

УДК 538.975:539.21:539,3/.8:62-253/-254

Д.В. КРИВОРУЧКО, д-р техн. наук,
И.О. ОСАДЧИЙ,
В.А. КОЛЕСНИК, Сумы, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В результаті експериментальних досліджень механічних і трибологічних властивостей вуглепластика та його компонентів у роботі показано, що міцність вуглепластика безпосередньо залежить від модуля пружності через перерозподіл навантажень між волокном і матрицею. Коефіцієнт тертя в парі «вуглепластик-твердий сплав» визначається в основному деформаційною складовою і варіюється в межах 0.12 до 0.4 через неоднорідність структури вуглепластика.

В результате экспериментальных исследований механических и трибологических свойств углепластика и его компонентов в работе показано, что прочность углепластика напрямую зависит от модуля упругости из-за перераспределения нагрузок между волокном и матрицей. Коэффициент трения в паре «углепластик-твердый сплав» определяется в основном деформационной составляющей и варьируется в пределах 0.12 до 0.4 из-за неоднородной структуры углепластика.

Experimental studies of mechanical and tribological properties of CFRP and its components shows that the strength of the CFRP depends on the elasticity modulus due to load distribution between fiber and matrix. Friction coefficient "CFRP-carbide" is determined mainly by the deformation component of friction force and varies between 0.12 to 0.4 due to the inhomogeneous structure of CFRP.

Введение

Повышение стоимости энергоресурсов делает актуальным разработку машин с пониженным энергопотреблением, высоким КПД и малой массой. Внедрение новых материалов раскрывает широкие возможности создания таких машин и механизмов. В последние годы широкое развитие получили углепластики, имеющие высокую удельную прочность за счет использования в их составе углеродных нановолокон. Этот материал применяется в основном для изготовления корпусных элементов машин. Вместе с тем высокая удельная прочность углеволокна и низкий коэффициент трения

позволяют создавать из него и детали другого назначения. В частности, на наш взгляд, этот материал является перспективным для изготовления зубчатых колес быстроходных передач. В этих передачах снижение массы зубчатых колес позволит уменьшить вибрации, шум и обеспечить дополнительное повышение частоты вращения.

Наличие достоверной информации о механических свойствах материала является основной для проектирования любого изделия. Вместе с тем свойства волокнистых полимерных композиционных материалов (ВПКМ), и, в частности, углепластиков, зависят от характера армирования, технологии изготовления и последующей термической обработки. Это хорошо видно из результатов исследований образцов углепластика с однонаправленной ориентацией волокон углеволокна, в которых механические свойства образцов весьма различаются.

Так Р. Mahajan, N. Bhatnagar установили, что модуль упругости вдоль волокон их образца составляет 140 ГПа, модуль упругости поперек волокон – 11 ГПа, модуль сдвига – 6 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,38 [1]. Е. Brinksmeier, S. Fangmann определили модуль упругости вдоль волокон – 142 ГПа, поперек волокон - 9 ГПа, твердость – 121 НВ, плотность – 1,6 г/см³ [2]. В работе F. Balle, S. Nuxhold приведены свойства: модуль упругости вдоль волокон – 135 ГПа, предел прочности - 580 МПа, относительное удлинение – 1,1% [3]. Т Sen, Н. N. Jagannatha Reddy определили модуль упругости, равный 240 ГПа, предел прочности при растяжении - 490 МПа [4]. W. Hintze, D. Hartmann определили модуль упругости вдоль волокон на уровне 139 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,37, предел прочности на растяжение - 600 МПа [5]. Y. Li , N. Hogi представили результаты: модуль упругости вдоль волокон – 120 ГПа, модуль упругости поперек волокон – 8,8 ГПа, модуль сдвига – 6 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,25 [6]. F. Gaoa, L. Boniface в своей статье приводят следующие данные: модуль упругости вдоль волокон – 136 ГПа, модуль упругости поперек волокон - 8,3 ГПа, коэффициент Пуассона - 0,34 [7]. Область варьирования основных свойств углепластиков: модуль упругости вдоль волокон - 120-240 ГПа (наиболее вероятно 140 ГПа), поперек волокон – 8,3-11 ГПа, коэффициент Пуассона - 0,25–0,38, предел прочности на растяжение вдоль волокон- 490 - 600 МПа.

В приведенных работах показано, что свойства ВПКМ не являются суммой свойств углеволокна и матрицы. Поэтому для выполнения детальных расчетов, в том числе и методом конечных элементов, необходимо изучение свойств отдельно углеволокна, матрицы и всего материала в целом. Изучение эти свойств для разработанной авторами технологии изготовления углепластика является **целью** этой работы.

Методика проведения испытаний

Изучении механических свойств углепластика выполнялось путём испытания на растяжение по ГОСТ 25.601-80. Образцы углепластика изготавливались из углеленты однонаправленной марки ЛУ-П-0,1. Схема укладки представляла собой сложенные друг на друга полосы ленты в направлении оси образца. Объемная доля волокна составила примерно 50%. Пропитка проводилась предварительно приготовленной эпоксидной смолой Lorit-285. Смола смешивается в соотношении 5 частей смолы и 2 части отвердителя. После пропитки и укладки заготовка помещалась в вакуумный пакет на 12 часов, процесс вакуумирования происходил при температуре 35 °С. Размеры и форма образцов соответствовали ГОСТ 25.601-80. Ширина образца равна 12 мм, толщина – 1 мм. Применение подкладок обеспечило надежность закрепления образцов в захватах.

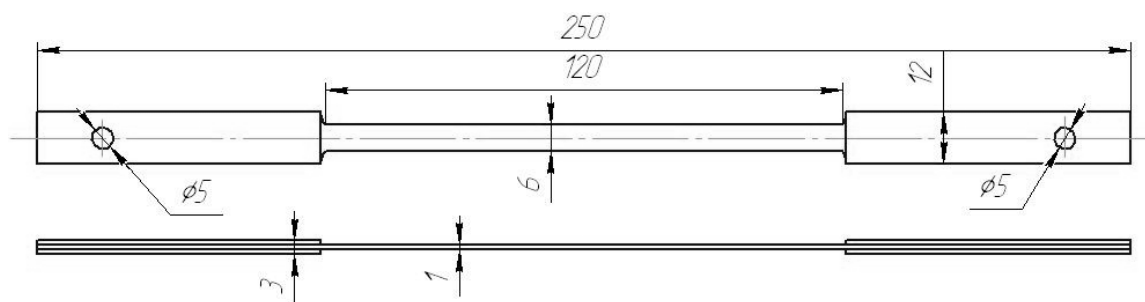


Рисунок 1 – Эскиз углепластикового образца

Исследование свойств эпоксидной смолы выполнялось путем разрушающих испытаний, в частности испытания на растяжение по ГОСТ 11262-80 и сжатие по ГОСТ 4651-86.

Исследование свойств смолы на растяжение выполнялись на призматических образцах толщиной 2 мм по ГОСТ 11262-80, на сжатие – на цилиндрических образцах диаметром 20 мм и высотой 20 мм.

Всего было изготовлено по 6 образцов каждого вида. Образцы закреплялись в зажимы испытательной машины по меткам, чтобы продольная ось образца совпадала с осью зажимов. Скорость движения подвижного захвата была равна 1мм/мин. Торцы образцов на сжатие смазывались маслом для уменьшения трения.

Свойства углеленты определены заводом производителем и представлены в паспорте. Модуль упругости при изгибе – (157 ± 25) ГПа, разрушающее напряжение при растяжении в углепластике - 0,7 ГПа, разрушающее напряжение при сжатии в углепластике - 0,7 ГПа, плотность в углепластике – $(31,49 \pm 0,05)$ г/см³, объёмная доля углеродной ленты - (62 ± 4) %.

Для проведения испытаний применялась испытательная машина УМЭ10-ТМ, система сбора данных LTR-U-1, программа Power Graph 3.0. Упругая деформация углепластика измерялись с помощью тензорезисторов КФ 5П1-5-100-А-12 со средним значением чувствительности $K = 2,09$, средним квадратическим отклонением чувствительности $Sk = 0,005$. Была реализована полномостовая схема включения тензорезисторов.

Исследование трибологических свойств выполнялось путем вдавливания вращающегося сферического индентора [8]. На базовую поверхность динамометра устанавливалось контртело (образцы из углепластика или смолы) в виде пластины толщиной 5 мм с параллельными боковыми поверхностями. В цанговом патроне была закреплена оправка с центровым отверстием. Индентор в виде полированной сферы диаметром 9,6 мм был изготовлен из твердого сплава. Нагружение контртела индентором осуществлялось перемещением консоли станка вверх вдоль оси z. Индентор вращался относительно своей оси непрерывно на протяжении всего нагружения. Измерение момента трения проводилось при частоте вращения шпинделя $n = 31,5$ об/мин. Обработка результатов была выполнена по методике [8].

Результаты исследований

Проведенные испытания показали, что материал матрицы (смола Lorit-285) проявляет весьма большую текучесть при сжатии, и в тоже время весьма хрупко сопротивляется растяжению (рис. 2). Следует отметить, что модуль упругости матрицы в 74 раза меньше модуля упругости углеволокна, а

модуль упругости углепластика всего в 2 раза меньше модуля упругости углеволокна (табл. 1). Величина модуля упругости углеволокна оказалась меньше тех значений, которые опубликованы в литературе, но все же всего только в два раза меньше модуля упругости стали.

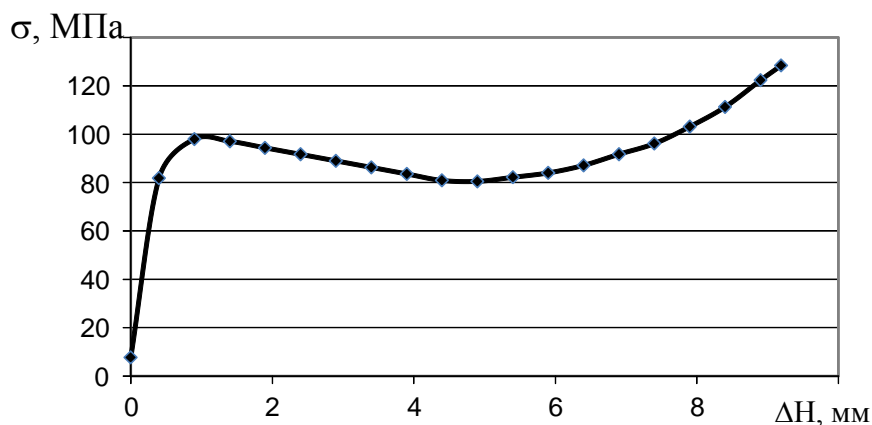


Рисунок 2 – Характерная диаграмма сжатия эпоксидной смолы Lorit-285 в истинных напряжениях

Таблица 1 – Свойства исследованных материалов

Материал	Плотность, г/см ³	Модуль упругости, ГПа	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа
Углеволокно в ленте ЛУ-П-0,1	1,7	260	-	2700 – 3000
Смола Lorit-285	0,85	3,5	120 (сжатие)	130
			-	65 (растяжение)
Углепластик	1,6	115	-	680 (растяжение вдоль волокон)

Также важно отметить, что предел прочности углепластика при растяжении вдоль волокон оказался на 80 МПа больше, чем в известных публикациях, что объясняется тщательной подготовкой образцов с удалением воздуха вакуумом. Такой предел прочности примерно соответствует свойствам, например, стали 45 твердостью 225 НВ. Однако при этом плотность углепластика в 4,6 раза меньше, чем стали. Таким образом, удельная прочность углепластика составила 0,4 МПа/(кг/м³) против 0,087 МПа/(кг/м³) у стали той же прочности.

Разрушение происходит путем вытягивания волокон. Относительное удлинение углепластика составило менее 1%. Хрупкий характер разрушения при растяжении обусловлен хрупкостью материала матрицы. Поэтому в качестве критерия макро разрушения можно принять в первом приближении максимальные главные напряжения.

Для того, чтобы оценить достижимые свойства углепластика рассмотрим процесс совместного растяжения двух склеенных стержней (рис. 3). Поскольку деформация стержней одинакова и равномерна вдоль поверхности склеивания, то сдвиговые деформации и касательные напряжения между стержнями отсутствуют. Тогда удлинение стержней равно

$$\Delta l = \frac{P \cdot l}{E \cdot (A_1 + A_2)} = \frac{P_1 \cdot l}{E_1 \cdot A_1} = \frac{P_2 \cdot l}{E_2 \cdot A_2}, \quad (1)$$

где E , E_1 , E_2 – модуль упругости вдоль волокон углепластика, углеволокна и матрицы соответственно; l – длина стержня; A_1 и A_2 – площадь сечения стержня из углеволокна и матрицы соответственно P , P_1 , P_2 – сила растяжения углепластика, волокна и матрицы соответственно.



Рисунок 3 – Расчетная схема

Уравнение равновесия

$$P = P_1 + P_2. \quad (2)$$

Тогда напряжения в каждом из стержней и, следовательно, в каждом из компонентов углепластика равны (σ_1 – в волокне, σ_2 – в матрице)

$$\sigma_1 = \frac{E_1}{E} \sigma, \quad \sigma_2 = \frac{E_2}{E} \sigma, \quad (3)$$

где σ – напряжения в углепластике,

$$E = E_1k + E_2(1 - k), \quad (4)$$

k – объемная доля углеволокна.

Таким образом, увеличение объемной доли углеволокна будет способствовать увеличению модуля упругости углепластика. Для исследуемого углепластика теоретический модуль упругости, рассчитанный по формуле (4) составляет 131,8ГПа, что всего на 10% больше измеренного. Для обеспечения модуля упругости углепластика на уровне модуля упругости стали объемная доля углеволокна должна составлять около 75%.

Расчеты по формуле (3) показывают, что в момент разрушения напряжения в углеволокне составили 1540МПа, в то время как в матрице всего 21МПа. Прочности волокна использована только на 50%, прочность матрицы – только на 32%. Разрушение матрицы при столь низких напряжениях вызвано наличием неизбежных макродефектов в местах вклейки волокон. Увеличение модуля упругости углепластика способствует увеличению напряжений в углеволокне и уменьшению их в матрице, что в свою очередь должно способствовать большему использованию несущей способности углеволокна при прочих равных условиях. Уменьшение дефектов в матрице также является направлением увеличения прочности углепластика.

Исследование трибологических свойств углепластика в паре с твердым сплавом удалось выполнить в диапазоне нормальных давлений от 120 до 250 МПа, а смолы от 70 до 120. Волокна углепластика располагались касательно к поверхности индентора.

При больших давлениях происходит активное разрушение поверхности образцов и нормальные напряжения снижаются из-за возрастания пятна контакта при любой начальной нагрузке. Средний коэффициент трения смолы находился в диапазоне от 0.15 до 0.35, в то время как коэффициент трения углепластика находился в диапазоне от 0.12 до 0.4. Разложение силы трения на адгезионную и деформационную составляющие показало (рис. 4), что наибольший вклад в коэффициент трения вносит деформационная составляющая из-за активного взаимодействия смолы и углеволокна с микронеровностями индентора. Прочность адгезионных связей в паре «смола-твердый сплав» была

определена на уровне 7 МПа. В паре «углепластик-твердый сплав» прочность адгезионных связей стремится к 0. Более широкий диапазон варьирования коэффициента трения в паре «углепластик-твердый сплав» можно объяснить неоднородностью углепластика и сильной зависимостью условий трения от положения места испытаний в образце.

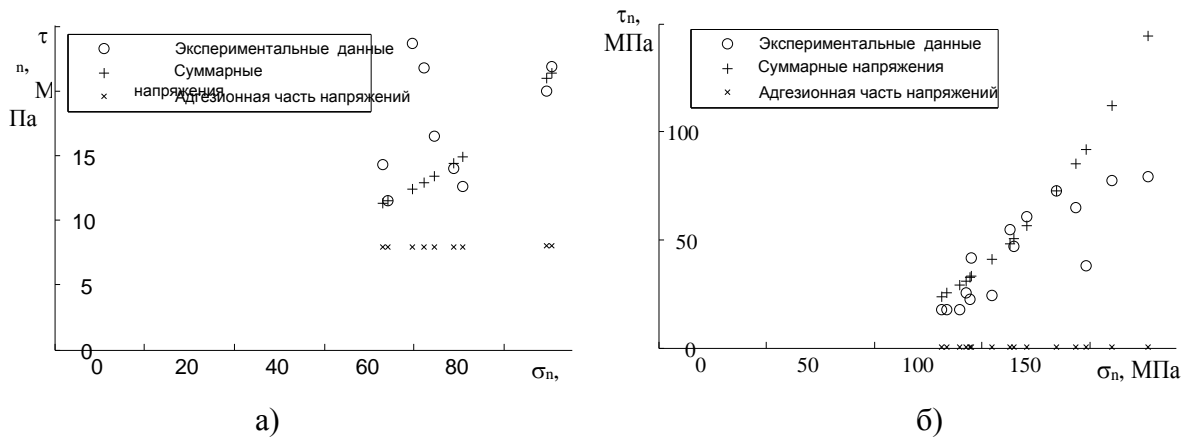


Рисунок 4 – Зависимость касательных напряжений от нормальных по результатам испытаний пары «смола-твердый сплав» (а) и пары «углепластик-твердый сплав» (б)

Выводы

Установлено, что модуль упругости углепластика вдоль волокон почти в два раза меньше модуля упругости конструкционных сталей. Он зависит от технологии изготовления, структуры армирования и последующей термической обработки. Уменьшение дефектов формовки и увеличение объёмной доли углеволокна способствует увеличению модуля упругости. Прочность углепластика напрямую зависит от модуля упругости из-за перераспределения нагрузок между волокном и матрицей.

Коэффициент трения в паре «углепластик-твердый сплав» определяется в основном деформационной составляющей и варьируется в пределах 0.12 до 0.4 из-за неоднородной структуры углепластика.

Список использованных источников 1. Mahajan P., Bhatnagar N. Micro-mechanical modeling of FRP composites – Cutting force analysis // Composites science and technology. - 2007. - № 67. - С. 579 - 593. **2.** Brinksmeier E., Fangmann S. Drilling of composites and resulting surface integrity // Manufacturing technology. - 2011. - № 60. - С. 57 - 60. **3.** Balle F., Huxhold S. Damage Monitoring of Ultrasonically Welded Aluminum / CFRP-Joints by Electrical Resistance Measurements // Procedia Engineering. - 2011.

- № 10. - P. 433-438. **4.** *Sen T., Reddy H. N. J.* Strengthening of RC beams in flexure using natural jute fibre - textile reinforced composite system and its comparative study with CFRP and GFRP strengthening systems // *International Journal of Sustainable Built Environment*. - 2013. - № 2. - P. 41-55. **5.** *Hintze W., Hartmann D.* Modeling of delamination during milling of unidirectional CFRP // *Procedia CIRP*. -2013. - № 8. - P. 444-449. **6.** *Li Y., Hori N.*, Improvement of interlaminar mechanical properties of CFRP laminates using VGCF // *Composites*. - 2009. - № 40. - P. 2004-2012. **7.** *Gao F., Boniface L.* Damage accumulation in woven-fabric CFRP laminates under tensile loading: 2. Modeling the effect of damage on macro-mechanical properties // *Composites Science and Technology*. – 1999. - № 59. – P. 137-145. **8.** Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография / Д.В. Криворучко, В.А. Залога; Под общ. ред. В.А. Залого. – Сумы : Университетская книга, 2012. – 496 с.

Bibliography (transliterated): **1.** *Mahajan P., Bhatnagar N.* Micro-machanical modeling of FRP composites – Cutting force analysis // *Composites science and technology*. - 2007. - № 67. - С. 579-593. **2.** *Brinksmeier E., Fangmann S.* Drilling of composites and resulting surface integrity // *Manufacturing technology*. - 2011. - № 60. - С. 57-60. **3.** *Balle F., Huxhold S.* Damage Monitoring of Ultrasonically Welded Aluminum / CFRP-Joints by Electrical Resistance Measurements // *Procedia Engineering*. - 2011.- № 10. - R. 433-438. **4.** *Sen T., Reddy H. N.J.* Strengthening of RC beams in flexure using natural jute fibre - textile reinforced composite system and its comparative study with CFRP and GFRP strengthening systems // *International Journal of Sustainable Built Environment*. -2013. - № 2. - R. 41-55. **5.** *Hintze W., Hartmann D.* Modeling of delamination during milling of unidirectional CFRP // *Procedia CIRP*. -2013.- № 8. -R. 444-449. **6.** *Li Y., Hori N.*, Improvement of interlaminar mechanical properties of CFRP laminates using VGCF // *Composites*. - 2009. - № 40. - R. 2004-2012. **7.** *Gao F., Boniface L.* Damage accumulation in woven-fabric CFRP laminates under tensile loading: 2. Modeling the effect of damage on macro-mechanical properties // *Composites Science and Technology*. – 1999. - № 59. – R. 137 – 145. **8.** Modelirovanie processov rezanija metodom konechnyh jelementov: metodologicheskie osnovy: monografija / D. V. Krivoruchko, V. A. Zaloga ; Pod obshh. red. V.A. Zalogi. — Sumy: Universitetskaja kniga, 2012. — 496 s.