

УДК 539.3

## ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКЕ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

И.К.Сенченков, О.П.Червинко, Н.П.Нестеренко

*Институт механики им. С.П.Тимошенко НАН Украины,  
Институт электросварки им. Е.О.Патона, Киев*

В рамках связанной задачи термовязкоупругости проведено численное моделирование ультразвукового разогрева слоистых металлопластиковых призматических тел. Изучено влияние армирования и контактных условий на кинетику виброразогрева композита.

Проводится исследование напряженно-деформированного и теплового состояния деталей из слоистых композитных материалов на полимерной основе в процессе УЗС. Рассматривается режим сварки при нормальном и касательном введении ультразвука. Виброразогрев изучается в рамках связанной макромеханики линейно вязкоупругих тел.

Рассматривается слоистый призматический элемент  $|x| \leq 2c, 0 < y < 2b$  из полиэтлена, армированный медной фольгой (рис.1). Элемент располагается на жестком гладком основании. На части верхней грани  $y = 2b, |x| \leq a$  действует волновод. В случае нормального возбуждения торец волновода предполагается гладким. При касательном возбуждении принимается условие жесткого сцепления. На всех поверхностях контакта поддерживается постоянная температура  $\theta_c$ . Остальная поверхность

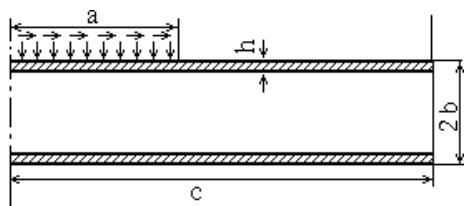


Рис. 1

элемента свободна от нагрузки и находится в условиях конвективного теплообмена с окружающей средой.

Постановка задачи включает уравнения колебаний и теплопроводности

$$\operatorname{div} \tilde{\sigma} + \rho \omega^2 \tilde{u} = 0, \quad (1)$$

$$C \dot{\theta} = \operatorname{div}(k \operatorname{grad} \theta) + \bar{D}', \quad (2)$$

определяющие уравнения

$$\tilde{s} = 2\tilde{G}\tilde{\epsilon}, \quad \tilde{\sigma}_{kk} = 3\tilde{K}\tilde{\epsilon}_{kk}, \quad \bar{D}' = 0.5\beta\omega \operatorname{Im}(\tilde{\sigma} : \tilde{\epsilon}^*), \quad (3)$$

а также граничные и начальные условия. В случае нормального возбуждения имеем

$$\tilde{u}_y = 0, \quad \tilde{\sigma}_{xy} = 0, \quad \theta = \theta_0 \quad |x| \leq c, \quad y = 0; \quad (4)$$

$$\tilde{u}_y = u_0, \tilde{\sigma}_{xy} = 0, \theta = \theta_0 \quad |x| \leq a, \quad y = 2b; \quad (5)$$

$$\tilde{\sigma}_{xx} = 0, \tilde{\sigma}_{xy} = 0, -k\partial\theta/\partial y = \alpha(\theta - \theta_c) \quad |x| > a, \quad y = 2b; \quad (6)$$

$$\tilde{\sigma}_{xx} = 0, \tilde{\sigma}_{xy} = 0, -k\partial\theta/\partial x = \alpha(\theta - \theta_c) \quad |x| = c, \quad 0 \leq y \leq 2b; \quad (7)$$

$$\theta = \theta_0 \quad \text{при } t = 0. \quad (8)$$

Для случая касательного возбуждения механические условия (4) и (5) имеют вид

$$\tilde{u}_x = 0, \tilde{u}_y = 0, |x| \leq a, \tilde{u}_y = 0, \tilde{\sigma}_{xy} = 0 \quad |x| > a, \quad y = 0; \quad (9)$$

$$\tilde{u}_x = u_0, \tilde{u}_y = 0, |x| \leq a, \quad y = 2b. \quad (10)$$

Кроме условия (9) рассматриваются и более мягкие условия свободной границы

$$\tilde{\sigma}_{yy} = 0, \tilde{\sigma}_{xy} = 0 \quad |x| > a, \quad y = 0. \quad (11)$$

Геометрия призмы, условия нагружения и теплообмена характеризуются параметрами:  $c = 3 \cdot 10^{-2}$  м,  $b = 2 \cdot 10^{-3}$  м,  $a = 10^{-2}$  м,  $\theta_0 = \theta_c = 20^\circ\text{C}$ ,  $f = 20$  кГц,  $u_0 = 20$  мкм,  $\alpha = 10$  Вт/м<sup>2</sup>·град,  $\beta = 0,41$ . Температурные зависимости физико-механических свойств полиэтилена приведены в работе [1]. Для физико-механических характеристик армирующих слоев меди принималось:  $k = 400$  Вт/м·°C,  $C = 3,47 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>·°C,  $\rho = 8,96 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $G = 4,5 \cdot 10^4$  МПа,  $\nu = 0,33$ .

Расчеты проводились с помощью метода конечных элементов [2].

Влияние армирующих слоев на температурное поле виброразогрева исследуется путем сопоставления решений трех задач. В задаче 1 элемент содержит 2 слоя меди толщиной  $h = 2 \cdot 10^{-4}$  м, расположенных на верхней и нижней поверхностях  $y = 0, 2b$ . В задаче 2 (модельной) рассматривается элемент, состоящий из материала матрицы – полиэтилена. В задаче 3 кроме наружных (задача 1) имеется третий слой меди  $h = 2 \cdot 10^{-4}$  м, расположенный в срединном сечении элемента  $y = b$ . В задачах 1 и 3 общая толщина полиэтиленовых прослоек одинакова и равна  $1,6 \cdot 10^{-3}$  м. Оценка температуры проводится в точках  $x = 0, y = b/2, y = 3b/2 + h$  (задача 3) и в точке  $x = 0, y = b$  (задачи 1 и 2).

Рассмотрим сначала случай нормального возбуждения. На рис.2 показаны временные зависимости температуры. Сплошные кривые 1 и 2 отвечают температуре, рассчитанной в рамках задач 1 и 2, а кривая 3 - задаче 3. Температуры в верхнем и нижнем ПЭ слоях для задачи 3 отличаются не более чем на 5%. Штриховая линия соответствует "стержневому" приближению, для которого  $a = c$  в соотношениях (4)-(7). Кружками пред-

ставлены экспериментальные значения температуры для трехслойного образца, а треугольниками – измеренные значения осадки материала  $\delta(t)$  (задача 1). Отметим хорошее согласование расчетных и экспериментальных кривых для задачи 1. Более быстрый разогрев слоистых образцов обусловлен более высокой эффективной деформацией  $\epsilon_0$  полиэтиленовых слоев в зоне сварки. Если для ПЭ образца  $\epsilon_0 \approx u_0/2b$ , то для трех- и пятислойных соответственно имеем  $\epsilon_0 \approx u_0/2(b-h)$ . Тепловое влияние поверхностных медных слоев невелико. В силу высокой теплопроводности оно сводится, по сути, к переносу граничных условий  $\theta = \theta_c$  на поверхность ПЭ слоев.

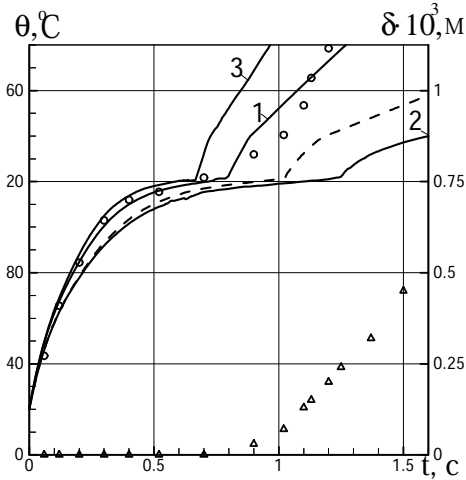


Рис. 2

Оценить влияние размеров волновода на разогрев можно путем сопоставления штриховой кривой и кривой 2. Здесь не вполне очевидно, почему широкий волновод, покрывающий весь элемент ( $a = c$ ) обеспечивает более интенсивный разогрев, чем узкий (кривая 2). Причина, по-видимому, в том, что материал под узким волноводом из-за стесняющего действия окружающего материала находится в состоянии, близком к гидростатическому сжатию. Это препятствует диссипации, поскольку последняя связана с энергией формоизменения.

Изотермы для задачи 2 представлены на рис.3. Числа - значения температуры. Темным фоном контрастированы зоны расплава, ограниченные изотермой  $\theta_{пл} = 125^{\circ}\text{C}$ . Характер изотерм отражает влияние контактного взаимодействия инструмента с изделием на температуру. Сущность эффекта состоит в наличии концентрации напряжений, а, следовательно, и тепловыделения, в окрестности угловых точек инструмента.

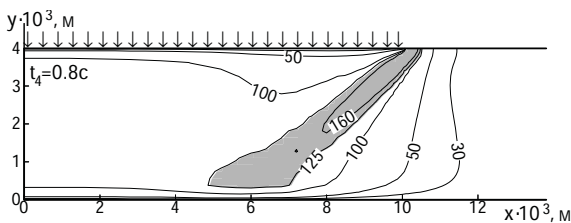


Рис. 3

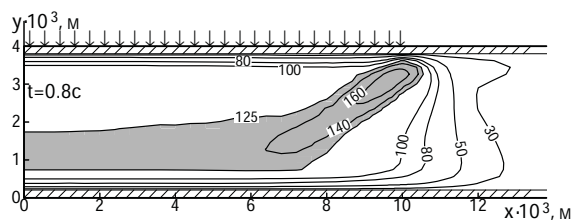


Рис. 4

Поскольку элемент достаточно тонкий, то при  $t \approx 0,8\text{c}$  прикромочная зона расплава пронизывает все его сечение. Она формирует тепловой экран, блокирующий отвод тепла

из зоны сварки  $|x| \leq 10^{-2} \text{ м}$ . В этих условиях указанная зона разогревается даже несколько быстрее, чем адиабатически, за счет притока тепла из кромочной зоны. Кромочный эффект волновода проявляется и при наличии медных слоев на граничных плоскостях (задача 1, рис.4) Однако имеется ряд особенностей. Распределение температуры более однородно вследствие выравнивающего теплового и механического эффектов медных слоев. Таким образом, эти слои создают более благоприятные с точки зрения временных и пространственных факторов условия для УЗС изделий. Механический эффект выравнивания температурного поля обусловлен более низким уровнем концентрации напряжений на ПЭ слоях, расположенных под медными.

Рассмотрим влияние срединного армирующего слоя (задача 3). Временная зависимость отражена кривой 3 на рис.2. Пространственное распределение для  $t = 0.7 \text{ с}$  показано

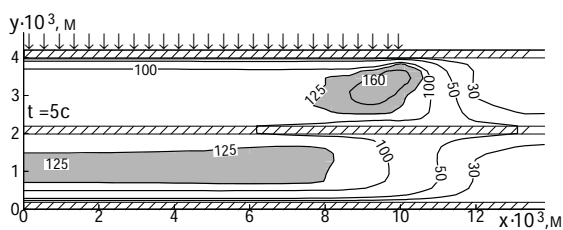


Рис. 5

на рис.5. Несмотря на геометрическую симметрию поле температур асимметрично относительно плоскости  $y = b + h/2$ . Это обусловлено различием механических граничных условий на поверхностях  $y = 0$ ,

$y = 2b + h$ . Как и в задачах 1 и 2 имеет место кромочный тепловой эффект. В отличие от трехслойного элемента (рис.4) он в значительной степени блокируется ниже лежащим медным слоем.

Поведение изолиний (например,  $\theta = 100^\circ \text{ C}$ ) в окрестности этого слоя показывает, что при  $t \leq 1,3 \text{ с}$  он поглощает тепло, генерируемое в полиэтиленовых слоях в зоне сварки, к моменту  $t \approx 1,3 \text{ с}$  этот слой прогревается. Одновременно, с самого начала процесса тепло отводится во внешнюю область  $x > 10^{-2} \text{ м}$ . Не считая области локализации, температурное поле относительно однородно в ПЭ слоях в зоне сварки.

Чтобы понять роль срединного слоя, а через него и влияние слоевого армирования на температуру в зоне сварки вообще, необходимо рассмотреть взаимодействие двух основных эффектов. Первый состоит в более высокой эффективной поперечной жесткости слоистого изделия по сравнению с однородным пластиковым (задача 2). Этот эффект армирования повышает температуру ультразвукового разогрева за счет более высоких напряжений в ПЭ слоях в зоне возбуждения при фиксированной амплитуде перемещения торца инструмента  $u_0$ .

Второй эффект состоит в повышении приведенной теплопроводности композита в направлении ориентирования и снижении теплоемкости за счет металлической фазы. Этот эффект армирования снижает температуру за счет усиления оттока тепла из зоны сварки.

Рассмотрим некоторые закономерности разогрева на примере задачи 3. При высоких амплитудах нагружения  $u_0 \approx 20$  мкм разогрев происходит быстро, почти адиабатически. Поэтому его уровень определяется первым – жесткостным фактором армирования, который ускоряет разогрев. При более низких амплитудах  $u_0 \approx 5$  мкм разогрев замедляется и влияние теплоотвода по металлическим армирующим элементам становится преобладающим и прогрессирующим во времени. Установлено значение амплитуды  $u_0 \approx 7$  мкм, разделяющее области доминирования указанных механизмов.

Таким образом, для слоистых композитных элементов УЗС происходит в более благоприятных условиях, по сравнению с изделиями из материала матрицы при тех же технологических параметрах.

Рассмотрим случай касательного возбуждения. Анализ временных кривых позволяет сделать следующие выводы. Как и при нормальном возбуждении, наличие медных пластин повышает эффективную сдвиговую деформацию ПЭ слоев. Поэтому композит греется быстрее, чем однородный ПЭ элемент. Примечательно, что способ закрепления поверхности  $|x| > a, b = 0$  практически не влияет на скорость разогрева при  $\theta \leq \theta_{nl}$ , и лишь при  $\theta > \theta_{nl}$  наличие свободной границы стимулирует более высокий уровень разогрева в зоне сварки. Парадоксальным представляется результат для широкого волновода. В отличие от нормального возбуждения волновод меньшего сечения обеспечивает более эффективную закачку энергии. Размер торца волновода проявляется лишь в высокотемпературной области  $\theta > \theta_{nl}$ , причем для сдвига он выражен сильнее.

Распределение температуры в трехслойном элементе (задача 1) для граничных условий (9) показано на рис.6. Температурное поле достаточно симметрично по толщине с максимальным уровнем разогрева в центральной части элемента. На рис.7 показано аналогичное распределение для пятислойного элемента (задача 3). Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы. При сдвиговом режиме сварки в многослойных композитах реальна проблема существенной несимметрии температурного поля в области повышенных температур (заключительная стадия сварки). Парадоксальная особенность неоднородности состоит в том, что интенсивней разогревается не верхний слой, прилегаю-

щий к волноводу, а нижний. Асимметрия возникает при  $\theta \approx 80^\circ\text{C}$ , быстро нарастает и затем стабилизируется.

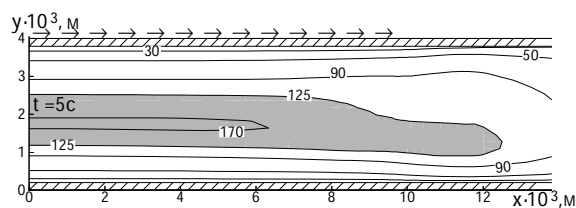


Рис. 6

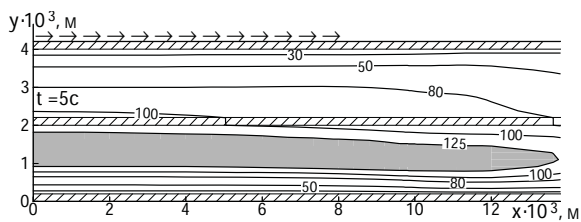


Рис. 7

Вторым неожиданным результатом является возможность снижения температуры в зоне сварки при продолжающемся озвучивании. Асимметрия возникает как при гладких, так и свободных условиях на грани  $y = 0$ . Слоевая неоднородность температуры есть эффект взаимодействия динамичности и условий контакта на грани  $y = 0$ . Понять причину прогрессирующей во времени асимметрии помогает рис.8. Здесь показано распределение

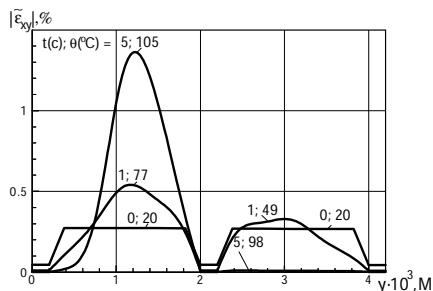


Рис. 8

амплитуды сдвиговой деформации  $|\tilde{\epsilon}_{xy}|$  по толщине пластины в сечении  $x = 0$  для гладких условий опирания. В приведенных на рисунке парах чисел, первое показывает время  $t$ , а второе – температуру. Если учесть, что сдвиговое напряжение в зоне сварки практически постоянное, то скорость разогрева будет определяться только деформацией. Видно, что в

начальной стадии процесса поле деформации (и температуры) практически симметрично. Однако при  $t \approx 1\text{с}$  возникает малая асимметрия, которая приводит к резкому нарастанию температуры и деформации в нижнем слое.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Н.П.Нестеренко, О.П.Червинко, И.К.Сенченков Моделирование ультразвукового разогрева структурных элементов полимерных волокнистых композитов при нормальном нагружении // Вестник НТУ «ХПИ».- 2002.-9.-С.3-8.
2. Механика связанных полей в элементах конструкций. Т.1. Термоупругость. Мотовиловец И.А., Козлов В.И. –К.1987. 264с.