

ФОРМИРОВАНИЕ СЛОИСТОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ПЛАСТИН ПЭИ И ПРЕПРЕГА ИЗ УВ-ТКАНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТАНОВКИ ДЛЯ УЗ-СВАРКИ

ТЯНЬ ДЭФАН¹, АЛЕКСЕНКО В.О.², ПАНИН С.В.^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: 1132076105@qq.com

Приложение ультразвуковых колебаний является одним из распространенных способов сварки термопластов. Эта технология достаточно хорошо развита и широко используется в промышленности.

Данный процесс производится в три основных этапа. На первом этапе реализуется постепенное увеличение усилия прижима на свариваемые детали до достижения порогового уровня. На этом этапе УЗ-колебания не прикладываются. Далее, при постоянном уровне усилия прижатия начинается фаза приложения УЗ-колебаний заданной частоты и амплитуды. При этом в течение определенного промежутка времени вибрация УЗ сварочного инструмента преобразуется в генерацию тепла (за счет фрикционного нагрева взаимно перемещающихся дуг относительно друга свариваемых деталей). Усилие прижима на этом этапе, как правило, поддерживается постоянным. На третьей стадии происходит кристаллизация расплавленного материала (затвердевание), реализуемое также под действием заданной силы прижатия в течение определенного времени. На этом заключительном этапе УЗ-колебания не прикладываются [1–5].

УЗ-сварка ранее не использовалась в промышленности для формирования слоистых волоконно-армированных изделий из препрегов на основе термопластичных связующих. Однако в настоящее время в литературе появляется значительное количество публикаций, посвященных применению метода УЗ-сварки для формирования неразъемных соединений слоистых композитов (ламинатов) на основе высокопрочных высокотемпературных термопластических связующих, армированных высокомолекулярными волокнами (тканями) [6].

В данной работе в лабораторных условиях изготавливали препреги из УВ-ткани со связующим из полиэфиримида (ПЭИ) при варьировании «конструкции» препрега, а именно соотношения содержания в нем связующего и армирующих волокон. Далее при варьировании параметров УЗ-сварки определяли режимы, позволяющие получить более однородную структуру границы раздела (без повреждения УВ-ткани), а также максимальные деформационно-прочностные свойства.

Целью работы являлся изучение особенностей структурообразования при формировании соединения внахлест «ПЭИ-пластина / ПЭИ-пропитанный УВ-препрег / ПЭИ-пластина», а также поиск оптимального сочетания технологических факторов УЗ-сварки для получения однородной макроструктуры и прочностных свойств.

На основании результатов предварительных испытаний было предложено использовать следующие параметры УЗ-воздействия.

- давление прижима 1,7 атм (не менялось);
- первым варьируемым параметром являлось время приложения УЗ-колебаний, составлявшее 600 мс (обр. 1, 2, 3), 700 мс (обр. 4, 5, 6) и 800 мс (обр. 7, 8 и 9);
- время прижима после окончания приложения УЗ-колебаний составляло 3 сек. (не менялось);
- соотношение содержания ПЭИ/УВ-ткань было вторым варьируемым фактором: 23/77 вес. % (обр. 1, 4, 7); 30/70 вес. % (обр. 2, 5, 8); 43/57 вес. % (обр. 3, 6, 9);

Для УЗ-соединения пластин использовали станок ультразвуковой сварки УЗПС-7 (ООО «СпецмашСоник», г. Воронеж). Площадь перекрытия соединяемых ПЭИ-пластин, равно как и размер сонотрода, составляла 20×20 мм². Свариваемые пластины помещали в фиксирующую струбцину, исключая возможность их взаимного перемещения в процессе приложения

УЗ-колебаний. Оценку прочности на сдвиг соединенных внахлест пластин проводили согласно ASTM D5868. Испытания проводили на разрывной электро-механической машине Instron 5582. Скорость перемещения подвижного захвата составляла 13 мм/мин.

Авторы сосредоточили особое внимание на двух структурных аспектах: сохранении структурной целостности препрега, представляющего собой ПЭИ пропитанную УВ-ткань, и обеспечении однородности макроструктуры по поперечному сечению неразъемного соединения в процессе УЗ-сварки.

Проведены испытания на растяжение соединений внахлест, рисунок 1, а. На рисунке 1, а представлен график зависимости предела прочности σ_U (разрушающего напряжения) образцов неразъемных соединений внахлест от времени приложения УЗ-колебаний t для композитов с различным содержанием связующего в препреге. Предел прочности композитов с препрегом с соотношением компонентов УВ/ПЭИ (23/77), т.е. с наименьшим содержанием полимера всегда выше, чем у композитов с двумя другими типами препрегов (УВ/ПЭИ: 30/70 и 43/57). Максимальное значение предела прочности составило 47 МПа (режим 4).

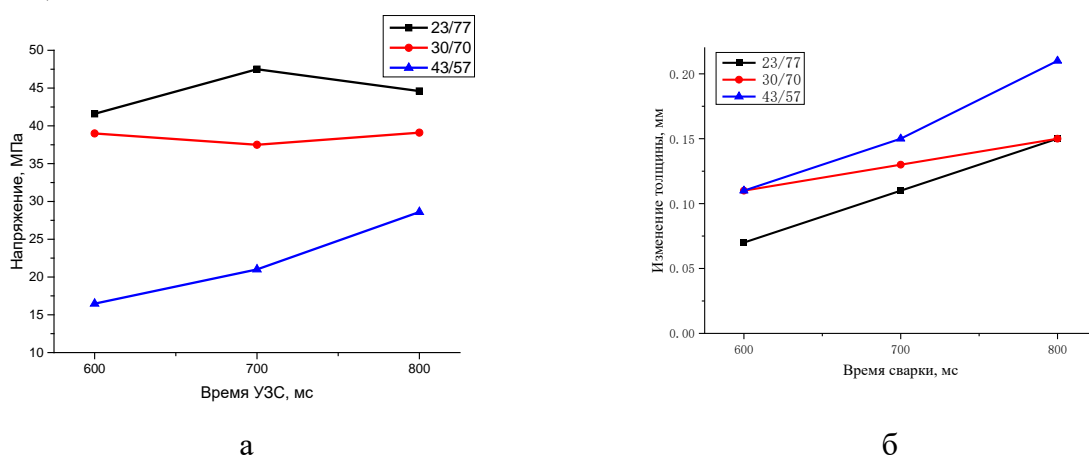


Рисунок 1 – (а) Зависимость разрушающего напряжения при растяжении соединения внахлест (пластин ПЭИ и препрега из УВ-ткани; и (б) изменения толщины соединения в зависимости от времени УЗС

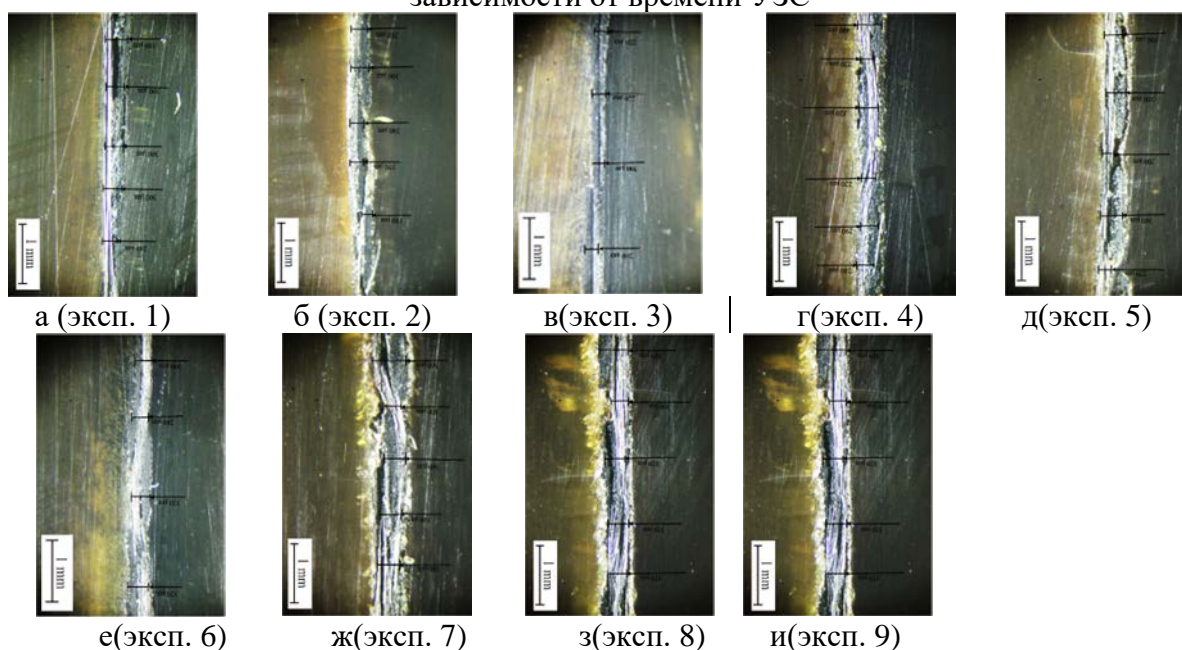


Рисунок 2 – Макроструктура образцов (поперечное сечение центральной части соединения внахлест) для различных режимов УЗ-сварки

Проведен анализ структуры по поперечному сечению, рисунок 2. Видно, что по мере увеличения времени УЗ-сварки толщина соединяемого пакета линейно уменьшалась. Интегральное изменение толщины пакета в процессе УЗ-сварки составляло 50-200 мкм. Оно было обеспечено плавлением и частичным и выдавливанием полимерного связующего из препрега.

Для препрега типа УВ/ПЭИ (23/77) при варьировании времени УЗС целостность УВ-ткани сохранялась, рисунок 2, а-в, а ее толщина минимальна, что обусловлено изначальным минимальным содержанием ПЭИ связующего.

Для препрега типа УВ/ПЭИ (30/70) при варьировании времени УЗС наблюдали увеличение толщины слоя, соответствующего препрегу, рисунок 2, г-е; это должно быть связано с выдавливанием расплавленного ПЭИ в процессе УЗ-сварки, что могло локально повреждать УВ-ткань. Однако это заметным образом не снижало прочностные свойства неразъемных соединений, сформированных при такой «конструкции» препрега.

Для препрега типа УВ/ПЭИ (43/57) помимо заметной структурной неоднородности в зоне сплавления можно говорить о выраженном повреждении УВ-ткани, что авторы связывают с избыточным содержанием ПЭИ-связующего в исходном препреге, рисунок 2, ж-и. По этой причине и свойства прочности были минимальные.

Заключение

1. Максимальные прочностные свойства обеспечил режим № 4 (препрег (23/77), $t = 700$ мсек.), чему соответствовал максимальный предел прочности до разрушения; однако при этом происходило локальное разрушение ПЭИ-пластины в зоне сплавления. С учетом структурных данных рациональным является режим №2 (препрег (30/70), $t = 600$ мс): при этом обеспечивалось высокое значения $\sigma_u = 38$ МПа, происходило сплавление ПЭИ и препрега, ПЭИ пластины ПЭИ в зоне сплавления не растрескивались.

2. В случае препрега (43/57) максимальное содержание ПЭИ связующего в препреге в процессе УЗ-сварки сопровождалось его выдавливанием, повреждением как УВ-ткани, так и ПЭИ-пластин. В результате такие соединения внахлест показали минимальные прочностные свойства.

3. В качестве одного из ключевых параметров для контроля процесса УЗ-консолидации слоистого композита можно принять изменение толщины соединяемого пакета. Превышении величины 150 мкм сопровождалось разрушением ПЭИ-пластин в зоне сплавления.

Список литературы

1. Yan, J. C., Wang, X. L., Li, R. Q., Xu, H. Bin, & Yang, S. Q. (2007). The Effects of Energy Director Shape on Temperature Field during Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites. *Key Engineering Materials*, 353–358, 2007–2010.
2. Harras, B., Cole, K. C., & Vu-Khanh, T. (1996). Optimization of the Ultrasonic Welding of PEEK-Carbon Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 15(2), 174–182.
3. Liu, S.-J., Chang, I.-T., & Hung, S.-W. (2001). Factors affecting the joint strength of ultrasonically welded polypropylene composites. *Polymer Composites*, 22(1), 132–141.
4. Ramarathnam, G., North, T. H., & Woodhams, R. T. (1992). Ultrasonic welding using tie-layer materials. part II: Factors affecting the lap-shear strength of ultrasonic welds. *Polymer Engineering and Science*, 32(9), 612–619.
5. Tateishi, N., North, T.H., & Woodhams, R.T. (1992). Ultrasonic welding using tie-layer materials. part I: Analysis of process operation. *Polymer Engineering and Science*, 32(9), 600 – 611.
6. Fernandez Villegas, I., & Vizcaino Rubio, P. (2015). On avoiding thermal degradation during welding of high-performance thermoplastic composites to thermoset composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 77, 172–180.