

Výskum, vývoj a výroba kompozitov na báze čadiča v podmienkach Slovenskej republiky

doc. Ing. Michal Hovanec, PhD., Ing. Paed. IGIP

Technical University of Kosice

Department of Aviation Engineering

Rampová 7, 041 21 KOSICE

michal.hovanec@tuke.sk

Ing. Samer AL-RABEEI, PhD.

Technical University of Kosice

Department of Aviation Engineering

Rampová 7, 041 21 KOSICE

Samer.al-rabeei@tuke.sk

Ing. Štefan Kandrač

Technical University of Kosice

Department of Aviation Engineering

Rampová 7, 041 21 KOSICE

stefan.kandrac@tuke.sk

prof. Ing. Hana Pačaiová, PhD.

Technical University of Kosice

Department of Aviation Engineering

Rampová 7, 041 21 KOSICE

hana.paciova@tuke.sk

Ing. Volodymyr Tymofiiv, PhD.

Technical University of Kosice

Department of Aviation Engineering

Rampová 7, 041 21 KOSICE

volodymir.tymofiiv@tuke.sk

Ing. Branislav Rácek, PhD.

Technical University of Kosice

Department of Aviation Engineering

Rampová 7, 041 21 KOSICE

branislav.racek@tuke.sk

Abstrakt

Výskum a vývoj kompozitov na báze čadiča v Slovenskej republike predstavujú perspektívny smer v oblasti udržateľného materiálového inžinierstva. Čadičové vlákno, ako prírodný a ekologicky priaznivý materiál, ponúka vysokú pevnosť, chemickú odolnosť a tepelnú stabilitu, čím sa stáva vhodnou alternatívou k oceli,

© Published by Journal of Global Science.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. The moral rights of the named author(s) have been asserted.

hliníku a plastom. Moderné výrobné procesy využívajú pultrúzne a vstrekovacie technológie s nízkou ekologickou stopou v súlade s princípmi „zelenej technológie“.

Súčasný výskum sa zameriava na optimalizáciu epoxidových systémov na báze obnoviteľných surovín (napr. sójový olej) a využitie recyklovateľných polymérov, ako je kyselina polymliečna (PLA). Vývoj nadväzuje na globálne trendy v nahrádzaní neobnoviteľných materiálov ekologickými alternatívami, ktoré sa intenzívne rozvíjajú od roku 2015 po svetovej výstave JEC v Paríži.

V slovenských podmienkach sa priemyselné uplatnenie čadičových kompozitov sústreďuje najmä na konštrukčné profily pre fotovoltaické systémy, fasádne a strešné konštrukcie či protihlukové zábrany. Výsledky výskumu, realizovaného v spolupráci s univerzitami v SR, ČR a Maďarsku, potvrdzujú, že čadičové kompozity predstavujú technicky aj ekonomicky efektívne riešenie s vysokým potenciálom uplatnenia v stavebníctve, doprave a odvetví obnoviteľných zdrojov energie.

Kľúčové slová

čadičové kompozity, udržateľné materiály, pultrúzia, ekologická výroba, obnoviteľné zdroje, zelené technológie

Informácia

Tento príspevok je výsledkom implementácie projektu: "Riadenie POPs rizík v kontexte prechodu na udržateľnú bioekonomiku" (Acronym: POP_RISKMAN base), č. I09I04-03-V02-00050, podporený v rámci Plánu obnovy a odolnosti SR, komponent 9. Efektívnejšie riadenie a podpora financovania, vývoja a inovácií republiky.

1. Úvod

Bazaltový kompozit je progresívnym materiálom pre využitie v rôznych oblastiach priemyslu. Bazaltové vlákno je prírodný produkt. Pultrúzna linka a ďalšie stroje a roboty zahrnuté v rámci výrobných aktivít na ťahanie, navíjanie a vstrekovanie kompozitných profilov a výrobu betónových vystužovacích prvkov je na súčasnej najvyššej technologickej úrovni. Spĺňajú najprísnejšie požiadavky „zelenej technológie“. Výrobné stroje pracujú s tzv. nízkou ekologickou stopou. Výrobná produkcia kompozitných materiálov na báze čadiča počíta aj s využitím moderných epoxidových systémov na báze sójového oleja alebo podobných prírodných produktov z obnoviteľných zdrojov. V prípade suchého spojiva ide o použitie recyklovateľných materiálov na báze PLA-kyseliny mliečnej, polysacharidov - tvrdidiel vyšších rádov a celulózy. Trend nárastu využívania materiálov z obnoviteľných zdrojov vo výrobe sa začal v posledných desiatich rokoch a nabral na obrátkach na svetovej výstave JEC 2015 v Paríži, kde bol prezentovaný ucelený výber nových, ekologicky priaznivých komponentov kompozitného priemyslu. Začiatky výskumu siahajú do 70. rokov 20. storočia. Vzhľadom na súčasné trendy sa v stavebníctve a ďalších odvetviach kladie čoraz väčší dôraz na udržateľnosť a kvalitné produkty. V dôsledku toho sa zvyšuje aj dopyt po konštrukčných prvkoch z čadičových vlákien.

Podstata výrobných aktivít spočíva vo využití najmodernejšej pultrúznej a vstrekovacej technológie prostredníctvom najmodernejších výrobných zariadení v niekoľkých možných alternatívach prevedenia na výrobu materiálov (rôznych profilov, lán, tkanín a ďalších výrobkov), ktoré v prevažnej miere nahradia doteraz používané konvenčné materiály z ocele, hliníka ale aj dreva a plastov (vrátane špeciálnych - nehorľavých). Doterajšie využitie uvedenej technológie vo svete je hlavne na výstužné tyče, siete a ďalšie nosné prvky hlavne betónových konštrukcií a to hlavne s použitím sklenených vlákien. Pre letecký a

automobilový priemysel sa začínajú používať kompozitné materiály prevažne na báze karbónu, čo je v porovnaní s materiálmi na báze čadiča cenovo neporovnateľné.

Počiatkový sortiment týchto aktivít v podmienkach Slovenskej republiky je zameraný hlavne na profily nahrádzajúce v súčasnosti používané hliníkové profily pre montáž fotovoltaických panelov, fasádnych systémov, strešné systémy či protihlukové zábrany. Tieto a ďalšie naše výrobky, ktoré sú predmetom vývoja v spolupráci s partnermi z univerzít v SR, ČR a HU majú simulované technické parametre porovnateľné (v mnohých oblastiach výrazne lepšie) s pôvodne používanými konvenčnými a sú navyše cenovo prístupnejšie (v mnohých prípadoch výrazne).

2. Základné teoretické východiská

HLAVNÉ PRODUKTOVÉ OBLASTI:

1. *Systém bazaltových komponentov pre odvetrané fasády*

V súčasnosti používané materiály pre realizáciu odvetraných fasád sú na báze hliníka, ďalších kovov, keramiky, skla a materiálov zabezpečujúcich tepelnoizolačnú bariéru medzi objektom a nosnými prvkami odvetranej fasády. Výhodou bazaltových komponentov oproti pôvodným je vyššia pevnosť a odolnosť voči vode a alkalickým soľam, výrazne nižšia tepelná vodivosť (oproti hliníku skoro 500x), nižšia hmotnosť a nižšia cena. Výraznou výhodou je elektrická nevodivosť. Bazaltové prvky je možné využiť v tomto prípade na kompletne prekrytie izolácie odvetranej fasády vrátane nosných prvkov s možnosť ľubovoľnej farebnej úpravy povrchov.

2. *Profily pre stavebníctvo – náhrada drevených, kovových a plastových profilov*

Vzhľadom na prepočítané pevnostné charakteristiky je možné tieto profily nadimenzovať v zmysle konkrétnych požiadaviek a požadovaných parametrov. Konkrétne vyrábané profily budú záležitosťou dopytu a vývoja. Nespornou výhodou je ich vodeodolnosť, odolnosť voči agresívnemu prostrediu, výrazne dlhšia životnosť a jednoduchšia manipulácia vzhľadom k výrazne nižšej hmotnosti a nenáročnosť údržby (zachovanie tvaru a farby počas celej doby životnosti). Sem môžeme zaradiť aj výrobu špeciálnych nehorľavých plastov, ktorých použitie v rámci stavebníctva, ale napríklad aj automobilového a elektro priemyslu (napr. montáž fotovoltaických systémov) je veľké.

3. *Strešné systémy a krytiny*

Výhodou bazaltových strešných krytín je popri absolútnej vodeodolnosti a odolnosti voči chemickým vplyvom aj stálosť povrchovej úpravy, odolnosť voči UV žiareniu, ľahšia manipulácia a neobmedzená životnosť aj v súvislosti s vysokou odolnosťou voči nárazom a mechanickému poškodeniu.

4. *Stĺpy, stožiare, výstuže, návěstidlá a komponenty pre pásové dopravníky*

Taktiež v tomto prípade je možné nadimenzovať vlastnosti jednotlivých prvkov v zmysle potrieb a požiadaviek. Je možné tieto produkty vyrábať až do dĺžky 12 m a dosiahnuť požadované pevnostné charakteristiky. Nízka hmotnosť je aj v tomto prípade predpokladom jednoduchej manipulácie. Výhodou je možnosť osadenia rôznych komponentov do tiel týchto prvkov (nabíjačky, rozvádzače, osvetlenie,...) čo umožňuje širokospektrálne využitie. Odolnosť voči vode, chemickým vplyvom a korózii dáva predpoklad ich dlhej doby životnosti.

5. *Výroba cestných bezpečnostných prvkov*

ako sú protihlukové zábrany, pohyblivé smerové zábrany či návěstidlá.

3. METODICKÉ ASPEKTY INOVÁCIÍ

V modernej trhovej ekonomike je manažment inovácií najdôležitejšou a často rozhodujúcou zložkou konkurencieschopnosti a udržateľnosti ekonomického riadenia spoločnosti.

Samotný pojem riadenie inovácií sa vzťahuje na organizačné a ekonomické metódy a formy riadenia všetkých etáp a typov inovačných procesov – nielen na úrovni primárnych subjektov (organizácií, spoločností), ale aj v ďalších častiach hospodárstva, priemyslu, regiónov a národného hospodárstva ako celku.

Ako vyplýva z definície tohto pojmu, riadenie inovácií je súčasťou riadenia investícií, pretože skúma investície v špecifickej oblasti – v oblasti inovácií. Preto sa okrem špeciálnych metód využívajú aj všetky metódy a mechanizmy spojené s riadením investícií.

V rámci tohto materiálu nie je možné postihnúť všetky znaky inovačných procesov, a preto sa – vzhľadom na orientáciu na spoločnosť ako predmet riadenia – obmedzujeme na stanovenie hlavných ustanovení moderného konceptu inovatívneho riadenia pre primárne obchodné jednotky.

Hlavným cieľom inovatívneho riadenia je poskytovať najúčinnšie spôsoby implementácie inovačnej stratégie spoločnosti v jednotlivých fázach jej rozvoja. V procese dosahovania tohto cieľa sú riadiace mechanizmy zamerané na riešenie najdôležitejších úloh:

zabezpečenie vysokej miery rozvoja organizácie (spoločnosti) a jej konkurencieschopnosti prostredníctvom efektívnych inovácií,

zabezpečenie maximalizácie príjmov (ziskov) z inovácií,

minimalizácia rizík pri komercializácii inovácií,

udržiavanie finančnej stability a platobnej schopnosti organizácie (spoločnosti) pri realizácii inovácií.

Hľadanie spôsobov, ako urýchliť vykonávanie inovačných projektov

Uvedené aktivity sú vzájomne prepojené, avšak prioritnou úlohou je zabezpečiť vysokú mieru hospodárskeho rozvoja organizácie (spoločnosti) a jej konkurencieschopnosť, podporenú dostatočnou finančnou stabilitou v procese tohto rozvoja.

Hlavné funkcie inovatívneho riadenia:

1. Štúdia vonkajšieho inovačného prostredia a prognóza vývoja vedy a techniky

V procese vykonávania tejto funkcie sa skúma právna oblasť inovácií (všeobecne aj v súvislosti s konkrétnymi druhmi inovácií), analyzuje sa súčasná situácia na relevantnom trhu, jeho určujúce faktory a spracúva sa prognóza vývoja.

2. Vypracovanie inovačnej stratégie

Táto funkcia zahŕňa vytvorenie systému inovačných cieľov založených na všeobecnej stratégii spoločnosti a prognóze trhových podmienok.

Okrem toho sú stanovené priority, ktoré sa budú riešiť v nasledujúcom období. Súčasťou je aj predpoveď potreby zdrojov všetkých druhov potrebných na realizáciu inovačných činností.

3. Vyhľadávanie a výber inovatívnych projektov

V rámci tejto funkcie sa analyzuje aktuálna ponuka na trhu inovácií, vyberajú sa najvhodnejšie organizácie, posudzuje sa ich odbornosť a výkonnosť, na základe čoho sa hodnotia dostupné možnosti a ich efektívnosť.

4. Tvorba portfólia inovácií
Zameriava sa na systematické usporiadanie a koordináciu jednotlivých inovačných projektov tak, aby sa dosiahla maximálna synergická efektívnosť v rámci strategických cieľov spoločnosti.
5. Súčasné plánovanie a operatívne riadenie vykonávania inovačných programov a projektov
Táto činnosť spočíva v rozvoji systému plánov, medzi ktorými významné miesto zaujímajú kalendárne plány a rozpočty jednotlivých projektov. Cieľom je zabezpečiť efektívnu realizáciu všetkých etáp inovačných aktivít.
6. Organizácia monitorovania vykonávania inovačných programov a projektov
Sleduje priebeh realizácie, hodnotí dosiahnuté výsledky, kontroluje využitie zdrojov a poskytuje spätnú väzbu pre úpravu stratégie a budúcich projektov.

4. Výsledky a diskusia

Trh s kompozitnými materiálmi v svete.

Dynamika trhu s kompozitnými materiálmi v Európe bola vyššia ako na globálnom trhu. Podiel Európy na svetovom trhu je približne 25 %, podobne ako v USA. Ázia v súčasnosti predstavuje približne 50 % celosvetovej výroby.

Napriek mnohým prekážkam sa kľúčové aplikačné segmenty v r 2021 vyvíjali veľmi pozitívne. Patrili sem predovšetkým sektor dopravy, ale aj ďalšie aplikačné oblasti zo segmentu športu a voľného času. Druhá hlavná aplikačná oblasť, výstavba a infraštruktúra, bola podstatne menej negatívne ovplyvnená ako celok.

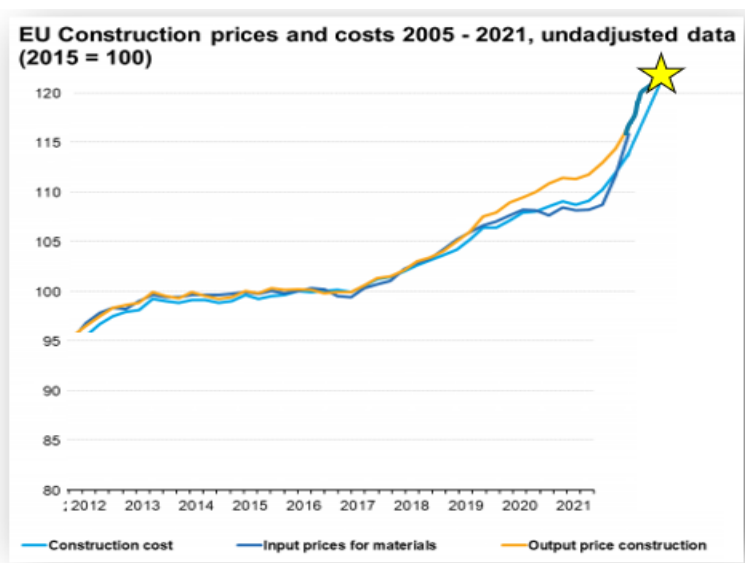
Z regionálneho hľadiska Nemecko, Španielsko/Portugalsko, Taliansko a krajiny východnej Európy si naďalej udržiavali svoje silné pozície v európskom kontexte. Nemecko zostáva krajinou s najvyšším objemom trhu s podielom takmer 20 % na celkovom objeme v Európe.

Systémy vystužené sklenenými vláknami však stále predstavujú viac ako 95 % celkového trhu, napriek množstvu nevýhod z pohľadu využitia týchto kompozitov. Preto priestor pre kompozitné materiály s bazaltovými vláknami, ktoré znamenajú vyššiu kvalitu a mnohonásobne lepšiu aplikovateľnosť v jednotlivých odvetviach je momentálne veľký, čo práve v tomto období je vhodné využiť.

Objem celosvetového trhu s kompozitmi dosiahol v roku 2021 celkovo 12,1 milióna ton, podľa najnovších údajov JEC (www.jecomposites.com). Toto predstavuje nárast o cca. 8 % oproti roku 2020, kedy bol objem 11,2 milióna ton.

Na porovnanie, európsky objem výroby kompozitov sa v roku 2021 zvýšil o 18,3 %.

Celkový európsky trh s kompozitmi tak predstavuje objem 2 962 000 ton. Trh rastie veľmi rýchlo a už po dvoch rokoch takmer späť na predkrízovú úroveň z roku 2018, kedy bol objem trhu 3 046 000 ton. A to stále s dominanciou systémov s využitím sklenených vlákien.



Obrazok.1: Náklady práce a cena stavebných materiálov v Európe



Obrazok.2: Produkcia kompozitných materiálov v Európe

Hlavné výhody bazaltu (čadiča): je to najrozšírenejšia magmatická hornina na Zemi s výnimočnými fyzikálnymi vlastnosťami:

- Vysoká pevnosť v ťahu - čadičové vlákno sa svojou pevnosťou blíži pevnosti uhlíkového vlákna (čadič je 3-krát pevnejší ako oceľ, ale 4-krát ľahší)
- tepelná vodivosť - čadič má nízku tepelnú vodivosť (100-krát nižšiu ako oceľ), jeho použitie umožňuje zvýšiť tepelnú účinnosť stien budov až o 35 %
- požiarne odolnosť - čadič odoláva dlhodobému pôsobeniu vysokých teplôt do 700 °C a krátkodobu až do 1000 °C (kompozit zo sklenených vlákien stráca pevnosť pri teplotách nad 300 °C) - skutočná hranica požiarnej odolnosti je minimálne 151 min.
- antikorozyne vlastnosti, elektrická nevodivosť, odolnosť v alkalickom a chemickom prostredí
- súdržnosť s betónom (obalené kremičitým pieskom)
- Odliatky z neho sú nevodivé, odolné voči oderu, chemikáliám, vlhkosti a extrémnym teplotám

- Je optimálny pre výrobky nahrádzajúce oceľ, hliník, drevo,...
- Výrobky z neho sú ekologické, cenovo dostupnejšie, majú dlhšiu životnosť a nižšie nároky na ich likvidáciu.
- Na Slovensku sa pultrúznej výrobe bazaltového kompozitu nikto nevenuje, preto vidíme veľký potenciál a obchodnú príležitosť v diverzifikácii svojej podnikateľskej činnosti a rozbehu výroby.

Vzhľadom ku skutočnosti, že na Slovensku sa výrobe nami vyvinutých produktov nevenuje nikto a nemáme ani žiadne informácie o tom, že by uvedené produkty boli dostupné na trhu v EÚ ani ostatných krajinách, nepredpokladáme ani žiadne spory ohľadom licencií, či iných nárokov duševného vlastníctva

TUKE v spolupráci so zástupcami SAV (Slovenská akadémia vied) a partnerskými vysokými školami (STU Bratislava, VUT Brno, Univerzita Pécs,...) pracuje na vývoji sledujúc trendy v oblasti kompozitných materiálov a ich uplatnenia v jednotlivých odvetviach priemyslu. Výstupom sú podklady k tvorbe projektových zámerov a návrhov nových produktov, ktoré sú predmetom aktivít tohto úseku a našich partnerov a spĺňajú všetky fyzikálno - mechanické, ekologické a ekonomické predpoklady uplatnenia na trhu.

Na základe týchto výstupov sa jednotlivé zámery a návrhy podrobujú analytickým procesom a na základe ich vyhodnotenia budú navrhované pre certifikáciu a využitie v praxi, hlavne v infraštruktúre.

Na úseku vývoja nových produktov sa spracúva podrobná dokumentácia k výrobe daného produktu a technológia jeho výroby s prepočtom materiálovej skladby a dosahovaných parametrov. Tieto výstupy sa následne porovnávajú s potrebami trhu a parametrami obdobných produktov vyrobených z konvenčných materiálov. Výstupom z úseku vývoja nových produktov a systémov bude výrobná dokumentácia pre výrobu prototypu, a následne po jeho vyrobení aj testovanie a hodnotenie jednotlivého prototypu, z čoho následne vyplynie návrh produktu pre jeho sériovú výrobu.

Diskusia

Výsledky výskumu naznačujú, že kompozity na báze čadiča predstavujú perspektívny materiál s vysokou pridanou hodnotou v rámci ekologicky udržateľnej priemyselnej výroby. Čadičové vlákno, ako prírodný materiál, vykazuje výborné mechanické vlastnosti – vysokú pevnosť v ťahu, odolnosť voči korózii, chemickým látkam a vysokým teplotám, pričom zároveň spĺňa environmentálne požiadavky modernej „zelenej technológie“. V porovnaní s konvenčnými materiálmi, ako sú oceľ, hliník či sklo, čadičové kompozity ponúkajú lepší pomer pevnosti k hmotnosti a nižšiu tepelnú vodivosť, čím znižujú energetickú náročnosť priemyselných aplikácií.

Diskusia poukazuje na fakt, že Slovenská republika v súčasnosti nevyužíva potenciál pultrúznej a vstrekovacej technológie v oblasti bazaltových kompozitov. Napriek tomu domáci výskumný a akademický sektor (TUKE, STU, SAV, VUT Brno, Univerzita Pécs) disponuje odborným zázemím na ich implementáciu do praxe. Kľúčovú úlohu tu zohráva technologická inovácia, najmä využívanie epoxidových systémov z obnoviteľných zdrojov a biologicky rozložiteľných polymérov (PLA).

Záver

Na základe uskutočneného výskumu možno konštatovať, že čadičové kompozity predstavujú perspektívnu alternatívu ku konvenčným materiálom z hľadiska technických parametrov, ekologickej udržateľnosti a ekonomickej efektívnosti. Ich zavedenie do priemyselnej výroby na Slovensku by mohlo významne prispieť k

diverzifikácii priemyselnej základne a zvýšeniu konkurencieschopnosti krajiny v oblasti pokročilých materiálov.

Výsledky výskumu potvrdzujú, že výrobky na báze čadiča – ako sú stavebné profily, fasádne systémy, strešné krytiny a výstužné prvky – dosahujú parametre porovnateľné, a v mnohých prípadoch lepšie, než ich kovové alebo plastové ekvivalenty. Kľúčové prínosy spočívajú v nižšej hmotnosti, vysokej odolnosti a dlhej životnosti, pričom výrobné procesy s nízkou ekologickou stopou spĺňajú prísne environmentálne kritériá.

Z vedeckého hľadiska je nevyhnutné pokračovať v experimentálnom overovaní fyzikálno-mechanických vlastností čadičových kompozitov, v optimalizácii technologických procesov a v rozvoji certifikačných metód. Výskum zároveň odporúča rozšírenie medzinárodnej spolupráce v rámci programov EÚ (napr. Horizon Europe), aby Slovensko využilo svoj potenciál v oblasti inovácií ekologicky orientovaných materiálov.

Zoznam bibliografických odkazov

1. A. Fiore, G. Marano, F. Monaco, and A. D'Ambrisi, "Basalt fiber reinforced polymer (BFRP) composites: Mechanical properties and applications in construction," *Composites Part B: Engineering*, vol. 162, pp. 120–131, 2019.
(zdroj: vysoko citovaný článok o použití bazaltu v stavebníctve)
2. M. Czigány, "Basalt fiber reinforced hybrid polymer composites: A review," *Materials Science Forum*, vol. 659, pp. 77–82, 2010.
(kľúčová práca o vývoji bazaltových kompozitov v strednej Európe – relevantné pre SR/HU regionálny kontext)
3. T. Sapuan and R. A. Ilyas, *Biocomposite Materials: Design and Manufacturing*. Elsevier, 2021.
(spája témy biopolymérov, PLA a „green composites“ – nadväzuje na tvoj text o ekologických živiciach a PLA)
4. A. Sim, M. Sławski, and A. Kozłowski, "Development of eco-friendly epoxy resins for composite applications," *Polymers*, vol. 13, no. 7, pp. 1154–1167, 2021.
(zdroj o epoxidových systémoch z obnoviteľných zdrojov – presne ako vo vašom výskume)
5. S. Dhand et al., "A short review on basalt fiber reinforced polymer composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 73, pp. 166–180, 2015.
(prehľad bazaltových kompozitov, fyzikálne a chemické vlastnosti – relevantné pre technologickú časť)
6. J. Militký, "Advanced composite materials: From glass to basalt fibers," *Textile Progress*, vol. 45, no. 3–4, pp. 157–246, 2013.
(od českého autora – vysoká odborná úroveň, vhodné pre vedeckú argumentáciu)
7. M. K. Güneşli et al., "Mechanical and durability performance of basalt fiber reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 124, pp. 878–889, 2016.
(praktická aplikácia bazaltu – výstužné prvky v betóne, súvisí s твоjím využitím vo výstavbe)
8. European Commission, *Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe*. Brussels, 2020.
(politický rámec pre ekologickú výrobu a materiály – podporuje argument o „zelenej technológii“)
9. JEC Group, *JEC Composites Sustainability Report 2023*. Paris: JEC Publications, 2023.
(aktuálny priemyselný prehľad o trendoch v udržateľných kompozitoch – nadväzuje na zmienku o JEC 2015 v tvojom texte)
10. R. K. Gupta and E. Kennel, *Green Composites: Materials, Manufacturing, and Engineering Applications*. CRC Press, 2017.