

УДК 621.791.13

В.Н. КОВАЛЕВСКИЙ, д-р техн. наук,
Г.М. СЕНЧЕНКО, канд. техн. наук,
В.С. НИСС, канд. техн. наук (БНТУ)

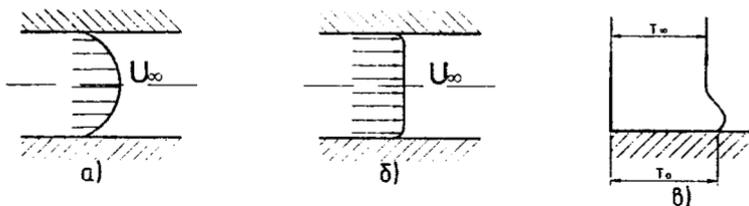
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И ТЕРМОНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ДЮРАЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16 И СТАЛИ 40Х

При изготовлении трубных слоистых композиционных материалов (КМ) методом сварки взрывом (СВ) важное значение имеют тепловые процессы, происходящие в приконтактной зоне, особенно при сварке цветных металлов и сплавов с низкой температурой плавления, когда возможное образование расплавов и участков с хрупкой интерметаллидной прослойкой препятствует получению качественного сварного соединения. Кроме того, при сварке материалов с резко отличающимися теплофизическими характеристиками с ростом температуры в зоне сварки увеличивается вероятность возникновения больших термонапряжений, снижающих конструкционную прочность готового изделия.

При СВ трубных заготовок основными источниками тепла, определяющими температуру свариваемых материалов в зоне сварки, являются:

- тепловое воздействие ударно-сжатого воздуха на свариваемые поверхности материалов;
- объемная пластическая деформация метаемой заготовки;
- локальная деформация приконтактных слоев в результате удара свариваемых заготовок.

Тепловое воздействие ударно-сжатого воздуха на свариваемые материалы можно рассмотреть на примере обтекания пластины высокоскоростным газовым потоком. Вблизи поверхности пластины имеется узкий пограничный слой с большими градиентами скорости и температуры (рисунок 1).



а – ламинарное движение; б – турбулентное движение;
в – температурный фронт в газовом потоке

Рисунок 1 – Структура газового потока при обтекании пластин

При СВ скорость точки контакта изменяется в пределах 2000–5000 м/с, а связанная с ней температура ударно-сжатого воздуха – 2500–8000 К [1]. При таких значениях температуры необходимо учитывать конвективный тепловой поток q_k и тепловой поток излучением $q_{изл}$:

$$q = q_k + q_{изл} = (St\rho C_p U_\infty + \sigma T_\alpha^3)(T_\alpha - T_s)$$

или

$$q = h_{cx}(T_\alpha - T_s), \quad (1)$$

где $h_{cx} = (St\rho C_p U_\infty + \sigma T_\alpha^3)$ – коэффициент теплоотдачи; St – число Стэнтона; ρ – плотность воздуха; C_p – теплоемкость воздуха; U_∞ – скорость основного газового потока; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·град⁴) – постоянная Стефана-Больцмана; T_α – температура адиабатически заторможенного воздуха; T_s – температура поверхности пластины.

Распределение температуры по сечению свариваемых пластин от действия ударно-сжатого воздуха представляет собой решение задачи нестационарной теплопроводности, получить которое можно с помощью численного метода в явном виде [2, 3]. По указанной методике тело разбивается на ряд ячеек с воображаемым узлом в центре. Записывая баланс энергии в каждом узле, можно получить уравнение, выражающее температуру в рассматриваемом узле через температуры в соседних узлах, геометрические характеристики и теплофизические свойства материала. В работе [3] на основании специально разработанной программы представлены результаты

определения температуры стали 40X и сплава Д16 от действия ударно-сжатого воздуха при СВ.

Нагрев материала в результате объемной пластической деформации зависит от степени деформации ε и физико-механических свойств материала. В предположении, что вся энергия, затраченная на деформацию, переходит в тепловую энергию, для материала матаемой трубной заготовки на основании первого закона термодинамики можно записать:

$$Q_i = \varepsilon_i \sigma_i, \quad (2)$$

где Q_i – удельная тепловая энергия; ε_i – деформация; σ_i – напряжение.

Обобщенная деформация в каждой точке материала равна [4]:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{d_{i0}}{d_i}, \quad (3)$$

где d_{i0} , d_i – диаметр расположения i -ой точки до деформации и после нее.

Учитывая, что напряжение при высокоскоростном деформировании определяется динамическим пределом текучести σ_d и подставляя (3) в (2), получим:

$$Q_i = \sigma_d \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{d_{i0}}{d_i}. \quad (4)$$

Зная удельную тепловую энергию для температуры материала в i -й точке можно записать:

$$T_i = T_0 + \frac{Q_i}{C_i \cdot \rho_i}, \quad (5)$$

где C_i , ρ_i – удельная теплоемкость и плотность материала в i -й точке.

Формулы (4) и (5) позволяют определить температуру материала в любой точке в зависимости от условий деформирования.

Таким образом, к моменту соударения свариваемых заготовок распределение температуры по сечению материалов можно с достаточной степенью точности рассчитать на основании приведенных выше формул (1)–(5).

Окончательное поле температур зависит от тепловыделения в зоне сварного шва в результате соударения заготовок, определить которое расчетным путем или экспериментально оказывается довольно сложно вследствие ударного характера взаимодействия, частичного выноса материала из зоны сварки и т.д.

Предлагаемая методика определения температуры свариваемых материалов основывается на следующих предположениях:

- температуры свариваемых материалов известны к моменту соударения;
- в результате соударения в течение промежутка времени Δt выделяется какое-то количество энергии Δq ;
- время тепловыделения Δt при заданных режимах соударения постоянно для любой точки и не зависит от длины свариваемых заготовок;
- источник тепла линейный, расположенный на границе свариваемых материалов;
- свариваемые заготовки являются полубесконечными и их охлаждение осуществляется кондуктивным теплопереносом.

На основании указанных предположений возможно моделирование на ЭВМ численным методом нагрева заготовок в результате соударения и их последующего охлаждения, для чего необходимо и достаточно знать на кривой охлаждения (в координатах: расстояние от границы сварки – максимальная температура) для одного из материалов координаты как минимум одной характерной точки. Такими точками могут быть граница расплава с $T_{пл}$, а также для сплава Д16 граница плавления легкоплавкой эвтектики $\alpha + \theta(Al_2Cu) + S(Al_2CuMg)$ с ее температурой плавления $T_{пл.эвт} = 506$ °С [5]. Последнее объясняется тем, что при превышении $T_{пл.эвт}$ эвтектика выделяется по границам зерен и влечет за собой снижение прочности и твердости сплава, не устранимое в последующем ни деформационной, ни термической обработкой. При температуре $T < T_{пл.эвт}$ также наблюдается падение прочности и твердости вследствие неполной закалки сплава, возможной при СВ ввиду больших скоростей охлаждения. В результате механические свойства по сечению дюралюминиевой заготовки распределяются неравномерно: максимум их приходится на слои, которые в процессе нагрева и охлаждения сплава имели температуру, близкую к $T_{пл.эвт}$. Измеряя микротвердость дюралюминиевого сплава по его сечению, можно определить

координаты точки (по максимальному значению микротвердости) с температурой плавления легкоплавкой эвтектики.

На рисунке 2 представлены результаты исследований микротвердости дюралюминиевого сплава Д16 при его сварке взрывом со сталью 40Х с определением толщины слоя Δx_1 , вынесенных из зоны сварки частиц алюминия, а также координат точки плавления Δx_2 сплава Д16 и точки плавления легкоплавкой эвтектики Δx_3 до границы сварки в зависимости от длины свариваемых заготовок при СВ стали 40Х и дюралюминиевого сплава Д16 по режимам: скорость точки контакта $v_k = 2622$ м/с, угол соударения $\gamma = 7,5^\circ$.

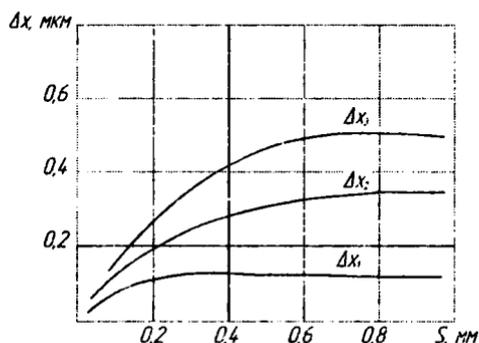


Рисунок 2 – Влияние длины заготовок на прогрев сплава Д16 при сварке взрывом со сталью 40Х

В результате определение температуры материалов в процессе сварки взрывом сводится к выполнению следующих операций:

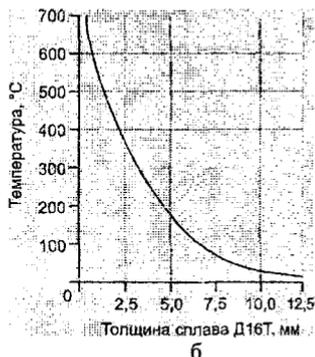
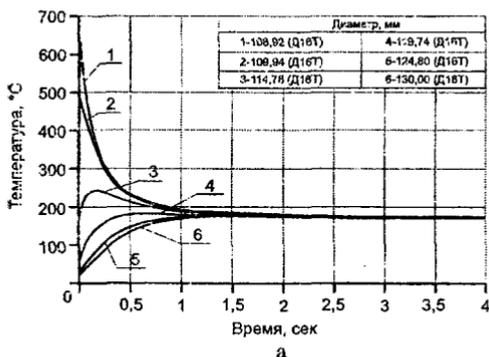
- изготовление образцов из дюралюминиевого сплава после СВ для исследования микротвердости в направлении, перпендикулярном границе сварки;
- исследование микротвердости сплава методом царапания по ГОСТ 21318-75 [6] с определением на инструментальном микроскопе минимальной толщины царапины;
- определение положения изотермы $T = 506$ °С в координатах: расстояние от границы сварки Δx_3 – расстояние от начала инициирования L ;
- расчет температуры свариваемых материалов к моменту соударения на основании формул (1)–(5);

- моделирование процесса нагрева заготовок в результате их соударения и процесса охлаждения из условия кондуктивного теплопереноса до совпадения расчетной изотермы $T = 506 \text{ }^\circ\text{C}$ с полученной экспериментальным путем.

По полученным координатам Δx_2 и Δx_3 , зная поле температур свариваемых материалов к моменту их соударения, рассчитанного с помощью ЭВМ, можно смоделировать процесс нагрева и охлаждения свариваемых материалов с определением их температуры в любой точке в любой момент времени. С этой целью использовали тестовый вариант программы для инженерных расчетов процессов сварки и термической обработки SYSWELD французской фирмы «ESI Group».

На рисунке 3 представлено распределение температуры в материалах при сварке взрывом сплава Д16Т и стали 40Х ($v_k = 2741 \text{ м/с}$, $\gamma = 8^\circ$, $S = 1000 \text{ мм}$). По времени (рисунок 3, а) скачки температуры наблюдаются в течение 0,1–0,2 с после соударения, через 1–2 с происходит выравнивание температуры по сечению материала, в дальнейшем материал охлаждается посредством конвективного теплопереноса. На рисунке 3, б представлено распределение температуры в сплаве Д16Т через 0,1 с после соударения.

В результате неравномерного нагрева материала слоистой композиции (вследствие различной степени деформации по толщине и неравномерного воздействия ударно-сжатого воздуха на свариваемые заготовки по длине), а также отличающихся физико-механических характеристик слоев КМ в последнем при охлаждении возникают остаточные напряжения, величина которых может превосходить прочность связи слоев. Учитывая длительность охлаждения слоистой композиции после сварки в условиях свободного конвективного теплообмена с окружающей средой, температура которого постоянна (в расчетах можно принимать 293 К), процесс определения термонапряженного состояния композиции можно рассматривать как несвязанный квазистатический [7], состоящий из двух этапов: определение температурных полей и определение напряженно-деформированного состояния, вызванного температурными полями.



а – в зависимости от времени; б – по сечению через 0,1 с после соударения
 Рисунок 3 – Распределение температуры в сплаве Д16Т после сварки взрывом

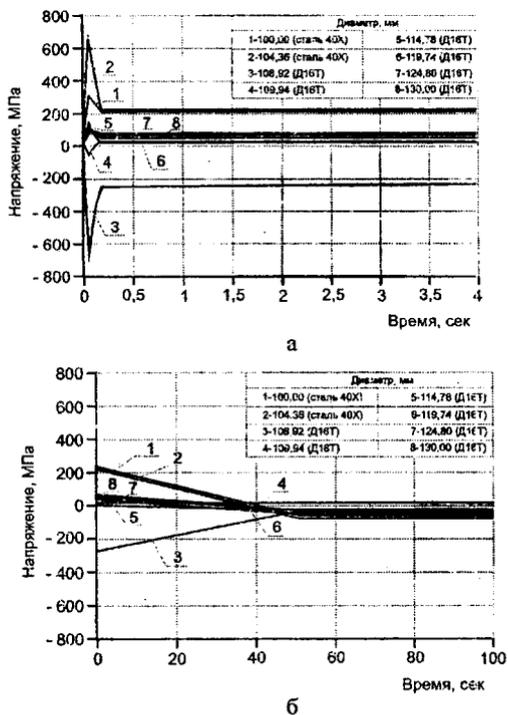
Для определения напряженно-деформированного состояния материала можно применить метод конечных элементов [8, 9], когда КМ представляется в виде отдельных слоев с фиксированными значениями температуры, физико-механических свойств и толщины каждого слоя. Например, в работе [10] для решения задачи термопластичности применяли шаговый алгоритм метода дополнительных деформаций, представляющий процесс нагружения тела как совокупность малых этапов.

В настоящей работе с целью определения термонапряжений использовали тестовый вариант программы для инженерных расчетов процессов сварки и термической обработки SYSWELD французской фирмы «ESI Group», которая моделирует термическую обработку металлов и сварочные процессы, внутренние напряжения, деформацию, твердость и прочность материалов, подвергнутых данным технологическим обработкам.

На основании установленных значений температуры материалов в процессе СВ, можно определить температурные напряжения, возникающие в КМ после сварки. На рисунке 4 представлено распределение температурных напряжений в КМ «сталь 40Х – сплав Д16».

Наибольшие напряжения (рисунок 4, а) возникают в районе сварного шва в течение короткого промежутка времени (~ 0,1 с), затем происходит релаксация и перераспределение напряжений (рисунок 4, б), а через 40–60 с уже можно оценить остаточные температурные напряжения, которые действуют в слоистой цилиндри-

ческой заготовке после сварки взрывом. В дальнейшем значения остаточных температурных напряжений учитываются при расчете слоистых цилиндрических заготовок на прочность. Аналогичные диаграммы можно получить для любых режимов СВ сплава Д16 в любой точке в любой момент времени.



а – в течение 4 секунд после сварки; б – в течение 100 с после сварки
 Рисунок 4 – Распределение напряжений в материалах при сварке взрывом сплава Д16 и стали 40Х

Литература

1. Физика взрыва / Ф.А. Баум [и др.]; под ред. К.П. Станюковича. – 2-е перераб. изд. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
2. Крейт, Ф. Основы теплопередачи / Ф. Крейт, У. Блэк. – М.: Мир, 1983. – 512 с.

3. Ковалевский, В.Н. Определение области сварки взрывом стали 40Х и сплава Д16 / В.Н. Ковалевский, Г.М. Сенченко // Сварка и родственные технологии: сб. науч. тр. – Минск, 2002. – Вып. 5. – С. 45–48.

4. Бондарь, Н.П. О пластической деформации в зоне соединения при плакировании взрывом / Н.П. Бондарь, В.М. Оголихин // Физика горения и взрыва. – 1985. – Т. 21. – № 2. – С. 147–151.

5. Ковалевский, В.Н. Термодинамические процессы при сварке взрывом углеродистых сталей и сплавов цветных металлов / Е. Н. Ковалевский, Г. М. Сенченко // Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр. – Минск: БНТУ, 2009. – Вып. 32. – С. 270–285.

6. Измерение микротвердости царапанием алмазными накоенчиками: ГОСТ 21318-75. – Введ. 02.12.75. – М.: Издательство стандартов, 1976. – 23 с.

7. Коваленко, А.Д. Термоупругость / А.Д. Коваленко. – Киев: Вища школа, 1975. – 216 с.

8. Метод конечных элементов в механике твердых тел / А.С. Сахаров [и др.]. – Киев: Вища школа, 1982. – 512 с.

9. Зенкевич, О.К. Метод конечных элементов в технике / О.К. Зенкевич. – М.: Мир, 1975 – 541 с.

10. Ковалевский, В.Н. Принципы создания эрозионностойких слоистых композиционных материалов методами импульсного нагружения и технология производства труб для изделий новой техники : дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.06 / В.Н. Ковалевский. – Минск, 1989. – 491 с.

УДК 621.70

Л.А. ИСАЕВИЧ, д-р техн. наук,
В.А. КОРОЛЬ, д-р техн. наук,
Д.М. ИВАНИЦКИЙ, канд. техн. наук,
В.И. ПУШКЕВИЧ (БНТУ)

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛОС ПАРАБОЛИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

В настоящее время широко распространен способ производства полос параболического профиля для малолистовых рессор большегрузных автомобилей, предложенный и запатентованный фирмой «Даниель Хойзер» (Германия) [1]. Сущность этого способа заклю-