

**ФОРМИРОВАНИЕ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ
«ПЭЭК – ПРЕПРЕГ ИЗ УВ-ТКАНИ – ПЭЭК»
МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ**

С.В. ПАНИН^{1,2}, А.В. БЯКОВ¹, В.О. АЛЕКСЕНКО¹, ТЯНЬ ДЭФАН²

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

²Томский политехнический университет

Слоистые полимерные композиционные материалы, армированные непрерывным углеродным волокном (ламинаты), находят широкое применение в аэрокосмической и других высокотехнологичных отраслях промышленности. Традиционно, для изготовления полимерных композиционных материалов используют эпоксидные связующие. В последнее время показана перспективность применения термопластических связующих. При этом активно проводится поиск новых способов производства волоконно-армированных композитов [1–3].

Отдельной задачей является проблема соединения армированных композитов. Показано, что для композитов на основе термопластических связующих эффективным методом решения данной задачи является ультразвуковая сварка [4–6]. Также актуален подбор оптимальных режимов формирования неразъемных соединений, к числу параметров которых относятся: i) давление прижима инструмента и ii) время приложения УЗ-колебаний. В рамках автоматизации процесса УЗ-сварки используются станки с непрерывно перемещающимся инструментом; в этом случае дополнительным управляющим параметром является скорость перемещения УЗ-индентора (сонотрода) относительно соединяемых пластин композитов.

Однако УЗ-сварка может использоваться и при проведении ремонтных работ, когда необходимо «залечить» поврежденные участки. В этом случае с помощью УЗ-сварки можно локально нарастить пакет из слоев полимера и препрегов (на основе лент однонаправленных УВ-волокон или УВ-ткани). Для этого необходимо изучить специфику формирования связи между слоями высокотехнологичного полимера (Advanced Engineering Plastics), в частности ПЭЭК и препрега на основе УВ-ткани.

В данной работе в лабораторных условиях изготавливали препреги из УВ-ткани со связующим из ПЭЭК при варьировании их параметров, а именно толщины препрега, и, соответственно, содержания связующего. 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 является установление взаимосвязи между параметрами (толщиной и содержанием полимера) препрега, параметрами УЗ-сварки, деформационно-прочностными свойствами, структурой и характером разрушения соединений внахлест «ПЭЭК – препрег на основе УВ-ткани – ПЭЭК».

Таблица 1 – Параметры препрегов

Обозначение	Толщина, мкм	Объемное содержание УВ/ПЭЭК, %
30РЕЕК/70CF	280±30	70/30
50РЕЕК/50CF	480±30	50/50
60РЕЕК/40CF	620±30	60/40

Для УЗ-соединения пластин использовали станок ультразвуковой сварки УЗПС-7 (ООО «СпецмашСоник», г. Воронеж). Площадь перекрытия соединяемых пластин, равно как и размер сонотрода, составляла 20×20 мм². Свариваемые пластины помещали в фиксирующую струбцину, исключая возможность их взаимного перемещения в процессе УЗ-сварки. Время приложения УЗ-колебаний составляло $t=800, 1000, 1200, 1400$ мс, что было определено в рамках предыдущих исследований авторов по данной тематике [7]. Усилие

прижима было фиксированное и составляло $P=3$ атм (764 Н); время выдержки под давлением после окончания приложения УЗ-колебаний составляло $\tau=5000$ мс. Оценку прочности на сдвиг соединенных внахлест пластин проводили согласно ASTM D5868 (ГОСТ Р 57066). Испытания проводили на разрывной электро-механической машине Instron 5582. Скорость перемещения подвижного захвата составляла 13 мм/мин.

На рисунке 1 представлен график зависимости предела прочности σ_U (разрушающего напряжения) образцов неразъемных соединений внахлест от времени приложения УЗ-колебаний t для композитов с препрегами различной толщины. Видно, что с увеличением времени t величина σ_U возрастает для всех трех исследованных типов слоистых композитов. Однако образцы соединений внахлест с препрегом максимальной толщины $\delta=620$ мкм уступают по прочности двум другим типам композитов (с более тонкими препрегами) при всех идентичных по величине временах приложения УЗ-колебаний $t=800-1400$ сек.

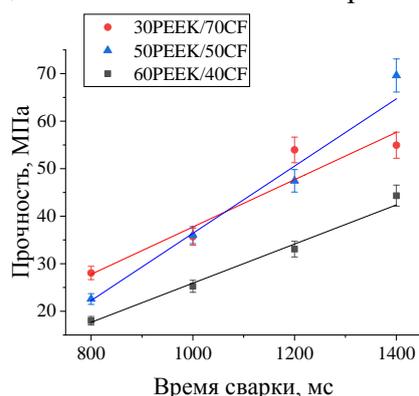


Рисунок 1 – Зависимость предела прочности УЗ-сварных соединений внахлест от времени УЗ-сварки для композитов с различной толщиной препрега

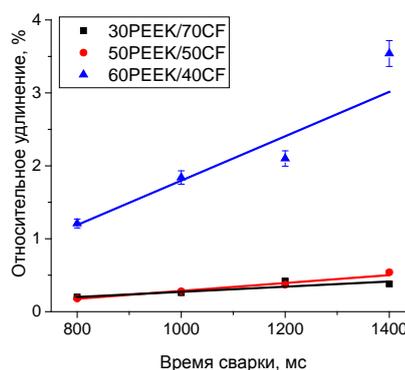


Рисунок 2 – Зависимость величины относительного удлинения при разрыве от времени УЗ-сварки для композитов с различной толщиной препрега

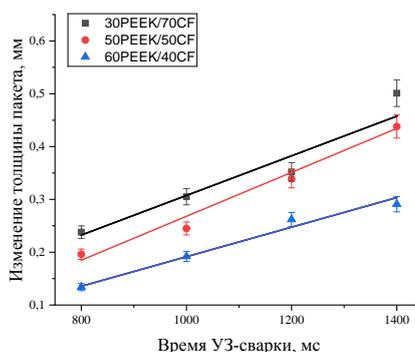


Рисунок 3 – Зависимость изменения толщины УЗ-свариваемого пакета Δd от времени УЗ-сварки t для композитов с различной толщиной препрега δ

На рисунке 2 представлен график зависимости величины относительного удлинения при разрыве от времени приложения УЗ-колебаний для исследованных слоистых композитов. Видно, что наибольшими значениями $\varepsilon=1,2 \div 3,5\%$ обладают композиты с более толстым препрегом. Собственно эти же композиты обладают и минимальной прочностью (см. рис. 1). Для композитов с содержанием связующего в препреге 30 и 50 вес. % величина относительного удлинения при разрыве имеет минимальное значение и при увеличении t меняется незначительно ($\varepsilon=0,2 \div 0,5\%$).

Согласно данным на рисунке 3 утонение пакета составило ~200 мкм; оно было обеспечено частичным плавлением как ED, так и внешних слоев препрега. Судя по фотографиям, UV-ткань в составе препрега сохранила целостность, а ее толщина составила $\eta=340$ мкм, при исходной толщине препрега $\delta=460$ мкм. Определено, что граница между адгезионной ПЭЭК-пленкой (ED) и основным материалом является контрастной, в то время как между ED и препрегом она слабо различима. Это обусловлено плавлением и перемешиванием более тонких компонентов по сравнению со свариваемыми пластинами толщиной 2.2 мм каждая. Несмотря на неполное расплавление ED, данный композит показал прочность меньше, чем таковой в композите с препрегом 30ПЭЭК/70УВ (рисунок 1).

При увеличении времени приложения УЗ-колебаний до $t=1400$ мс снижение толщины пакета составило 440 мкм (рисунок 3).

Заключение

Показано, что по мере увеличения времени ультразвуковой сварки прочность неразъемного соединения увеличивалась, что имело наибольшее значение для препрега толщиной 480 мкм. Прочность сварного шва с препрегом максимальной толщины 620 мкм всегда была ниже, чем прочность сварного шва для двух других толщин препрегов.

Выявлено, что при толщине препрега 620 мкм композит имел высокую степень деформации; для двух других толщин препрегов относительное удлинение при разрыве очень мало и не сильно меняется с увеличением времени УЗ-сварки.

Показано, что с увеличением толщины препрега толщина сварных соединений внахлест изменялась в меньшей степени: сохранялся линейный тренд изменения толщины во времени. Это связано с тем, что чем больше толщина препрега, тем медленнее происходит его плавление.

Благодарности

Исследование финансировалось Российским научным фондом. # 21-19-00741, <https://rscf.ru/project/21-19-00741/>.

Список литературы

1. Liu, G; Xiong, Y; Zhou, L. Additive manufacturing of continuous fiber reinforced polymer composites: Design opportunities and novel applications. *Compos. Commun.* 2021, 27, 100907.
2. Karaş, B.; Smith, P.J.; Fairclough, J.P.A.; Mumtaz, K. Additive manufacturing of high density carbon fibre reinforced polymer composites. *Addit. Manuf.* 2022, 58, 103044.
3. Mishra, T.; Mandal, P.; Rout, A.K.; Sahoo, D. A state-of-the-art review on potential applications of natural fiber-reinforced polymer composite filled with inorganic nanoparticle. *Composites Part C: Open Access.* 2022, 9, 100298.
4. Tsiangou E., Teixeira de Freitas S., Villegas I.F., Benedictus R. Investigation on energy director-less ultrasonic welding of polyetherimide (PEI)- to epoxy-based composites // *Composites Part B: Engineering.* 2019. vol. 173. pp. 107014. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107014>
5. Byakov A.V., Alexenko V.O., and Panin S.V. Ultrasonic Welding Assisted Formation of PEEK-CF Layered Composites. *Proceedings of the International Conference “Physical Mesomechanics. Materials with Multilevel Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing Technology”.* AIP Conf. Proc. 2509, 020037-1–020037-4; <https://doi.org/10.1063/5.0084750>.
6. Kosmachev P.V., Alexenko V.O., Bochkareva S.A., Panin, S.V. Deformation Behavior and Fracture Patterns of Laminated PEEK- and PI-Based Composites with Various Carbon-Fiber Reinforcement. *Polymers* 2021, 13, 2268. <https://doi.org/10.3390/polym13142268>.
7. Byakov A.V., Alexenko V.O., and Panin S.V. Ultrasonic Welding Assisted Formation of PEEK-CF Layered Composites. *Proceedings of the International Conference “Physical Mesomechanics. Materials with Multilevel Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing Technology”.* AIP Conf. Proc. 2509, 020037-1–020037-4; <https://doi.org/10.1063/5.0084750>.