

## ИСПЫТАНИЕ ОБРАЗЦОВ ГИБРИДНОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ПО СТАНДАРТУ ASTM D7905

ХУ СИНЬ<sup>1</sup>, М.В.БУРКОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: [burkov@tpu.ru](mailto:burkov@tpu.ru)

Стеклопластики имеют высокие механические и другие специальные свойства, такие как коррозионная стойкость, обладая ценой ниже, чем углепластики. Детали, изготавливаемые из стеклопластиков, часто находят применение в авиационной, морской и автомобильной промышленности, при строительстве водохранилищ, нефтеперерабатывающих заводов, а также в производстве различных бытовых товаров. В качестве связующих используются термопластичные и термореактивные полимеры. В настоящее время актуальным является исследование композитов, в которых помимо основного армирования непрерывными волокнами используются дополнительные наполнители. В качестве таковых могут выступать различные микро- и наночастицы металлов в форме шаров и волокон, наночастицы графена (в форме пластин), углеродные микроволокна или углеродные нанотрубки. Среди вышеуказанных наполнителей, углеродные волокна и нанотрубки могут одновременно повышать как механические свойства, так и электрические, и тепловые. При этом изготовление таких гибридных композитов из сухого волокна с термореактивными матрицами является достаточно изученным, а полученные материалы обладают повышенными характеристиками. Модификация же КМ, изготавливаемых из термопластичных препрегов, является менее изученной. В данной работе была поставлена задача исследовать возможность модификации стеклопластиков на основе полиамидного связующего добавлением углеволокон и нанотрубок на слой препрега.

Для исследования были изготовлены образцы без наполнения и с разными наполнителями по двум методам: распылением (S) и нанесением на полиамидную сетку (M). Каждый из методов производства включал свой исходный состав стеклопластика без наполнителя и стеклопластики с армированием углеродными нанотрубками (CNT) и короткими углеродными волокнами (CF). После изготовления образцов были проведены испытания на определение трещиностойкости по стандарту ASTM D7905 [1]. Эскиз образца приведен на рисунке 1.

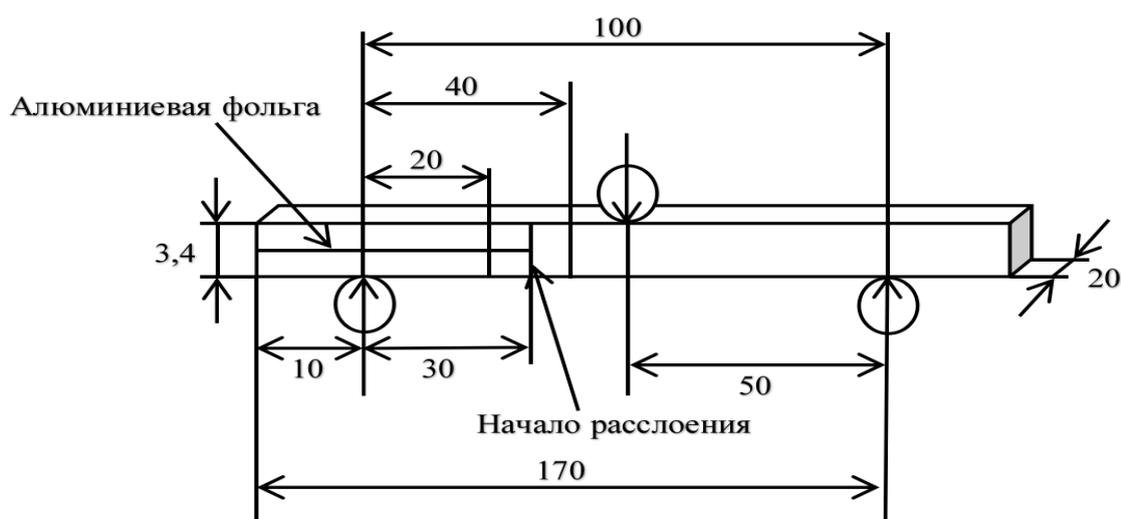


Рисунок 1 – Эскиз образца

Всего было изготовлено 9 составов стеклопластиков с укладкой  $[0]_{8S}$ . Из каждого вырезали по три образца для испытаний. Длина образца составляла 170 мм, ширина 20 мм, толщина 3,4 мм. В середине укладки согласно стандарту была добавлена алюминиевая фольга, действующая в качестве антиадгезионной пленки, создающей начальную зону расслоения. Толщина пленки составляла 10 мкм, а начальная длина ( $a_i$ ) – примерно 45 мм. Для облегчения визуального обнаружения вершины расслоения и проведения процедуры калибровки податливости наносили калибровочные метки. Для этого белым маркером красили боковую сторону образца и отмечали вершину фольги тонкой вертикальной линией, затем отмечали три вертикальные калибровочные метки на боковой поверхности, расположенные в пределах пленки на расстоянии 20, 30 и 40 мм от начала фольги. Затем образцы были испытаны на изгиб по стандарту ASTM D7905 [1]. Трещиностойкость определяли в двух состояниях: NPC – трещиностойкость образца после формования и PC – после прироста естественной трещины по окончании NPC испытания.

Расчет трещиностойкости производится следующим образом:

$$G_{Пс} = \frac{3mP_{Max}^2 a_i^2}{2B} \quad (1)$$

где  $m$  – коэффициент, определенный по результатам калибровки податливости,  $P_{Max}$  – максимальная сила при испытании на разрушение,  $a_i$  – длина трещины перед началом роста расслоения,  $B$  – ширина образца.

На рисунке 2 показано сравнение значений трещиностойкости в состоянии NPC и PC с разными составами, полученными методом распыления.

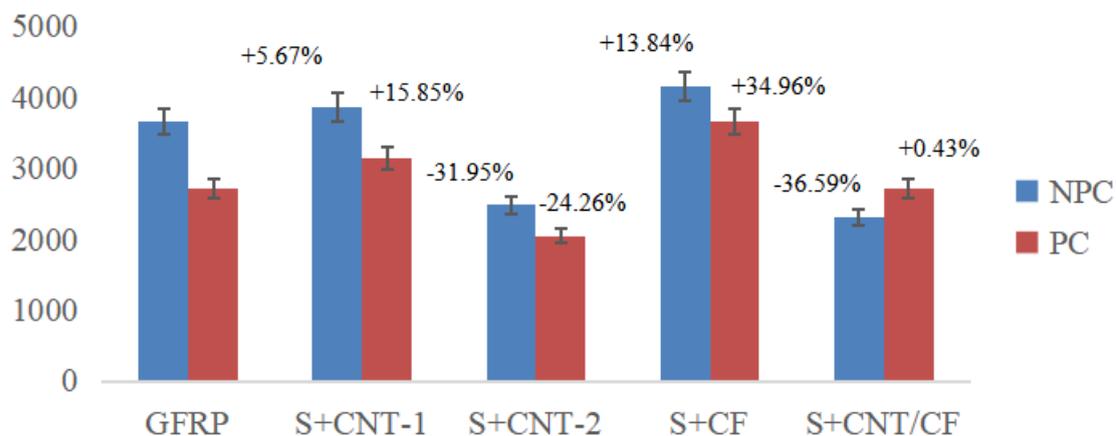


Рисунок 2 – Сравнение трещиностойкости всех S образцов в состоянии NPC и PC

На рисунке 3 представлены значения трещиностойкости на NPC и PC с разными составами, изготовленными с использованием полиамидной сетки. В таблице 1 приведены сводные данные по определению трещиностойкости всех составов стеклопластиков.

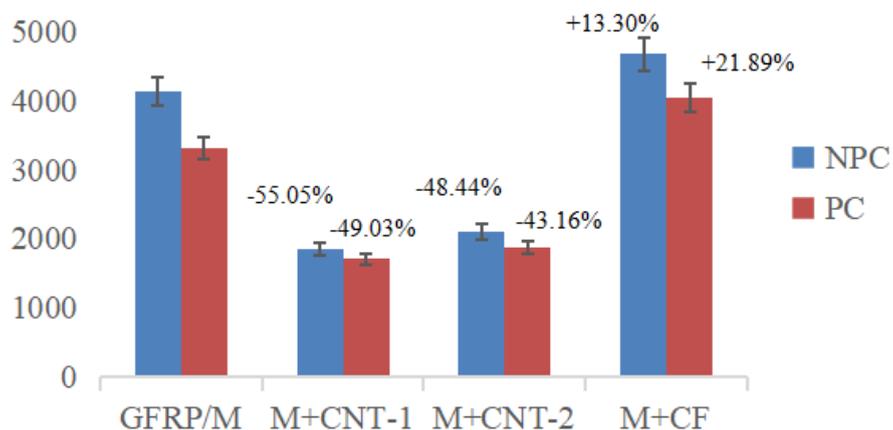


Рисунок 3 – Сравнение трещиностойкости всех М образцов в состоянии NPC и PC

Таблица 1 - Значения трещиностойкости всех составов стеклопластика

G <sub>пс</sub> , Дж/м <sup>2</sup>	GFRP	S+CNT-1	S+CNT-2	S+CF	S+CNT/CF	GFRP/M	M+CNT-1	M+CNT-2	M+CF
NPC	3654,5 ±159,7	3861,7 ±266,3	2487,0 ±277,2	4160,2 ±248,1	2317,5 ±799,2	4135,5 ±629,2	1858,9 ±456,5	2107,7 ±895,7	4685,6 ±371,3
PC	2710,6 ±131,8	3140,2 ±370,5	2053,1 ±533,0	3658,3 ±233,7	2722,3 ±721,9	3319,8 ±274,9	1711,7 ±293,2	1887,0 ±286,6	4046,5 ±601,3

По результатам сравнения видно, что по методу распыления значение трещиностойкости при добавлении нанотрубок S+CNT-1 (напыление в один слой) повышается в обоих состояниях на 5-15 %. Напыление нанотрубок в два слоя (S+CNT-2) резко снизило трещиностойкость на 30 %. Совместное добавление нанотрубок и углеродов (S+CNT/CF) в состоянии PC практически не изменило трещиностойкости. Использование углеродов (S+CF) привело к повышению трещиностойкости в обоих состояниях: +14 % и +35 %, для NPC и PC соответственно.

Применение второго метода изготовления с помощью нейлоновой сетки, на которую напыляли наполнители, дало похожие результаты. Единственное отличие, что добавление нанотрубок независимо от количества слоев напыления приводило к резкому падению трещиностойкости на ~50 %. Углеродов при этом, аналогично вышеуказанным результатам, дают прирост трещиностойкости на 13-22 %.

*В работе применялось оборудование ЦКП НОИЦ НМНТ ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710».*

### Список литературы

1. D7905/D7905M – 14 Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites.