

**Ольга Набережна**<sup>1</sup>кандидат технічних наук, асистент кафедри фізики конденсованого стану

Дніпровський державний технічний університет (Кам'янське, Україна)

E-mail: [o.naberezhnaya@gmail.com](mailto:o.naberezhnaya@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1302-4098>ResearcherID: [T-2024-2019](https://orcid.org/0000-0003-1302-4098). Scopus Author ID: [57189904509](https://orcid.org/0000-0003-1302-4098)**УЗК-ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВУГЛЕЦЕВИХ ВОЛОКОН НА ВЛАСТИВОСТІ ВУГЛЕПЛАСТИКІВ НА ОСНОВІ ПОЛІФЕНІЛЕНСУЛЬФІДУ**

У роботі розглянуто суперконструкційні пластики (поліфеніленсульфід) і отримані за рахунок армування вуглецевим волокном – вуглепластики. У статті представлені результати механічних випробувань поліфеніленсульфідів та вуглепластиків на його основі, визначені основні показники: міцність, відносна деформація і модуль пружності, мікротвердість. Показано, що для оцінки міцнісних характеристик композицій на основі ПФС може використовуватися метод акустичної дефектоскопії – ультразвуковий контроль. Запропонований неруйнівний підхід дослідження вуглепластиків на основі ПФС, який за результатами корелює з лабораторними дослідженнями властивостей матеріалів. Наведено імпульси відбитих «донних» сигналів і визначено швидкість поширення хвилі в матеріалі.

**Ключові слова:** поліфеніленсульфід; вуглецеве волокно; вуглепластик; полімерний композиційний матеріал; характеристики міцності; ультразвукова дефектоскопія.

Рис.: 4. Табл.: 2. Бібл.: 10.

**Актуальність теми дослідження.** Поліфеніленсульфід (ПФС) є одним з пластиків з дійсно видатними характеристиками. Вони володіють хорошими механічними властивостями, термостійкістю, радіаційною стійкістю, стійкістю до різних агресивних середовищ (за хімічною стійкістю, наприклад, поліфеніленсульфід поступається лише політетрафторетилену). ПФС належить до класу негорючих матеріалів, їм притаманна висока адгезія до металів [1]. ПФС не плавиться за температури наближеної до 573 °С. До того ж він стійкий до впливу полум'я. Переробники, що працюють у галузі виробництва пластмас, називають пластики з дуже хорошими характеристиками, як, наприклад, ПФС, суперконструкційними пластиками [2]. А введення до складу матриці вуглецевих волокон сприяє ще більш розширеним можливостям їх використання.

Вуглепластики (ВП) відрізняються від традиційних конструкційних матеріалів поєднанням таких властивостей, як високі питомі міцність і жорсткість, низькі коефіцієнти лінійного термічного розширення і тертя, висока зносостійкість і стійкість до впливу агресивних середовищ, термічного й радіаційного ударам, температурного розширення та електрофізичні властивості, що змінюються у широких межах, висока втомна міцність при статичних і динамічних навантаженнях [5]. Зазначені властивості ВП визначили їх переважне використання в оборонних галузях промисловості й насамперед в авіаційній і ракетобудівній техніці. Велика кількість елементів конструкцій військових літаків, бойових та дослідницьких космічних апаратів і ракет (у тому числі й космічний комплекс «Енергія-Буран»), антен і антенних обтічників виконано з ВП [6]. Використання вуглепластиків в оборонній техніці робило практично недоступною інформацію про них для широкого кола фахівців у різних галузях промисловості.

**Постановка проблеми.** Властивості вуглепластиків вивчалися різними методами і з різних позицій [1-4]. Однак різноманіття самих матеріалів, широта сфер використання і складність спектра їх властивостей як і раніше викликають активний інтерес до них з боку дослідників. Особливо гостро стоїть питання визначення довговічності без ушкодження деталей.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У більшості робіт [3-6] представлено розробку полімерних композиційних матеріалів на основі вуглецевих тканин та обговорено складності виготовлення та проблему адгезії полімеру та наповнювача. Для оцінки потенціалу таких ВП, як конструкційних матеріалів проведено багато досліджень дефектності їхньої структури та характеристик міцності зразків із дефектних та бездефектних зон.

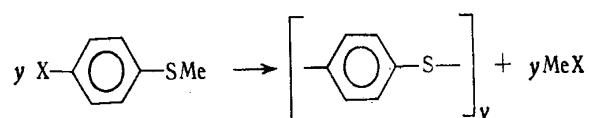
На жаль, особливості переважної галузі використання вуглепластиків робило інформацію про результати цих досліджень малодоступною. Однак вивчення і аналіз фізичних процесів вуглепластиків становить інтерес не тільки чисто практичний, але й загальнонауковий, особливо в зіставленні з композиційними матеріалами інших видів і класів.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що питання вибору та розподілення вуглецевого волокна має сильний вплив на кінцеві показники властивостей матеріалу. Для поліпшення експлуатаційних характеристик до складу ПФС вводили дискретні вуглецеві волокна (ВВ) [3; 4]. У роботі запропоновано неруйнівний метод дослідження готових виробів.

Враховуючи вищевикладене, **метою статті** було дослідження впливу вуглецевих волокон на механічні властивості вуглепластиків на основі ПФС та проведення ультразвукового дослідження матеріалів на визначення дефектності.

#### Об'єкти та методи досліджень

Поліфеніленсульфіди утворюються при конденсації *n*-галоїдтіофенолятів у розчині піридину за реакцією:



Вони стабільні в повітрі й у атмосфері азоту до 673 К [7].

Внаслідок жорстколанцюгової структури, вузького температурного інтервалу переходу ПФС у в'язкотекучий стан, що межує з температурою деструкції, виникають певні труднощі при його переробці методами екструзії та лиття під тиском. Враховуючи це, для переробки ПФС та ВП на його основі у виробі, був обраний метод компресійного пресування.

Для армування використовували вуглецеві волокна «Торейка» Т700SC (табл. 1).

Таблиця 1 – Характеристики міцності вуглецевого волокна «Торейка»

Міцність при розтягуванні, МПа, не менш	4200
Модуль пружності при розтягуванні, ГПа, не менш	1700
Густина, г/см <sup>3</sup>	1,80
Лінійна щільність, текс.	800±20

Наповнення полімеру ПФС вуглецевими волокнами здійснювали шляхом змішування компонентів у електромагнітному полі, що обертається, за участі феромагнітних частинок. Їх переробку в блокові вироби здійснювали методом компресійного пресування при температурі 503-553 К та тиску 85 МПа.

Механічні характеристики: міцність ( $\sigma_{\text{стис.}}$ ), відносна деформація ( $\epsilon$ ) і модуль пружності ( $E$ ) при стисканні визначали на машині SANS (згідно зі стандартом Китаю GB/T 2569-1995) швидкість переміщення траверси 2 мм/хв. Для досліджень використовували зразки діаметром 10 і висотою 12 мм.

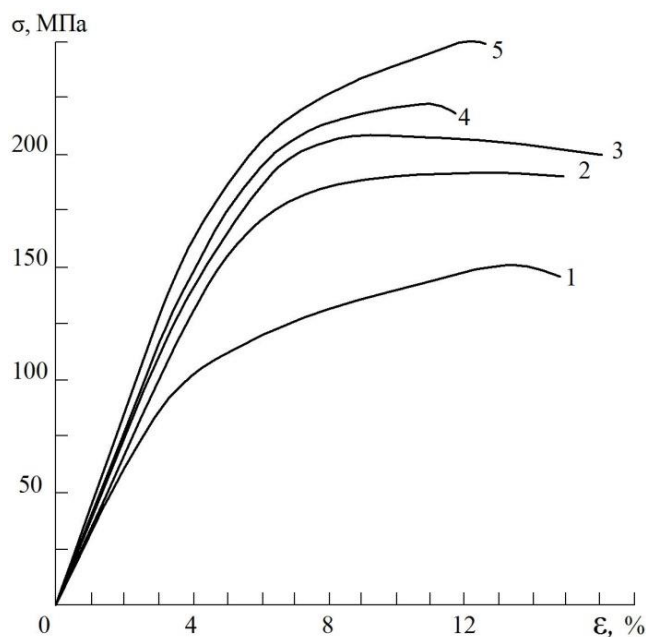
Неруйнівний контроль якості матеріалів визначали ехоімпульсним методом за допомогою універсального ультразвукового дефектоскопа УД2В-П46 («КРОПУС», ТОВ «НВП Укрінтех»), у режимі АСД, частота 5 МГц, період 2,5, ПЕП 5 МГц.

Дослідження мікроструктури проводилося на мікроскопі «Біолам-М», збільшення 100. Густина визначали адитивним та гідростатичним методом згідно з ГОСТ 15139-69.

**Результати та їх обговорення.** Враховуючи те, що однією з основних галузей використання розроблених вуглепластиків є машинобудування, зокрема деталі рухомих з'єднань, особлива увага при вивченні фізико-механічних властивостей була приділена міцності при стисненні ( $\sigma_{\text{сж.}}$ ), оскільки цей показник дає можливість передбачити вантажопідйомність вузла тертя, укомплектованого деталями з вуглепластиків. Результати механічних показників представлені на рис. 1 та в табл. 2 [7].

Таблиця 2 – Фізико-механічні характеристики

Показники	Вміст вуглецевого волокна «Торейка», мас. %				
	0	5	10	15	20
$\sigma_{\text{стис.}}$ , МПа	147	203	174	219	247
$\epsilon$ , %	15	16	10	9	12
$E$ , МПа	3059	4011	5102	4625	3008
HV	26,4	29,7	30,6	28,9	26,8

Рис. 1. Криві  $\sigma$ - $\epsilon$  ПФС (1) та ВП на його основі, що містять 5 (2), 10 (3), 15 (4) та 20 (5) мас. % ВВ

Встановлено, що криві  $\sigma$ - $\epsilon$  ПФС і ВП на його основі відносяться до II типу, згідно з класифікацією Херцберга [5] (рис. 1), межа міцності при стисканні вихідного ПФС збільшується прямо пропорційно до вмісту вуглецевого волокна (у 1,2 - 1,7 раза). Особливо суттєве підвищення міцності при стисканні спостерігається при введенні 15-20 мас. % вуглецевого волокна. Що ж до модуля пружності, він зростає лише при 5-15 мас.% відсотковому наповненні, далі – знижується.

Це збільшення можна пояснити ефектом міжструктурного наповнення, коли частинки волокна розміщуються на межах поділу надмолекулярних утворень у місцях дефектів і впливають на гнучкість полімерних макромолекул. Поблизу поверхні наповнювача відбувається обмеження рухливості елементів надмолекулярних структур, яке не залежить від природи полімеру і наповнювача. Це призводить до деякої зміни еластичності матеріалу [7] і, отже, до зміни значень мікротвердості (табл. 2). Нині відомо [8], що мікротвердість HV є властивістю, чутливою до морфологічних і до структурних змін у полімерних матеріалах.

Для вивчення міцнісних характеристик композицій на основі ПФС застосовувався метод акустичної дефектоскопії – ультразвуковий контроль, який знайшов найбільше застосування через свою простоту й високу продуктивність, надійність і універсальність [9]. Ультразвукові випробування дозволяють визначати не тільки тріщини, мікротріщини, і т. ін., але і ступінь втрати працездатності виробів до настання зовнішніх ознак руйнування, тобто. прогнозувати довговічність.

Дослідження проводилися за допомогою імпульсного ехометоду, заснованого на збудженні в контрольованому виробі коротких імпульсів височастотних коливань та реєстрації інтенсивності та часу ехосигналів, відбитих від дефектів або меж виробу.

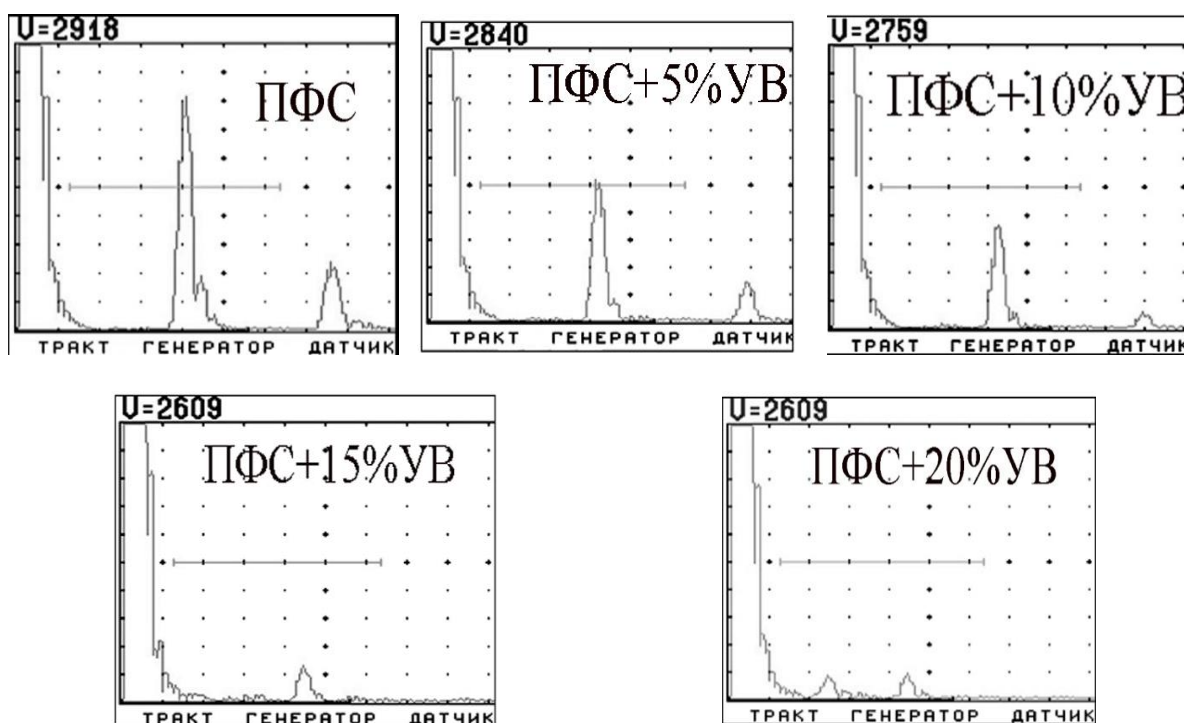


Рис. 2. Імпульси відбитих «донних» сигналів

Дефектоскопія пластмас найбільш часто здійснюється методом прямого відбиття. Пластмаси мають менші швидкості поширення ультразвуку і володіють значними величинами згасання, в порівнянні з металами, що дозволяє досліджувати зразки малої товщини (3 – 4 мм). У цьому зв'язку, у розроблених нами матеріалах проводилось оцінювання відбитого «донного» імпульсу, швидкості поширення хвилі, і, навіть, довжини шляху ультразвуку (рис. 2).

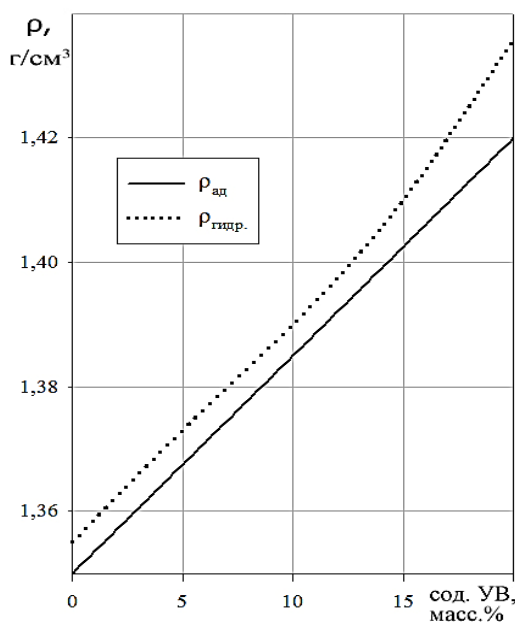


Рис. 3. Адитивна та гідростатична щільність ВП із вмістом 5-20 мас.% ВВ

Представлені на рис. 3 дані показали симбатність зміни значень щільності й масового вмісту волокна, що, у свою чергу, говорить про незмінну полімерну структуру. Швидкість поширення ультразвукової хвилі в ВП варіювалася в межах 2907 - 2967 м/с, час проходження 5,25 - 6,25 мкс, «донний» сигнал спостерігався в усіх досліджуваних зразках.

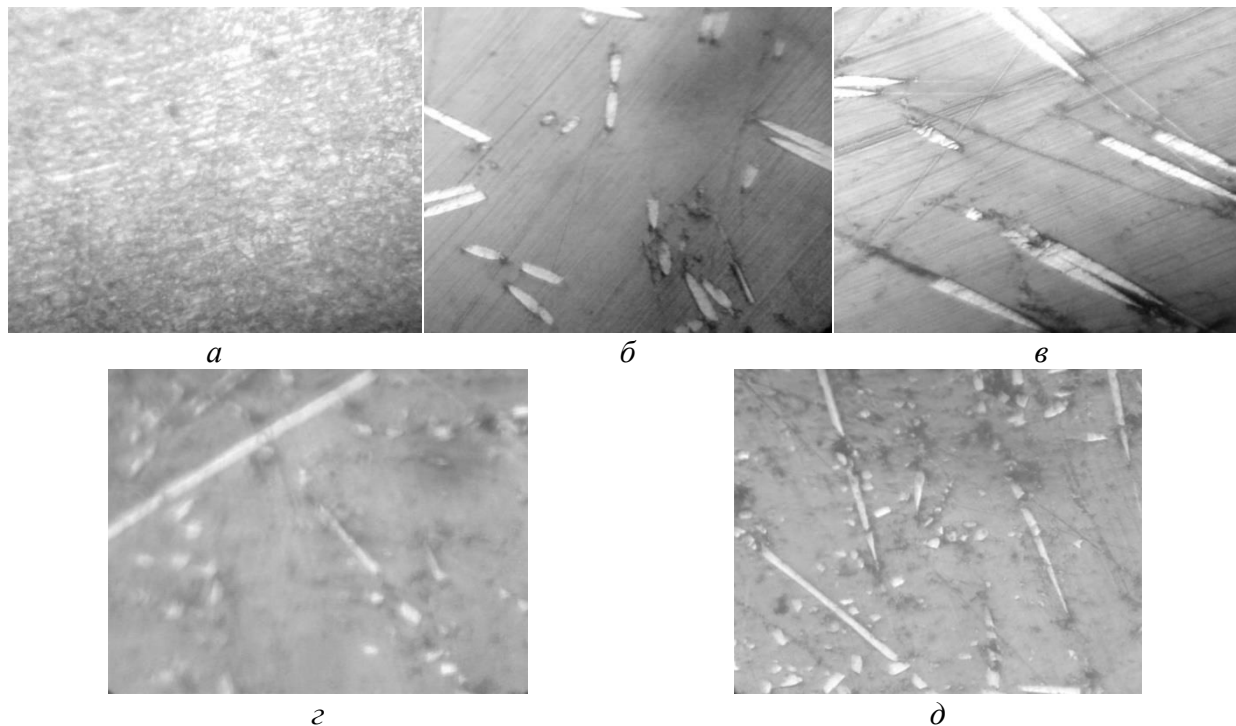


Рис. 4. Мікроструктура ПФС (а) та ВП на його основі, із вмістом наповнювача: 5(б), 10(в), 15(г), 20(д) мас.% ВВ

Як видно з представлених даних, спостерігається ослаблення ультразвуку на 80 %, зі збільшенням відсоткового вмісту наповнювача в сполучному, при цьому немає численних внутрішніх відображень (характерно для волокнисто наповнених матеріалів) [10]. Це свідчить про хорошу адгезію вуглецевого волокна з ПФС, а також про підвищення міцності, що добре корелює з отриманими механічними характеристиками.

Отримані результати також описують рівномірність розподілу наповнювача в сполучному (рис. 4), а також характеризують отриманий матеріал як кристалічний.

**Висновки.** Загалом у роботі запропоновано неруйнівний підхід дослідження вуглепластиків на основі ПФС, який за результатами корелює з лабораторними дослідженнями властивостей матеріалів. Проведений аналіз фізико-механічних властивостей показав, що отриманні ВП характеризуються досить високими показниками міцності. Це дає можливість рекомендувати їх для заміни термопластичних і термореактивних полімерів, особливо в машинобудуванні.

#### Список використаних джерел

1. Oliveux G. Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties / G. Oliveux, L. O. Dandy, G. A. Leeke // Progress in Materials Science. – 2015. – Vol. 72. – Pp. 61-99.
2. Каблов Е. Н. Композиты: сегодня и завтра / Е. Н. Каблов // Металлы Евразии. – 2015. – № 1. – С. 36-39.
3. Петров А. В. Технологии утилизации полимерных композиционных материалов (обзор) [Электронный ресурс] / А. В. Петров, М. С. Дориомедов, С. Ю. Скрипачев // Труды ВИАМ : электрон. науч.-техн. журнал. – 2015. – № 8. – С. 78-94. – Режим доступа: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-9-9.

4. Дасковский М. И. Систематизация базисных факторов, препятствующих внедрению полимерных композиционных материалов (обзор) [Электронный ресурс] / М. И. Дасковский, М. С. Дориомедов, С. Ю. Скрипачев // Труды ВИАМ : электрон. науч.-техн. журнал. – 2016. – № 5. – С. 104-112. – Режим доступа: [www.viam-works.ru](http://www.viam-works.ru). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-6-6.
5. Переработка армирующих наполнителей при утилизации изделий из ПКМ / М. С. Дориомедов, А. В. Петров, М. И. Дасковский, С. Ю. Скрипачев // Труды ВИАМ : электрон. науч.-техн. журнал. – 2016. – № 8. – С. 122-137. – DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-12-12.
6. Петров А. В. Зарубежный опыт развития производства изделий с использованием вторично переработанных полимерных композиционных материалов (обзор) [Электронный ресурс] / А. В. Петров, М. С. Дориомедов, С. Ю. Скрипачев // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журнал. – 2015. – № 12. – С. 166-178. – DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-12-12.
7. Нильсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций / Л. Нильсен. – М. : Химия, 1978. – 423 с.
8. Херцберг Р. В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов / Р. В. Херцберг. Пер. с англ. / под ред. М.Л. Бернштейна. – М. : Metallurgia, 1989. – 560 с.
9. Synthetic polymer-polymer composites / ed. by D. Bhattacharyya, S. Fakirov. – Munich : Hanser Publishers, 2012. – 819 p.
10. Потапов А. И. Неразрушающий контроль конструкций из композиционных материалов / А. И. Потапов, Ф. П. Пеккер. – Л. : Машиностроение, 1977. – 192 с.

### References

1. Oliveux, G., Dandy, L.O., & Leeke, G.A. (2015). Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in Materials Science*, 72, 61-99.
2. Kablov, Ye.M. (2015). Kompozyty: sohodni ta zavtra [Composites: today and tomorrow]. *Metally Evrazii – Metals of Eurasia*, (1), 36–39.
3. Petrov, A.V., Doriomedov, M.S., & Skrypachov, S.Yu. (2015). Tekhnolohiyi utylizatsiyi polimernykh kompozytsiynykh materialiv (ohliad) [Technologies for the utilization of polymer composite materials (review)]. *Pratsi VIAM – Proceedings of VIAM*, (8), 78-94.
4. Daskovskiy, M.I., Doriomedov, M.S., & Skrypachov, S.Yu. (2016). Systematyzatsiia bazisnykh chynnykiv, shcho pereshkodzhayut vprovadzhenniu polimernykh kompozytsiynykh materialiv Rosii (ohliad) [Systematization of the basic factors hindering the introduction of polymer composite materials (review)]. *Pratsi VIAM – Proceedings of VIAM*, (5), 104-112.
5. Doriomedov, M.S., Petrov, A.V., Daskovskiy, M.I., & Skrypachov, S.Yu. (2016). Pererobka armuyuchykh napovnyuvachiv pry utylizatsiyi vyrobiv z PKM [Proceedings of VIAM: electron. scientific and technical magazine]. *Pratsi VIAM – Proceedings of VIAM*, (8), 122-137.
6. Petrov, A.V., Doriomedov, M.S., & Skrypach, S.Yu. (2015). Zarubizhnyy dosvid rozvytku vyrobnytstva vyrobiv z vykorystannyam povtorno pereroblenykh polimernykh kompozytsiynykh materialiv (ohlyad) [Processing of reinforcing fillers during the recycling of products from PCM]. *Pratsi VIAM – Proceedings of VIAM*, (12), 166-178.
7. Nilsen, L. (1978). *Mekhanicheskiye svoystva polimerov i polimernykh kompozitsiy* [Mechanical properties of polymers and polymer compositions]. Khimiia.
8. Khertsberg, R.V. (1989). *Deformatsiya i mekhanika razrusheniya konstruktsionnykh materialov* [Deformation and fracture mechanics of structural materials]. Metallurgiiia.
9. Synthetic polymer-polymer composites / ed. by D. Bhattacharyya, S. Fakirov. – Munich : Hanser Publishers, 2012. – 819 p.
10. Potapov, A.I., Pekker, F.P. (1977). *Nerazrushayushchiy kontrol' konstruktsiy iz kompozitsionnykh materialov* [Non-destructive testing of structures made of composite materials]. Mashinostroeniie.

Отримано 23.05.2022

**Olga Naberezhna**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, assistant of the department of physics of condensed steel  
Dniprovsk State Technical University (Kamyanske, Ukraine)

E-mail: [o.naberezhnaya@gmail.com](mailto:o.naberezhnaya@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1302-4098>

ResearcherID: [T-2024-2019](https://orcid.org/0000-0003-1302-4098). Scopus Author ID: [57189904509](https://orcid.org/0000-0003-1302-4098)

**ULTRASOUND RESEARCH OF THE INFLUENCE OF CARBON FIBERS  
ON THE PROPERTIES OF CARBON PLASTIC BASED  
ON POLYPHENYLENE SULPHIDE**

*Polyphenylene sulfides are one of the plastics with truly outstanding characteristics. The introduction of carbon fibers into the composition of the matrix contributes to the expansion of their potential use. The main requirement for the obtained materials is to increase their strength indicators due to the reinforcement of the matrix frame with carbon fibers.*

*Carbon plastics are distinguished among other composite materials by high specific strength and stiffness, low coefficients of linear thermal expansion and friction, high wear resistance and resistance to aggressive environments. This allows their use in defense industries and, above all, in aviation and rocket engineering.*

*The analysis of the latest research and publications showed that the issue of selection and distribution of carbon fiber has a strong influence on the final indicators of the material's properties. To improve the operational characteristics, discrete carbon fibers were introduced into the composition of polyphenylene sulfide. The main goal of this method of obtaining composites was the uniform distribution of fibers in the polymer matrix.*

*The article presents the results of mechanical tests of polyphenylene sulfide and carbon plastics based on it, the main indicators are determined: strength, relative deformation and modulus of elasticity, microhardness. It is shown that the method of acoustic defectoscopy - ultrasonic control can be used to assess the strength characteristics of compositions based on polyphenylene sulfide. A non-destructive approach to the study of carbon plastics based on polyphenylene sulfide is proposed, which results correlate with laboratory studies of material properties. The pulses of the reflected "bottom" signals are given and the speed of wave propagation in the material is determined.*

*The analysis of the physical and mechanical properties showed that the resulting carbon-plastics are characterized by fairly high strength indicators, which makes it possible to recommend them for replacing thermoplastic and thermosetting polymers, especially in machine building.*

**Keywords:** polyphenylene sulfide, carbon fiber; polymer composite material; strength characteristics; ultrasonic flaw detection.

Fig.: 4. Table: 2. References: 10.