

UDC 2.2.1

SCOPUS CODE 2503

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2025-3-336-343>

მეტალ-პოლიმერული კომპოზიტების მიღება ვაკუუმური ინფუზიის ტექნოლოგიით, მაღალენტროპიული ფხვნილებითა და ბოჭკოებით გაძლიერებული მატრიცით

დავით წვერავა

პოლიმერული კომპოზიტების და მაღალტექნოლოგიური მასალების
ლაბორატორია, გრიგოლ წულუკიძის სამთო ინსტიტუტი, საქართველოს
ტექნიკური უნივერსიტეტი, საქართველო, 0186, თბილისი, ე. მინდელის 7
E-mail: datotsverava@gmail.com

რეცენზენტები:

მ. ჯანიაშვილი, სტუ-ის ნაგებობების, სპეციალური სისტემებისა და საინჟინრო უზრუნველყოფის
ინსტიტუტის პროფესორი

E-mail: mjanikashvili@gmail.com

ს. კვინიკაძე, სტუ-ის გრიგოლ წულუკიძის სამთო ინსტიტუტის პოლიმერული კომპოზიტებისა და
მაღალტექნოლოგიური მასალების ლაბორატორიის უფროსი, მთავარი მეცნიერი თანამშრომელი

E-mail: sophi.kvinikadze@gmail.com

ანოტაცია. მეტალ-პოლიმერული კომპოზიტური მასალების კლასი თხელი ალუმინის ფურცლებისა და ეპოქსიდური კომპოზიტური ფენებისგან შედგება. მათი ერთ-ერთი გავრცელებული ნაირსახეობაა ბოჭკოვანი ქსოვილებით (არამიდი და სხვა) დაარმატურებული მეტალ-პოლიმერული კომპოზიტი. ამ მასალებს, სხვა ანალოგებთან შედარებით, აქვს დაბალი კუთრი წონა, გაუმჯობესებული ანტიკოროზიული თვისებები, დადლილობასა და დარტყმის მიმართ წინააღმდეგობა. ამასთან ერთად, აქტიურად მიმდინარეობს კვლევები მათი თვისებების

სრულყოფისა და გაუმჯობესების მიმართულებით. კომპლექსური ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების გაუმჯობესების ერთ-ერთი მეთოდი, რომელიც აქტიური კვლევის ფაზაშია, არის სტრუქტურაში ფუნქციური მეტალური ნანოფხვნილების დამატება. მეტალური ნანოფხვნილების შემავსებლებს შორის განსაკუთრებით პერსპექტიულად მიიჩნევა მაღალენტროპიული ნანოფხვნილები.

განხილულია ალუმინისა და ეპოქსიდური ფისის ბაზაზე, არამიდით გაძლიერებული და FeW₂NiTiAl მაღალენტროპიული ფხვნილებით შევსებული, მეტალ-პოლიმერული კომპოზიტების, ვაკუუმურ-ინ-

ფუზიური მეთოდით მიღების ტექნოლოგია და მიღებული ნიმუშების ზოგიერთი მექანიკური მახასიათებელი.

საკვანძო სიტყვები: მეტალ-პოლიმერული კომპოზიტი; დამაარმატურებელი ქსოვილი; მაღალენტროპიული ფხვნილი; ვაკუუმ-ინფუზია; დარტყმამდეგობა.

შესავალი

კომპლექსური ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების მქონე ახალ მასალებზე მზარდი მოთხოვნები განაპირობებს სამეცნიერო კვლევების ინტენსიურობას, მათი თვისებების დაპროექტებისა და წარმოების ტექნოლოგიების შექმნის მიმართულებით. მასალების ფართო სპექტრში განსაკუთრებული თვისებების გამოვლინების შესაძლებლობებით მოწინავე ადგილი უკავია კომპოზიტებს, რომელთა წარმოების მოცულობა სულ უფრო იზრდება. კომპოზიტურ მასალებს შორის ერთ-ერთი პერსპექტიული მიმართულებაა მეტალ-პოლიმერული კომპოზიტები. მათ შორის ბოლო 25 წლის განმავლობაში მსოფლიო მასშტაბით ინტენსიურად მიმდინარეობს კვლევები, რომლებიც დაკავშირებულია მრავალფენოვანი მეტალ-პოლიმერული კომპოზიტის შექმნასთან [1-13]. ასეთი კომპოზიტები სხვადასხვა მასალისგან დამზადებული, თხელი ფირფიტების კონსოლიდირებული სტრუქტურაა (ლამინატი). ლამინატის ზედა და ქვედა ფენა (შრე) მეტალისგან მზადდება. უმეტეს შემთხვევაში იყენებენ ალუმინს, ტიტანს, მაგნიუმს ან/და მათი შენადნობების თხელ ფირებს (დაახლოებით 0.5 მმ სისქით). შუა ფენების

სახით კი წარმოდგენილია პოლიმერები, რომელთა მატრიცა გაძლიერებულია სხვადასხვა სახის ბოჭკოებით/ფიბრებით. დამაარმატურებელ სტრუქტურებად ხშირად იყენებენ არამიდისა და მინის ბოჭკოებისგან დამზადებულ ქსოვილებს. არამიდით დამაარმატურებელი კომპოზიტები ცნობილია Arall-ის, ხოლო მეორე სახის კომპოზიტები – Glare-ს სახელწოდებით. მეტალ-პოლიმერული კომპოზიტები გამოირჩევა მუშაობის მაღალი უნარით დინამიკურ დატვირთვებზე, დარტყმითი ენერგიის მაღალი ჩახშობის უნარით და ბალისტიკური ზემოქმედების მიმართ კარგი მედეგობით. ეს კომპოზიტები ძირითადად გამოიყენება თვითმფრინავთმშენებლობაში. ინფორმაცია მეტალ-პოლიმერული კომპოზიტების, როგორც მსუბუქი ავტოსატრანსპორტო საშუალებების, საჯავშნე მასალად გამოყენების შესახებ, შედარებით მწირია, დღეისათვის დაგროვილ გამოცდილებაზე დაყრდნობით, რომელიც დაკავშირებულია ორგანოპლასტიკების შექმნასა და მათ გამოცდასთან დარტყმამდეგობაზე.

ამასთან ერთად, ლიტერატურაში არსებობს მრავალი შრომა, პოლიმერული მატრიცის ნაწილგანხილვით გაძლიერების შესახებ [14-16], მათ შორის აღსანიშნავია ბაზალტის ულტრადისპერსიული ფხვნილებით პოლიმერული მატრიცის გაძლიერების სამუშაოები, რომლებიც ჩატარებულია საქართველოში, სამთო ინსტიტუტში [17-18]. აღნიშნული კვლევების შედეგადაც დადასტურდა ულტრადისპერსიული ფხვნილებით კომპოზიტის სტრუქტურის მოდიფიცირება-გაუმჯობესების კარგი პოტენციალი. ულტრადისპერსიული მასალების კვლევების მიმართულებით, ბოლო პერიოდში, განსაკუთრებული ინტერესის საგანია მაღალენტროპიუ-

ლი შენადნობების ფხვნილები. ამ მიმართულებით კვლევები მიმდინარეობს აგრეთვე სამთო ინსტიტუტში, შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის #FR-21-6556 პროექტის სამუშაო გეგმით. აღნიშნული კვლევის მიზანია FeW_{0.1}NiTiAl მაღალენტროპიული ფხვნილებისა და მოცულობითი კომპოზიტების მიღება მაღალენტროპიულ წისქვილში, მექანიკური ლეგირებით და აფეთქებით კომპაქტირებით. ამდენად, არსებული რესურსებისა და გამოცდილების გათვალისწინებით, აღწერილი სამუშაოს მიზანია არამიდის ქსოვილით დაარმატურებული მეტალ-პოლიმერული კომპოზიტური ლამინატების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების გაუმჯობესება (ან ახალი თვისებების მინიჭება): FeW_{0.1}NiTiAl ულტრადისპერსიული მაღალენტროპიული ფხვნილების შეყვანით პოლიმერულ მატრიცაში; ულტრადისპერსიული ფხვნილებითა და ბოჭკოებით გაძლიერებული მატრიცის მქონე მეტალ-პოლიმერული კომპოზიტების სატესტო ნიმუშების დამზადება და დარტყმამდეგობაზე მათი გამოცდა „ჩარპის ურნალზე“. ამგვარად, დასმული პრობლემა შეიძლება ფორმულირდეს შემდეგნაირად: ულტრადისპერსიული FeW_{0.1}NiTiAl მაღალენტროპიული ფხვნილებით გაძლიერებული მატრიცის მქონე ახალი თაობის მეტალ-პოლიმერული ლამინატის შექმნა ორიგინალური ტექნოლოგიური ხერხების გამოყენებით.

ძირითადი ნაწილი

კვლევაში საწყის კომპონენტებად შერჩეულ იქნა: მეტალურ ფუძედ – ალუმინის 0.5მმ სისქის ფურცელი; არამიდის ქსოვილი, სხვადასხვა სტრუქტურით და ზედაპირული სიმკვრივით (200 და 350 გ/მ², Kelvar s 800d-P145 A200 და Kelvar s 800d-T160 A350); პოლიმერულ მატრიცად (ფენების ძირითად შემადგენიერებად (ადჰეზივი) – ორკომპონენტიანი ეპოქსიდური ფისი; შემავსებლად – Fe-W-Ni-Ti-Al სისტემის მაღალენტროპიული ფხვნილების მიკრომექანიკური ნარევი.

მაღალენტროპიული ფხვნილების მიღება

მაღალენტროპიული ფხვნილების სინთეზი განხორციელდა მაღალენტროპიულ პლანეტარულ ნანოწისქვილში. ამ მიზნით მომზადდა 15%Fe-45%W7%Al-12%Ti-15%Ni-3%C-3%B (მასური კონცენტრაციით) კომპოზიციის მიკრომექანიკური ნარევი, რომელიც დამუშავდა FRITSH-ის მაღალენტროპიულ პლანეტარულ ნანოწისქვილში (სურ.1). დამუშავების რეჟიმი: მასა - 6 გ; ბრუნთა რიცხვი - 500 ბრ/წთ; ბურთულებისა და ფხვნილის მასების თანაფარდობა: 10:1; ჯამური დრო - 36 სთ (30 წთ უწყვეტი დაფქვა; 10 წთ დაყოვნება; რევერსიულად). დამუშავების პროცესში განხორციელდა ჰომოგენიზაცია და მაღალენტროპიული ნანოკომპოზიტის სინთეზი.



ა)



ბ)

სურ.1. მაღალენტროპიული კაზმი, 15%-Fe; 45%-W; 7%-Al; 12%-Ti; 15%-Ni; 3%-C; 3%-B

ა) ნაწილისკენი, ბ) დოლურაში ჩატვირთული კაზმი ბურთულებთან ერთად

შემკვრელი მასალა

ვაკუუმური ინფუზიის გამოყენებისას მთავარი მნიშვნელობა შემკვრელ მასალას ენიჭება. ამისთვის, როგორც წესი, გამოიყენება დაბალი სიბლანტის ფისები (100-250 მპა·წ), ვინაიდან კომპოზიტში (ბოჭკოებში) ფისის დენადობის უზრუნველყოფა ერთ-ერთი აუცილებელი პირობაა ქსოვილის გაჯერებული გაჟღენთისთვის. ამდენად, სიბლანტის მცირე ცვლილებამ (ზრდის მიმართულებით) შეიძლება გამოიწვიოს ინფუზიის შეფერხება. კვლევებით დადგინდა, რომ მატრიცაში მაღალენტროპიული ფხვნილის შეყვანით იზრდებოდა ფისის სიბლანტე, ამიტომ მნიშვნელოვანია ფისის მოდიფიცირებისას განისაზღვროს ფხვნილის ის ოპტიმალური შემცველობა, რაც არ გამოიწვევს პოლიმერული მატრიცის სიბლანტის მნიშვნელოვანმატებას. ექსპერიმენტებში გამოყენებულ იქნა მატრიცა, რომლის სიბლანტე მოდიფიცირებამდე იყო 120 მპა·წმ (თურქული წარმოების ეპოქსიდური ფისი - PREMIUM Epoxy Resin AB Glue). მოდიფიცირე-

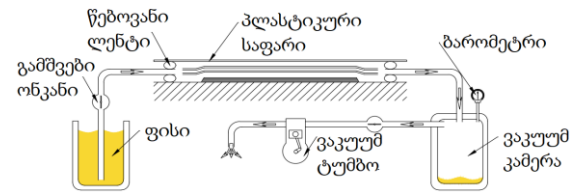
ბის შემდეგ იგი სრულად აკმაყოფილებდა წაყენებულ ტექნოლოგიურ მოთხოვნებს.

ვაკუუმ-ინფუზიის ტექნოლოგია

ტექნოლოგიური მოსაზრებების გათვალისწინებით საწყის ეტაპზე დამზადდა პოლიმერული მატრიცა, რომელსაც ემატებოდა მაღალენტროპიული ნაწილაკები, 2%-იანი მასური შემცველობით. პარალელურად ხორციელდებოდა ნარევის ჰომოგენიზაცია. 60 მმ დიამეტრისა და 4მმ სისქის დისკოს ფორმის ნიმუშების დასამზადებლად გამოყენებულ იქნა ვაკუუმური ინფუზიის მეთოდი, რომლის სქემა ნაჩვენებია მე-2 სურ-ზე. ვაკუუმური ინფუზიის ტექნოლოგია საჭიროებს შემდეგ მოსამზადებელ სამუშაოებს: ვაკუუმური კამერის მომზადება – წებოვანი ლენტებით შეკრული ორი გლუვზედაპირიანი პლატფორმა, რომელთა შორის მოთავსებულია ბოჭკოვანი ქსოვილი. კამერის ერთი ბოლო მილით უკავშირდება თხევად/ზღანტ მდგომარეობაში მყოფ პოლიმერ/ნაწილაკების სუსპენზიას,

ხოლო მეორე ბოლო ვაკუუმურ კამერას, რომელიც, თავის მხრივ, მიმდევრობით ჩართულია ვაკუუმურ ტუმბოსთან. პირველ სტადიაზე ტუმბოს მეშვეობით ხდება სუსპენზიის დეგაზაცია. მეორე ეტაპზე ვაკუუმის ხარჯზე უარყოფითი წნევის შედეგად (10^{-3} ტორი) ხდება კამერაში ქსოვილის შეკუმშვა და მიმდინარეობს დაკვირვება ნახევარი საათის განმავლობაში, ვაკუუმის შენარჩუნების ხარისხის დასადგენად. კამერაში სტაბილური ვაკუუმის მიღწევისას, იხსნება ონკანი და რეზერვუარიდან სუსპენზია გადაედინება კამერაში განთავსებული მილის მეშვეობით, რომელიც მთელ სიგრძეზე დასერილია სპირალურად და გარს უვლის ქსოვილების ფენას. ფისი/სუსპენზია შეედინება კამერაში ისე, რომ სრულიად ითვისებს შიგა სივრცეს, რაც საშუალებას იძლევა ფისის/სუსპენზიის მიერ ქსოვილის გაჟღენთის კარგ ერთგვაროვნებას მთელ ქსოვილში.

ნანოფხვნილებით შევსებული პოლიმერული მატრიცა გაჟღენთავს ქსოვილს და შეასრულებს შემკვრელის ფუნქციას, ერთმანეთთან დააკავშირებს ალუმინს და დამარმატურებელი არამიდის ბოჭკოებს. სრული გამყარების შემდეგ კი მიიღება მეტალ-პოლიმერული კომპოზიტი.



სურ. 2. ვაკუუმური ინფუზიის სქემა

არამიდის ქსოვილით დამარმატურებელი და მაღალენტროპიული შენადნობების ულტრადისპერსიული ფხვნილებით გაძლიერებული მეტალ-პოლიმერული კომპოზიტები, რომლებიც დამზადდა ვაკუუმურ-ინფუზიური ტექნოლოგიით წარმოდგენილია მე-3 სურ-ზე.



სურ. 3. ვაკუუმურ-ინფუზიური ტექნოლოგიით დამზადებული კომპოზიტები

დასკვნა

ექსპერიმენტულად დადგინდა, რომ ვაკუუმური ინფუზიის ტექნოლოგიით შესაძლებელია დამზადდეს ჰიბრიდული ბოჭკოებით გაძლიერებული

მეტალ-პოლიმერული კომპოზიტი, მაღალენტროპიული ნანოფხვნილებით შევსებული მატრიცით.

ნანოფხვნილებით პოლიმერული მატრიცის შევსებისას საჭიროა წინასწარ დადგინდეს მყარი შემავსებლის გავლენა სუსპენზიის სიბლანტეზე და, საჭიროების მიხედვით, განხორციელდეს მატრიცის მოდიფიცირება.

საჭიროა ჩატარდეს კვლევები კონკრეტულ პოლიმერულ მატრიცაში მყარი მაღალენტროპიული შემავსებლის ოპტიმალური კონცენტრაციის დასადგენად და ფუძემდებთან (ალუმინი) ადჰეზიის გავლენის შესასწავლად.

მადლიერება!

კვლევა განხორციელდა „შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული ფონდის“ (SRNSFG) მხარდაჭერით [გრანტი FR-21-6556]

ლიტერატურა

1. Das, R., Chanda, A., Brechou, J., & Banerjee, A. (n.d.). *Dynamic deformation, damage and fracture in composite materials and structures*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100080-9.00017-8>
2. Sinmazçelik, T., Avcu, E., Bora, M. O., & Çoban, O. (2011). A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. *Materials & Design*, 32(7), 3671–3685. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.035>
3. Vlot, A., & Gunnink, J. W. (2011). *Fibre metal laminates: An introduction*. Springer Science & Business Media.
4. Sadighi, M., Alderliesten, R. C., & Benedictus, R. (2012). Impact resistance of fiber–metal laminates: A review. *International Journal of Impact Engineering*, 49, 77–90. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.10.009>
5. Vaghoubi, A. S., & Liaw, B. M. (2012). Thickness influence on ballistic impact behaviors of GLARE5 fiber-metal laminated beams: Experimental and numerical studies. *Composite Structures*, 94(8), 2585–2598. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.03.026>
6. Hoo Fatt, M. S., Ouyang, E. Y., & Castagna, A. (2003). Ballistic impact of GLARE™ fiber-metal laminates. *Composite Structures*, 61(1–2), 73–88. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(03\)00031-3](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(03)00031-3)
7. Langdon, G. S., Nurick, G. N., Jacob, N., & Simmons, V. (2009). Response of GLARE panels to blast loading. *Engineering Structures*, 31(12), 3116–3120. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.07.006>
8. Starikov, R. (2013). Assessment of impact response of fiber metal laminates. *International Journal of Impact Engineering*, 59, 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.03.008>
9. Langdon, G. S., Nurick, G. N., Karagiozova, D., & Cantwell, W. J. (2010). Fiber–metal panels subjected to blast loading. In B. Dattaguru & E. S. Dwarakadasa (Eds.), *Dynamic failure of materials and structures* (pp. 269–296). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0332-4_12
10. Langdon, G. S., Nurick, G. N., Jacob, N., & Simmons, V. (2007). Localized blast loading of fibre-metal laminates with polyamide matrix. *Composites Part B: Engineering*, 38(7–8), 902–913. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.11.002>

11. Vo, T. P., Guan, Z. W., Cantwell, W. J., & Schleyer, G. (2013). Modeling of the low-impulse blast behavior of fibre metal laminates based on different aluminum alloys. *Composites Part B: Engineering*, 44(1), 141–151. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.06.003>
12. Soutis, C., Hodzic, A., & Fairlie, R. (2011). Modeling the structural response of GLARE panels to blast load. *Composite Structures*, 94(1), 267–276. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.07.010>
13. Das, R., Chanda, A., Brechou, J., & Banerjee, A. (n.d.). Impact behavior of fibre–metal laminates. In *Dynamic deformation, damage and fracture in composite materials and structures*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100080-9.00017-8>
14. Moses, A., Karthikeyan, K., & Balamurugan, K. (2023). Ball milling process variables optimization for high-entropy alloy development using design of experiment and genetic algorithm. *Powder Technology*, 427. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118810>
15. Venkatesh Murthy, R., & Shantharaja, M. (n.d.). Influence of FeCoNiMnCr high-entropy alloy particulate fillers on morphology and mechanical behaviour of epoxy composites. *[Journal name missing—add if known]*
16. Chen, Z., Ren, X., Wang, P., & Ge, C. (2023). Design and experimental investigation of the high-entropy alloys AlCrFeNiCu and AlCrFeNbMo. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 3118–3135. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.076>
17. Chikhradze, N., Marquis, F. D. S., & Abashidze, G. (2015). Hybrid fiber and nanopowder reinforced composites for wind turbine blades. *Journal of Materials Research and Technology*, 4(1), 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.01.002>
18. Chikhradze, N., Abashidze, G., Tsverava, D., & Kvinikadze, S. (2024). Fabrication of protective composite structures by infusion technology to resist the blast wave. *Inżynieria Mineralna*, 1(1), 287–292. <https://doi.org/10.29227/IM-2024-01-31>

UDC 2.2.1

SCOPUS CODE 2503

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2025-3-336-343>

Production of Metal-Polymer Composites Using Vacuum Infusion Technology weith High-Entropy Powders and Fiber-Reinforced Matrix

Davit Tsverava

Laboratory of Polymeric Composites and High-Tech Materials, Grigol Tsulukidze Mining Institute, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, 0186, E. Mindeli 7
E-mail: datotsverava@gmail.com

Reviewers:

M. Janikashvili, Professor, Institute of buildings, Special Systems and Engineering Support, GTU

E-mail: mjanikashvili@gmail.com

S. Kvinikadze, Head of the Laboratory of Polymeric Composites and High-Tech Materials, Chief Researcher, Grigol Tsulukidze Mining Institute, GTU

E-mail: sophi.kvinikadze@gmail.com

Abstract. The class of metal-polymer composite materials consists of thin aluminum sheets and epoxy composite layers. One of the widely used types is fiber-reinforced metal-polymer composites, reinforced with fabrics such as aramid and others. Compared to similar materials, these composites offer lower specific weight, improved anti-corrosion properties, and enhanced resistance to fatigue and impact. Additionally, ongoing research aims to refine and improve their properties further.

One of the methods currently under active investigation for enhancing the complex physical-mechanical properties of these materials is the incorporation of functional metallic nanoparticles into their structure. Among various metallic nanoparticle fillers, high-entropy nanoparticles are considered particularly promising.

This paper discusses the vacuum infusion technology used for producing metal-polymer composites based on aluminum and epoxy resin, reinforced with aramid fibers and filled with FeW₂NiTiAl high-entropy powders. Furthermore, it examines certain mechanical properties of the obtained samples.

Keywords: High-entropy powder; Impact resistance; Metal-polymer composite; Reinforcing fabric; Vacuum infusion.

განხილვის თარიღი 03.03.2025

შემოსვლის თარიღი 05.03.2025

ხელმოწერილია დასაბეჭდად 25.09.2025