

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ  
ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКЕ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ  
НА ОСНОВЕ СУПЕРКОНСТРУКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРОВ**

*В.О. АЛЕКСЕНКО<sup>1</sup>, Д. ТЯНЬ<sup>2</sup>, С.В. ПАНИН<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

<sup>2</sup>Томский политехнический университет, Томск

E-mail: [vl.aleksenko@mail.ru](mailto:vl.aleksenko@mail.ru)

Промышленно выпускаемые термопластичные полимеры делят на три группы: общего назначения; инженерно-технического назначения; суперконструкционные. К последним относятся полимеры, способные длительное время выдерживать температуры более 230° С, а также обладающих заметно более высокими свойствами прочности. К их числу относятся: полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), полиэфиримид (ПЭИ), полиэфирсульфон (ПЭС) и др. [1,2]. Так, крупные аэрокосмические компании STELIA Aerospace (Франция), GKN Fokker (Нидерланды) и Gulfstream (США) и др. изготавливают прототипы фюзеляжа самолета, аэродинамические профили и прочие элементы конструкции самолета из композитов на основе ПЭЭК с углеродным волокном [3]. При этом традиционные способы изготовления малоразмерных изделий из полимерных композитов, например, горячее прессование, здесь не применимы, поскольку детали, как правило, имеют большие размеры и сложную геометрию. На данный момент, основным способом изготовления композиционных материалов является автоматизированная выкладка лент либо ткани с последующей пропиткой связующим и автоклавным отверждением [4]. Однако, данные технологии имеют ряд существенных недостатков таких как: дороговизна изготовления, сложность производства, ограниченная геометрическая сложность деталей, высокий уровень потерь материала и т. д. [5].

В настоящее время активно обсуждается возможность применения оборудования для ультразвуковой сварки (УЗС) в задачах изготовления слоистых композиционных материалов. В литературе описаны работы, посвященные изготовлению последних путем послойной выкладки термопластичной полимерной пленки и ткани из углеродных волокон с последующим их соединением с помощью ультразвука [6]. Другой способ заключается в послойной выкладке только препрегов на основе углеткани, с последующим их соединением УЗС [7]. Под препрегом в данных работах подразумеваются ткани или однонаправленные ленты из УВ, полностью пропитанные полимерным связующим.

Авторами настоящей работы ранее было показано [8], что изготовление препрега методом пропитки раствором матричного полимера является эффективным с позиции реализации процесса УЗС ненаполненных ПЭЭК пластин. Это позволяет сохранить целостность УВ-ткани при УЗ-воздействии. Однако, при сварке пятислойного композита "ПЭЭК – Energy Director (ПЭЭК) – препрег (ПЭИ/УВ-ткань) – Energy Director (ПЭЭК) – ПЭЭК" меньшая температура плавления и больший ПТР обуславливают выдавливание из препрега расплавленного ПЭИ, что в ряде случаев сопровождалось существенным повреждением УВ-ткани. Таким образом, влияние «конструкции» препрега на закономерности формирования структуры как переходных слоев, так и всей макроструктуры соединения внахлест при УЗС требует дальнейшего изучения.

В процессе формирования препрега (что включало пропитку ткани с последующим спеканием) на его поверхности формируется «облицовочный» слой ненаполненного полимера, что в том числе зависит от соотношения компонентов. Предполагается, такой слой будет препятствовать повреждению/разрушению препрега в процессе УЗС. В качестве полимера для пропитки препрега может выступать как ПЭЭК, так и ПЭИ. Однако ПЭЭК растворяется только концентрированными кислотами. На основе вышеизложенного целью настоящей работы является исследование влияния «конструкции» препрега на закономерности формирования структуры при УЗС (соединений внахлест) пластин

ненаполненного полиэфирэфиркетона и препрега на основе пропитанной раствором ПЭИ/ПЭС УВ-ткани.

В качестве порошкового фидстока для изготовления пластин для УЗС использовали порошок ПЭЭК марки 770PF (Zeepeek, Китай). Для изготовления пластин применяли литьевую (плунжерную) машину RR/TSMP (Ray-Ran Test Equipment Ltd., Nuneaton, UK). Для формирования неразъемных соединений из соединенных внахлест пластин между ними и препрегом размещали Energy Director (ED) из ПЭЭК-пленки толщиной 250 мкм (Vitrex, Artiv 2000). Препреги изготавливали путем пропитки фрагментов двунаправленной углеродной ткани ACM C285S (UMATEX, РФ) растворами термопластов полиэфиримида (ПЭИ) и полиэфирсульфона (ПЭС). Для этого их растворяли в N,N-Диметилформамиде (C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>NO). Составы образцов и их условные обозначения приведены в таблице 1. На рисунке 1 представлены РЭМ-фотографии, характеризующие использованные в работе препреги.

Таблица 1 – Параметры препрега

Обозначение	Полимер для пропитки	Материал «Облицовочного слоя» препрега	Толщина препрега, мкм
ППр-1	ПЭИ	ПЭИ	500
ППр-2	ПЭИ	-	500
ППр-3	ПЭИ	ПЭЭК	500
ППр-4	ПЭС	-	250
ПП-5	ПЭИ	-	250

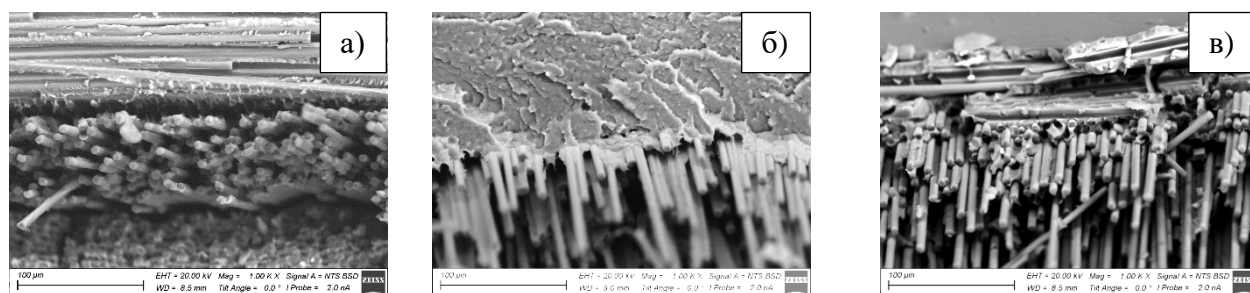


Рисунок 1 – РЭМ-фотографии использованных в работе препрегов:

а) ППр-2; б) ППр-3; в) ППр-5

Для УЗ-соединения пластин использовали станок ультразвуковой сварки УЗПС-7 (ООО «СпецмашСоник», г. Воронеж). Оценка прочности при растяжении 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. Исследование топографии поверхности проводили на оптическом микроскопе Neophot 2 (Carl Zeiss Jena), оборудованном цифровой камерой Canon EOS 550D (Canon Inc.).

В результате проведенных исследований была продемонстрирована перспективность «конструкции» препрега, пропитанного раствором ПЭИ, и подвергнутого последующему компрессионному спеканию (в том числе с целью его утонения до толщины 250 мкм). Показано, что в процессе УЗ-воздействия, происходит сплавление соединяемых пластин ПЭЭК и адгезионных пленок ED, при этом сохранялась структурная целостность УВ-ткани в составе препрега. Использование препрега, пропитанного ПЭС, сопровождалось значительным утонением УЗ-соединяемого пакета по причине большего значения показателя текучести расплава пропитывающего полимера.

При использовании препрега с наплавленными «облицовочными» слоями, за счет большой толщины (порядка 500 мкм) выдавливаемый при УЗС как изнутри, так и снаружи препрега избыточный расплавленный полимер (связующее) оказывал разрушающее воздействие на УВ-

ткань. Это недопустимо с позиции формирования микро- и макроструктуры и принципа УЗ-соединения препрегов на основе УВ-ткани.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2021-0010 и при поддержке проекта Российского научного фонда № 21-19-00741.*

#### Список литературы

1. Бейнер Э.Я., Петрова Г.Н. Термопластичные связующие для полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ. – 2015. – № 11. – С. 40 – 49.
2. Сорокин А.Е., Сагомонова В.А., Петрова А.П., Соловьяничик Л.В. Технологии получения полимерных композиционных материалов на основе термопластичной матрицы (обзор) // Труды ВИАМ. – 2021. – № 3. – С. 78 – 86. [https://kompozit.org.tr/wp-content/uploads/2022/02/CW20\\_Thermoplastics.pdf](https://kompozit.org.tr/wp-content/uploads/2022/02/CW20_Thermoplastics.pdf)
3. Boon Y.D., Joshi S. C., Bhudolia S.K. Review: Filament Winding and Automated Fiber Placement with In Situ Consolidation for Fiber Reinforced Thermoplastic Polymer Composites // Polymers. – 2021. – № 13. – P. 1951.
4. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Развитие автоматизированной выкладки: от истоков до наших дней (обзор) Часть 1. Автоматизированная выкладка лент (ATL) // Авиационные материалы и технологии. – 2021. – № 2 (63). – С. 51 – 61.
5. Gomer A., Zou W., Grigat N., Sackmann J., Schomburg W. K. Fabrication of Fiber Reinforced Plastics by Ultrasonic Welding // Journal of Composites Science. – 2018. – №2. – P. 56.
6. Wang J., Lu C., Xiao C., Cheng J., Ren R., Xiong X. Heat distribution simulation and effects of ultrasonic welding amplitude on carbon fiber/polyetherimide composite joint properties // Materials Letters. – 2023. – № 340. – P. 134148.
7. Alexenko V.O., Panin S.V., Stepanov D.Yu., Byakov A.V., Bogdanov A.A., Buslovich D.G., Panin K.S., Tian D. Ultrasonic Welding of PEEK Plates with CF Fabric Reinforcement – The Optimization of the Process by Neural Network Simulation // Materials. – 2023. – V. 16. – № 5. – P. 2115.