

<https://doi.org/10.15407/knit2020.05.022>

УДК 67.02

С. О. ОДАЙСЬКИЙ¹, інж.

E-mail: tolya220@gmail.com

О. М. ПОТАПОВ¹, нач. комплексу перспективних матеріалів і технологій,

акад. Акад. технол. наук України, канд. техн. наук, акад. МАА

С. В. ФЕДОРЕНКО², нач. групи

А. П. ЩУДРО¹, пров. інж.-конструктор

А. С. КУЛИК¹, інж.-конструктор

¹ ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля»

вул. Криворізька 3, Дніпро, Україна, 49047

² Дніпропетровське представництво генерального замовника — Державного космічного агентства України

вул. Криворізька 1, Дніпро, Україна, 49047

СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ТРУБ З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ КОНСТРУКЦІЙ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

При проектуванні літальних апаратів широко використовуються рамні силові конструкції, в яких для зменшення масогабаритних характеристик застосовуються композитні стрижневі елементи. Для вирішення проблем виготовлення стрижневих елементів з полімерних композиційних матеріалів було розроблено технологію виготовлення вуглепластикових труб з використанням наявного верстата для намотування вуглецевого волокна, що забезпечує необхідну міцність і жорсткість переважно у поздовжньому напрямку. При розрахунках стрижневих елементів слід врахувати всі навантаження, які будуть впливати на конструкцію з урахуванням коефіцієнта термічного розширення. Для досягнення необхідних фізико-механічних і теплофізичних характеристик оптимальною схемою армування з квазіпоздовжнім напрямком волокон.

Розроблено спосіб виготовлення з використанням технологічного прийому, що дозволяє отримати схему армування з орієнтацією волокон в квазіпоздовжньому напрямку з кутом армування близько 1° комбінованим методом пошарового намотування вуглецевого волокна та викладення пакетів припрегів на формоутворювальну оправку з подальшим термічним швиванням полімерної матриці. В результаті технологічного відпрацювання були отримані зразки вуглепластикових стрижневих елементів, на яких провадилося тестування розрахункових характеристик. З метою перевірки фізико-механічних і теплофізичних характеристик визначались межі міцності і модулі пружності при згинанні, при крученні і при стисненні, визначався також коефіцієнт температурного розширення. Отримані характеристики залежностей модуля пружності матеріалу дослідних зразків труби від кута орієнтації волокон корелюють з теоретичними розрахунками.

На представлений спосіб отримано патент України № UA 128613.

Ключові слова: стрижневий елемент, труба, вуглепластик, намотування вуглецевого волокна, схема армування.

ВСТУП

Одним з основних несучих елементів авіакосмічної техніки є фермові і рамні конструкції, які працюють в умовах силових і температурних навантажень, що змінюються в широкому діа-

пазоні. Високі вимоги до подібних конструкцій (висока і стабільна міцність і жорсткість, мінімальна вага, низький і стабільний коефіцієнт термічного розширення) можуть бути задоволені при використанні елементів, виготовлених

Цитування: Одайський С. А., Потапов А. М., Федоренко С. В., Щудро А. П., Кулик А. С. Спосіб виготовлення труб з полімерних композиційних матеріалів для конструкцій літальних апаратів. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 5 (126). С. 22—27. <https://doi.org/10.15407/knit2020.05.022>

з вуглепластиків у вигляді труби прямокутного перетину з фітингами.

Сучасні адитивні технології виробництва виробів з полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) дозволяють автоматизувати виконання виробничих операцій і істотно розширити перелік вузлів, виготовлених з ПКМ, в аерокосмічній техніці. Серед адитивних технологій, що знайшли застосування при серійному виробництві деталей з ПКМ, найбільшого поширення набули: автоматизоване розміщення волокна (для виготовлення корпусних деталей зі складною геометричною формою), мокре намотування вуглецевого волокна (для виготовлення деталей у вигляді тіл обертання). Через те що стрижневі елементи найчастіше є прямолінійними трубами квадратного або прямокутного перерізу, більш технологічною для даного типу виробу є технологія мокрого намотування.

Відомі способи виготовлення вуглепластикових стрижневих елементів рамних і фермових силових конструкцій з ПКМ. У роботі [4] описано спосіб, в якому на формоутворювальне оправлення намотуються шари волокна, просоченого полімерним сполучним. Відомий також спосіб [5], в якому на формоутворювальне оправлення намотують спіральні шари просоченої тканини наповнювача з переважною кількістю «уточних» армувальних волокон.

Викладені вище способи мають ряд недоліків, серед яких найголовнішим є неможливість створення ПКМ-труб з високою міцністю і жорсткістю переважно у поздовжньому напрямку.

Метою роботи є пошук оптимальної схеми армування, яка б забезпечувала необхідні пружно-міцнісні параметри силових конструкцій літальних апаратів, створення оптимальної технології для виготовлення труб прямокутного перерізу для силових конструкцій літальних апаратів, визначення фізико-механічних і теплофізичних характеристик виробів, і проведення порівняльного аналізу отриманих результатів.

ВИБІР СХЕМ АРМУВАННЯ

Відомо, що для виробів з вуглекомпозиту зміна кута армування істотно впливає на пружні константи матеріалу.

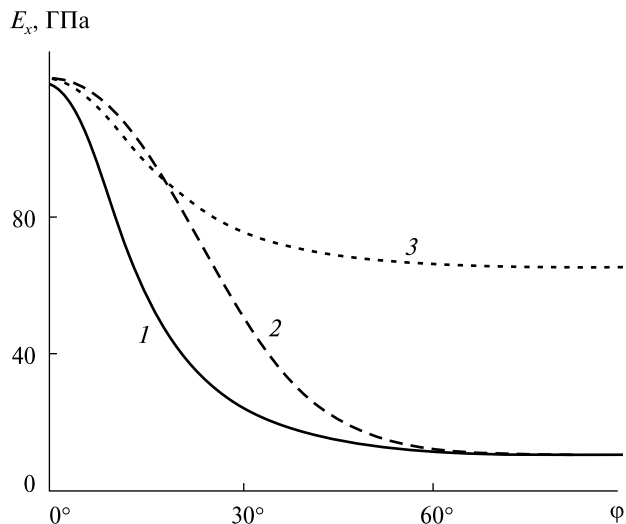


Рис. 1. Залежність константи E_x від кута армування: 1 — структура $[+\varphi]$, 2 — структура $[\pm\varphi]$, 3 — структура $[0^\circ, +\varphi]$, $\psi_0 = 0.5$

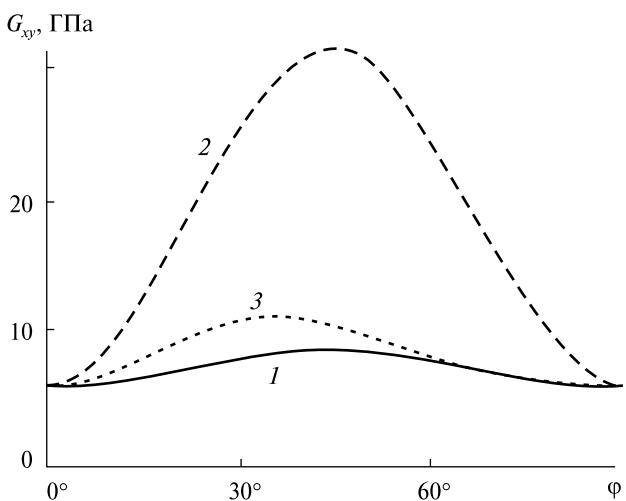


Рис. 2. Залежність константи G_{xy} від кута армування: 1 — структура $[+\varphi]$, 2 — структура $[\pm\varphi]$, 3 — структура $[0^\circ, +\varphi]$, $\psi_0 = 0.5$

З графіків залежності констант пружності E_x , G_{xy} (рис. 1, 2) і графіка залежності коефіцієнта термічного розширення (КТР) від кутів армування (рис. 3) видно, що найкращі характеристики вуглепластику можна отримати для схеми армування з симетричним розташуванням армувальних джгутів відносно поздовжньої осі виробу зі структурою $[\pm\varphi]$ [2].

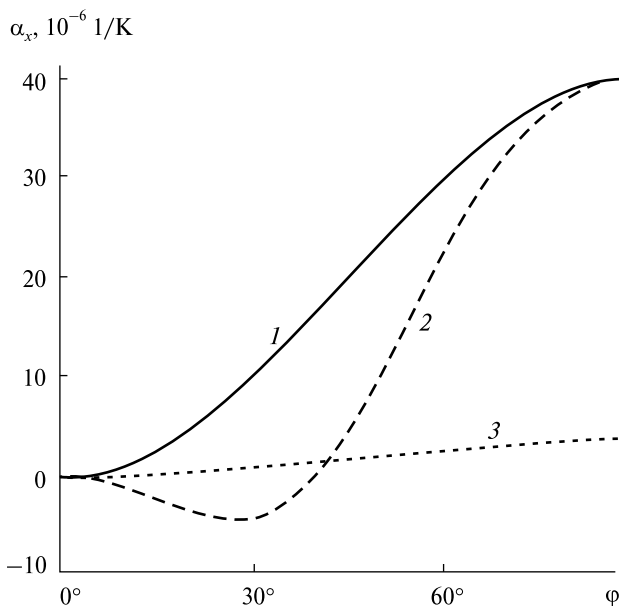


Рис. 3. Графік залежності коефіцієнта термічного розширення від кутів армування: 1 – структура $[+\varphi]$, 2 – структура $[\pm\varphi]$, 3 – структура $[0^\circ, +\varphi]$, $\psi_0 = 0.5$

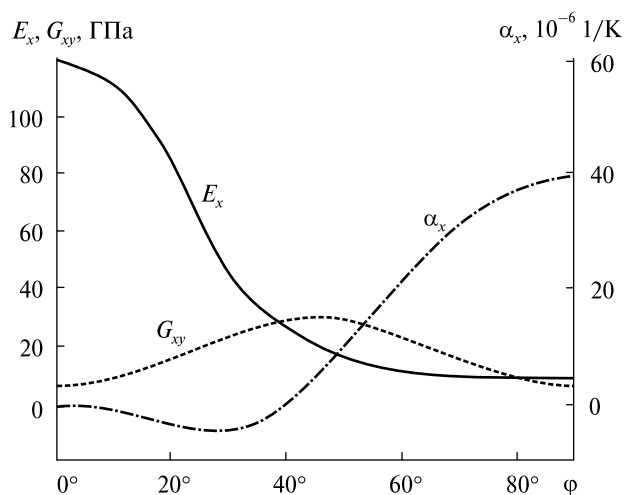


Рис. 4. Узагальнений графік залежностей пружно-міцнісних та теплофізичних характеристик від кута армування волокна

Для аналізу залежностей властивостей вуглепластикових труб від кута армування з графіків залежності E_x , G_{xy} , α_x від кута армування сформований узагальнений графік, зображений на рис. 4. На графіку можна виділити три області

залежності властивостей матеріалу від кута армування.

Область з кутами армування понад 50° використовувати нерационально, через те що поздовжня жорсткість має малі значення, КТР помітно збільшується і стає залежним від похибок виготовлення. Область від 10° до 50° – зона отримання нестабільних характеристик виробу. Поздовжня жорсткість значною мірою залежить від кута намотування. Область від 0 до 10° – зона оптимальних значень параметрів і найкраща для формування силового шару.

Важливо зауважити, що волокна в одному силовому шарі необхідно розмістити в одній площині (без переплетення). При цьому мінімізується кількість сполучного у складі виробу, поліпшується об'ємна щільність.

Для внутрішнього і зовнішнього шарів, що забезпечують прийнятні значення G_{xy} , кут армування доцільно вибирати в діапазоні $20^\circ \dots 45^\circ$ [1].

Виходячи з вищевикладеного, для досягнення необхідних пружно-міцнісних і теплофізичних характеристик оптимальною схемою армування виробу буде варіант $\pm 45^\circ / \pm 10^\circ / \pm 45^\circ$.

СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ВУГЛЕПЛАСТИКОВИХ ТРУБ

Для усунення недоліків способів [4, 5], зазначених вище, що призводять до провисання армувального волокна на оправці, яка забезпечує геометричну форму, був розроблений спосіб, що дозволяє створити трубу з ПКМ з кутами армування внутрішнього силового шару $\pm 10^\circ$. Спосіб базується на технології мокрого намотування вуглецевого волокна, комбінованого з викладенням пакета внутрішніх силових шарів.

Технологічний процес виготовлення вуглепластикових труб складається з таких операцій:

- на технологічний барабан, встановлений на намотувальний верстат, кільцевими шарами намотується пакет силового шару з кутами орієнтації волокна $\pm 90^\circ \pm \varphi^\circ$, після чого відносно поздовжньої осі намотування зрізається утворений пакет;
- встановлюється оправка, що утворює геометричну форму труби, і намотуються внутрішні шари $\pm 45^\circ$. На поверхню оправки викладається

пакет з квазіпоздовжнім напрямком волокна. Після викладення пакета оправка, що утворює геометричну форму труби, поміщається у пристрій, який формує зовнішню геометрію труби для часткового зшивання полімерної матриці;

- після закінчення режиму часткового зшивання на поверхню оправки намотуються зовнішні шари з орієнтацією волокна $\pm 45^\circ$, після чого виконується остаточне зшивання полімерної матриці виробу. Після закінчення режиму труба знімається з оправлення. На рис. 5 зображено кінцевий виріб.

Даний спосіб дозволяє виготовляти труби з квазіпоздовжнім розташуванням волокон (менше 1°).

ВИЗНАЧЕННЯ ПРУЖНО-МІЦНІСНИХ І ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для випробувань було використано вуглепластикову трубу з поперечним перетином $28 \times 28 \times 2$ мм з внутрішнім радіусом заокруглення кутів 5 мм. Зразок труби був виготовлений з вуглецевого волокна Toho Tenax IMS65 і епоксидної трикомпонентної системи Araldite® LY 11135-1 A / Aradur®917 CH / Accelerator 960-1 HUNTSMAN.

Цілями випробувань були:

- визначення межі міцності і модуля пружності при згині;



Рис. 5. Труба квадратного перерізу з ПКМ

- визначення межі міцності і модуля пружності при крученні;
- визначення межі міцності і модуля пружності при стисненні;
- визначення коефіцієнта температурного розширення.

За результатами проведених випробувань було проведено порівняльний аналіз отриманих даних для зразків вуглепластикових труб зі схемами армування $\pm 56^\circ/\pm 25^\circ/\pm 56^\circ$ і $\pm 45^\circ/\pm 10^\circ/\pm 45^\circ$. Результати наведено у таблиці.

З аналізу експериментальних характеристик матеріалів труб і порівняння їх з характеристиками впливає, що отриманий характер залеж-

Підсумкова таблиця результатів випробувань зразків

Схема армування		$\pm 56^\circ/\pm 25^\circ/\pm 56^\circ$	$\pm 56^\circ/\pm 25^\circ/\pm 56^\circ$	$\pm 45^\circ/\pm 10^\circ/\pm 45^\circ$	$\pm 56^\circ/\pm 25^\circ/\pm 56^\circ$	$\pm 45^\circ/\pm 10^\circ/\pm 45^\circ$
Розмір зразка	зовнішній розмір, мм	31.00	28.66	27.99	28.30	28.05
	внутрішній розмір, мм	23.63	23.42	23.30	24.13	23.93
	товщина стінки, мм	3.68	2.62	2.35	2.09	2.06
	площа перетину труби, мм ²	392.98	222.3	208.2	—	—
Щільність, г/см ³		1.42	1.50	1.39	1.48	1.39
КТР, 1/К		83×10^{-7}	4.29×10^{-7}	5.25×10^{-7}	—	—
Межа міцності при згині, кг/см ² (МПа)		—	—	—	1953.57 (191.58)	2315.06 (227.03)
Модуль пружності при згині, ГПа		—	—	—	51.80	85.30
Досягнута поздовжня напруга при стисканні, кг/см ² (МПа)		2290.19 (224.59)	2744.04 (269.10)	3122.00 (306.15)	—	—
Модуль пружності при стисканні, кг/мм ² (ГПа)		—	5301 (51.99)	7572 (74.26)	—	—
Модуль зсуву при крученні, кг/мм ² (ГПа)		—	3642.5 (35.72)	2110 (20.69)	—	—

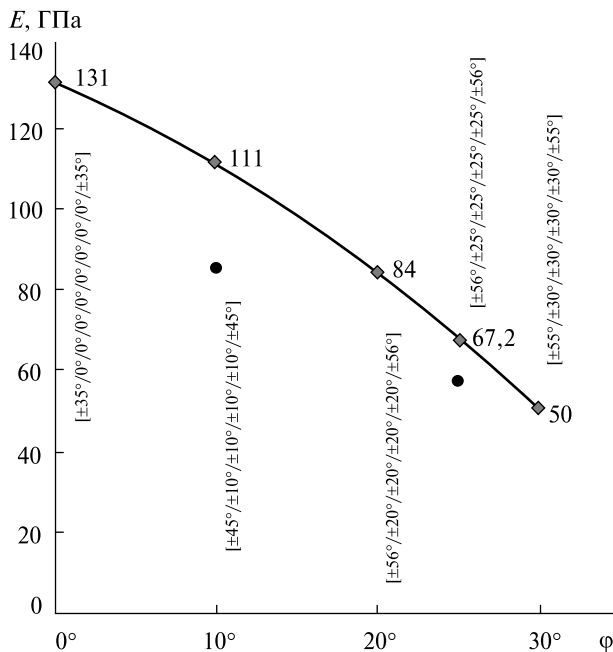


Рис. 6. Теоретична залежність модуля пружності матеріалу труб від кутів орієнтації вуглецевого волокна

ностей модуля пружності матеріалу дослідних зразків труби від кута орієнтації волокон корелює з теоретичними розрахунками, наведеними на рис. 6.

Слід зазначити, що у зразках труби з проміжними шарами під кутами $\pm 10^\circ$ щільність становить 1.9 г/см^3 , тобто процентний вміст смоли завищено ($\sim 65\%$ замість потрібних $30\text{--}40\%$), а процентний вміст волокон занижено ($\sim 35\%$ замість потрібних $60\text{--}70\%$). Отже, є резерв для досягнення розрахункових показників: модуль пружності труби безпосередньо залежить від процентного вмісту волокон, оскільки модуль пружності смоли всього 3.1 ГПа , а її внесок у модуль пружності композиційного матеріалу при підвищеному вмісті становив $2 \text{ і } 1 \text{ ГПа}$ при нор-

мальному вмісті. Таким чином, очікуваний мінімальний модуль пружності зразків труби з проміжними шарами $\pm 10^\circ$ (при найменшій з допустимих об'ємних часток волокна 60%) дорівнює

$$E_{10^\circ} = (74.3 - 2) \cdot \frac{60\%}{35\%} + 1 = 125 \text{ ГПа.}$$

При застосуванні проміжних шарів з квазінульовим напрямком волокон модуль пружності буде більшим, ніж при орієнтації волокон цих шарів під кутами $\pm 10^\circ$.

Труби з проміжними шарами $\pm 25^\circ$ не мають резерву для досягнення розрахункових показників, оскільки вміст волокон там 50% , що вже близько до норми ($60\text{--}70\%$), а поздовжній модуль пружності, порівняно з необхідним, дуже малий. При правильному співвідношенні компонентів мінімальний модуль буде дорівнювати

$$E_{25^\circ} = (51.8 - 1) \cdot \frac{60\%}{50\%} + 1 = 62 \text{ ГПа.}$$

ВИСНОВКИ

В ході виконання роботи було знайдено схему армування, що відповідає всім вимогам фізико-механічних і теплофізичних характеристик стрижневих елементів рамних і фермових силових конструкцій. На основі отриманих вихідних даних з необхідними схемами армування виробу було розроблено технологію виготовлення труб квадратного і прямокутного перетину.

За результатами технологічного відпрацювання були отримані зразки вуглепластикових труб перетином $28 \times 28 \text{ мм}$, на яких були визначені пружно-міцнісні і теплофізичні характеристики та проведено порівняльний аналіз з трубами зі схемою армування $\pm 56^\circ/\pm 25^\circ/\pm 56^\circ$. Після проведеного аналізу була підтверджена залежність фізико-механічних характеристик від схеми армування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Карпов Я. С. *Проектирование деталей и агрегатов из композитов*. Харків: ХАІ, 2010.
2. Коваленко В. А., Малков И. В., Сировой Г. В., Сохач Ю. В. *Исследование терморазмеростабильности ферменных конструкций космических аппаратов*. Харьков: Нац. аерокосмичный ун-т, 2011. С. 20—34.
3. Малков И. В. *Научные основы технологии формообразования намоткой углепластиковых элементов ферменных конструкций космических аппаратов*: дис. ... д-ра техн. наук. Луганск, 2001. 451 с.

4. Пат. RU 2415329, МПК F16L9/12. Капустин А. С., Феруленко А. В., Сехин В. А. и др. Способ изготовления трубы из композиционных материалов; заяв. 19.06.2009, опубл. 27.03.2011. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2415329C2_20110327 (дата звернення 06.08.2019).
5. Пат. RU 2075389. Яиков В. П., Рожков В. Б., Плотников В. И. и др. Способ изготовления трубы из композиционного материала и труба, изготовленная этим способом; заяв. 02.12.1993, опубл. 20.03.1997. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2075389C1_19970320 (дата звернення 06.08.2019).

Стаття надійшла до редакції 06.08.2019

REFERENCES

1. Karpov Ya. S. (2010). *Designing of parts and assemblies from composites*. Kharkov: KhAI.
2. Kovalenko V. A., Malkov I. V., Syrova G. V., Sochach Yu. V. (2011). *Study of thermal stability of spacecraft truss structures*. Kharkov: National Aerospace University.
3. Malkov I. V. (2001). The scientific basis of the technology of shaping the winding of carbon-fiber plastic elements of spacecraft trusses: dis. ... Dr. of technical Sciences.
4. Pat. RU 2415329 of the Russian Federation IPC F16L9 / 12 “A method of manufacturing a pipe from composite materials” [Electronic resource]: Kapustin A. S., Ferulenko A. V., Sekhin V. A. and others., stated. 06/19/2009, published. 03/27/2011. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2415329C2_20110327 (Last accessed: 06.08.2019).
5. Pat. RU 2075389 of the Russian Federation “A method of manufacturing a pipe from a composite material and a pipe manufactured by this method” [Electronic resource]: Yaakov V. P., Rozhkov V. B., Plotnikov V. I. and others., stated. 12/02/1993, publ. 03/20/1997. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2075389C1_19970320 (Last accessed: 06.08.2019).

Received 06.08.2019

S. Odaisky¹, Engineer

O. Potapov¹, Dr. in Tech. Sci., Head of the Department of New Materials and Advanced Technologies, Acad. of the International Academy of Astronautics, Acad. of the Academy of Technical Sciences, Laureate of the State Awards in Science and Technology of Ukraines

S. Fedorenko², Head of Group

A. Shchudro¹, Leading Designer

A. Kulik¹, Designer

¹ Yuzhnoye State Design Office

3 Krivorizka Str., Dnipro, 49008 Ukraine

² Dnipro representative office of the General Customer – State Space Agency of Ukraine

1 Krivorizka Str., Dnipro, 49047 Ukraine

A METHOD OF MANUFACTURING PIPES FROM POLYMER COMPOSITE MATERIALS FOR AIRCRAFT STRUCTURES

The frame power structures are widely applied when designing aircraft, in which composite rod elements are used to reduce the mass and size characteristics. To solve the problem of manufacturing rod elements from polymer composite materials, we developed a technology for the manufacture of carbon fiber pipes using an existing machine for winding carbon fiber, which provides the necessary strength and rigidity mainly in the longitudinal direction.

When calculating the rod elements, all the loads that will affect the structure as well as the coefficient of thermal expansion should be taken into account. To achieve the required physical, mechanical, and thermophysical characteristics, the optimal scheme of reinforcement is the scheme with a quasi-longitudinal direction of the fibers. We developed the method of manufacturing based on the technology allowing us to obtain a reinforcement scheme with fiber orientation in the quasi-longitudinal direction with a reinforcement angle of about 1° by a combined method of layer-by-layer winding of carbon fiber. As a result of technological testing, we obtained samples of carbon fiber rod elements, which were used to confirm the calculated characteristics.

To confirm the physico-mechanical and thermophysical characteristics, we determined the assessment of limit of strength and modulus of elasticity in bending, the limit of strength and modulus of elasticity in torsion, the limit of strength and modulus of elasticity in compression, and the coefficient of thermal expansion. The obtained characteristics of the dependences of the elasticity modulus of the pipe prototype material at the fibers' orientation angle correlate with theoretical calculations. The presented method has the patent UA 128613 U.

Keywords: rod elements, pipe, carbon plastic, winding the carbon fiber, diagram of reinforcement.