

КАЧЕСТВЕННАЯ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ОБРАБОТКИ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН АТМОСФЕРНОЙ ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМОЙ

В. Ш. ЗЫОНГ¹, П. В. КОСМАЧЕВ², С. В. ПАНИН^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: duongvansan@tpu.ru

Полимерные композиты, армированные непрерывными углеродными волокнами, нашли широкое применение благодаря их высоким показателям удельной прочности и модуля упругости, а также отличной термической стабильности и устойчивости к химическим воздействиям [1, 2]. Углепластики широко используются в различных высокотехнологичных областях промышленности, таких как ракетно-космическая техника, авиатехника, автомобилестроение, медицинская техника и многих других [3]. Поверхность углеродных волокон, состоящая из графитовых кристаллических структур, обладает низкой адгезией к полимерной матрице из-за своей гладкости и отсутствия полярных групп [4].

Для улучшения взаимодействия углеродных волокон с полимерной матрицей или связующим часто применяются различные методы их поверхностной обработки. Эти методы включают в себя очистку поверхности волокон от загрязнений, удаление слабо связанных углеродных структур, увеличение шероховатости и/или добавление на поверхность химически активных групп. Плазменная обработка является одним из самых высокотехнологичных и экологически безопасных методов модификации поверхности волокон, который активно изучается в последние десятилетия. Процесс заключается во взаимодействии волокон с активной средой ионизированного газа [5-7]. Это приводит к активации поверхности волокон: образуются и закрепляются функциональные полярные группы, а также повышается поверхностная энергия волокон. Одновременно с этим увеличивается шероховатость поверхности, что улучшает механическую составляющую взаимодействия между полимером и волокном. Таким образом, плазменная обработка способствует значительному улучшению адгезионной связи углеродных волокон с полимерной матрицей.

Целью данной работы является установление влияния атмосферной воздушной плазмы на шероховатость поверхности и величину поверхностной энергии углеродных волокон.

В данной работе была использована установка для плазменной обработки при атмосферном давлении, где сжатый воздух служил источником газа. Было исследовано влияние продолжительности и расстояния обработки на шероховатость поверхности углеродных волокон 12К-300-230 (Umatex, Россия). Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ КУКУ-ЕМ6900, КНР) использовалась для характеристики изменений структуры поверхности УВ при варьировании параметров обработки.

На рисунке 1 представлен пример, демонстрирующий влияние плазменной модификации поверхности волокон при одном из режимов, испытанных в ходе исследования.

Результаты качественно подтверждают, что после плазменной обработки поверхность углеродного волокна претерпела изменения, такие как увеличение шероховатости. Видно, что при длительности обработки $t = 90$ секунд и расстоянии между плазменным соплом и пучком волокон $l = 25$ мм поверхность волокон становится заметно шероховатой по сравнению с исходной. Однако для более точной оценки влияния этих изменений на смачиваемость углеродного волокна необходимо провести количественные исследования.

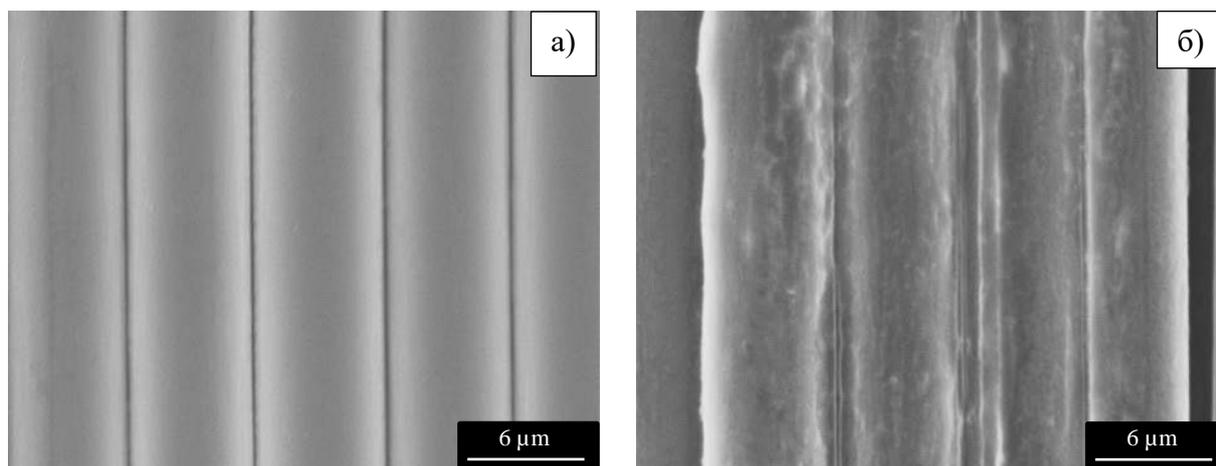


Рисунок 1. СЭМ-изображения поверхности углеродных волокон
а) исходное; б) после плазменной обработки

Влияние плазменной обработки на смачиваемость поверхности материалов оценивали количественно путем измерения угла смачивания и последующего расчета свободной поверхностной энергии [8]. Для этих целей использовался метод Оуэнса, Вендатма, Рабеля и Кельбле (метод ОВРК), который позволяет определить поверхностную энергию через вычисление угла смачивания жидкостей с известными дисперсионной и полярной составляющими поверхностного натяжения [9].

Измерения угла смачивания проводились с использованием системы для измерения краевого угла LR-SDL-100 (Dongguan Lonroy Equipment Co LTD, КНР) методом лежащей капли. В работе применяли тестовые жидкости с разной полярностью (дистиллированную воду, этиленгликоль и дийодметан). Формирование капель одинакового размера на единичных волокнах на данном оборудовании оказалось сложно-осуществимой задачей, однако, поскольку поверхность углеродных волокон состоит из графитовых кристаллических структур [4], для исследования были использованы плоские пластины графита в качестве модели. Измерения угла смачивания проводились на этих пластинах, обработанных плазмой в тех же режимах, что и углеродные волокна.

На рисунке 2 представлены диаграммы, показывающие зависимость угла смачивания при различных режимах плазменной обработки.

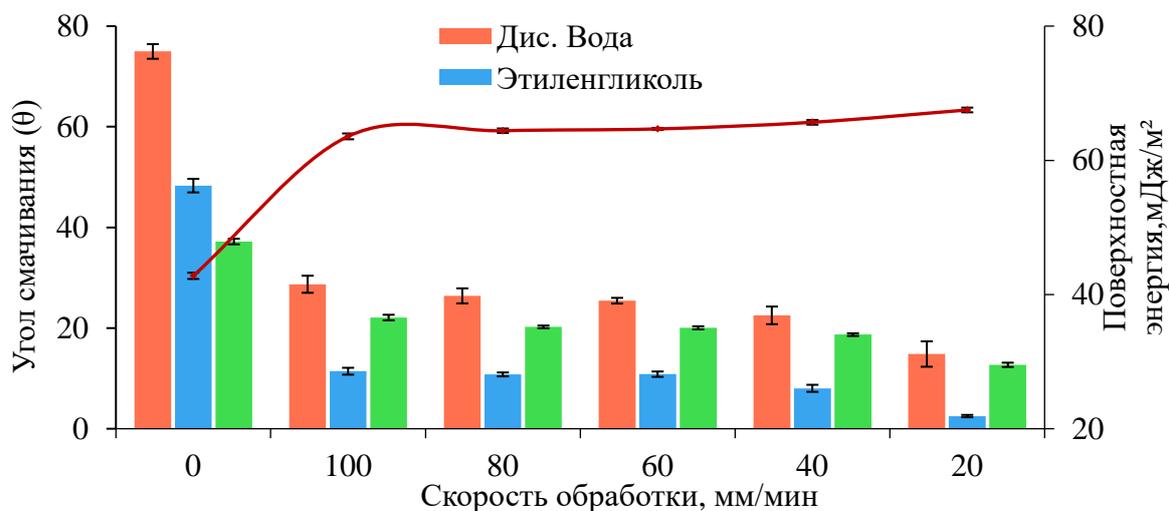


Рисунок 2. Диаграммы зависимости угла смачивания и поверхностной энергии от скорости движения плазмотрона

Было установлено, что обработка плазмой во всех случаях приводила к увеличению смачиваемости углеродного материала. При этом поверхностная энергия увеличивалась с 42,78 мДж/м² для необработанного образца до 63,57 мДж/м² для образца, обработанного при скорости плазмотрона 100 мм/мин. При этом, если скорость плазменной обработки снижалась ниже 100 мм/мин, существенного изменения поверхностной энергии графитовой пластины не наблюдалось. Ожидается, что это может привести к увеличению смачиваемости УВ полимерным связующим при изготовлении полимерных композиционных материалов.

Таким образом, в ходе проведенных исследований, было определено качественное (изменение шероховатости согласно СЭМ) и количественное (изменение удельной поверхностной энергии по методу ОВРК) влияние обработки углеродных волокон в атмосферной воздушной плазме. Дальнейшие исследования предполагают изготовление образцов полимерных композитов из модифицированных плазмой углеродных волокон и сравнение их механических свойств с аналогичными образцами с исходными волокнами.

Список литературы

1. Xiao, J., Zhang, X., Zhao, Z., [et al.]. Rapid and Continuous Atmospheric Plasma Surface Modification of PAN-Based Carbon Fibers // American Chemical Society (ACS). – 2022. – Vol. 7, №. 13. – P.10963–10969.
2. Kong L. M., Wang X. B., Zheng W. [et al.]. Effects of plasma treatment on properties of carbon fiber and its reinforced resin composites // Materials Research Express. – 2020. – Vol. 7. – №. 6.
3. Zhao L. X., Liu W. Z., Liu P. X. [et al.]. Study on atmospheric air glow discharge plasma generation and surface modification of carbon fiber fabric // Plasma Processes and Polymers. 2020. – Vol. 17, №. 4.
4. Borooj M. B., Shoushtari A. M., Sabet E. N., Haji A. Influence of oxygen plasma treatment parameters on the properties of carbon fiber Journal of Adhesion Science and Technology. – 2016. – Vol. 30. – №. 21. – P. 2372–2382.
5. Kosmachev P. V., Panin S. V., Panov I. L., Bochkareva S. A. Surface Modification of Carbon Fibers by Low-Temperature Plasma with Runaway Electrons for Manufacturing PEEK-Based Laminates // Materials. – 2022. – Vol. 15. – №. 7625.
6. Kosmachev P.V., Panin S.V., Panov I.L., Bochkareva S.A. Structure and Deformation Behavior of Polyphenylene Sulfide-Based Laminates Reinforced with Carbon Fiber Tapes Activated by Cold Atmospheric Plasma // Polymers. – 2024. – Vol. 16. – №. 121.
7. Sun X., Bao J., Li K. [et al.]. Advance in Using Plasma Technology for Modification or Fabrication of Carbon-Based Materials and Their Applications in Environmental, Material, and Energy Fields // Advanced Functional Materials. – 2020. – Vol. 31. – №. 7.
8. Gravis D., Moisan S., Poncin-Epaillard F. Surface characterization of plasma-modified carbon fiber: Correlation between surface chemistry and morphology of the single strand // Surfaces and Interfaces. – 2020. – Vol. 21. – P. 100731.
9. Owens D. K., Wendt R. C. Estimation of the surface free energy of polymers // Journal of Applied Polymer Science. – 1969. – Vol. 13. – P. 1741–1747.