

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ ЗАКЛАДНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПЛАСТМАСС*

Р. В. КОЛЕСНИК, М. В. ЮРЖЕНКО, Н. Г. КОРАБ, А. А. ШАДРИН, Ю. В. ЛИТВИНЕНКО

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Термостойкие полимеры находят все большее применение в аэрокосмической, автомобильной и других отраслях промышленности. Для процесса сварки термопластов важно изучение распределения температуры внутри нахлесточного сварного соединения. В работе выполнено моделирование термических и деформационных процессов при сварке закладным элементом листовых образцов из высокотехнологичного термостойкого полимера ZEDEX ZX-410 на основе полиэфиримида. Критерием для оптимизации параметров процесса служили температура плавления и температура деструкции полимерного материала. Показана хорошая корреляция результатов моделирования и экспериментальных данных, полученных в результате как тепловых исследований процесса формирования сварных соединений, так и механических испытаний уже самих сформированных сварных соединений. Библиогр. 9, рис. 12.

Ключевые слова: сварка закладным элементом, высокотехнологические полимеры, моделирование, испытания

С развитием техники и технологий в мире разрабатываются новые полимеры с улучшенными эксплуатационными свойствами, которые во многих сферах вытесняют металлы и другие традиционные материалы. В последние годы активно используются высокотехнологичные термостойкие полимеры класса полиариленов — полиэфиримид (PEI), полиэфирэфиркетон (PEEK), полифениленсульфид (PPS) и другие. Эти полимеры являются термопластами, в связи с чем для их соединения применяют различные виды сварки. Наиболее интенсивно развивается использование высокотехнологичных термостойких полимеров в аэрокосмической, автомобильной промышленности, а также машиностроении, где часто возникает необходимость выполнять протяженные швы сложной геометрической формы и в труднодоступных местах. Такие соединения обычно сваривают при помощи закладного нагревательного элемента.

Типичная схема процесса сварки закладным элементом представлена на рис. 1. Закладной элемент изготавливается из металлической проволоки, сетки или полосы и при его использовании является источником тепловой энергии, а после сварки он остается внутри сварного соединения. Нагрев закладного элемента чаще всего осуществляется за счет выделения теплоты при пропускании через него электрического тока от специального источника питания. Для качественного формирования сварного шва к внешней по-

верхности соединения прикладывается рабочее давление.

Плавление полимерного материала и формирование соединения при сварке закладным элементом происходит в замкнутом пространстве между поверхностями свариваемых деталей. При этом возможность контроля за нагревом и остыванием стыка ограничена, параметры процесса сварки как правило устанавливаются и регулируются по косвенным признакам (скорости нагрева закладного элемента, величине образуемого грата и т. д.). Основной проблемой при сварке закладным элементом является обеспечение оптималь-

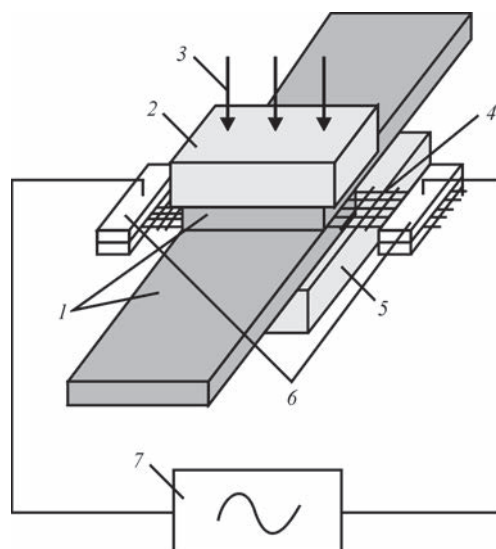


Рис. 1. Схема процесса сварки закладным элементом: 1 — образцы; 2 — прижим; 3 — рабочее давление; 4 — закладной элемент; 5 — основание; 6 — электроконтакты; 7 — источник питания

* В работе принимал участие К. О. Зворыкин, НТУУ «КПИ им. И. Сикорского».

ного количества теплоты, которая выделяется в зоне сварки. При сварке протяженных швов сложной формы существует высокая вероятность появления на одних участках соединения непрогретых зон и формирования непроваров, а на других — зон перегрева с деструктировавшим полимерным материалом. Поэтому предварительное математическое моделирование термомеханических процессов при сварке закладным элементом для определения допустимых параметров нагрева закладных элементов при сварке деталей различных геометрических параметров является актуальным.

Начало применения сварки закладным элементом для соединения деталей из высокотехнологичных полимеров сопровождалось появлением первых математических моделей процесса нагрева закладного элемента [1]. Это двумерные модели, разработанные для оценки в процессе сварки распределения температуры по поверхности ленточных закладных элементов, изготовленных из металла или углеволоконного композита на основе РЕЕК.

В дальнейшем разработаны трехмерные тепловые модели процесса сварки закладным элементом, которые уже учитывали теплопроводность полимерного материала, тепловые потери и скрытую теплоту. Отмечались трудности моделирования поверхностей контакта между закладным элементом и свариваемыми деталями, которые описывались на основе физического понятия теплопроводности разрыва. Известны трехмерные модели тепловых процессов при сварке закладным элементом полимерных композиционных материалов на основе РЕЕК и РЕИ с предварительной подготовкой закладного элемента путем укладки на него пленки из основного полимерного материала [2].

Аналогичные работы выполнены для случаев сварки многослойных стекловолоконных композитов на основе РЕЕК и РЕИ при помощи металлической сетки [3, 4]. Модели динамического распределения температуры по поверхности закладного элемента использовались для определения допустимых и критичных параметров процесса сварки. Критериями для оптимизации параметров служили физические характеристики полимера матрицы – температуры плавления и деструкции, адекватность моделирования оценивали сравнением с экспериментальными данными. По результатам математического моделирования определяли области («окна») оптимальных значений основных параметров процесса терморезисторной сварки (удельной мощности питания и длительности нагрева) для закладных элементов из металлической сетки разных типоразмеров [5].

Украина является одной из немногих стран в мире с собственной аэрокосмической промышленностью, однако исследования по сварке закладным элементом высокотехнологичных полимерных материалов у нас до настоящего времени не проводились. В данной работе впервые проведены отечественные экспериментальные работы и моделирование процесса сварки закладным элементом термостойкого полимерного материала ZX-410 торговой марки ZEDEX на основе РЕИ. В отличие от зарубежных работ [1, 3], в данной работе при моделировании процесса терморезисторной сварки дополнительно определялось влияние тепловой энергии, выделяемой закладным элементом в процессе сварки, на величину остаточной пластической деформации и прогнозировались потенциальные зоны начала разрушения сварного соединения. В экспериментальной части работы изучены основные теплофизические параметры используемого полимерного материала и их поведение в зависимости от температуры. Далее полученные данные использовались как базовые для разработки моделей. Для оценки адекватности моделирования тепловых процессов проведена серия экспериментальных работ по сварке нахлесточных соединений с синхронным измерением температуры в нескольких точках непосредственно внутри сварного соединения и регистрацией тепловых полей путем съемки в инфракрасном спектре.

Экспериментальная часть. Материалы. В работе использовали листовой полимерный материал ZX-410 на основе высокотехнологичного термостойкого РЕИ. Основные термомеханические характеристики этого материала при температуре 20 °С, декларируемые производителем, следующие: плотность ρ — 1,33 кг/дм³; прочность при разрушении σ_b — 101 МПа; относительное удлинение при разрушении δ — 25 %; модуль Юнга E — 3368 МПа; максимальная рабочая температура $T_{\text{макс}}$ — 180 °С; температура стеклования $T_{\text{ст}}$ — 210 °С; температура плавления $T_{\text{пл}}$ — 320 °С; коэффициент термического расширения α — $4,0 \cdot 10^{-5}$ 1/К (при температуре до 0 °С) и $5,8 \cdot 10^{-5}$ 1/К (при температуре 0...50 °С); коэффициент теплопроводности λ — 0,25 Вт/(м·К); коэффициент теплоемкости c_p — 1,85 кДж/(кг·К).

При моделировании тепловых процессов важно учитывать существенную зависимость коэффициента теплопроводности λ и коэффициента теплоемкости c_p полимерного материала от значений температуры. Температурные зависимости теплофизических коэффициентов материала ZX-410 определены экспериментальным путем.

Коэффициент теплопроводности λ при разных температурах определяли при помощи универсального динамического калориметра IT-400, в котором

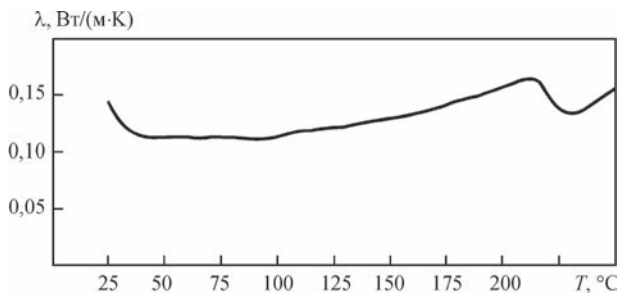


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности λ полимерного материала ZX-410 от температуры

измерения проводятся с монотонным линейным увеличением температуры. Для проведения измерений из исследуемого материала изготавливали образцы в виде дисков диаметром 15 мм и высотой 1,2 мм, которые непосредственно перед измерениями кондиционировали в течение суток при температуре 22 °С. Из-за технических ограничений прибора коэффициент λ измеряли в температурном диапазоне 22...250 °С через каждые 5 °С.

Полученная температурная зависимость λ приведена на рис. 2. Как видно, наблюдается начальное резкое снижение коэффициента теплопроводности с ростом температуры и последующая стабилизация его значения. По достижению температуры 100 °С начинается монотонный рост коэффициента λ вплоть до температуры стеклования материала (приблизительно 217 °С [6]), где наблюдается экстремум графика, снижение и последующий рост значений λ .

Температурную зависимость коэффициента теплопроводности c_p материала ZX-410 изучали методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) [7] на приборе DSC Q2000 производства компании TA Instruments (США) в инертной атмосфере газообразного азота повышенной чистоты. Измерения проводили в диапазоне температур 40...450 °С с постоянной скоростью нагрева 20 °С/мин. Перед измерениями образцы массой 10 мг кондиционировали в течение суток при температуре 22 °С и взвешивали на электронных весах ANG50С с точностью 0,0001 г.

Полученная температурная зависимость коэффициента теплоемкости приведена на рис. 3. На кривой проявляются два пика при $T = 220$ и 326 °С. Пик при $T = 220$ °С объясняется таким тепловым процессом, как расстеклование аморфной фазы PEI, а при $T = 326$ °С плавлением его кристаллической фазы. Измеренная величина температуры стеклования практически совпадает со значением, полученным при определении коэффициента теплопроводности (рис. 2). При расстекловании образуется локальный максимум коэффициента теплоемкости, который в этом случае связан с восстановлением энтальпии [8], когда плотность полимера возрастает, а его свободный объем уменьшается [9]. Процесс плавления кри-

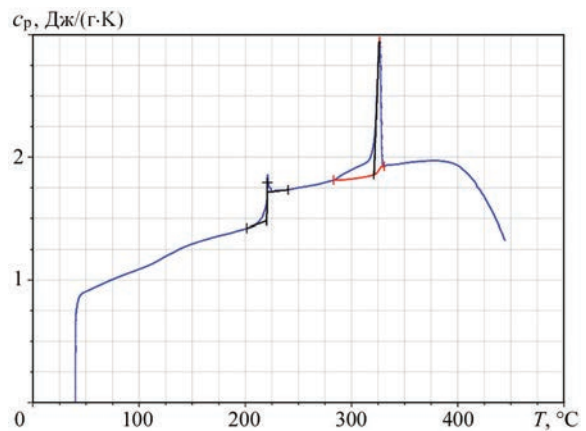


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоемкости c_p полимерного материала ZX-410 от температуры

сталлической фазы с энергией $\Delta H = 96$ Дж/г имеет двустадийный характер. Процесс предплавления в температурном диапазоне 280...320 °С свидетельствует о наличии в полимере определенной межфазной связи и кристаллитов сложной структуры.

Экспериментальная установка для сварки закладным элементом. Экспериментальная установка собрана в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1. Листовые образцы из полимерного материала ZX-410 размером 25×100 мм, толщиной от 8 мм сваривали внахлест. В качестве закладного элемента использовали металлическую плетеную сетку из высоколегированной стали 12Х18Н9Т, изготовленную в соответствии с требованиями ГОСТ 3826 и следующими параметрами: диаметр проволоки 0,25 мм, проходной размер ячейки 0,8 мм, удельное сопротивление материала 0,7...0,8 Ом·мм²/м. Размеры закладного элемента составляли 25×60 мм, размеры сварного соединения 25×25 мм. Питание осуществлялось источником переменного тока сетевой частоты 50 Гц с регулируемыми диапазонами напряжения 1...50 В и силы тока 5...45 А. Рабочее давление при сварке составляло 0,2 МПа.

Измерение температуры. Измерение температуры в процессе сварки закладным элементом проводили в трех характерных точках внутри сварного соединения (рис. 4). Точка 1 предназначена для измерения температуры закладного элемента и расположена в непосредственной близости от его продольной проволоки. Точка 2

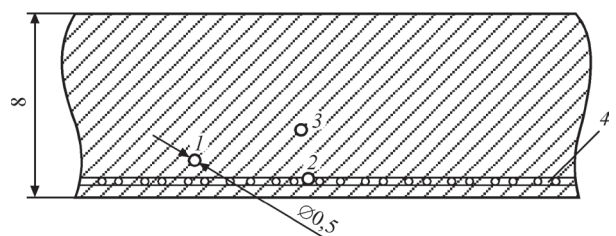


Рис. 4. Точки измерения температуры в процессе сварки закладным элементом (1–3); 4 — продольные проволоки сетки закладного элемента

расположена в центре ячейки сетки, а точка 3 — в полимере над закладным элементом.

Для температурных измерений использовали термопары ТХК (Тип L, диаметр 0,5 мм). Фиксация и запись сигналов трех термопар осуществлялась при помощи многоканального прибора ОВЕН УКТ-38, подключенного к компьютеру. Температурное поле видимых поверхностей сварного соединения также фиксировали при помощи тепловизора DT-918.

Механические испытания. В мировой практике, в связи с отсутствием специального норматива, для механических испытаний нахлесточных сварных соединений листовых полимерных материалов, как правило, используют норматив, разработанный для клеевых соединений ASTM D1002-10. В соответствии с ним для нахлесточных соединений определяют механическую прочность на сдвиг LSS (англ. lap shear strength). Также для определения прочности клеевых соединений на сдвиг и отрыв разработан аналогичный ГОСТ 14759.

В данной работе механические испытания нахлесточных швов на растяжение проводили в соответствии с требованиями упомянутых нормативов на разрывной машине FP-10 (Германия) со скоростью перемещения подвижного зажима 25 мм/мин. Испытывали как целые сварные соединения, так и вырезанные из них образцы в виде продольных полос.

Математическая модель. Для моделирования термомеханических задач распределения тепла, развития деформаций и напряжений могут использоваться различные комплексы программного обеспечения, такие как COMSOL Multiphysics, ANSYS и Abaqus FEA. В данной работе использовался Abaqus FEA. Программный комплекс Abaqus ориентирован на решение самых сложных и ответственных задач, с учетом всех видов нелинейностей, а также на проведение многодисциплинарного статического и динамического анализа в рамках единого алгоритма. Такая концепция выгодно отличает Abaqus от других программ подобного уровня (программный комплекс ANSYS для анализа сильно нелинейных и быстротекущих процессов использует внешнюю программу LS-DYNA), что позволяет с помощью Abaqus в рамках единого подхода решать многоцелевые задачи, сочетая преимущества явной и неявной схем конечно-элементного анализа и их комбинацию.

При построении модели закладной нагревательный элемент из плетеной металлической сетки упрощенно моделировался как гомогенная и изотропная металлическая полоса. Нагрев закладного элемента при пропускании через него электрического тока моделировался как объемное выделение теплоты, эквивалентной приложенной

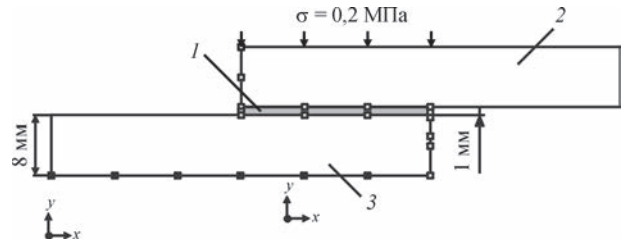


Рис. 5. Схема двумерной модели нахлесточного соединения при сварке закладным элементом: 1 — закладной элемент; 2 — образец 1; 3 — образец 2

электрической мощности. Критерием для оптимизации параметров служили температура плавления и температура деструкции полимерного материала ZX-410. Использовали двумерную модель соединения, которая приведена на рис. 5. Размеры свариваемых образцов составляли 8×25×50 мм, величина рабочего давления 0,2 МПа. В соответствии с экспериментальными данными время прогрева принималось равным 100 с.

Для расчета использовался подмодуль Abaqus/Standard — один из двух основных решателей программного комплекса Abaqus, использующий неявную форму метода конечных элементов, которая описана ниже.

В качестве граничных принимались следующие условия: к основанию образца 2 (рис. 5) прикладывалось ограничение, которое предотвращало его перемещение в направлении оси X и Y, а также вращение вокруг оси Z; к краям образцов прикладывался поверхностный тепловой поток, который характеризовал теплоотдачу в окружающую среду (коэффициент теплопроводности воздуха).

Результаты и обсуждение. Процесс сварки закладным элементом происходит в стационарном режиме, без перемещения расплавленного материала. Передача тепла от нагревательного закладного элемента происходит главным образом за счет теплопроводности полимерного материала. Поэтому в использованной двумерной модели осуществляли решение стационарного уравнения теплопроводности методом конечных элементов. При этом использовали экспериментально полученные температурные зависимости теплофизических коэффициентов изучаемого материала (рис. 2, 3).

Распределение тепла от нагревательного элемента в полимерную матрицу подчиняется закону теплопроводности Фурье:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (1)$$

где q — тепловой поток; A — площадь, по которой распределяется тепловой поток; k — теплопроводность материала; $\partial T / \partial x$ — температурный градиент в направлении теплового потока.

Определяющее уравнение равновесия для конечно-элементной модели имеют следующий вид:

$$P^N - I^N = M^{NM} \ddot{u}^M, \quad (2)$$

где P^N — вектор внешней силы; I^N — вектор внутренней силы; $M^{NM} \ddot{u}^M$ — вектор силы инерции материала.

Внутренние силы определяются уравнениями ниже:

$$I^N = \int_V \beta^N \sigma V, \quad (3)$$

где V — объем модели; $\sigma(x)$ — напряжения в точке x ; $\beta^N(x)$ — степень деформации — перемещения, которое определяется в интерполяционных предположениях в элементе $\dot{\epsilon} = \beta^N \dot{u}^n$.

Динамическое равновесие предполагает, что силы Даламбера значительны:

$$M^{NM} \ddot{u}^M, \quad (4)$$

где M^{NM} — матрица масс; \ddot{u}^M — вектор ускорения.

Статическое равновесие означает, что силы Даламбера изменяются медленно, постоянны со времени, а $M^{NM} \ddot{u}^M \approx 0$.

Abaqus/Standard использует Ньютоновский метод для решения статического равновесия. Принимается, что речь идет о предполагаемом решении на итерации i , $u_{(i)}^N$, поэтому ряд Тейлора будет иметь следующий вид:

$$P^N - I^N + \left(\frac{\partial P^N}{\partial u^M} - \frac{\partial I^N}{\partial u^M} \right) c^M + \dots = 0, \quad (5)$$

который может быть записан как

$$P^N - I^N = K^{NM} c^M, \quad (6)$$

где $K^{NM} = \frac{\partial I^N}{\partial u^M} - \frac{\partial P^N}{\partial u^M}$ — жесткость системы, или матрица якобиана; c^M — поправка к решению ступеней свободы N .

Прирост Δu корректируется согласно уравнению

$$\Delta u_{(i+1)}^N = \Delta u_{(i)}^N + c_{(i)}^N. \quad (7)$$

Итерации повторяются на каждом инкременте до достижения конвергенции, что означает:

- контактные условия удовлетворены в каждой точке;
- достигнуто равновесие сил в каждой точке;
- достигнуто равновесие моментов в каждой точке.

Точное выполнение Ньютоновского метода включает несимметрическую матрицу Якобиана, как это показано на представленной матрице связанных уравнений:

$$\begin{pmatrix} K_{uu} & K_{u\theta} \\ K_{u\theta} & K_{\theta\theta} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_u \\ R_\theta \end{Bmatrix}, \quad (8)$$

где Δu , $\Delta \theta$ — соответственно поправки для нарастающих перемещения и температуры; K_{ij} — подматрицы связанной матрицы Якобиана; R_u , R_θ

— механический и термический вектор невязки соответственно.

Основное уравнение теплопередачи в матричном виде можно записать так:

$$[C] \{\dot{T}\} + [K] \{T\} = \{Q\}, \quad (9)$$

где $[C]$ — матрица удельной теплоемкости; $\{\dot{T}\}$ — производная температуры по времени; $[K]$ — матрица эффективной теплопроводности; $\{T\}$ — вектор узловых температур; $\{Q\}$ — вектор эффективного теплового потока в узле.

Для стационарного теплового анализа, когда температура не зависит от времени, уравнение теплопередачи упрощается к следующему виду:

$$[K] \{T\} = \{Q\}. \quad (10)$$

Следует отметить что решение уравнения теплопроводности проводилось последовательно в разные моменты времени. На начальной стадии нагрева температура распределяется по ширине нагревательного элемента достаточно равномерно (рис. 6, а, в). К окончанию процесса нагрева сварного соединения возрастает неравномерность распределения температуры (рис. 6, б, в), центральные области прогреты больше. Это связано с более интенсивным отводом тепла по краям закладного элемента. По завершению процесса охлаждения сварного шва общий уровень температуры в зоне сварки снижается, однако температурное поле принимает сферическую форму с максимумом в центре.

Для проверки адекватности результатов, полученных при моделировании тепловых процессов, проводили последовательную фиксацию изменения температурного поля боковой поверхности сварного соединения в процессе сварки в инфракрасном диапазоне при помощи тепловизора. На инфракрасных фотографиях видно, что с началом процесса сварки (рис. 7, а) преимущественно нагревается свободная зона закладного элемента с постепенным оплавлением полимерного материала на краю соединения. В дальнейшем с прогревом закладного элемента максимум температуры концентрируется в центральной части сварного соединения, что соответствует данным, полученным при математическом моделировании. Под действием рабочего усилия прижатия в этой части сварного соединения образуется грат. На конечной стадии прогрева и после остывания (рис. 7, б) тепловое поле приобретает эллипсоидную форму с максимумом в центре. Полученные экспериментальные данные демонстрируют тепловое поле на боковой поверхности сварного соединения, поэтому несколько отличаются от данных предложенной расчетной модели, где рассматривается тепловое поле внутри сварного соединения.

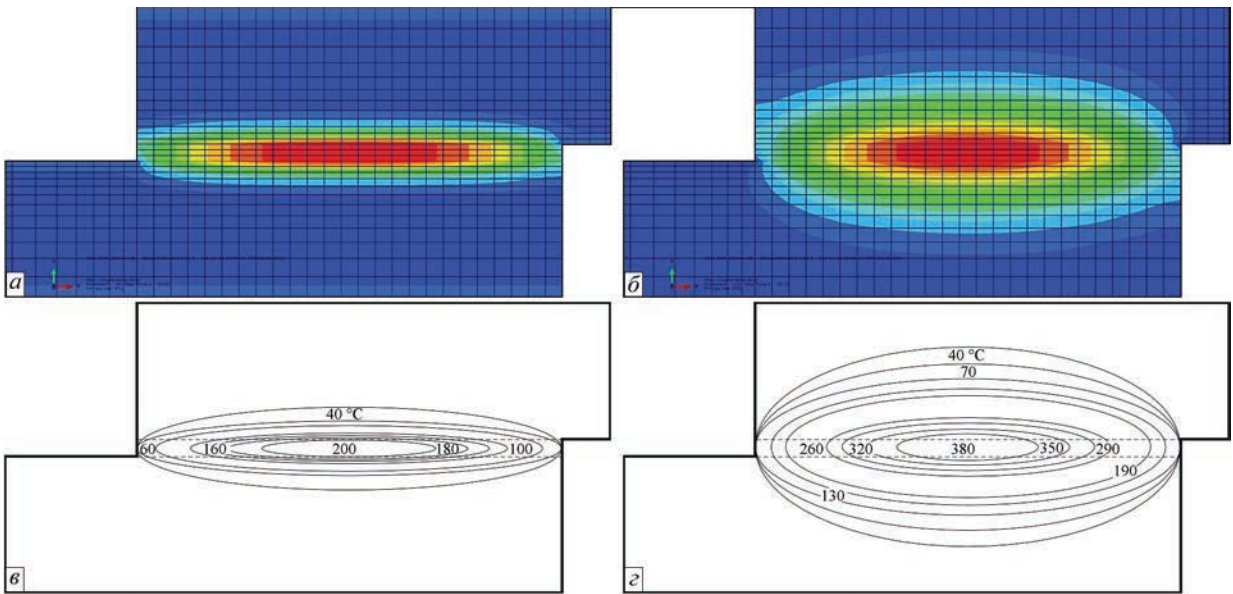


Рис. 6. Температурное поле в начальный (а) и конечный (б) моменты времени процесса сварки и их изотермы (в, г, соответственно)

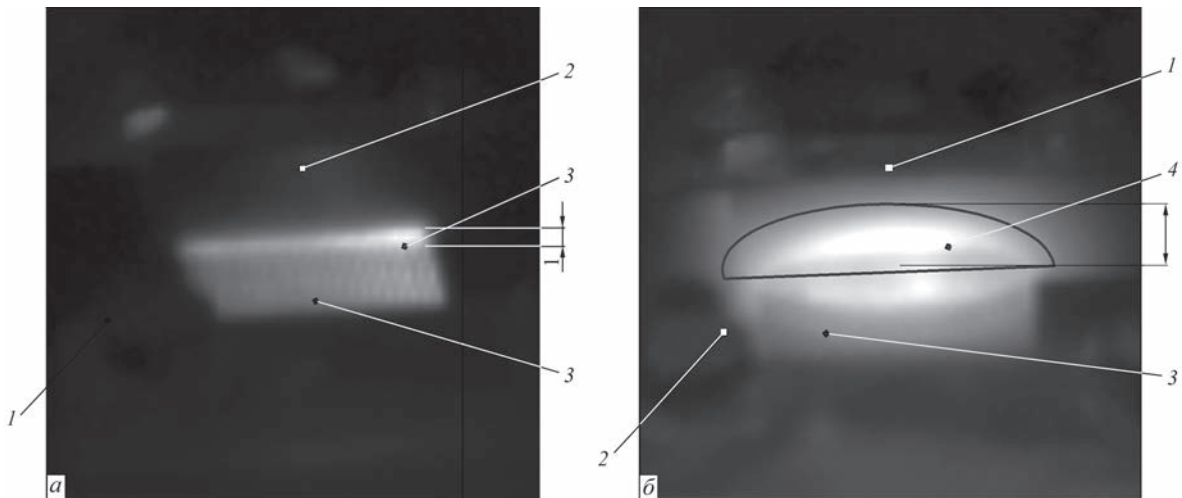


Рис. 7. Последовательные иллюстрации процесса сварки закладным элементом: а — 12 с ($T_{\max} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$); б — 100 с ($T_{\max} > 400 \text{ }^\circ\text{C}$). 1 — образец 2; 2 — образец 1; 3 — грат; 4 — закладной элемент

По результатам моделирования были построены графики изменения температуры (рис. 8) в процессе сварки закладным элементом — сеткой в характерных точках сварного соединения, показанных на рис. 4.

Графики, полученные экспериментальным путем при непосредственном измерении температуры с помощью термопар в процессе сварки закладным элементом с длительностью прогрева 120 с, приведены на рис. 9. Следует также отметить, что несмотря на разницу в длительности процесса нагрева, графики аналогичны и имеют схожий характер, что подтверждает эффективность моделирования и схожесть тепловых процессов в сварном соединении при разных условиях сварки.

Как на расчетном, так и на экспериментальном графиках температура полимерного материала в плоскости сетки (точка 2) постепенно возрастает по мере распространения тепла от нагретых продоль-

ных проволок сетки с двух сторон в центр. Поскольку при моделировании вместо сетки использовалось упрощенное представление нагревателя в виде го-

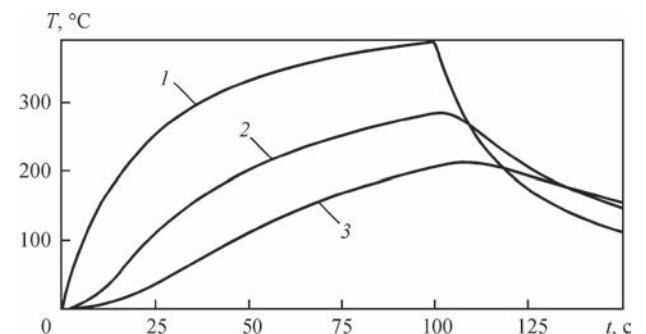


Рис. 8. Результаты моделирования изменения температуры в характерных точках сварного соединения: 1 — температура на поверхности закладного элемента; 2 — температура на расстоянии 0,5 мм от поверхности закладного элемента; 3 — температура в слоях полимера, удаленных от плоскости закладного элемента

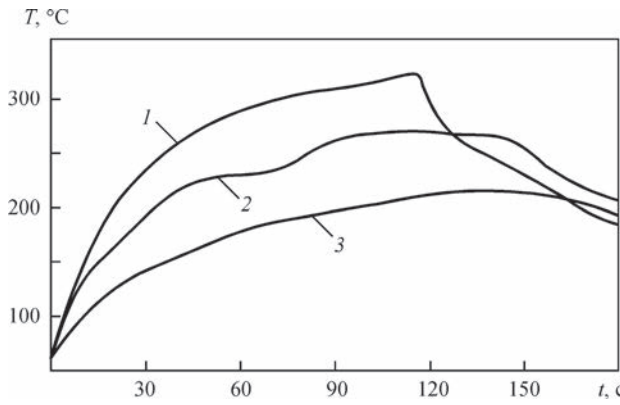


Рис. 9. Результаты экспериментального измерения температуры в характерных точках сварного соединения (описание 1–3 см. рис. 8)

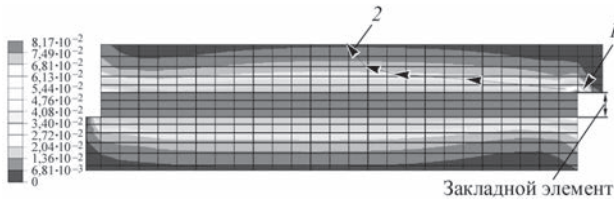


Рис. 10. Поле эквивалентных пластических деформаций в нахлесточном сварном соединении: 1 — зона с максимальным значением остаточной пластической деформации; 2 — траектория разрушения

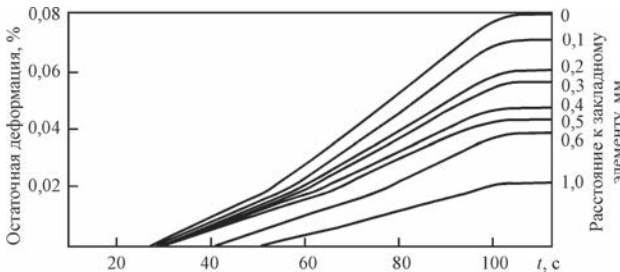


Рис. 11. Изменение величины пластической деформации полимера во времени на разных расстояниях от поверхности закладного элемента

могенной и изотропной металлической ленты, модельный график точки 2 соответствует расстоянию 0,5 мм от поверхности нагревателя. Поэтому экспериментальная температура в этой точке несколько выше по сравнению с данными, полученными в процессе моделирования.

Температура в слоях полимера, удаленных от плоскости закладного элемента (точка 3) возрастает медленно, по сравнению с прилегающей к закладному элементу полимерной матрице, что объясняется невысокой теплопроводностью материала. Точка плавления материала здесь достигается практически в момент выключения источника питания, однако из-за инерционности процесса распространения тепла прогрев материала в этой зоне продолжается еще некоторое время. Это способствует более равномерному расплавлению основного материала и дальнейшему нормальному формированию сварного соединения. Кривая изменения температуры в точке 3, полученная в ре-

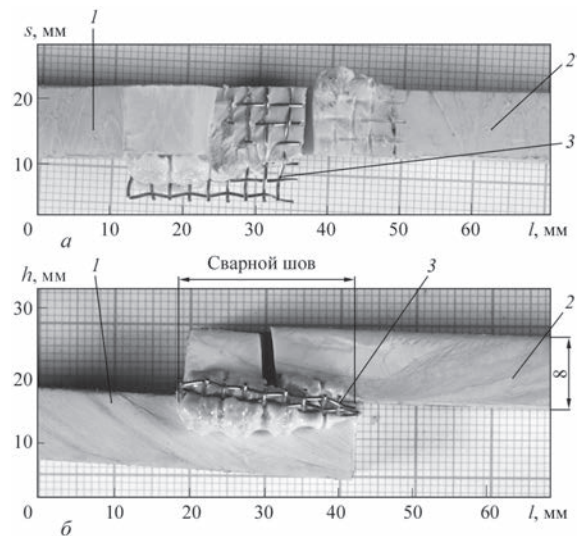


Рис. 12. Характер разрушения образца (l — длина, h — высота, s — ширина), вырезанного из равнопрочного нахлесточного сварного соединения полимерного материала ZX-410: a — вид сверху; b — вид сбоку (1 — образец 2; 2 — образец 1; 3 — закладной элемент)

зультате моделирования, подтверждает полученные экспериментальные результаты.

В работе проводили также моделирование развития остаточных пластических деформаций, обусловленных выделением тепла в процессе сварки. Результаты моделирования представлены на рис. 10.

На начальной стадии прогрева остаточная пластическая деформация практически отсутствует, ее развитие фиксируется только на краях сварного соединения, где закладной элемент прилегает к основному полимерному материалу. В дальнейшем пластические деформации равномерно распространяются вдоль плоскости закладного элемента. Характер изменения величины пластической деформации полимера во времени на разных расстояниях от закладного представлен на рис. 11. Как видно, наибольшие величины пластической деформации достигаются на краю сварного соединения (рис. 10, поз. 1).

Механические испытания нахлесточных сварных соединений, полученных на оптимальных режимах, показывают их равнопрочность основному материалу (рис. 12, a), где разрушение происходило не по сварному соединению, а по основному материалу. Разрушение нахлесточного соединения при испытаниях на сдвиг (рис. 12) происходит по траектории, сходной с линией наибольших значений величины пластической деформации, полученной при моделировании (рис. 10, z).

Выводы

В работе представлена двумерная модель развития температурных полей при сварке закладным элементом листового полимерного материала ZX-

410 с учетом его температурно-зависимых теплофизических параметров, которая также учитывает развитие остаточных пластических деформаций при нагреве в зоне сварки. Корректность моделирования подтверждается экспериментальными измерениями температуры в процессе сварки при помощи термопар и тепловизора. Показано, что разрушение образцов при нагрузке на сдвиг начинается в области наибольших пластических деформаций и распространяется в направлении к центральной области шва.

Таким образом, по результатам моделирования можно спрогнозировать возможные области с повышенным риском формирования непроваров по краям закладного элемента, что связано с неравномерным распределением температуры в зоне сварки. Такие непровары необходимо компенсировать соответствующим увеличением площади нахлесточного шва.

В дальнейшем разработанные модели могут быть использованы для прогнозирования оптимальных режимов прогрева при сварке закладным элементом, в нашем случае — металлической сеткой.

Список литературы / References

1. Jakobsen T. B., Don R. C., Gillespie Jr. J. W. (1989) Two-dimensional Thermal Analysis of Resistance Welded Thermoplastic Composites. *Polymer Engineering and Science*, 29, 23, 1722–1729.
2. Ageorges C., Ye L., Mai Y.-W., Hou M. (1998) Characteristics of resistance welding of lap shear coupons. Part I. Heat transfer. *Composites Part A*, 29, 899–909.
3. Colac Z. S., Sonmez F. O., Kalenderoglu V. (2002) Process modeling and optimization of resistance welding for thermoplastic composites. *J. of Composite materials*, 36, 6, 721–744.
4. Yousefpour A., Simard M., Oceau M.-A., Hojjati M. (2005) Process optimization of resistance-welded thermoplastic composites using metal mesh heating elements. *Proceedings of SAMPE*, USA, Long Beach.
5. Stavrov D., Nino G. F., Bersee H. E. N., Beukers A. (2007) Optimization tool for welding of thermoplastic composites. *16-th International Conference on Composite Materials*. Kyoto, Japan, Fellow Doshisha University.
6. Ibeh C. C. (2011) *Thermoplastic Materials: Properties, Manufacturing Methods, and Applications*. CRC Press, Boca Raton, FL.
7. Menczel J. D., Prime R. B. (2009) *Thermal analysis of polymers: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA.
8. Simon S. L. (1997) Enthalpy Recovery of Poly(ether imide): Experiment and Model Calculations Incorporating Thermal Gradients. *Macromolecules*, 30(14), 4056–4063.
9. Gabbott P. (ed.) (2007) *Principles and Applications of Thermal Analysis*. Wiley, Blackwell Publishing Ltd.

Р. В. Колісник, М. В. Юрженко, М. Г. Кораб,
А. О. Шадрін, Ю. В. Литвиненко

ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ЗАКЛАДНИМ ЕЛЕМЕНТОМ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПЛАСТМАС

Термостійкі полімери знаходять все більше застосування в аерокосмічній, автомобільній та інших галузях промисловості. Для процесу зварювання термопластів важливим є вивчення розподілу температури усередині напусткового зварного з'єднання. В роботі виконано моделювання термічних і деформаційних процесів під час зварювання заставним елементом листових зразків з високотехнологічного термостійкого полімеру ZEDEX ZX-410 на основі полієфірімідів. Критерієм для оптимізації параметрів процесу є температура плавлення та температура деструкції полімерного матеріалу. Показана кореляція результатів моделювання і експериментальних даних, отриманих в результаті як теплових досліджень процесу формування зварних з'єднань, так і механічних випробувань вже самих сформованих зварних з'єднань. Бібліогр. 9, рис. 12.

Ключові слова: зварювання заставним елементом, високотехнологічні полімери, моделювання, випробування

R.V. Kolesnik, M.V. Yurzenko, N.G. Korab,
A.A. Shadrin, Yu.V. Litvinenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03680, Kiev, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

MODELING THERMOMECHANICAL PROCESSES IN WELDING HIGH-TECH PLASTICS WITH EMBEDDED ELEMENTS

Heat-resistant polymers are ever wider applied in aerospace, automotive and other industries. For the process of thermoplastic welding it is important to study temperature distribution inside the overlap welded joint. In this work thermal and deformation processes in welding with embedded element of sheet samples from high-tech heat-resistant polymer ZEDEX ZX-410 based on polyetherimide, were modeled. Melting temperature and polymer material destruction temperature were the criteria for optimization of process parameters. Good correlation is shown for modeling results and experimental data obtained both from thermal studies of the process of welded joints formation, and mechanical testing of the formed welded joints. 9 Ref., 12 Fig.

Keywords: welding with embedded element, high-tech polymers, modeling, testing

Поступила в редакцію 24.07.2017