



UDC 621.791.9

OPTIMIZATION OF THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF STRUCTURAL ELEMENTS OF AIRCRAFT MADE OF BASALT PLASTIC

Younis B.N./ Юніс Б.Н.

к.т.н., as.prof.

ORCID: 0000-0002-5693-6954

Miroshnikov V.Yu. / Мірошніков В.Ю.

д.т.н., prof.

ORCID: 0000-0002-9491-0181

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute, / Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут Харків, Чкалова, 17, 61070

Анотація. Сучасна аерокосмічна галузь потребує матеріалів, які не лише покращують експлуатаційні та технологічні характеристики аерокосмічних систем, але й мінімізують витрати, пов'язані з експлуатацією, технічним обслуговуванням і утилізацією. Перспективним рішенням є використання полімерних композиційних матеріалів (ПКМ). Зі зростанням вимог до покращення експлуатаційних характеристик з'являється гостра потреба у матеріалах, які можуть підвищити технічні показники та водночас зменшити вагу. Базальтне волокно (БВ), отримане з базальтової гірської породи, може бути перероблене у надтонкі філаменти. При поєднанні з полімером утворюється базальтово-волокнистий полімер (BFRP). У цій роботі представлено огляд хімічного складу, механічних властивостей та довговічності базальтового волокна. У статті наведено методи покращення експлуатаційних властивостей конструкційних елементів літальних апаратів із базальтових пластиків, зокрема термообробку та модифікацію. Термообробка може підвищити механічні властивості, такі як міцність і жорсткість, без збільшення маси. Базальтовий пластик після термообробки може застосовуватись у критичних конструкційних елементах, таких як лонжерони лопатей гелікоптера, стрингери крила та обтічники гелікоптера.

Ключові слова: композиційний матеріал; полімерна матриця; базальтовий пластик; армування; зв'язувальна речовина; термообробка; механічні властивості; питома міцність; модифікація; тальк.

Вступ Протягом останніх 40 років використання полімерних композицій у аерокосмічній галузі конструктори та інженери перейшли від відносно невеликих, слабо навантажених компонентів та ділянок конструкцій, таких як елерони та обтічники, до високоміцних і критичних елементів, таких як основні крила та фюзеляжі літаків Boeing 787, Airbus A400M та Airbus A350, які на 50% (у випадку A350 — до 53%) складаються з вуглецево-волокнистих композитів (за масою літака)[1]. У цих літаках основні крила та фюзеляж в основному виготовлені з композитних матеріалів. Волокнисті армовані композити (FRC) мають широкий спектр застосування — від аерокосмічних компонентів до автомобільної промисловості, енергетики, будівництва, морської інженерії,



електроніки, хімічного обладнання та медичних пристроїв. У багатьох випадках композити створюються для заміни металевих компонентів, особливо тих, що використовуються в корозійних середовищах. Основні переваги FRC порівняно з металевими матеріалами полягають у підвищеній стійкості, поєднанні технічних, економічних, екологічних та соціально-управлінських аспектів. Базальтові пластики, засновані на мінеральних наповнювачах, поєднують високу питому міцність, технологічну зручність, діелектричні властивості, низьку теплопровідність, атмосферну, водну та хімічну стійкість. Завдяки цим властивостям вони використовуються у виробництві фюзеляжів гелікоптерів, лонжеронів лопатей, стрингерів крила й обтічників, що вирізняються радіопрозорістю[2-5]. Односпрямовані композити на основі базальтових волокон, укладених під певними кутами, мають найкращі міцнісні характеристики. Механічні властивості базальтових пластиків переважно залежать від характеристик наповнювача та міцності його зчеплення зі зв'язувальною речовиною, а також від температур обробки та експлуатації. Модифікація органічними й мінеральними речовинами у певних співвідношеннях підвищує термостійкість. Основними критеріями матеріалів в авіації є мала маса та висока міцність і жорсткість. Для підвищення ефективності застосування композитів необхідно збільшити ці параметри без значного підвищення густини. Це можна здійснити термообробкою або модифікацією.

Мета роботи — покращення механічних властивостей базальтових пластиків шляхом термообробки та оцінка її впливу на структуру.

Базальтові композити в аерокосмічній промисловості

Базальт — найпоширеніша магматична гірська порода, що становить понад 90% усіх вулканічних порід. Його мікроструктура залежить від швидкості охолодження лави: повільне охолодження сприяє кристалічній структурі, тоді як швидке — аморфній. Мінералогічно базальт містить плагіоклази, піроксени й олівін. Базальтові волокна мають лінійну пружно-деформаційну поведінку до моменту крихкого руйнування[6-9]. Дослідження, проведені Deák & Czigány[10], виявили вплив геометричних і хімічних характеристик (вмісту SiO_2 та Al_2O_3) на



міцність на розрив. Підвищення вмісту Al_2O_3 покращує міцність волокна.

Базальт плавиться при 1500–1700 °С, що забезпечує його високу термостійкість і екологічність[11]. Порівняння скловолокнистих і базальтових композитів показало, що базальтові мають вищу міцність і меншу кількість пор. Після 55 циклів нагрівання-охолодження базальтове волокно виявило більшу термостійкість, ніж скловолокно[23]. Хоча подовження до руйнування (3,15%) нижче, ніж у скловолокна (4,7%), базальтове волокно має вищу питому міцність і меншу вартість порівняно з вуглецевим волокном[24-26].

Таблиця 1 - Порівняння властивостей волокон, що зазвичай використовуються в полімерних композитах, армованих волокном

Fibre	Fibre Diameter (µm)	Density (g/cm ³)	Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)	Elongation at Break (%)	Price (USD/kg)
Basalt	9–23	2.8–3.0	3000–4840	79.3–93.1	3.1	2.5–3.5
E-glass	9–13	2.5–2.6	3100–3800	72.5–75.5	4.7	0.75–1.2
S-glass	9–13	2.46–2.5	4590–4830	88–91	5.6	5–7
Carbon	4–7.5	1.75–1.9	3500–6000	230–600	1.5–2.0	30
Aramid	5–18	1.44	2900–3400	70–112	2.8–3.6	25

Гібридні композити, що поєднують штучні й природні волокна, демонструють покращені властивості[27]. Наприклад, суміш Е-скловолокна (400 GSM) і базальтового волокна у співвідношенні 6:2 із введенням наночастинок графену дозволяє отримати легкий (на 40%) композит товщиною 1,1 мм для авіаційної промисловості [8-12,22]. У авіації базальтові композити можуть застосовуватись для тепло- та звукоізоляції в двигунах і фюзеляжах [28-33].

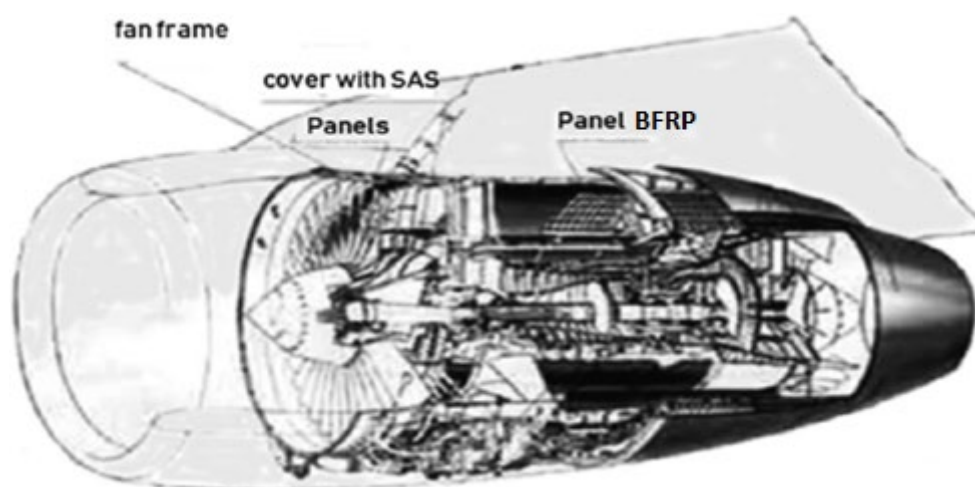


Рис. 1 - Використання базальтового пластику для виготовлення звукоізоляційних панелей авіаційного двигуна [34].



Матеріали та методи дослідження

Матеріал: базальтовий пластик.

Використані компоненти:

- армування — базальтова тканина BT-200;
- зв'язувальна речовина — епоксидна смола ED-20 і розчинник.

Етапи виготовлення:

1. Укладання семи шарів армування та просочення зв'язувальною речовиною.
2. Пресування при температурі 70°C.
3. Витяг матеріалу з форми.
4. Остаточна механічна обробка (різання згідно ASTM D7264/D7264M – 21) і шліфування.
5. Термообробка.

Технологія подальшої обробки попередньо з'єднаних шаруватих заготовок включає нагрівання до певної температури, витримку при цій температурі та охолодження. Для полімерів використовуються чотири види термічної обробки: відпал, гартування, нормалізація та відпуск [35]. Використовуються ті ж назви, що й для термічної обробки металів. Під час нормалізації полімер нагрівають до заданої температури, а потім повільно охолоджують. Цей процес знімає внутрішні напруження, що виникли під час виготовлення деталей. Нормалізацію зазвичай називають відпалом аморфних полімерів.

Далі розглядаються процеси, що відбуваються в полімері під час відпалу. Вплив відпалу проявляється у формуванні максимально рівноважної супрамолекулярної структури. На будь-якому етапі обробки формується аморфно-кристалічна структура з максимальним ступенем кристалічності та максимальними розмірами ламелей та сферолітів, а також щільно упакована, максимально неоднорідна структура аморфних областей. Термічна обробка базальтового пластику методом нормалізації включала нагрівання зразків до температури 220°C, витримку при цій температурі протягом 1 години та охолодження на повітрі (див. рис. 2). Режим термічної обробки проілюстровано



на рис. 2. При 220°C протягом 1 години [36].

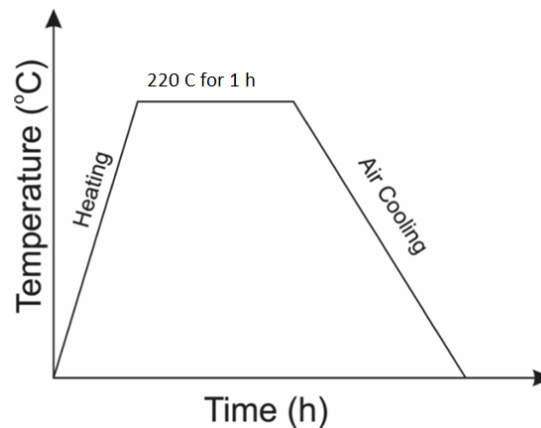


Рис.2 - Режим термічної обробки базальтового пластику [37]

Під час термічної обробки також відбувається остаточна полімеризація смоли, яка може бути не повністю завершена під час виробництва матеріалу. Зшивання відбувається під час полімеризації смоли. Зшивання поліетилену відноситься (рис. 3) до процесу з'єднання молекулярних сегментів у піротехнічну тривимірну мережу шляхом утворення зшивок.[38]

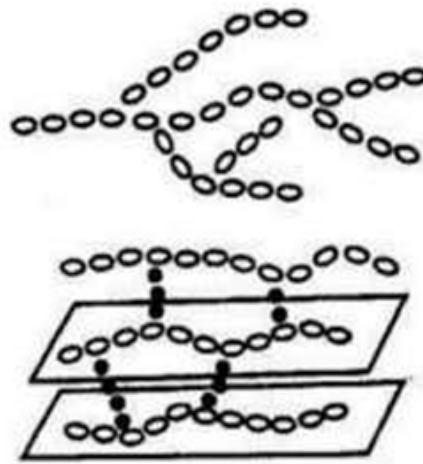


Рис.3 - Процес полімеризації зі зшиванням між ланцюгами.

Для дослідження механічних властивостей використовувалися такі методи:

- Випробування модуля пружності при розтягу відповідно до ASTM D3039/D3039M-08. Застосовувалися кроки навантаження 250 г. Похибка вимірювання становить $6 < 1\%$.



- Випробування на згин згідно з ASTM D7264/D7264M – 21. Швидкість навантаження становила 20-10 мм/хв, з похибкою вимірювання 84%.

- Випробування на ударну в'язкість згідно з ASTM E1922.

Швидкість маятника в момент удару становила 3,44 м/с, з вагою 2,035 кг. Похибка вимірювання становить $5 < 4\%$. Структуру зразків базальтового пластику вивчали за допомогою оптичного мікроскопа OLIMPUS GX51, призначеного для формування збільшених зображень. Принцип дії базується на проходженні розбіжного променя його світла через зразок, збільшеного отриманого зображення об'єктивом та заломленого для потрапляння в трубку окуляра, де відбувається подальше збільшення. Використовуючи відбій світла та збільшення від 50 до 1000 разів, фіксували структуру досліджуваного матеріалу. Для визначення об'ємних часток структурних компонентів використовували точний метод, пропонує А.А. Глаголевим [39].

Обговорення результатів

Результати механічних випробувань узагальнені в таблиці:

На основі таблиці 2 створено гістограми залежності питомої міцності та жорсткості від обробки базальтового пластику. (Рис. 4,5).

Таблиця 2 - Дані, отримані в результаті механічних випробувань.

Матеріал	E , Гра	σ_t розтягувальне напруження Mpa	E , у напрузі згину Гра	ρ , kg/m^3	σ_{is} , km питома міцність	E_{sr} , km питома жорсткість	Q , kJ/m^2
Базальтовий пластик	9,1	130	18,5	1300	10,2	1,45	58
Базальтовий пластик після термічної обробки	15	192	21	1307	14,9	1,63	67,3

Питома міцність після термічної обробки зразків більша, ніж до термічної обробки.

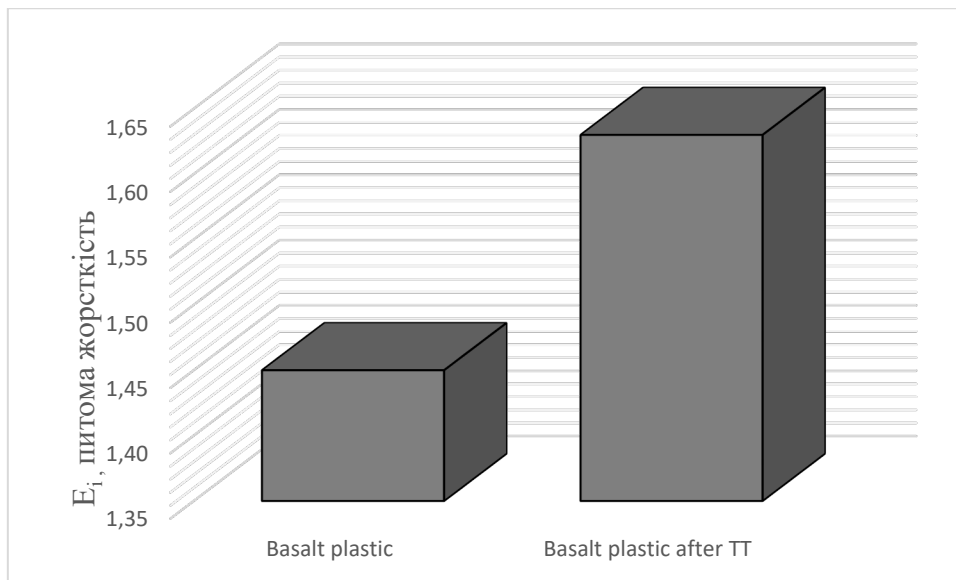


Рис. 4 - Порівняльні гістограми питомих характеристик композитних матеріалів: значення питомої жорсткості.

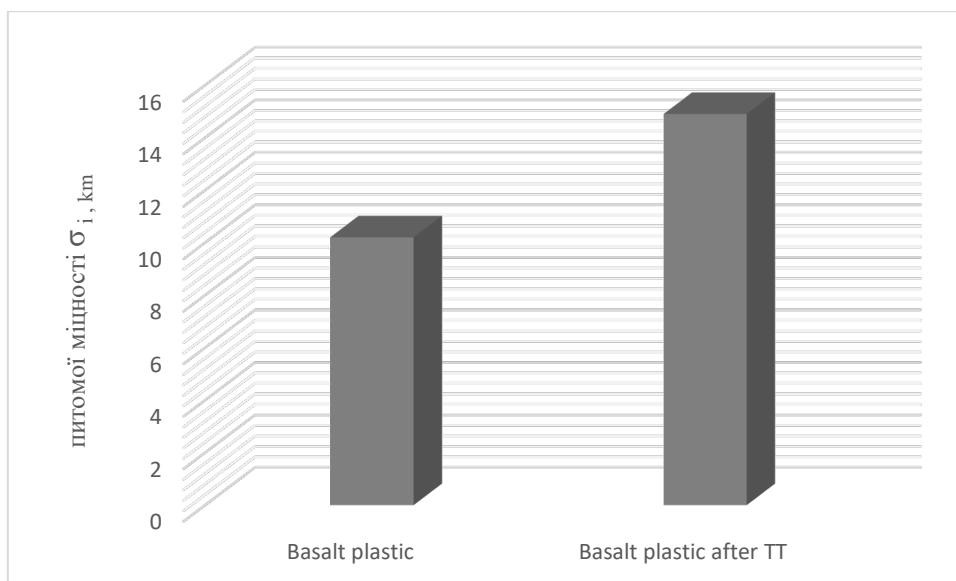


Рис. 5 - Порівняльні гістограми питомих характеристик композитних матеріалів: значення питомої міцності.

Проводячи механічні випробування п'яти зразків композитних матеріалів, що відрізняються складом та термічною обробкою, можна зробити висновок, що базальтопластик, що піддався термічній обробці, показав найкращі властивості міцності (на 47% більша міцність, ніж необроблений базальтопластик). Були отримані наступні зображення (рис. 6, 7).

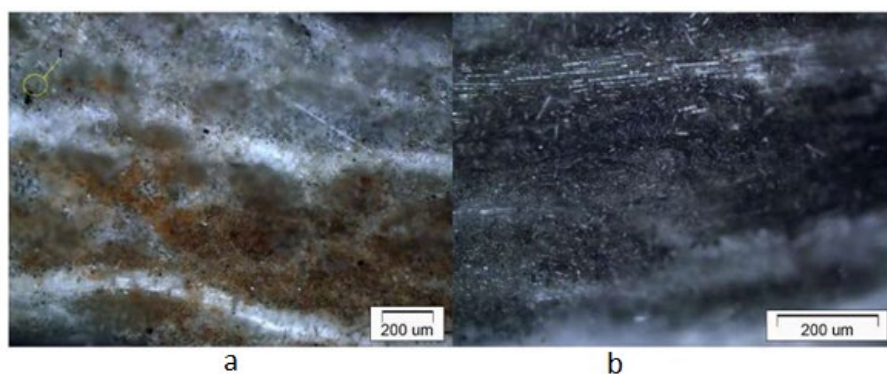


Рис. 6 - Мікрофотографія необробленого базальтового волокнистого пластику а - поздовжній розріз: 1 - пора; б - поперечний розріз.

Найнижчу міцність спостерігали у базальтового пластику, який не піддавався термічній обробці та модифікації. Таким чином, термічна обробка підвищує межу міцності та модуль пружності матеріалу. Для дослідження мікроструктури були виготовлені поздовжні та поперечні зрізи.

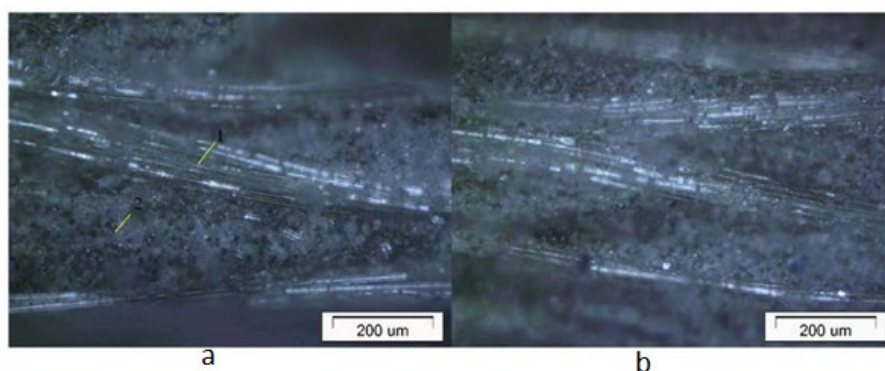


Рис. 7 - Мікрофотографія термічно обробленого базальтового волокнистого армованого пластику: а - поздовжній розріз: 1 - волокно; 2 - матриця; б - поперечний розріз.

На зображеннях видно, що армуючий компонент представлений у вигляді тканинного переплетення, з приблизно однаковою кількістю ниток утка та основи. Виділено шарувату структуру композиту, спричинену шарами нанесення тканини та сполучного матеріалу. Чітко видно сім шарів.

Додатково, кількісні параметри мікроструктури були визначені за фотографіями поздовжнього розрізу, включаючи діаметр волокон, об'ємну частку та рівномірність їх розподілу по всьому композиту. Об'ємні частки



структурних компонентів детально описані в таблиці 3.

Таблиця 3 - Об'ємні частки структурних компонентів досліджуваних матеріалів

Матеріал	$V_f\%$	S, %
Базальтовий пластик	66	3
Базальтовий пластик після термічної обробки	61	3

Резюме

У цій роботі проведено дослідження з метою покращення механічних властивостей базальтових пластикових композитів за рахунок термічної обробки, а також оцінено її вплив на структуру матеріалу. Механічні випробування були виконані на п'яти зразках композитних матеріалів, що відрізнялися умовами термічної обробки. Базальтопластик, підданий термічній обробці, продемонстрував найкращі показники міцності (на 47% вищу міцність порівняно з необробленим базальтопластиком). Його питома міцність також перевищує показники зразків для порівняння. Таким чином, термічна обробка підвищує межу міцності та модуль пружності матеріалу. Мікроструктурні зображення показали, що армівний компонент має структуру тканого полотна з приблизно однаковою кількістю ниток основи та утку. Шарувата структура композиту зумовлена послідовним нанесенням тканини та сполучного матеріалу шарами. Коефіцієнт нерівномірності розподілу волокон не перевищує 3%, що свідчить про високу однорідність розподілу армівного компонента в об'ємі та про якісне виготовлення композитів. Враховуючи коефіцієнт армування, незважаючи на меншу кількість армівного компоненту, міцність базальтопластику після термічної обробки перевищує міцність необробленого матеріалу на 57%.

References

1. Philip Irving Polymer Composites in the Aerospace Industry Woodhead



Publishing Series in Composites Science and Engineering Polymer Composites in the Aerospace Industry 2020 .pp.14-16. ISBN: 978-0-08-102679-3

2.Park, S.J.; Seo, M.K. Composite Characterization. *Interface Sci. Technol.* 2011, 18, 631–738. [Google Scholar]

3.Vallittu, P.K. Fibre-Reinforced Composites for Dental Applications. In *Dental Biomaterials*; Curtis, V., Watson, T.F., Eds.; Woodhead Publishing: Southen, UK, 2008; pp. 239–260. [Google Scholar]

4.Deb, A. Crashworthiness Design Issues for Lightweight Vehicles. In *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*; Mallick, P.K., Ed.; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2021; pp. 433–470. [Google Scholar]

5.Randbaran, E.; Dayang, L.; Zahari, R.; Sultan, M.T.H.; Mazlan, N. Advantages and Disadvantages of Using Composite Laminates in the Industries. *Mod. Approaches Mater. Sci.* 2020, 32, 349–352. [Google Scholar]

6.Monaldo, E.; Nerilli, F.; Vairo, G. Basalt-based fiber-reinforced materials and structural applications in civil engineering. *Compos. Struct.* 2019, 214, 246–263. [CrossRef]

7.Dhand, V.; Mittal, G.; Rhee, K.Y.; Park, S.J.; Hui, D. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. *Compos. Part B* 2015, 73, 166–180. [CrossRef]

8.Fiore, V.; Scalici, T.; Bella, G.D.; Valenza, A. A review on basalt fibre and its composites. *Compos. Part B* 2015, 74, 74–94. [CrossRef]

9.Greco, A.; Maffezzoli, A.; Casciaro, G.; Caretto, F. Mechanical properties of basalt fibres and their adhesion to polypropylene matrices. *Compos. Part B Eng.* 2014, 67, 233–238. [CrossRef]

10. Deák, T.; Czigány, T. Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibres: A comparison. *Text. Res. J.* 2009, 79, 645–651. [CrossRef]

11. Gutnikov, S.I.; Malakho, A.P.; Lazoryak, B.I.; Loginov, V.S. Influence of alumina on the properties of continuous basalt fibres. *Russ. J. Inorg. Chem.* 2009, 54, 191–196. [CrossRef]

12. Ramakrishnan, N.S.; Tolmare, V.; Brik, V.B. Performance Evaluation of 3-D Basalt Fibre Reinforced Concrete and Basalt Rod Reinforced Concrete. In *NCHRP-*



IDEA Program Project Final Report; Transportation Research Board: Washington, DC, USA, 1998.

13. Colombo, C.; Vergani, L.; Burman, M. Static and fatigue characterization of new basalt fibre reinforced composites. *Compos. Struct.* 2012, 94, 1165–1174.

[CrossRef]

14. Liu, H.; Yu, Y.; Liu, Y.; Zhang, M.; Li, L.; Ma, L.; Sun, Y.; Wang, W. A review on basalt fiber composites and their applications in clean energy sector and power grids. *Polymers* 2022, 14, 2376. [CrossRef]

15. Brik, B. Basalt Fibre Composite Reinforcement for Concrete. In NCHR-IDEA Program Project Final Report; Transportation Research Board: Washington, DC, USA, 1997.

16. Loos, M. Composites in Carbon Nanotube Reinforced Composites. In *CNR Polymer Science and Technology*; Willian Andrew Applied Science Publishers: New York, NY, USA, 2015; pp. 37–72.

17. Mahltig, B.; Kyosev, Y. Basalt Fibres. In *Inorganic and Composite Fibres; Production, Properties and Applications*; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2018; pp. 195–217.

18. Martynova, E.; Cebulla, H. Glass Fibres. In *Inorganic and Composite Fibres; Production, Properties and Applications*; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2018; pp. 131–163.

19. Tempelman, E.; Shercliff, H.; van Eyben, B.N. Resin Transfer Moulding. In *Manufacturing and Design: Understanding the Principles of How Things Are Made*; Elsevier Ltd.: Amsterdam, The Netherlands, 2014; pp. 171–186.

20. Wypych, G. Fillers—Origin, Chemical Composition, Properties, and Morphology in *Handbook of Fillers*; Chem Tec Publishing: Scarborough, ON, Canada, 2016; pp. 14–266.

21. Jamshaid, H.; Mishra, R. A green material from rock: Basalt fibre—A review. *J. Text I* 2016, 107, 923–937. [CrossRef]

22. Summerscales, J.; Searle, T.J. Low-pressure (vacuum infusion) techniques for moulding large composite structures. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*



2005, 219, 45–58.

23. Krishan Pareek, Purna Saha Basalt fiber and its composites: an overview. Proceedings of National Conference on Advances in Structural Technologies (CoAST-2019), Department of Civil Engineering National Institute of Technology Silchar (2019). PP.53.

24. T. Xiong, N. Wang, J. Liao, Y. Zhang Modified boron nitride-basalt fiber/epoxy resin composite laminates and their enhanced mechanical properties Polym. Adv. Technol., 32 (9) (2021), pp. 3621-3632, 10.1002/pat.5370

25. Emine Feyza Sukur, Gurol Onal Graphene nanoplatelet modified basalt/epoxy multi-scale composites with improved tribological performance, Wear. Volumes 460–461 ISSN 0043-1648 <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203481> (2020)

26. N. Jamali, H. Khosravi, A. Rezvani, et al. Mechanical properties of multiscale graphene oxide/basalt fiber/epoxy composites Fibers Polym., 20 (2019), pp. 138-146, 10.1007/s12221-019-8794-2

27. M.A. Azghan, F. Bahari-Sambran, R. Eslami-Farsani. Modeling and experimental study on the mechanical behavior of glass/basalt fiber metal laminates after thermal cycling Int. J. Damage Mech., 30 (8) (2021), pp. 1192-1212.

28. M.Sakthivel, S.RAMESH, (2013), Mechanical Properties Of Natural Fibre (Banana, Coir, Sisal) Polymer Composites science PARK,

29. Alexander.J, Dr.BSM. Augustine (2016), “influence of microwave post curing on the mechanical and thermal properties of basalt / epoxy composites for aerospace applications” ,Journal of the Balkan Tribological Association, Vol. 22(1), pp.220–234.

30. Alexander.J, Dr.BSM. Augustine (2015), “Inter ply stress analysis of basalt fibre reinforced plastic laminated composites” International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 10(11), pp.10448-10450.

31. Kuruvilla Joseph, Romildo Dias Tolêdo Filho, Beena James, Sabu Thomas & Laura Hecker De Carvalho, (1999), A Review On Sisal Fiber Reinforced Polymer, Composites, Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental, V.3, N.3, P.367-379.

32. Ahmad Hosseini , Asokan Raji Improved double impact and flexural



performance of hybridized glass basalt fiber reinforced composite with graphene nanofiller for lighter aerostructures . *Polymer Testing*, Volume 125, August 2023, 108PP.107

33. Basalt Fiber & Composite Materials Technology Development. Scope of Application of Basalt Fibre Materials. 2014. Available online: <http://basaltm.com/en/bnv/scope-of-application-of-basalt-fiber-materials.html> (accessed on 10 November 2022)

34. E. D. Moskvicheva & V. I. Reznichenko The Use of Basalt Plastic for the Manufacture of Sound Insulation Panels of an Aircraft Engine Conference paper First Online: 02 June 2021. pp 101–113.

35. Autar K. Kaw *Mechanics of composite materials* second edition. Published in 2006 by CRC Press Taylor & Francis Group. ISBN 13: 978-0-8493-1343-1 .pp.16-18.

36. Vidya Viswanath, Somsubhra Maity, Jason R. Bochinski, Laura I. Clarke, and Russell E. Gorga Thermal Annealing of Polymer Nanocomposites via Photothermal Heating: Effects on Crystallinity and Spherulite Morphology [dx.doi.org/10.1021/ma401855v](https://doi.org/10.1021/ma401855v) | *Macromolecules* 2013, vol.46,pp. 8596–8607.

37. Cecep Ruskandi, Darma Firmansyah Undayat, Gita Novian Hermana, Muhammad Rizki Gorbyandi Nadi, and Wiwik Purwadi Study on Thermal Behaviour of Tungsten Cemented Carbide Tip Scraps. T. P. Syawitri et al. (Eds.): MEST 2022, AER 222, pp. 107–113, 2023. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-134-0_11.

38. M. A. Sachini N. Weerasinghe a, Obed J. Dodo a, Chamoni W. H. Rajawasam a, Ibrahim O. Raji a, Shiwanka V. Wanasinghe , Dominik Konkolewicz , and Nethmi De Alwis Watuthanthrige . Educational series: turning monomers into crosslinked polymer networks DOI: 10.1039/D3PY00912B (Tutorial Review) *Polym. Chem.*, 2023, 14, pp.4503-4514.

39. Yuliya Goncharova Evaluation of Filler Distribution in Particulate Reinforced Composites. July 2015 *Journal of Materials Science and Chemical Engineering* 3(7):pp.108-112. DOI:10.4236/msce.2015.37014.