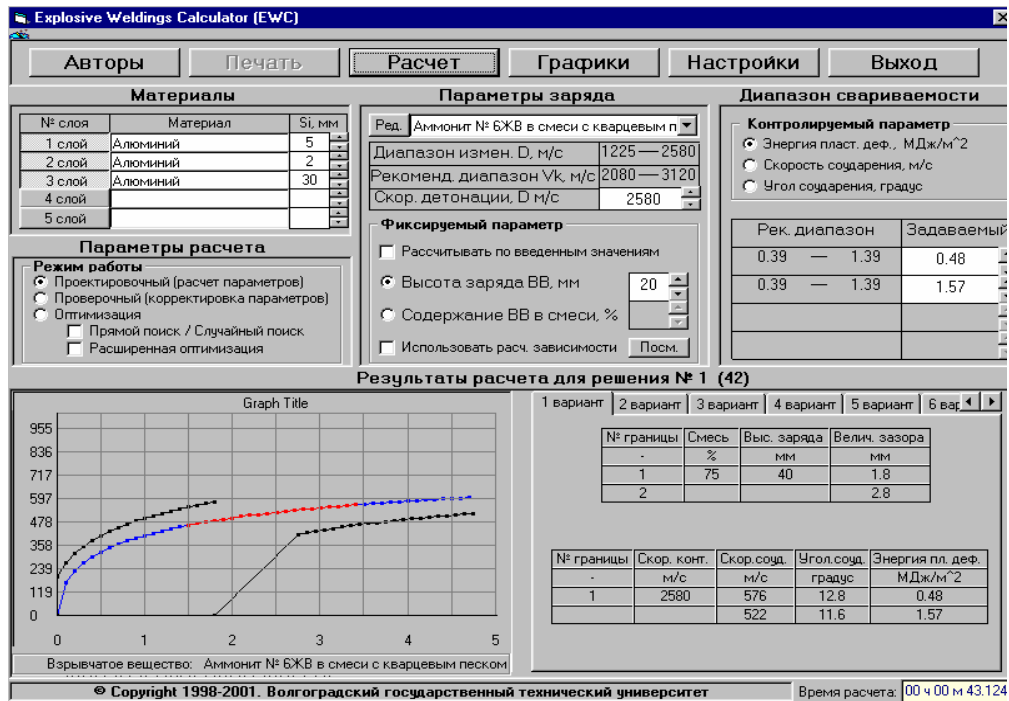


Рис. 6. Основной функциональный экран пакета прикладных программ по расчету и оптимизации параметров сварки взрывом многослойных металлических композиционных материалов EW Calc

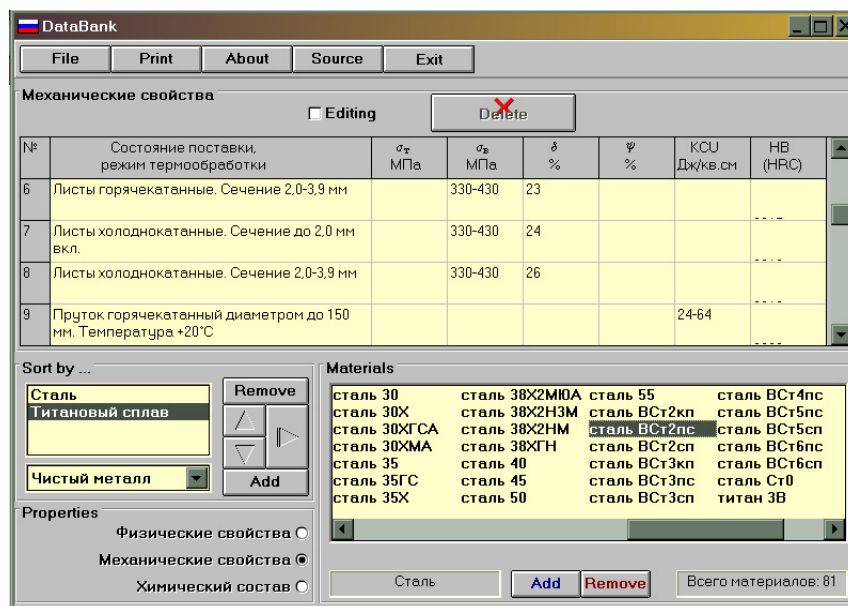
Система во взаимодействии с автоматизированными банками данных (свойств материалов, взрывчатых веществ и ретроспективных проектных решений, рис. 7, а, б) может работать в трех основных режимах:

1. Проектировочном, при котором исходными данными являются количество слоев в свариваемом композите, их наименование и толщина, требуется определить параметры сварки, обеспечивающие реализацию на каждой межслойной границе СКМ прочное соединение.

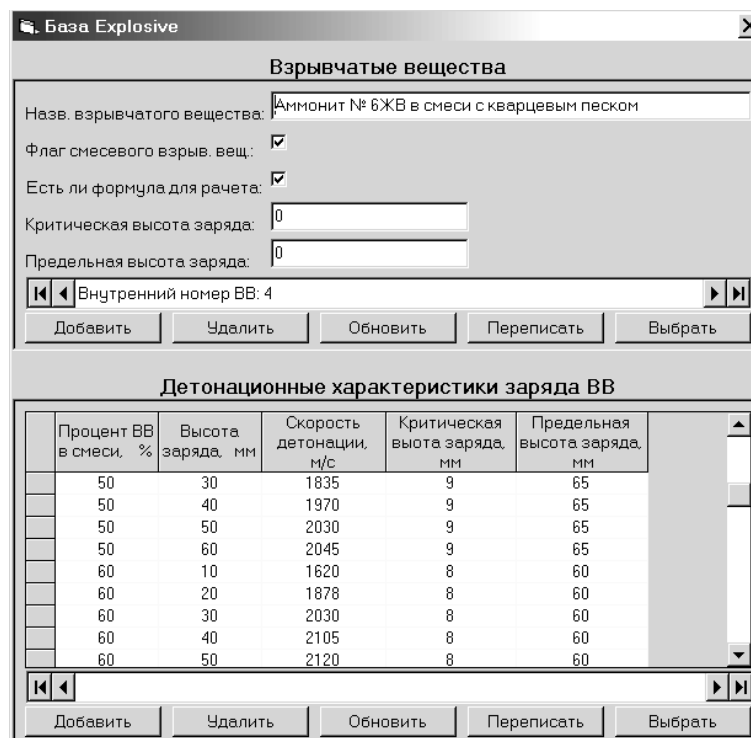
В этом режиме расчет ведется с использованием итерационных методов и соответствующих моделей, изложенных в настоящей статье.

2. Проверочном (или корректировочном), при котором решается обратная задача, т.е. по известным параметрам установочной группы (тип и высота заряда ВВ, сварочные зазоры на границах пакета, составленного из известных металлов заданных толщин) рассчитываются скорости соударения и энерговложения на всех межслойных границах. Этот режим применяется, в том числе, при корректировке параметров сварки, полученных на этапе проектирования или оптимизации, например, при замене рассчитанного состава смеси на стандартную взрывчатую смесь или округлении величин сварочных зазоров до целочисленных значений.

3. Оптимизационном, отыскивающим в пространстве проектных параметров (с учетом действующих ограничений) решения, реализация которых в технологии позволяет получать оптимальные свойства СКМ – максимально возможную прочность при минимальном развитии структурной и химической неоднородностей.



а)



б)

Рис. 7. Основные функциональные экраны АБД *DB Explosives* (а) и *DB Materials* (б)

Заключение

Рассмотренные принципы расчета и оптимизации параметров сварки взрывом металлических слоистых композитов, базирующиеся на применении энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию металла ОШЗ при высокоскоростном соударении, в качестве универсального критериального параметра, взаимоувязывающего свойства свариваемых материалов и режимы сварки, служат теоретической основой для создания компьютерной модели исследуемого процесса и соответствующих программных средств, позволяющих существенно уменьшить затраты на проектирование технологических процессов изготовления композиционных материалов с гарантированным качеством соединения составляющих слоев.

Библиографический список

1. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – М.: Машиностроение–1, 2005. – 544 с.
2. Дерibas, А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом / А. А. Дерibas. – Новосибирск: Наука, 1980. – 220 с.
3. Определение параметров соударения плоских тел, метаемых ВВ, в условиях сварки взрывом / А. А. Дерibas, В. М. Кудинов, Ф. И. Матвеев, В. А. Симонов // Физика горения и взрыва. – 1967. – Т. 3, №2. – С. 291-298.
4. Захаренко, И. Д. Сварка металлов взрывом / И. Д. Захаренко. – Минск: Наука і тэхніка, 1990. – 205 с.
5. Высокоскоростная деформация металлов / В. И. Беляев, В. Н. Ковалевский, Г. В. Смирнов, В. А. Чекан. – Минск: Наука и техника, 1976. – 224 с.
6. Соннов, А. П. Влияние исходной прочности соединяемых металлов на режимы их сварки взрывом / А. П. Соннов // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. трудов / ВолгПИ. – Волгоград, 1989. – С. 3-7.
7. Седых, В. С. Определение «нижней границы свариваемости» металлов при сварке взрывом / В. С. Седых, А. П. Соннов // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. трудов / ВолгГТУ. – Волгоград, 1995. – С. 63-66.
8. Роман, О. В. Динамика высокоскоростной деформации и кумулятивные эффекты при сварке металлов взрывом / О. В. Роман, Г. В. Смирнов, С. М. Ушеренко // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. трудов / ВолгГТУ. – Волгоград, 1998. – С. 51-64.
9. Смелянский, В. Я. К вопросу о расчете режимов сварки взрывом разнородных металлов / В. Я. Смелянский, М. Т. Рыскулов, В. Е. Кожевников // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. трудов / ВолгПИ. – Волгоград, 1986. – С. 54-62.
10. Лысак, В. И. Определение критических границ процесса сварки взрывом / В. И. Лысак, В. С. Седых, Ю. П. Трыков // Сварочное производство. – 1973. – №5. – С. 6-8.
11. Lysak, V. I. Explosive welding of metal layered composite materials / V. I. Lysak, S. V. Kuzmin; edited by V. E. Paton. – Kiev: E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2003. – 117 p.
12. Кузьмин, С. В. Временные условия формирования соединения при сварке взрывом / С. В. Кузьмин, В. А. Чувичилов, В. И. Лысак // Перспективные материалы. – 2005. – №1.
13. Седых, В. С. Классификация, оценка и связь основных параметров сварки взрывом / В. С. Седых // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. тр. / ВолгПИ. – Волгоград, 1985. – С. 3-30.
14. Комплексное исследование основных характеристик смесей аммонита №6ЖВ с кварцевым песком применительно к сварке взрывом / А. Д. Бабков, Ю. П. Бешапошников, В. Е. Кожевников, В. И. Лысак и др. // Физика горения и взрыва. – 1992. – №2. – С. 107-108.
15. Лысак, В. И. Детонационные характеристики смесевых ВВ для сварки на основе аммонит №6ЖВ+наполнитель / В. И. Лысак, В. Г. Шморгул // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. тр. / ВолгПИ. – Волгоград, 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. Всесоюзной межвуз. научн. конф. по обработке металлов взрывом. – М., 1980. – С. 79-81.
17. Аммониты для сварочных работ / Л. В. Дубнов и др. // Физико-химические и взрывные процессы в машиностроении: тр. МВТУ – М., 1973. – №168. – С. 164-169.
18. Ишуткин, С. Н. Особенности детонации плоских зарядов смесевых ВВ / С. Н. Ишуткин, В. А. Симонов // Труды 4-го междунар. симп. по применению энергии взрыва для производства металлических материалов с новыми свойствами. – ЧССР, 1979. – С. 386-397.
19. Дубнов, Л. В. Промышленные взрывчатые вещества / Л. В. Дубнов, Н. С. Бухаревич, А. И. Романов. – М.: Недра, 1988. – 358 с.
20. Седых, В. С. Расчет энергетического баланса процесса сварки взрывом / В. С. Седых, А. П. Соннов // Физика и химия обработки материалов. – 1970. – №2. – С. 6-13.
21. Лысак, В. И. Об оценке факторов, определяющих надежность процесса сварки взрывом / В. И. Лысак, В. С. Седых, Ю. П. Трыков // Сварочное производство. – 1979. – №3. – С. 3-6.
22. Кузьмин, С. В. Расчет параметров соударения при сварке многослойных композиций / С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, В. П. Багмутов, Т. Ш. Сильченко // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений». – 2004. – №6. – вып. 1(13).
23. Сухарев, А. Г. Курс методов оптимизации / А. Г. Сухарев, А. В. Тимохов, В. В. Федоров. – М.: Наука, 1986. – 328 с.