

Анализ рентгенограмм для обеих сталей свидетельствует о том, что при увеличении продолжительности старения при температуре 700°C также происходит уменьшение параметров решетки аустенитных фаз Fe- $\gamma_{N1}$  и Fe- $\gamma_{N2}$ .

На основании результатов рентгеноструктурного анализа можно сделать вывод о том, что обе стали 1,2CN и 1,9CN после 5 часов выдержки претерпевают фазовые превращения при температуре старения 700°C. Исследования микроструктуры сталей с помощью ПЭМ показали, что при старении по границам аустенитных зерен Fe- $\gamma_{N1}$  зарождаются и растут ячейки прерывистого распада: Fe- $\gamma_{N1}$   $\rightarrow$  пластины Cr<sub>2</sub>(N,C) + аустенитная матрица Fe- $\gamma_{N2}$ , рисунок 2 а. Фронт реакции прерывистого распада от границ распространяется по телу аустенитных зерен, рисунок 2 б. Однако в состаренных образцах обеих сталей наблюдали аустенитные зерна, в которых реакция прерывистого распада не протекает. Детальный анализ ПЭМ-изображений показал, что аустенитные зерна Fe- $\gamma_{N1}$ , не “захваченные” реакцией прерывистого распада, имеют крапчатый контраст, а на соответствующих им дифракционных картинах наблюдали радиальное размытие аустенитных рефлексов, рисунок 2 в. Наряду с этим, параметр решетки нераспавшегося аустенита Fe- $\gamma_{N1}$  сталей 1,2CN и 1,9CN уменьшился на  $\Delta a_{1,2CN} = 0,02 \text{ \AA}$  и  $\Delta a_{1,9CN} = 0,04 \text{ \AA}$ , соответственно. То есть, результаты рентгеноструктурного анализа и ПЭМ исследования указывают на то, что происходит гомогенный рост частиц (V,Cr)(N,C) в нераспавшихся аустенитных зернах Fe- $\gamma_{N1}$ . Частицы (V,Cr)(N,C), выделяющиеся по непрерывному механизму в теле аустенитных зерен в результате старения, тормозят движение фронтов прерывистого распада, и реакция не распространяется на такие аустенитные зерна. Помимо этого, старение сопровождается формированием интерметаллидной  $\sigma$ -фазы в двух сталях 1,2CN и 1,9CN у границ аустенитных зерен.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Администрации Томской области (проект № 18-48-700042 р\_а). Исследования проведены с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН.*

*Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Е.Г. Астафуровой, к.ф.-м.н. Майер Г.Г., к.ф.-м.н. С.В. Астафурову, В.А. Москвиной, М.Ю. Панченко, К.А. Реуновой, Е.В. Мельникову за помощь в проведении исследования.*

### Список литературы

1. Berns H., Gavriliuk V., Riedner S. High interstitial stainless austenitic steels. – Berlin: Springer-Verlag, 2013. – 170 p.
2. Astafurov S.V, Maier G.G, Tumbusova I.A. et al. The effect of solid-solution temperature on phase composition, tensile characteristics and fracture mechanism of V-containing CrMn-steels with high interstitial content C+N>1 mass. % // Materials Science & Engineering A. – 2019. – Vol. 44, I. 36. – P.20529-20544.

## ОПТИМИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПЭЭК И УВ-ПРЕПРЕГА

С.В. ПАНИН<sup>1,2</sup>, А.В. БЯКОВ<sup>1</sup>, В.О. АЛЕКСЕНКО<sup>1</sup>, ТЯНЬ ДЭФАН<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Томский политехнический университет

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 друг 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 [1–6].

УЗ-сварка ранее не использовалась в промышленности для изготовления слоистых армированных изделий (препрегов) из термопластичных композиционных связующих. Однако в настоящее время в литературе появляется значительное количество публикаций, посвященных применению метода УЗ-сварки для формирования слоистых композитов на основе высокопрочных высокотемпературных термопластических связующих, армированных высокомодульными волокнами (тканями) [7–10].

Целью работы являлся поиск оптимального сочетания различных факторов ультразвуковой сварки для получения наилучшей структуры и прочностных свойств.

### Результаты исследования и их обсуждения

Таблица 1 – Комбинации факторов при ультразвуковой сварке

№ эксперимента	Уровень / фактор		
	Время УЗ-сварки, мсек.	Время прижима после УЗ-сварки, мсек.	Давление прижима, атм.
50	800	500	2
51	800	1000	3
52	800	1500	4
54	1000	500	3
55	1000	1000	4
56	1000	1500	2
57	1200	500	4
58	1200	1000	2
59	1200	1500	3

После УЗ-сварки проведены испытание на растяжение соединений внахлест (рисунок 1). Также проведен анализ структуры поперечного сечения (рисунок 2).

Особое внимание авторы обращают на два структурных аспекта: целостность центрального (армирующего) слоя, а именно препрега, основой которого являются однонаправленные волокна (в термопластичном связующем), а также остаточная толщина обеих адгезионных пленок (Energy director), которые при УЗ-сварке плавилась и частично выдавливались из зоны сплавления.

Режимы №50-52 соответствовали малому времени УЗ-сварки – 800 мсек. На картине поперечного сечения (рис. 2,а) видно, что при режиме №50 препрег сохранил целостность, а обе пленки ED расплавились. В случае режима №51 на поперечном сечении видно, что препрег также сохранил целостность, а пленки ED имеют остаточную толщину не менее 50 мкм (рисунок 2,б). При использовании режима №52 (рисунок 2,в) «слой» препрега выглядит ровным и широким (рисунок 2,в).

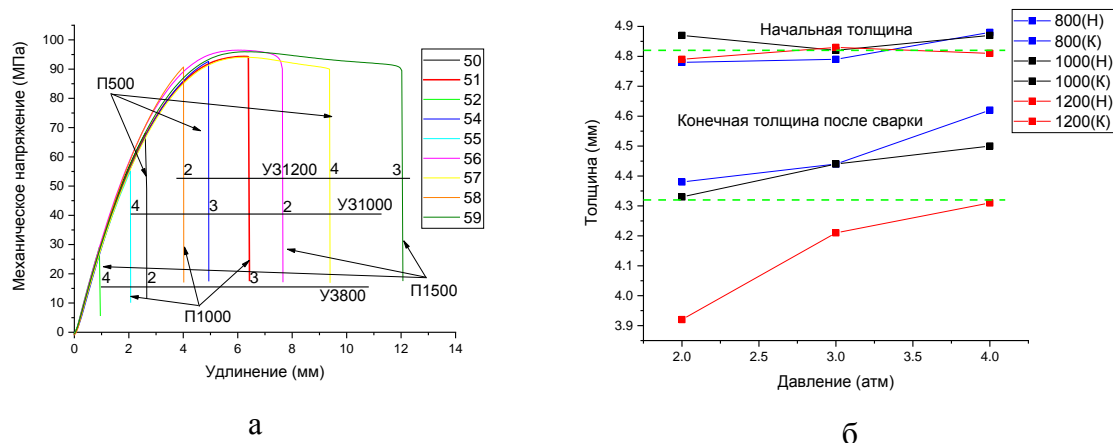


Рисунок 1 – Диаграммы нагружения исследованных образцов (а) и изменение толщины соединений внахлест до и после УЗ-сварки (б)

При всех последующих режимах УЗ-сварки в силу увеличения времени УЗ-колебаний на фотографиях поперечного сечения УЗ-соединений видно, что препрег в той или иной мере утратил целостность (рис. 3,г,д,е,ж,з,и). Это значит, что процесс формирования неразъемного соединения сопровождался плавлением не только пленок ED, но и (частично) препрега.

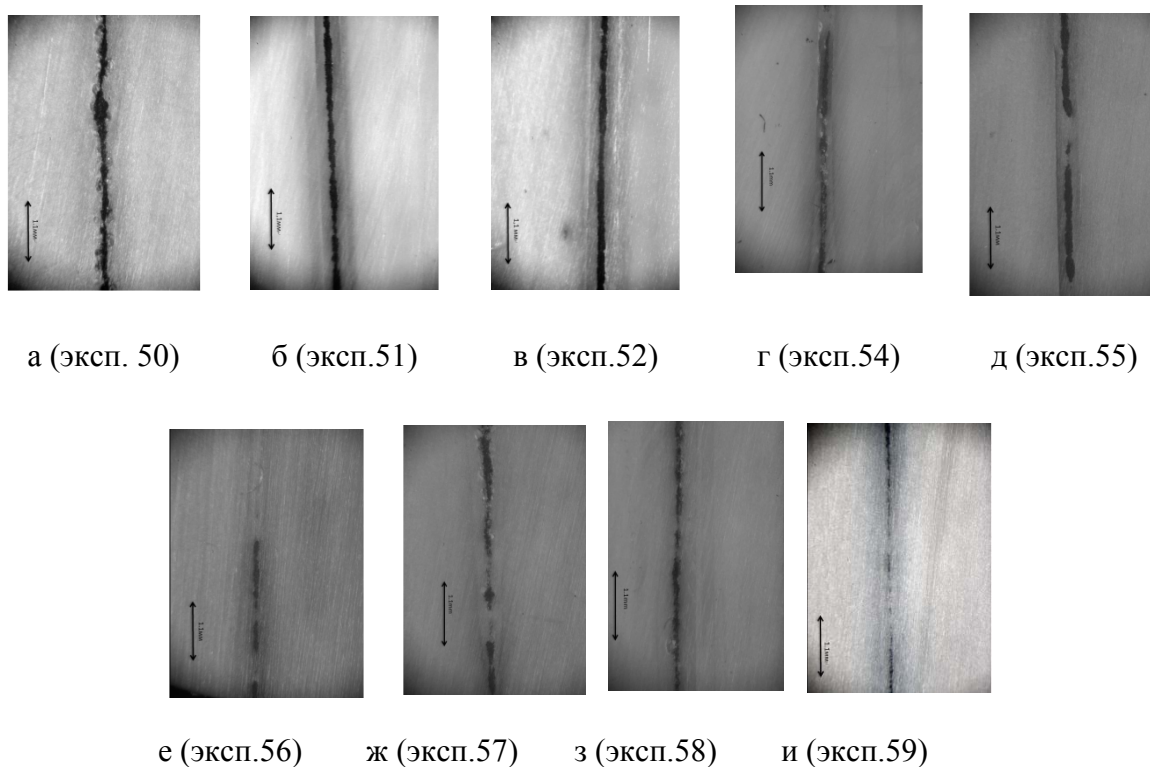


Рисунок 2 – Макроструктура образцов (поперечное сечение центральной части соединения внахлест) для режимов УЗ-сварки согласно таблице 1

В таком случае, если формирование зоны сплавления сопровождалось частичным разрушением препрега, это могло способствовать повышению деформационно-прочностных свойств за счет дополнительного армирования разрушенными волокнами. Однако, разумеется, что такой режим формирования неразъемного соединения неприемлем для практического применения.

### Заключение

Лучшие прочностные свойства обеспечивает режим №9 ( $P_{\text{приж}}=3$  атм,  $\tau_{\text{уз}} = 1200$  мсек.), чему соответствует максимальный предел прочности и величина удлинения до разрушения. Однако при этом происходит плавление препрега и разрушение волокон. С учетом структурных данных рациональным является режим №2 ( $P_{\text{приж}} = 3$  атм,  $\tau_{\text{уз}} = 800$  мсек). При этом обеспечиваются высокие значения  $\sigma_{\text{в}}=94$  МПа и  $\varepsilon=8.5\%$ , происходило требуемое плавление ED, соединение внахлест разрушалось по основному материалу, а препрег сохранял целостность.

В качестве одного из ключевых параметров для контроля процесса УЗ-консолидации слоистого композиты следует принять изменение толщины соединяемого слоистого композита. Как только его толщина уменьшится на величину порядка 350–400 мкм (на 100–150 мкм меньше суммарной толщины обеих адгезионных пленок ED) УЗ-воздействие следует прекращать

### Благодарности

The study was funded by Russian Science Foundation # 21-19-00741, <https://rscf.ru/project/21-19-00741/>.

### Список литературы

1. 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. <https://doi.org/10.1177/073168449601500203>
2. 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. <https://doi.org/10.1002/pc.10525>
3. 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. <https://doi.org/10.1002/pen.760320907>
4. 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. <https://doi.org/10.1002/pen.760320906>
5. Jongbloed, B., Teuwen, J. J. E., Palardy, G., and Villegas, I. F., Benedictus, R. (2018). “Improving weld uniformity in continuous ultrasonic welding of thermoplastic composites,” in *Proceedings of the European Conference on Composite Materials – ECCM 18 (Athens)*.
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. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.07.002>
7. Power Ultrasonics. (2015). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-16435-5>
8. [8] Sackmann, J., Burlage, K., Gerhardy, C., Memering, B., Liao, S., & Schomburg, W. K. (2015). Review on ultrasonic fabrication of polymer micro devices. *Ultrasonics*, 56, 189–200. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2014.08.007>
9. Sánchez-Sánchez, X., Hernández-Avila, M., Elizalde, L. E., Martínez, O., Ferrer, I., & Elías-Zuñiga, A. (2017). Micro injection molding processing of UHMWPE using ultrasonic vibration energy. *Materials & Design*, 132, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.06.055>
10. Sun, Y., Liu, X., & Yang, X. (2018). A novel ultrasonic precise bonding with non-constant amplitude control for thermoplastic polymer MEMS. *Ultrasonics*, 84, 404–410. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.12.005>