

УДК 629.113:620.2

Колодницька Р. В.

кандидат технічних наук,
доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій,
Заклад вищої освіти Державний університет «Житомирська політехніка»
Житомир, Україна
E-mail: ruslanakolod2017@gmail.com
ORCID: 0000-0002-6943-3731

Можаровський М. М.

старший викладач кафедри автомобілів і транспортних технологій,
Заклад вищої освіти Державний університет «Житомирська політехніка»
Житомир, Україна
E-mail: zid_mmm@ztu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-5418-4736

Шумляківський В. П.

кандидат технічних наук,
завідувач кафедри автомобілів і транспортних технологій,
Заклад вищої освіти Державний університет «Житомирська політехніка»
Житомир, Україна
E-mail: shumliakivskyiv@ztu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-0618-4483

КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ НАТУРАЛЬНИХ ВОЛОКОН ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

Анотація

У зв'язку з військовими діями в Україні поставки джуту за-за кордону обмежені, отже підприємства намагаються використовувати місцеву продукцію, а саме промислову коноплю, яка не містить в своєму складі тетрагідроканабінолу. Генрі Форд використовував конопляні волокна в композитних матеріалах для кузова автомобіля ще в 1941 р. Він інвестував мільйони доларів у дослідження і розробку пластикового автомобіля і оголосив, що буде «вирощувати автомобілі з ґрунту». Починаючи з 2009 р. в Державному Університеті «Житомирська політехніка» проводяться дослідження композитних матеріалів на основі конопляних волокон і можливості застосування їх для автомобільного транспорту. Метою роботи є дослідження особливостей виробництва композитних матеріалів на основі промислової коноплі і розробка методики виготовлення повністю натурального композиту з промислової коноплі. У роботі розглянуто дві методики виготовлення композитних матеріалів на основі натуральних волокон коноплі: з синтетичною і натуральною матрицями. Проаналізовано процес виготовлення композитних матеріалів з синтетичною матрицею, що армовані конопляними волокнами, які виготовляються за допомогою процесу формування листів (SMC, sheet moulding compound). При створенні композитних матеріалів з натуральною матрицею з використанням біопластику (PLA), міцність міжфазного зв'язку між волокнами конопель і матрицею PLA буде слабка, що є недоліком композитів з натурального волокна. Для того щоб подолати цей недолік було використано метод пробивання голками матеріалу. Описано виготовлення композитного матеріалу на основі коноплі в Державному університеті «Житомирська політехніка». Композитний матеріал був виготовлений з нетканого матеріалу на основі коноплі і натуральної плівки PLA, яка для кращого прилягання пробивалася голками. Розроблена методика полягає в наступному: 1) створення павутини з конопляного матеріалу і PLA; 2) стиснення павутини і пробивання голками; 3) розрізання конопляних матів на куски розмірами 20×175 мм; 4) формування і розрізання плівки PLA на прямокутники 20×175 мм; 5) сушіння матеріалу в духовці протягом 30 хв за температури 105 °С; 6) застосування гарячого пресування.

Ключові слова: автомобільний транспорт, композитні матеріали, натуральні волокна, технічна конопля.

Вступ. У зв'язку з військовими діями в Україні поставки джуту за-за кордону обмежені, отже підприємства намагаються використовувати місцеву продукцію, а саме технічну (промислову) коноплю. Промислові коноплі – це сорти *Cannabis sativa*, які мають вміст тетрагідроканабінолу (ТГК), як правило, нижче 0,35% [3]. Сорт конопель з найнижчим вмістом ТГК (майже 0%) був виведений в Україні (м. Глухів, Сумська область). В звіті [3] показано, яка кількість коноплі (млн.т) використовувалося в 2022 році на автомобільному транспорті (АТ) у наступних регіонах: Північна Америка, Європа, Азіатсько-Тихоокеанський регіон, Латинська Америка, Близький Схід та Африка. Також прогнозується зростання використання промислової коноплі в АТ протягом 2023–2029 рр. На

жаль, ці дані не є у вільному доступі й потрібно сплатити 2900 доларів США для того, щоб отримати детальну інформацію щодо використання конопляних матеріалів в АТ за 2022 р.

В Державному Університеті «Житомирська політехніка» проводяться не тільки дослідження дизельних біопалив на основі коноплі для АТ [1], але й композитних матеріалів на основі конопляних волокон. Починаючи з 2009 р., було виконано декілька бакалаврських і магістерських проєктів щодо використання композитів на основі натуральних волокон в АТ, включаючи магістерську роботу Весненка С. «Амортизатор нового типу з використанням композиційного матеріалу на основі натуральних волокон».

Генрі Форд використовував конопляні волокна в композитних матеріалах для кузова автомобіля ще в 1941 р. Цей автомобіль міг витримати десятикратний удар у порівнянні з еквівалентною металевою конструкцією [8]. Форд інвестував мільйони доларів у дослідження і розробку пластикового автомобіля і оголосив, що буде «вирощувати автомобілі з ґрунту». Рама цього автомобіля була зроблена із сталевих труб, до яких було прикріплено близько чотирнадцяти пластикових панелей, товщиною лише 6 мм. Така модернізація призвела до зменшення ваги автомобіля на 33%. На жаль, автомобіль не потрапив в масове виробництво через комерційний успіх скловолна і паралельну розробку синтетичних смол, таких як ненасичені полієфірні смоли і епоксидні смоли під час і відразу після Другої світової війни [8]. Це призвело до масового виробництва синтетичних композитів і відповідного зниження використання натуральних волокон.

Екологічні проблеми суспільства в таких питаннях, як стійкість, переробка пластику [5] та екологічна безпека призвели до відновлення інтересу до композитів з натурального волокна [8]. Німеччина є в авангарді використання натуральних волокон у композитних матеріалах для АТ. Ляні волокна мали найбільшу частку використання в композитах АТ – 65%, за ним слідували конопляні волокна – 10% [8]. Використання композитів, армованих натуральним волокном, подвоїлося з 15000 т. (1999 р.) до 30000 т. (2005 р.). В середньому 5,4 мільйона автомобілів, випущених в 2005 році, використовували 3,6 кг натуральних волокон на один автомобіль [8].

В [4] проведено аналіз використання різних типів сталей в легковому автомобілі. Відомо, що конопляне волокно має більшу міцність, ніж сталь. В [2] волокна коноплі були успішно армовані в полімерних матрицях для підвищення міцності композитних матеріалів. В [10] була застосована нова методика ламінування для поліпшення механічних властивостей композитів на основі біопластику (полімолочної кислоти), армованих конопляними волокнами.

Мета роботи. Дослідження особливостей виробництва композитних матеріалів на основі промислової коноплі і розробка методики виготовлення повністю натурального конопляного композиту для АТ.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо дві методики виготовлення композитного матеріалу на основі конопляних волокон.

Методика 1. Виготовлення композитного матеріалу на основі коноплі з синтетичною матрицею.

Композити, армовані конопляними волокнами [6], були виготовлені з використанням традиційного процесу *формування листів композитів* (SMC, sheet moulding compound). Машина SMC складалася з двох станцій для розмотування рулонів поліамідної плівки. Для виготовлення композиту спочатку в нижній смоляний ящик машини подавали смоляну пасту для просочення. Виробництво SMC починалося з переміщення машиною нижньої та верхньої плівок, оскільки смоляна паста наносилася на обидві плівки з рівномірною товщиною за допомогою двох лопаток з регульованою висотою. Одночасно рулон конопляного нетканого матеріалу подавався між двома плівками, створюючи структуру сендвіч-плівки, а потім переміщався між серією роликів для ущільнення. Цей матеріал SMC, що був поміщений між двома плівками, був спресований через ряд валиків для того, щоб смоляна паста проникла в конопляний волокнистий килимок. Потім конопляний препрег залишали в приміщенні при підвищеній температурі (30–40°C) протягом одного дня [7] для так званого процесу загущення (SMC thickening process). Далі матеріал пресували за допомогою гарячого пресу (форми 300 мм × 300 мм). Два шари препрегу SMC використовувалися для виробництва зразків композитних матеріалів для механічних випробувань. Гаряче пресування відбувалося за температури 140°C і тиску 10 МПа біля 5 хвилин, і одержаний композит мав умовну товщину 3,5 мм.

В [7] для створення нового матеріалу використовувались неткані конопляні килимки (матики), які були придбані у компанії Nemp Technology Ltd (Великобританія) з поверхневою щільністю 500 г/м² і середньою довжиною волокна 65 мм. Ортофталевий ненасичений поліестер (DSM Resins, Великобританія) був вибраний в якості смоли. Для композитів SMC на основі скловолна були використані неткані килимки E-glass. Карбонат кальцію (CaCO₃) з розміром частинок 10 мм використовувався як мінеральний наповнювач. У [7] також описані результати випробувань на низько швидкісне ударне навантаження цих композитних матеріалів, як на основі скловолна, та і армованих натуральними волокнами. Повідомляється [7] про вплив вмісту конопляного волокна та наповнювача (CaCO₃) на енергію композита, армованого конопляним волокном (H-SMC), та порівнюється з композитом, який армований скловолном (G-SMC). Були вивчені три різні параметри матеріалу - об'ємна частка волокон, вміст наповнювача та обробка поверхні волокон. Встановлено, що як максимальна сила, так і енергія удару зростали зі збільшенням вмісту волокон до об'ємної частки біля 40%, після чого зменшувалися [7]. Таким чином, оптимальна об'ємна частка волокон композиту з конопляних волокон становить біля 40%.

Методика 2. Виготовлення композитного матеріалу на основі коноплі з використанням біопластику як матриці. Біопластик, що використовується в якості матриці в [10] був матеріал PLA – що представляє собою полімолочну кислоту, яка отримується з поновлюваних органічних джерел, таких як кукурудзяний крохмаль або цукрова тростина. Методика виготовлення композитного матеріалу, що запропонована в [10], полягає в наступному. Спочатку конопляні волокна і волокна біопластику (PLA) змішуються і проколюються голками з одержанням матику волокон (fiber felt). З плітетів PLA формують плівку PLA. Далі з цих двох матеріалів формується ламінат методом гарячого пресування.

Як правило, міцність міжфазного зв'язку між волокнами конопель і матрицею PLA слабка, що є недоліком композитів з натурального волокна. В [10] смоляна плівка PLA була сформована за допомогою машини гарячого пресування з плітетів PLA. Потім цю плівку PLA розрізали на прямокутні форми (20 мм × 175 мм). Для формування більш однорідного композиту з більшою міцністю утворений матеріал пробивався голками. Цей процес відбувався в два етапи: попереднє голкопробивання (розташування голок: 3500 голок/м, частота руху голки: 650 разів/хв, діаметр голки: 1,83 мм) та основне голкопробивання (розташування голок: 5000 голок/м, частота руху голки: 1000 разів/хв, діаметр голки: 1,83 мм).

Запропонована комбінована методика 3. Методика виготовлення матеріалу в «Житомирська політехніка» базувалась на методиці, що була адаптована з вище викладених двох методик. Відмінності виготовлення композитного матеріалу за розробленою методикою полягають в тому, що на відміну від методики 1, що викладена в [6, 7], була використана натуральна матриця PLA, а не синтетична (див. [6]). Також матеріал проколювався голками, як це було запропоновано за методикою 2, що описана в [10]. Але на відміну від методики 2 в зразках, які були виготовлені, використовувався нетканый матеріал («матик»), що був виготовлений з відходів коноплі, а не самі волокна коноплі, що має знизити вартість такого композиту.

Були виготовлені зразки композитного матеріалу на основі відходів конопляної сировини: 1) конопляний «матик», виготовлений в м. Макарів, Україна; 2) конопляний нетканый матеріал, компанія «Агро-Ханф», Україна. Комбінована методика полягає в наступному: 1) створення павутини з конопляного матеріалу і PLA; 2) стиснення павутини і пробивання голками; 3) розрізання конопляних матиків на куски розмірами 20×175 мм; 4) формування і розрізання плівки PLA на прямокутники 20×175 мм; 5) сушіння матеріалу в духовці протягом 30 хв за температурою 105 °С; 6) застосування гарячого пресування, деталі якого описані в [10].

В [9] було досліджено, що додавання лігніну до конопляно-епоксидних композитів (з використанням нетканого конопляного волокнистого матику) збільшувало міцність композиту. Дослідження проблем міцності композитів на основі конопляних волокон може бути темою наступних досліджень.

Висновки. У роботі проведено аналіз методик виготовлення композитних матеріалів на основі натуральних волокон коноплі. Описано методику виготовлення конопляного композитного матеріалу в Державному університеті «Житомирська політехніка». Композитний матеріал був виготовлений з нетканого матеріалу на основі коноплі і натуральної плівки PTL, яка для кращого прилягання пробивалася голками. Дослідження проблем міцності композитів на основі конопляних волокон може бути темою наступних досліджень.

Список використаних джерел

1. Колодницька Р.В. Процеси випаровування та згоряння дизельного біопалива у двигунах внутрішнього згоряння : монографія. Житомир: ЖДТУ, 2018. 192 с.
2. Dayo A. Q., Xu Y-L., Zegaoui A. et al. Reinforcement of waste hemp fibres in aromatic diamine-based benzoxazine thermosets for the enhancement of mechanical and thermomechanical properties. *Plastics, Rubber and Composites*. 2017. 46:10. P. 442–449.
3. Global Industrial Hemp in Automotive Market Research Report 2023. URL: <https://reports.valuates.com/market-reports/QYRE-Auto-11Y10587/global-industrial-hemp-in-automotive>.
4. Fechová E., Kmec J. Vagaská, A., Kozak D. Material Properties and Safety of Cars at Crash Tests. *Procedia Engineering* 149 (2016) 263–268. International Conference on Manufacturing Engineering and Materials, ICMEM 2016, 6–10 June 2016, Nový Smokovec, Slovakia.
5. Ozoemena M.C., Coles S.R. Hydrothermal Treatment of Waste Plastics: An Environmental Impact Study. *J Polym. Environ.* 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02792-3>.
6. Patel H.K., Ren G., Hogg P.J., Peijs T. Hemp Fibre as an Alternative to Glass Fibre in Sheet Moulding Compound: Part 1. Influence of Fibre Content and Surface Treatment on Mechanical Properties. *Plastics, Rubber and Composites, Macromolecular Engineering*. Volume 39 – Issue 6. 2013. P. 268–276.
7. Patel H.K., Ren G., Hogg P.J., Peijs T. Hemp Fibre as an Alternative to Glass Fibre in Sheet Moulding Compound: Part 2 – impact properties. *Plastics, Rubber and Composites, Macromolecular Engineering*. Volume 44 – Issue 7. 2015. P. 291–298.
8. Shahzad. A Hemp fiber and its composites - A review. *Journal of Composite Materials*. 2012. 46 (8). P. 973–986.
9. Wood B. M., Coles S. R., Maggs S., Meredith J., James O. and Kirwan K. 2011. Use of lignin as a compatibiliser in hemp/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, Vol. 71 (No. 16). P. 1804–1810.
10. Xu Z., Yang L., Ni Q., Ruan F. and Wang H. Fabrication of high-performance green hemp/poly(lactic acid) fibre composites. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2019. Volume 14. P. 1–9.

Kolodnytska R. V.

*Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer at the Department of Automobiles and Transport Technologies,
Higher Education Institution Zhytomyr Polytechnic State University,
Zhytomyr, Ukraine*

E-mail: ruslanakolod2017@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6943-3731

Mozharovsky M. M.

*Assistant Professor at the Department of Automobiles and Transport Technologies,
Higher Education Institution Zhytomyr Polytechnic State University,
Zhytomyr, Ukraine*

E-mail: zid_mmm@ztu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-4720-3783

Shumliakivsky V. P.

*Candidate of Technical Sciences,
Head of the Department of Automobiles and Transport Technologies,
Higher Education Institution, Zhytomyr Polytechnic State University,
Zhytomyr, Ukraine*

E-mail: shumliakivskyiv@ztu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-0618-4483

COMPOSITE MATERIALS BASED ON NATURAL FIBERS FOR ROAD TRANSPORT

Abstract

In connection with the hostilities in Ukraine, the supply of jute abroad is limited, so enterprises are trying to use local products, namely industrial hemp, which does not contain tetrahydrocannabinol. Henry Ford used hemp fibers in composite materials for the car body as early as 1941. He invested millions of dollars in the research and development of a plastic car and announced that he would "grow cars from the soil." Since 2009, Zhytomyr Polytechnic State University has been conducting studies of composite materials based on hemp fibers and the possibility of using them for road transport. The purpose of this work is to investigate the features of the production of composite materials based on industrial hemp and the development of methods for manufacturing a completely natural composite from industrial hemp. The paper considers two methods of manufacturing composite materials based on natural hemp fibers: with synthetic and natural matrices. The process of manufacturing composite materials with synthetic matrix, reinforced with hemp fibers, which are made using the process of forming sheets (SMC, sheet moulding compound), is analyzed. When creating natural matrix composite materials using bioplastics (PLA), the interfacial bond strength between hemp fibers and the PLA matrix will be weak, which is a disadvantage of natural fiber composites. In order to overcome this drawback, the method of punching material with needles was used.

The production of composite material based on hemp at Zhytomyr Polytechnic State University is described. The composite material was made of nonwoven material based on hemp and natural PLA film, which was punched with needles for a better fit. The developed technique is as follows: 1) creating a web of hemp material and PLA; 2) compression of the web and punching with needles; 3) cutting hemp sticks into pieces measuring 20×175 mm; 4) forming and cutting PLA film into rectangles of 20×175 mm; 5) drying the material in the oven for 30 minutes at a temperature of 105°C; 6) the use of hot pressing.

Key words: automobile transport, composite materials, natural fibers, industrial hemp.

References

1. Kolodnytska, R.V. (2018). *Protsesy vyparovuvannya ta zgoryannya dyzelnoho biopalyva u dvygunah vnutrishnjogo zgoryannya: monohrafiia. [Processes of evaporation and combustion of diesel biofuel in internal combustion engines: monograph].* Zhytomyr: ZSTU, 192 p. [in Ukrainian].
2. Dayo, A. Q., Xu, Y-L., & Zegaoui A. et al. (2017). Reinforcement of waste hemp fibres in aromatic diamine-based benzoxazine thermosets for the enhancement of mechanical and thermomechanical properties. *Plastics, Rubber and Composites*. 46:10. pp. 442–449.
3. Global Industrial Hemp in Automotive Market Research Report 2023. (2023). Retrieved from: <https://reports.valuates.com/market-reports/QYRE-Auto-11Y10587/global-industrial-hemp-in-automotive>
4. Fehová, E., Kmec, J. Vagaská, A., & Kozak, D. (2016). Material Properties and Safety of Cars at Crash Tests. *Procedia Engineering*. 149 pp. 263–268. International Conference on Manufacturing Engineering and Materials, ICMEM 2016, 6–10 June 2016, Nový Smokovec, Slovakia.
5. Ozoemena, M.C., & Coles, S.R. (2023). Hydrothermal Treatment of Waste Plastics: An Environmental Impact Study. *J Polym. Environ.* Retrieved from: <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02792-3>.

6. Patel, H.K., Ren G., Hogg, P.J., & Peijs, T. (2013). Hemp Fibre as an Alternative to Glass Fibre in Sheet Moulding Compound: Part 1. Influence of Fibre Content and Surface Treatment on Mechanical Properties. *Plastics, Rubber and Composites, Macromolecular Engineering*. V 39. Iss. 6. pp. 268–276.
7. Patel, H.K., Ren G., Hogg, P.J., & Peijs, T. (2015). Hemp Fibre as an Alternative to Glass Fibre in Sheet Moulding Compound: Part 2 – impact properties. *Plastics, Rubber and Composites, Macromolecular Engineering*. V. 44 – iss. 7. pp. 291–298.
8. Shahzad, A. (2012). Hemp fiber and its composites – A review. *Journal of Composite Materials*. iss. 46 (8). pp. 973–986.
9. Wood, B.M., Coles, S.R., Maggs, S., Meredith, J., James, O., & Kirwan, K. (2011). Use of lignin as a compatibiliser in hemp/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, iss.71 (16). pp. 1804–1810.
10. Xu, Z., Yang, L., Ni, Q., Ruan, F. and Wang, H. (2019). Fabrication of high-performance green hemp/polylactic acid fibre composites. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. iss. 14. pp. 1–9.