

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
ხელნაწერის უფლებით

ლამარა რურუა

ტიტანის, ალუმინისა და სილიციუმის კარბიდო-ბორიდული ფუძის მქონე
კომპოზიციური მასალების მიღება და კვლევა

სადოქტორო პროგრამა : საინჟინრო ფიზიკა
შიფრი:

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარდგენილი დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი

2021 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სტრუქტურულ კვლევათა რესპუბლიკურ ცენტრში.

ხელმძღვანელი: დოქტორი, პროფესორი ნიკოლოზ ჯალაბაძე

რეცენზენტები: _____

დაცვა შედგება ----- წლის ”-----” -----, ----- საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის სხდომაზე, კორპუსი -----, აუდიტორია -----

მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,

ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებ-გვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი -----

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალურობა

ლიტერატურის ანალიზის შედეგად დადგინდა, რომ ამჟამად, მრეწველობის ბევრ სფეროში შეინიშნება ტრადიციული მასალებიდან კომპოზიტურ მასალებზე გადასვლა, რადგან ტრადიციული მასალები აღარ აკმაყოფილებს მათდამი წაყენებულ გაზრდილ მოთხოვნებს. ახალი თაობის მასალები უნდა ფლობდეს მთელ რიგ უნიკალურ თვისებებს, კერძოდ: დაბალ სიმკვრივეს, მაღალ სიმტკიცესა და თბომედეგობას, და ამავე დროს ადვილი უნდა იყოს მათი დამუშავება. მსგავსი მოთხოვნები ვრცელდება ლითონებსა და არალითონებზე, აგრეთვე მათ კომბინაციებზე. დღეისათვის პერსპექტიულია ლითონის კომპოზიციური მასალები, კერძოდ Ti-Al სისტემის მასალები. კარგი მახასიათებლები აქვს ბორის კარბიდს, სილიციუმის კარბიდს, ტიტანის დიბორიდს და კარბიდს და მათ კომპოზიციებს, ამიტომ კვლევის მასალად შერჩეული იქნა Ti-Al-Si-B-C სისტემა.

ამ სისტემიდან ძირითად კომპოზიციურ მასალად, ანუ ფუძედ შერჩეული იქნა TiB_2 -TiC-SiC კომპოზიტი. იმისათვის, რომ მიღწეულ იქნას შესაბამისი მახასიათებლები, მალეგირებელ ნაერთებად გამოყენებული იყო ტიტანის, ალუმინის და სილიციუმის კარბიდო-ბორიდული მასალები Ti_3SiC_2 ; Ti_3AlC_2 ; Al_8SiC_7 ; $Al_8B_4C_7$; Al_4SiC_4 ; ასევე FeNi.

გარდა ამისა მოსინჯული იქნა სხვა ნაერთების გამოყენებაც: Ti_6Si_2B ; AlB_{12} ; MgB_2 ; $AlMgB_{14}$; $AlMgO_4$; მათი ტექნოლოგიური გამოყენების შესაძლებლობის შეფასების თვალსაზრისით.

მოცემული კვლევის მიზანს წარმოადგენს საჯავშნე კომპოზიციური მასალების მიღება და კვლევა, აგრეთვე საჯავშნე ფილების დამზადება, შემუშავებული კომპოზიციური მასალებიდან და მათი ბალისტიკური გამოცდა.

მეცნიერული სიახლე

კომპოზიციური მასალების გამოყენება დღესდღეისობით და უახლოეს მომავალში მეტად მნიშვნელოვანია ახალი თაობის საჯავშანე მასალების შესაქმნელად. ლითონის ჯავშანს უნდა ჰქონდეს სიხისტისა და სისალის მაღალი მნიშვნელობები, რათა წინააღმდეგობა გაუწიოს ტყვიის შეღწევას, აგრეთვე მაღალი პლასტიკურობა და სიმტკიცე, ნამსხვრევების შემდგომი გავრცელების თავიდან ასაცილებლად.

ყველაზე გავრცელებულია ფოლადის, ალუმინის ოქსიდის, ბორის კარბიდის და სილიციუმის კარბიდის საჯავშანე მასალები. ცალკე, ეს მასალები ხასიათდებიან გარკვეული საჭირო დადებითი თვისებებით, თუმცა აქვთ ნაკლოვანებებიც. უკეთესი მახასიათებლების მქონე საჯავშანე მასალების მისაღებად საჭიროა მოიძებნოს კომპოზიტი მათი გაერთიანებით ან შეიქმნას მრავალშრიანი მასალები ასევე მათი გამოყენებით.

განხორციელდა საჯავშანე მასალების სინთეზისათვის ელემენტებისა და ნაერთების შერჩევა, კერძოდ ფუძისა და მალეგირებელი ნაერთებისათვის გამოყენებული იქნა ცალკეული ელემენტების (Ti, Al, Si, C, B, Mg, Fe, Ni და სხვა), აგრეთვე ნაერთების (TiB₂, TiC, SiC, B₄C, AlMgB₁₄ და სხვა) ფხვნილები.

გამოიყენებოდა სინთეზირება/შეცხოვის გაერთიანებული მეთოდი. ამ დროს ხორციელდებოდა ცნობილი ქიმიური რეაქციები, რომლებიც განაპირობებდნენ სასურველი კომპოზიციის შედარებით ადვილად მიიღებას და მიღებული ნიმუში უფრო წვრილმარცვლოვანიც იყო. საჭირო შემადგენლობის კომპოზიტის მისაღებად ხდებოდა ზოგიერთი ელემენტის ან ნაერთის დამატებით შეყვანა კაზმის შედგენილობაში.

სამუშაოს მიზანი

კვლევის მიზანია კომპოზიციური მასალების მიღება ტიტანის, ალუმინისა და სილიციუმის კარბიდული და ბორიდული ნაერთების ფუძით, რომლებიც ლეგირებული იქნებიან სხვადასხვა ტიპის მაღალტემპერატურული და პლასტიური მასალებით, მათი შემდგომში

საჯავშნე ელემენტებში გამოყენების მიზნით. ბორიდული მასალებიდან ყველაზე ფართო გამოყენება აქვს ტიტანის დიბორიდს -TiB₂-ს, კარბიდული მასალებიდან კი ტიტანის და სილიციუმის კარბიდებს, ამიტომ საკვლევი კომპოზიციური მასალების ფუძედ შერჩეულია TiB₂-TiC-SiC.

TiB₂-TiC-SiC ტიპის კერამიკული კომპოზიტებისადმი ყურადღება გამოწვეულია იმით, რომ ისინი ხასიათდებიან მაღალი ლღობის ტემპერატურით, მაღალი სისალით და მაღალი კოროზია-მედეგობით. სიმკვრივისა და სიმტკიცის გაზრდის მიზნით იყენებენ განსხვავებული ნედლეულის სისტემებსა და დანამატებს, აგრეთვე ლითონებს Al, Mg, Zr და სხვა.

TiB₂ ამჟამად გამოიყენება, მხოლოდ სპეციალიზირებულ პროგრამებში, ისეთ სფეროებში, როგორცაა, მჭრელი იარაღები, ტიგელები, ცვეთამედეგი დანაწარები, დარტყმის მიმართ მედეგი ჯავშანი.

მოცემული კვლევის მიზანს წარმოადგენს აგრეთვე უშუალოდ საჯავშნე ფილების დამზადება შემუშავებული კომპოზიციური მასალებიდან და მათი ბალისტიკური გამოცდა.

საჯავშნე ფილების დამზადებისთვის შეირჩა კომპოზიციური მასალები დაბალი სიმკვრივით და მაღალი სისალით და სიმტკიცით.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები

კვლევის ძირითადი ობიექტია კომპოზიციური მასალები, რომლებიც გამოყენებულ უნდა იქნას ჯავშანნაკეთობების დასამზადებლად.

შესწავლილი იყო შემდეგი კომპოზიციურ მასალები:

- TiB₂-TiC-SiC
- TiB₂-TiC-SiC-AlMgB₁₄
- TiB₂-TiC-SiC-Ti₃Al_{0.5}Si_{0.5}C₂
- TiB₂-TiC-SiC-FeNi
- TiB₂-TiC-SiC-Al₄SiC₄
- TiB₂-TiC-SiC-Al₈SiC₇
- TiB₂-TiC-SiC-Al₈B₄C₇

- TiB₂-TiC-TiN-SiC-FeNi
- TiB₂-TiC-TiN-FeNi

კვლევის მეთოდოლოგია ემყარება კომპოზიციურ მასალათა ფხვნილების მიღებას და მათ შემდგომ კომპაქტირება-შეცხობას. აგრეთვე შესაბამისი ნაერთების პირდაპირ სინთეზირებას წნეხ-ყალიბში (In situ) და იმავდროულად კომპაქტირება-შეცხობას. კომპოზიციური მასალების ფხვნილებისა და მასიური ნიმუშების მიღება განხორციელდა ცენტრში შემუშავებული ნაპერწკალურ პლაზმური სინთეზირება/შეცხობის (SPS) მოწყობილობის გამოყენებით. საწყისი კომპონენტების წინაწარ შერჩევის შემდეგ ხდებოდა ფხვნილის მოთავსება გრაფიტის სპეციალურ წნეხ-ყალიბში. ფხვნილების მისაღებად გამოიყენებოდა დაწნევის მცირე წნევა, ხოლო მასიური ნიმუშების მისაღებად კი მაღალი წნევები. სინთეზირება/შეცხობის ექსპერიმენტები SPS დანადგარზე წარიმართებოდა სხვადასხვა რეჟიმების გამოყენებით.

მისაღები კომპოზიციური მასალების ფუძედ შერჩეული TiB₂-TiC-SiC კომპოზიტი, მიიღებოდა ცალკეული ელემენტებისაგან (Ti, B, Si და C) და ტიტანისა და სილიციუმის ბორის კარბიდთან ურთიერთქმედების შემდეგი რეაქციით $7Ti+3B_4C+3Si \rightarrow 6TiB_2+TiC+3SiC$. ასევე სასურველი თანაფარდობით TiB₂, TiC, SiC ნაერთების ფხვნილების გამოყენებით.

ნიმუშები მიღებულ იქნა განსხვავებულ პირობებში წნევისა და ტემპერატურის რეგულირებით. ერთიდაიგივე შედგენილობის კომპოზიციური მასალა მიღებული იქნა შეცხობის განსხვავებული ტემპერატურის პირობებში, შეცხობისათვის საჭირო მინიმალური ტემპერატურის დადგენის მიზნით. ხდებოდა აგრეთვე შეცხობის ტემპერატურაზე დაყოვნების დროის კონტროლი.

განხორციელდა ფუძე კომპოზიციური მასალების მიღება როგორც სუფთა სახით, ასევე მალეგირებელი ნაერთებთან ერთად. იმის გათვალისწინებით, რომ მასალები საჯავშნედ უნდა იყოს გამოყენებული, მალეგირებელი ნაერთები შეირჩა, სიმყიფის შემცირების, სისალისა და

სიმტკიცის გაზრდის მიზნით. აღნიშნული მასალების ლეგირება განხორციელდა $AlMgB_{14}$, $Al_8B_4C_7$, Al_8SiC_7 , Al_4SiC_4 , $Ti_3Al_{0.5}Si_{0.5}C_2$, $FeNi$ და მათი კომბინაციებით. ზოგიერთ შემთხვევაში ასევე გამოიყენებოდა ტიტანის ნიტრიდი TiN . ფიზიკო-მექანიკური თვისებების და სტრუქტურული მდგომარეობის კვლევისათვის მიიღებოდა ცილინდრული ფორმის ნიმუშები, ხოლო ბალისტიკური გამოცდებისათვის კი ოთხკუთხა ფორმის ნიმუშები.

სინთეზის შედეგად მიღებულ ნიმუშებს განესაზღვრებოდა სიმკვრივე და ფორიანობა. სიმკვრივე იზომებოდა ჰიდროსტატიკური მეთოდით. მიკროსისალე განისაზღვრებოდა MINILOAD-2 ხელსაწყოს გამოყენებით.

მასალების მორფოლოგიურ-სტრუქტურული და ელემენტური შემადგენლობის კვლევა ხდებოდა მასკანირებელი ელექტრონული JEOL JSM-6510LM და ოპტიკური LEITZ WETZLAR მიკროსკოპების მეშვეობით. შესწავლილი იქნა ნიმუშების სტრუქტურა, შეფასდა მარცვალთა წყობის სიმჭიდროვე და ფორიანობა. ფაზური ანალიზი განხორციელდა რენტგენული დიფრაქტომეტრით XZG 4A.

კვლევის ძირითადი შედეგები და შედეგების გამოყენების სფერო

- ჩატარებული კვლევების შედეგად დადგენილია რეჟიმები განსხვავებული ქიმიური შედგენილობის მქონე კომპოზიციური მასალების თეორიულთან მიახლოებული სიმკვრივით მიღებისათვის.
- შესწავლილია მიღებული მასალების ფაზური შედგენილობა, სტრუქტურა, მორფოლოგია, ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები.
- შემუშავებულია საჯავშნე ფილების დამზადების/აწყოების ტექნოლოგია.
- დამზადებულია/აწყობილია საჯავშნე ფილები.

ზემოთ ჩამოთვლილი შედეგები მნიშვნელოვან ინფორმაციას მისცემს კომპოზიციური მასალებით დაინტერესებულ მკვლევარებს ნაპერწკალურ-

პლაზმური მეთოდით მასალების მიღების და მათი თვისებების შესახებ, აგრეთვე საჯავშნე ფილების აწყობის ტექნოლოგია საჯავშნე მასალებით დაინტერესებულ მკვლევარებს თუ მწარმოებლებს გაუადვილებს საჯავშნე ფილების დამზადებას.

ნაშრომის მოცულობა და სტრუქტურა

სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლის, სამი თავისაგან, დასკვნისა და ციტირებული ლიტერატურისაგან. სამუშაო შეიცავს 102 ნაბეჭდ გვერდს, 4 ცხრილს, 62 სურათსა და 102 დასახელების ბიბლიოგრაფიას.

ნაშრომის ძირითადი შედეგები

შესავალში განხილულია სადისერტაციო ნაშრომის აქტუალობა. ნაჩვენებია კომპოზიციური მასალების გამოყენების მნიშვნელობა მრეწველობაში. ხაზგასმულია ნანოტექნოლოგიის შემუშავებაზე კომპოზიციური მასალების დასამზადებლად. ტექნოლოგიისა და ნანომასალების დანერგვის მნიშვნელობაზე წარმოებაში. განხილულია კომპოზიციური მასალების მიღების ტექნოლოგიის ეტაპები. გამახვილებულია ყურადღება თანამედროვე ტიპის კარბიდულ და ბორიდულ საჯავშნე მასალებზე.

პირველ თავში წარმოდგენილია ლიტერატურული ანალიზი. განხილულია ტიტანისა და სილიციუმის კარბიდებისა და ტიტანის დიბორიდის ფუძის მქონე არსებული კომპოზიციური მასალები, მათი გამოყენების არეალი, მათი მიღების მეთოდები და სტრუქტურული თავისებურებანი. მოყვანილია ფაზური მდგომარეობის დიაგრამები. აღწერულია ის შესაძლო ფაზები, რომლებიც შეიძლება წარმოიქმნას ტექნოლოგიური პროცესების წარმართვის დროს. შედარებულია ფხვნილთა მიღების და შეცხობა-კომპაქტირების არსებული მეთოდები და გამოვლენილია მათი ნაკლოვანებები. აღნიშნულია, რომ კომპაქტური

კომპოზიციური ნანომასალების მიღების ერთ-ერთ პერსპექტიული გზა ნაპერწყალურ-პლაზმური შეცხოვის (SPS) მეთოდია.

როგორც ცნობილია ლითონის კომპოზიციური მასალები შედგება ლითონის ფუძისა და მკავშირეული მასალისაგან. მატრიცის სახით ხშირად იყენებენ ფერად ლითონებს (ალუმინი, მაგნიუმი, ნიკელი) ან მათ შენადნობებს. იმისათვის, რომ მივიღოთ სასურველი თვისებები მქონე კომპოზიტი, საჭიროა შევისწავლოთ მისი შემადგენელი ნაერთების თვისებები. ამის საშუალებას იძლევა მდგომარეობის დიაგრამები, რომლითაც შესაძლებელია მოვიძიოთ მნიშვნელოვანი ინფორმაცია. კერძოდ: მოცემულ სისტემაში რა ტემპერატურაზე რომელი ნაერთი შეიძლება წარმოიქმნას, ნივთიერება როდის არის მყარ და როდის გადადის ის თხევად მდგომარეობაში და ა. შ. არსებობს ორმაგი, სამმაგი და ოთხმაგი სისტემები. ნაშრომში ისინი განხილულია ცალ-ცალკე და დახასიათებულია წარმოქმნილი ნაერთები. განსაკუთრებით ყურადღება გამახვილებულია კარბიდულ და ბორიდულ ნაერთებზე, მათი მიღების მეთოდებზე, აგრეთვე ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე.

ჩატარებულია მოყვანილი ლიტერატურის ანალიზი და მის საფუძველზე ჩამოყალიბებულია კვლევის მიზნები და ამოცანები.

მეორე თავში წარმოდგენილია ფხვნილთა მიღებისა და მასიური ნიმუშების კომპაქტირების ექსპერიმენტული ნაწილი. მოყვანილია კომპოზიციურ მასალათა ფიზიკურ-მექანიკური თვისებებისა და სტრუქტურის შესწავლის მეთოდები და ნიმუშების ზედაპირის მომზადების წესი შემდგომი ანალიზისათვის. ნიმუშების სტრუქტურა და მორფოლოგია შესწავლილ იქნა რენდგენო-დიფრაქტომეტრისა (XRD) და მასკანირებელი ელექტრონული მიკროსკოპის (SEM) მეშვეობით. ფიზიკურ-მექანიკური თვისებებიდან შეისწავლებოდა ნიმუშების სიმკვრივე, ფორიანობა და მიკროსისალე.

აღწერილი მეთოდის მუშაობის პრინციპი და თავისებურებანი. აღნიშნულია, რომ კვლევებში გამოყენებული ორიგინალური SPS მოწყობილობა

აღჭურვილია კვების ბლოკით, რომელსაც შეუძლია მოიცეს მუდმივი, მუდმივი იმპულსური და ცვლადი იმპულსური დენი. როგორც გამოკვლევებმა აჩვენეს, ნაერთთა სინთეზირების, შეცხოების პროცესში უკეთეს შედეგს ცვლადი იმპულსური დენის გამოყენება იძლევა. მასალათა სინთეზირებისა და კომპაქტირებისათვის გამოიყენებოდა გრაფიტის წნეხ-ყალიბები. საწყისი ელემენტებისგან მომზადებული კაზმის სინთეზირება/კომპაქტირება წარმოებდა სხვადასხვა რეჟიმებზე, $5 \div 15$ წუთის ხანგრძლივობით, $1200-1800^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურებზე და $P=20 \div 90$ მპა წნევის ქვეშ. შეცხოების პროცესში წნეხის ჭოკის გადაადგილებით იზომებოდა ნიმუშის ჩაჯდომა და შეცხოების ხარისხი.

მისაღები კომპოზიტის თეორიული სიმკვრივე განისაზღვრებოდა გამომდინარე მისი სავარაუდო შედგენილობიდან.

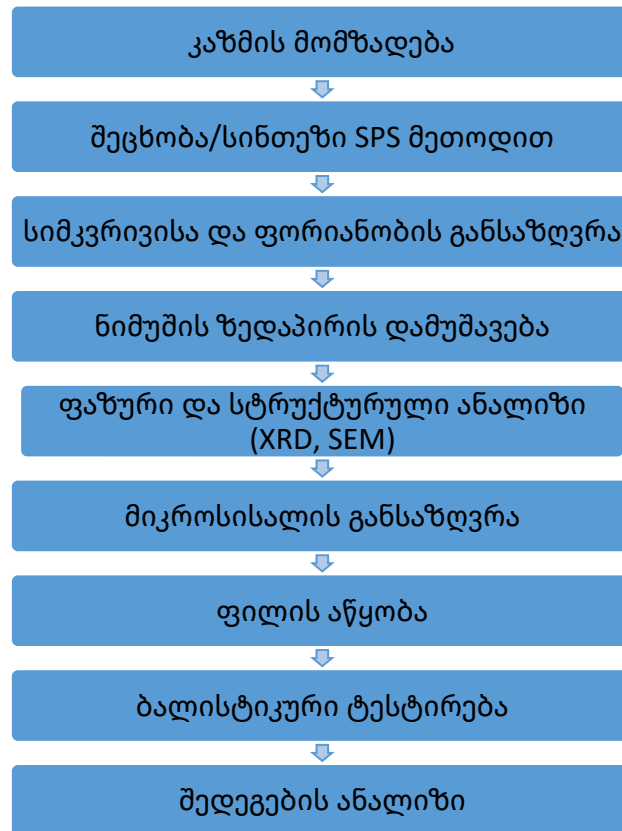
ნიმუშის ფაზური ანალიზი ხორციელდებოდა რენტგენოდირაქციული მეთოდით. ამ მეთოდით შესაძლებელია განისაზღვროს შეცხოებილი მასალის ქიმიური შედგენილობა. იყო შემთხვევები, როცა მიღებული შედეგი განსხვავდებოდა დაგეგმილისაგან, ამ შემთხვევაში, დგინდებოდა მიზეზები თუ რატომ წარიმართა რეაქცია არასასურველი მიმართულებით. ნიმუშის მორფოლოგია შეისწავლებოდა მისი ტეხისა და პოლირებული ზედაპირის ანალიზით მასკანირებელი ელექტრონულ მიკროსკოპის გამოყენებით. ტეხის ანალიზი ადვილად და სწრაფად ხდება, თუმცა ამ დროს რთულია გარჩევა გატეხვის ზედაპირზე არსებული სიცარიელე მარცვლის ამოვარდნითაა გამოწვეული, თუ ფორიანობით. პოლირებული ზედაპირის მიკროსკოპული ანალიზისათვის საჭიროა ნიმუშის ზედაპირის დამუშავება. ზედაპირზე მკვეთრად უნდა ჩანდეს მარცვლები, გამოკვეთილი უნდა იყოს მარცვლების საზღვრები, რათა შევძლოთ მარცვლების ჩაწყობის სიმჭიდროვის დანახვა. ამისათვის ხდებოდა ნიმუშების პოლირება პოლირების დანადგარზე. გამოყენებული იყო სხვადასხვა ფრაქციის ზუმფარა და 9 სხვადასხვა ფრაქციის ალმასის აბრაზივიანი პასტა. გამოყენებული ალმასის აბრაზივიანი პასტების მარცვლოვანება იყო: 50, 20,

10, 5, 3, 1, 0.5, 0.25 და 0.1 მიკრონი. ზუმფარების მეშვეობით ხდებოდა ზედაპირის სიბრტყის გასწორება, შემდეგ სხვადასხვა ფრაქციის ალმასის აბრაზივიანი პასტების გამოყენებით ხდებოდა ზედაპირიდან ზედმეტი ფენის თანდათანობით მოშორებ. ყოველი ფრაქციით დამუშავების შემდეგ ოპტიკური მიკროსკოპით კონტროლდებოდა ზედაპირის ხარისხი, რათა არ წარმოქმნილიყო ამორფული ფენა, რომლის გადაგლესვაც მოხდებოდა ნიმუშის ზედაპირზე და შეუძლებელი გახდებოდა ფაზებისა და მარცვლების საზღვრების დანახვა. ასეთი ამორფული ფენის გაჩენის შემთხვევაში მეორდებოდა უფრო მსხვილმარცვლოვანი პასტით დამუშავების ოპერაცია, სანამ აღნიშნული ამორფული ფენა არ მოსცილდებოდა ნიმუშის ზედაპირს. ვინაიდან ნიმუშებს სხვადასხვა შედგენილობა და სისაღე გააჩნიათ, მათი დამუშავება განსხვავებულ მიდგომას საჭიროებს. თუ ნიმუშს არ აქვს ძალიან მაღალი სისაღე, მსხვილმარცვლოვანი ალმასის პასტით (50 და 20 მკმ) პოლირების ხანგრძლივობა შეადგენს 5 წუთს, შედარებით მაღალი სისაღის ნიმუშისათვის 7-8 წუთს. უფრო წვრილმარცვლოვანი პასტებით (10, 5, 3, 1, 0.5, 0.25) 7-10 წუთს, ხოლო 0.1 მიკრონიანი მარცვლოვანების პასტით 15-20 წუთს.

სისაღე არის მასალის წინააღმდეგობა ადგილობრივი პლასტიკური დეფორმაციის მიმართ, რომელიც გამოწვეულია მასში სხვა, პლასტიკური დეფორმაციის მიმართ მდგრადი სხეულის შეღწევით. მიკროსისაღე განისაზღვრებოდა ვიკერსის მეთოდით. აღნიშნული მეთოდი გულისხმობს ნიმუშზე ანაბეჭდის გაკეთებას დატვირთვის ქვეშ, ოთხკუთხა პირამიდის ფორმის ალმასის ინდენტორით. 30 წამის განმავლობაში $P = 0,2$ კგმ დატვირთვის შემდეგ ნიმუშზე ჩნდება რომის ფორმის ანაბეჭდი. მიკროსკოპის მეშვეობით ხდება რომის დიაგონალების გაზომვა და შესაბამისი ფრომულების გამოყენებით განისაზღვრება ნიმუშის მიკროსისაღე.

მესამე თავში მოყვანილია ის ძირითადი შედეგები, რომლებიც მიღებულ იქნა კვლევითი სამუშაოს ჩატარების შედეგად.

წინამდებარე სამუშაოს ერთ-ერთ მიზანს წარმოადგენდა მიღებული კომპოზიციური მასალებისაგან საუკეთესო თვისებების მქონე ერთი ან რამდენიმე მასალის შერჩევა და მათი მეშვეობით საჯავშნე ფილის აწყობა. შემუშავებულ იქნა საჯავშნე ფილების დამზადებისა და აწყობის ტექნოლოგია. აღნიშნული ტექნოლოგია შედგება შემდეგი ეტაპებისაგან: (იხ. სურ.1) კაზმის მოსამზადებლად თავდაპირველად ხდება კომპოზიტის გათვლა კომპონენტთა თანაფარდობის შერჩევით. შემდგომ ხდებოდა სინთეზისათვის ელემენტებისა და ნაერთების შერჩევა, კერძოდ ფუძისა და მალეგირებელი ნაერთებისათვის ცალკეული ელემენტების (Ti, Al, Si, C, B, Mg, Fe, Ni და სხვა) ან ნაერთების (TiB₂, TiC, SiC, B₄C, AlMgB₁₄ და სხვა) საჭირო რაოდენობის ფხვნილების აწონვა და შერევა.



სურ. 1 საჯავშნე ფილების მიღების ტექნოლოგიური ეტაპების სქემა
კომპონენტთა ფხვნილების შერევა და მექანიკური აქტივირება შესაძლებელია ხელით ან ბურთულეებიან წისქვილში. წისქვილში შერევის შემთხვევაში ხდება ფხვნილის დაწვრილმარცვლოვნებაც.

სასურველი ფორმისა და ზომის ნიმუშის მისაღებად ხდებოდა წნეხეალების შერჩევა და მასში შერეული და მექანიკურად აქტივირებული ფხვნილების მოთავსება, რაც გულისხმობს წნეხეალებში სიგრაფლექსის ამოფენას, რათა არ მოხდეს ნიმუშის მიკვრა წნეხეალების კედლებისა და პუანსონების ზედაპირზე.

ნიმუშების მიღება ხდებოდა ნაპერწკალურ-პლაზმური სინთეზის (SPS) მეთოდით. სინთეზი წარმოებდა ვაკუუმში, სპეციალურ SPS მეთოდზე დაფუძნებულ დანადგარში შეცხოების პროცესების მართვით. ტემპერატურისა და წნევის რეგულირება ხდებოდა ისე, რომ არ მომხდარიყო დაბალტემპერატურული ელემენტების/ნაერთების გამოდნობა და კომპოზიტის შემადგენლობიდან გამოსვლა, ან აირის სახით გამოყოფა და აორთქლება. წნევის კონტროლი საჭირო იყო იმისათვის, რომ მიღებული ნიმუშის ფორიანობა მინიმუმამდე დაგვეყვანა. სინთეზის შედეგად მიღებულ ნიმუშებს განესაზღვრებოდა სიმკვრივე და ფორიანობა. ყოველი ახალი კომპოზიციური მასალის ნიმუშის ფორიანობა განისაზღვრებოდა, რეალური სიმკვრივის შეფარდებით თეორიულ სიმკვრივესთან, რომელიც წარმოადგენს კომპოზიციური მასალის შემადგენელი ნაერთების სიმკვრივეთა ჯამს ნაწილების პროცენტული შემცველობის გათვალისწინებით.

ნიმუშის ფაზური ანალიზი ხორციელდებოდა რენტგენოგრაფიული მეთოდით. ამ მეთოდით შესაძლებელია განისაზღვროს შეცხოებილი მასალის ქიმიური შედგენილობა. იმ შემთხვევებში, როცა მიღებული შედეგი განსხვავდებოდა დაგეგმილისაგან, დგინდებოდა მიზეზები თუ რატომ წარიმართა რეაქცია არასასურველი მიმართულებით და ამის გათვალისწინებით მეორდებოდა ექსპერიმენტი.

მისაღები კომპოზიციური მასალების ფუძედ შერჩეული TiB_2 - TiC - SiC კომპოზიტი და მალეგირებელი ნაერთები AlB_{12} , $AlMgB_{14}$, Al_8SiC_7 , Al_4SiC_4 , $Al_8B_4C_7$, $Ti_3Al_{0.5}Si_{0.5}C_2$, $Fe-Ni$ ნაჩვენებია ცხრილი 1-ში. ტექნოლოგიური რეჟიმების და ფიზიკო-მექანიკური თვისებების დადგენისათვის მიღებულ

იქნა ცილინდრული ფორმის ნიმუშები. ბალისტიკური გამოცდებისათვის კი ოთხკუთხა ფორმის. შეცხოვა ხდებოდა ტემპერატურის, წნევისა და შეცხოვის ტემპერატურაზე დაყოვნების დროის კონტროლით (ცხრილი 2). მიღებულ მასალებს განესაზღვრა სიმკვრივე, მიკროსისალე, ფორიანობა (ცხრილი 3).

ცხრილში 1 მოცემულია ნიმუშების მიღების მეთოდები. ცხრილში შენიშვნის ნაწილში მითითებულია რომელი ფხვნილებია აღებული ნაერთის სახით და რომელი ცალკეული ელემენტის სახით. მაგ.: $TiB_2-TiC-SiC-AlB_{12}$ (SPS-660) ნიმუშის კაზმი

მიღებულია უშუალოდ Ti, Al, B, Si, C ელემენტების ფხვნილების შერევით, $TiB_2-TiC-SiC-AlMgB_{14}$ (SPS-733)- TiB_2, TiC, SiC ნაერთების და Al, Mg, B ელემენტების ფხვნილების შერევით, $TiB_2-TiC-SiC$ (SPS-760), $TiB_2-TiC-TiN-FeNi$ (SPS-786, 789, 795) , $TiB_2-TiC-AlMgB_{14}-FeNi$ (SPS-797), $TiB_2-TiC-SiC-AlMgB_{14}$ (SPS-802), $TiB_2-TiC-TiN-SiC-FeNi$ (SPS-812), $TiB_2-TiC-TiN-SiC-FeNi$ (SPS-813), $TiB_2-TiC-TiN-SiC-FeNi$ (SPS-814), $TiB_2-TiC-SiC-FeNi$ (SPS-822) ნიმუშები მიღებულია ცხრილში მოცემული ქიმიური რეაქციებით.

ცხრილში 2 მოცემულია ნიმუშების მიღების რეჟიმები. მასში ნათლადაა ასახული კონკრეტული ნიმუშის მიღებისათვის საჭირო ტემპერატურა, წნევა, დაყოვნების დრო, მიღებული ნიმუშის გეომეტრიული ზომები. უნდა აღინიშნოს, რომ ერთიდაიგივე შედგენილობის მასალების მიღება სხვადასხვა პირობებში იყო შესაძლებელი იმისდა მიხედვით, თუ რა კომპონენტებისაგან იყო კაზმი შედგენილი და როგორ განვითარდა რეაქცია იცვლებოდა შეცხოვის დროც, წნევაც და ტემპერატურაც, რომელიმე მალეგირებელი ნაერთი (მაგ. რკინა-ნიკელის შენადნობი) ნიმუში უფრო დაბალ ტემპერატურაზე მიღების საშუალებას იძლეოდა. რაც შეეხება დროსა და წნევას, ისინი უშუალოდ შეცხოვის პროცესში რეგულირდებოდა, იმის მიხედვით თუ რამდენად სწრაფად გაიზარდა ტემპერატურა საჭირო იყო წნევის გაზრდაც, რათა მომხდარიყო მინიმალური ფორიანობის მქონე მასალის კომპაქტირება.

ცხრილი 3 ასახავს მიღებული ნიმუშების თვისებებს, კერძოდ ნაჩვენებია ნიმუშების მიკროსისალე, სიმკვრივე, თეორიული სიმკვრივე და ფარდობითი სიმკვრივე. ეს უკანასკნელი სიდიდე აჩვენებს თუ რამდენად სრულად არის შეცხოვბილი ესა თუ ის ნიმუში.

ცხრილი 1. მიღებული კომპოზიციური მასალები

№	SPS	კომპოზიტის შედგენილობა	შენიშვნა
1	782	TiB ₂ -TiC-SiC	ელემენტებით
2	760	TiB ₂ -TiC-SiC	7Ti+3B ₄ C +3Si →6TiB ₂ +TiC+3SiC რეაქციით
3	660	TiB ₂ -TiC-SiC -AlB ₁₂	ელემენტებით
4	746	TiB ₂ -TiC-SiC -Al ₈ SiC ₇	Al ₈ SiC ₇ -ელემენტებით
5	770	TiB ₂ -TiC-SiC -Al ₄ SiC ₄	Al ₄ SiC ₄ -ელემენტებით, პრიზმული
6	772	TiB ₂ -TiC-SiC - Al ₄ SiC ₄	Al ₄ SiC ₄ - ელემენტებით, ცილინდრული
7	783	TiB ₂ -TiC-SiC - Ti ₃ Al _{0.5} Si _{0.5} C ₂	ელემენტებით
8	777	TiB ₂ -TiC-SiC - Ti ₃ Al _{0.5} Si _{0.5} C ₂	Ti ₃ Al _{0.5} Si _{0.5} C ₂ -ელემენტებით
9	778	TiB ₂ -TiC-SiC - Ti ₃ Al _{0.5} Si _{0.5} C ₂ -Al ₈ B ₄ C ₇	Al ₈ SiC ₇ - Al ₈ B ₄ C ₇ -ელემენტებით
10	779	TiB ₂ -TiC-SiC - Ti ₃ Al _{0.5} Si _{0.5} C ₂ - Al ₄ SiC ₄	Ti ₃ Al _{0.5} Si _{0.5} C ₂ - Al ₄ SiC ₄ -ელემენტებით
11	786	TiB ₂ -TiC -TiN-FeNi	2B ₄ C+2BN+9Ti+FeNi→5TiB ₂ +2TiC+2TiN+FeNi
12	789	TiB ₂ -TiC -TiN-FeNi	2B ₄ C+2BN+9Ti+FeNi→5TiB ₂ +2TiC+2TiN+FeNi
13	794	TiB ₂ -TiC -TiN-FeNi	2B ₄ C+2BN+9Ti+FeNi→5TiB ₂ +2TiC+2TiN+FeNi
14	795	TiB ₂ -TiC -TiN-FeNi	2B ₄ C+2BN+9Ti+FeNi→5TiB ₂ +2TiC+2TiN+FeNi
15	733	TiB ₂ -TiC-SiC -AlMgB ₁₄	AlMgB ₁₄ -ელემენტებით
16	797	TiB ₂ -TiC -AlMgB ₁₄ -FeNi	3Ti+B ₄ C+Al+Mg+14B+Fe+Ni→2TiB ₂ +TiC+AlMgB ₁₄ +FeNi
17	802	TiB ₂ -TiC- SiC -AlMgB ₁₄	3Ti+B ₄ C+Si+C+Al+Mg+14B→2TiB ₂ +TiC+SiC+AlMgB ₁₄
18	812	TiB ₂ -TiC-SiC -TiN-FeNi	6Ti+B ₄ C+SiC+2BN+Fe+Ni→3TiB ₂ -TiC-2TiN-SiC-FeNi
19	813	TiB ₂ -TiC-SiC -TiN-FeNi	6Ti+B ₄ C+SiC+2BN+Fe+Ni→3TiB ₂ -TiC-2TiN-SiC-FeNi

20	814	TiB ₂ -TiC-SiC -TiN-FeNi	6Ti+B ₄ C+SiC+2BN+Fe+Ni→3TiB ₂ -TiC-2TiN-SiC-FeNi
21	780	TiB ₂ -TiC-SiC -FeNi	Fe-Ni- ელემენტებით
22	822	TiB ₂ -TiC-SiC -FeNi	3Ti+2B ₄ C+Si+Fe+Ni→2TiB ₂ -TiC-SiC-FeNi

ცხრილი 2. სინთეზის/ შეცხოვის პროცესის პარამეტრები

№	SPS №	კომპოზიტის შედგენილობა	მასა გრ.	ზომე-ბი (მმ)	დრო წთ.	T°C	P მპა
1	782	TiB ₂ -TiC-SiC	2	Ø 12	5	1750	85
2	660	TiB ₂ -TiC-SiC	2	Ø 12	3	1100	50
3	760	TiB ₂ -TiC-SiC -AlB ₁₂	2	Ø 12	5	1550	80
4	746	TiB ₂ -TiC-SiC - Al ₈ Si ₇	2	Ø 12	5	1700	70
5	770	TiB ₂ -TiC-SiC - Al ₄ Si ₄	7	23x23 x3	1	1750	20
6	772	TiB ₂ -TiC-SiC - Al ₄ Si ₄	2	Ø 12	2	1800	80
7	783	TiB ₂ -TiC-SiC - Ti ₃ Al _{0.5} Si _{0.5} C ₂	2	Ø 12	3	1700	85
8	777	TiB ₂ -TiC-SiC - Ti ₃ Al _{0.5} Si _{0.5} C ₂	2	Ø 12	3	1500	85
9	778	TiB ₂ -TiC-SiC - Ti ₃ Al _{0.5} Si _{0.5} C ₂ - Al ₈ B ₄ C ₇	2	Ø 12	6	1500	80
10	779	TiB ₂ -TiC-SiC - Ti ₃ Al _{0.5} Si _{0.5} C ₂ - Al ₄ Si ₄	2	Ø 12	2	1700	80
11	786	TiB ₂ -TiC -TiN-FeNi	2	Ø 12	6	1400	85
12	789	TiB ₂ -TiC -TiN-FeNi	2	Ø 12	7	1400	80
13	794	TiB ₂ -TiC -TiN-FeNi	2	Ø 12	6	1400	85
14	795	TiB ₂ -TiC -TiN-FeNi	2	Ø 12	6	1300	85
15	733	TiB ₂ -TiC-SiC - AlMgB ₁₄	2	Ø 12	2	1550	70
16	797	TiB ₂ -TiC -AlMgB ₁₄ -FeNi	2	Ø 12	3	1350	85
17	802	TiB ₂ -TiC- SiC - AlMgB ₁₄	2	Ø 12	5	1700	85

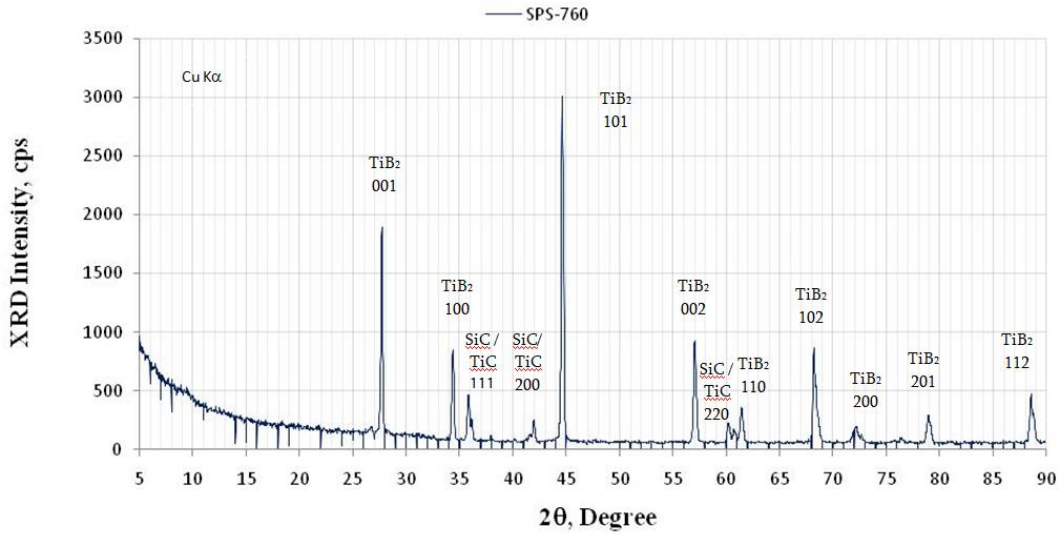
18	812	TiB2-TiC-SiC -TiN-FeNi	2	Ø 12	5	1300	80
19	813	TiB2-TiC-SiC -TiN-FeNi	2	Ø 12	6	1250	80
20	814	TiB2-TiC-SiC -TiN-FeNi	2	Ø 12	4	1200	80
21	780	TiB2-TiC-SiC -FeNi	2	Ø 12	4	1400	80
22	822	TiB2-TiC-SiC -FeNi	2	Ø 12	7	1200	80

ცხრილი 3. მიღებული ნიმუშების თვისებები

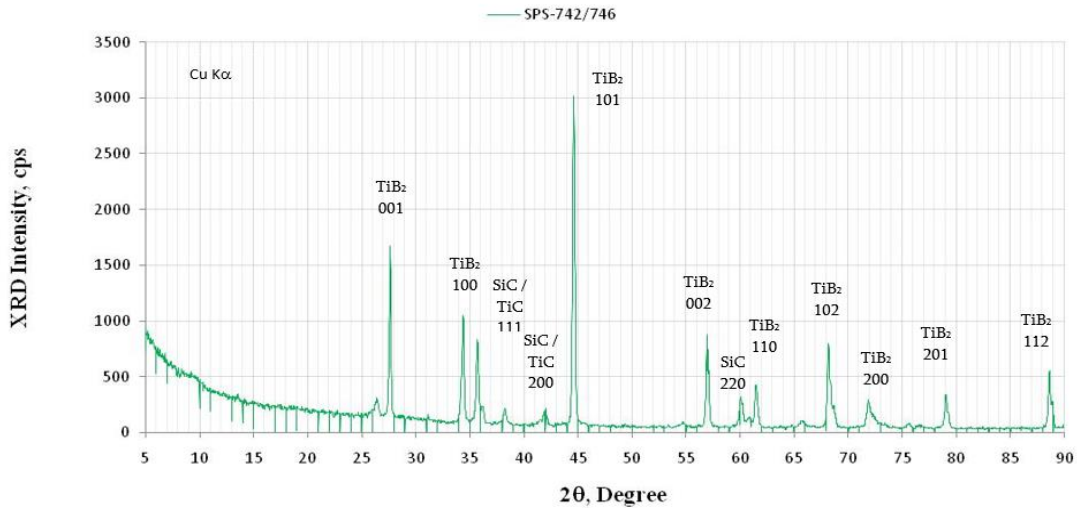
№	SPS №	კომპოზიტის შედგენილობა	სიმკვრივე გ/სმ ³	თეორ. სიმკვრივე გ/სმ ³	ფარდობითი სიმკვრივე	მიკრო-სისალე Hv, გპა
1.	782	TiB2-TiC-SiC	4.1	4.35	94.3	40.5
2.	760	TiB2-TiC-SiC	4.34	4.41	98.4	43.5
3.	660	TiB2-TiC-SiC-AlB12	3.7	3.71	99.7	40.6
4.	733	TiB2-TiC-SiC - AlMgB14	3.48	3.91	89	33.4
5.	802	TiB2-TiC - SiC - AlMgB14	4.06	4.37	92.9	40.5
6.	746	TiB2-TiC-SiC - Al8SiC7	3.92	3.96	99	26.6
7.	770	TiB2-TiC-SiC - Al4SiC4	3.69	4.16	88.7	27
8.	772	TiB2-TiC-SiC - Al4SiC4	4.05	4.16	97.4	37
9.	783	TiB2-TiC-SiC-Ti3Al0.5Si0.5C2	4.14	4.19	98.8	35.6
10.	777	TiB2-TiC-SiC - Ti3Al0.5Si0.5C2	4.17	4.35	95.9	35.6
11.	778	TiB2-TiC-SiC - Ti3Al0.5Si0.5C2-Al8B4C7	3.91	4.4	88.9	24.5
12.	779	TiB2-TiC-SiC-Ti3Al0.5Si0.5C2-Al4SiC4	3.68	4.17	88.2	24.4

13.	786	TiB ₂ -TiC-TiN-FeNi	4.79	4.92	97.4	32.9
14.	789	TiB ₂ -TiC-TiN-FeNi	4.79	5.06	94.7	27.3
15.	794	TiB ₂ -TiC-TiN-FeNi	3.54	4.21	84.1	20
16.	795	TiB ₂ -TiC-TiN-FeNi	4.75	5.01	94.8	24.8
17.	797	TiB ₂ -TiC- AlMgB ₁₄ -FeNi	4.35	5.01	86.8	24
18.	812	TiB ₂ -TiC-TiN-SiC- FeNi	4.14	4.3	96.3	30.5
19.	813	TiB ₂ -TiC-TiN-SiC- FeNi	4.13	4.3	96	30
20.	814	TiB ₂ -TiC-TiN-SiC- FeNi	4.28	4.3	99.5	35.6
21.	780	TiB ₂ -TiC-SiC-FeNi	3.96	4.54	87.2	20.5
22.	822	TiB ₂ -TiC-SiC-FeNi	3.74	4.24	88.2	20.4

რენტგენოდიფრაქციული კვლევის შედეგად მიღებულ დიფრაქტოგრამებზე შეინიშნება კომპოზიტის ძირითადი ფაზების ტიტანის დიბორიდის-TiB₂ სილიციუმის კარბიდის-SiC და ტიტანის კარბიდის-TiC დიფრაქციული მაქსიმუმები (სურ. 2-6), თუმცა არ ჩანს მალეგირებელი ფაზების Al₈SiC₇ (სურ.3), Al₄SiC₄ (სურ.4), AlMgB₁₄ (სურ.5) და Fe-Ni (სურ.6) შესაბამისი დიფრაქციული მაქსიმუმები. ეს გარემოება გამოწვეულია შესაბამისი ფაზის სიმცირით და სავარაუდოდ ისინი რენტგენომორფულ მდგომარეობაში იმყოფებიან. ზემოთ აღნიშნული ფაზების არსებობა შესაბამის კომპოზიტებში დასტურდება რასტრული ელექტრონული მიკროსკოპის კვლევებით. მალეგირებელი ფაზების შესაბამისი ელემენტები Al და Si (სურ.8-9), Al და Mg (სურ.10) და Fe-Ni (სურ.11) ნათლად ჩანს ენერგოდისპერსიული მიკრორენტგენულ სპექტრებზე. ამავე სურათებზე ნაჩვენებია შესაბამისი კომპოზიტების ელექტრონული მიკროფოტოგრაფიები. ფუძე კომპოზიტის ელექტრონული მიკროფოტო და შესაბამისი ენერგოდისპერსიული მიკრორენტგენო სპექტრი ნაჩვენებია სურ. 7-ზე.

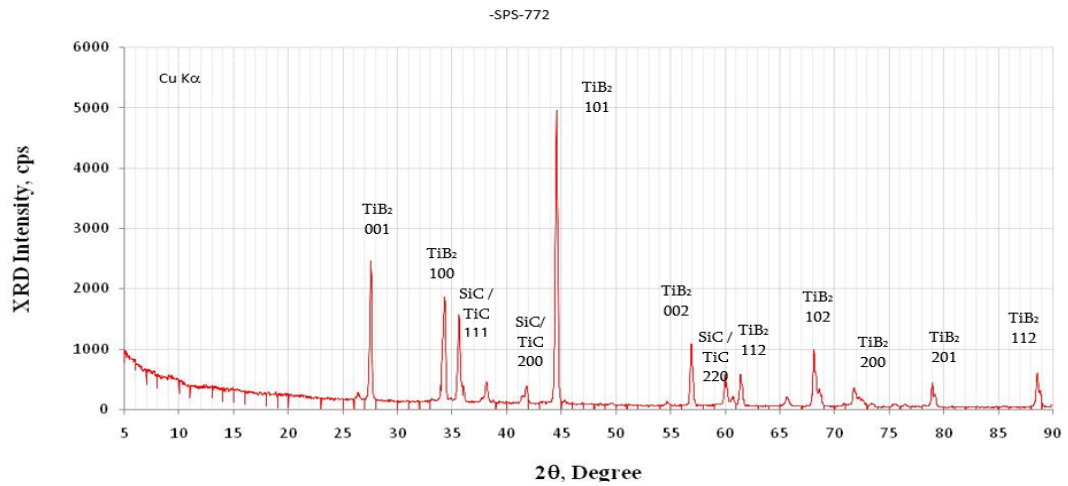


სურ. 2. TiB₂-TiC-SiC სისტემის კომპოზიტის (SPS-760) რენტგენოდიფრაქტოგრამა

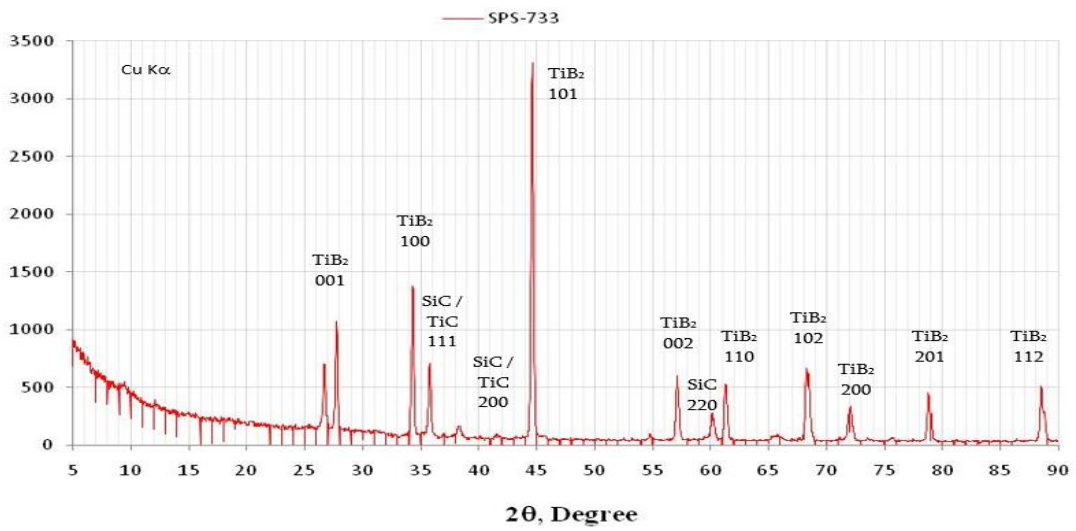


სურ. 3. TiB₂-TiC-SiC-Al₈SiC₇ სისტემის კომპოზიტის (SPS-742/746) რენტგენოდიფრაქტოგრამა

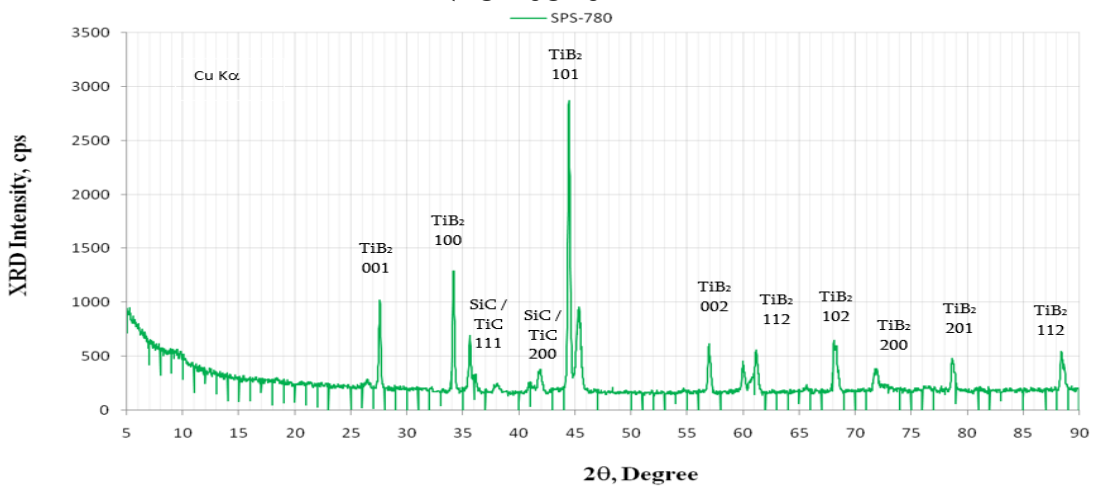
სურ



4. $\text{TiB}_2\text{-TiC-SiC-Al}_4\text{SiC}_4$ სისტემის კომპოზიტის (SPS-772) რენტგენოდიფრაქტოგრამა

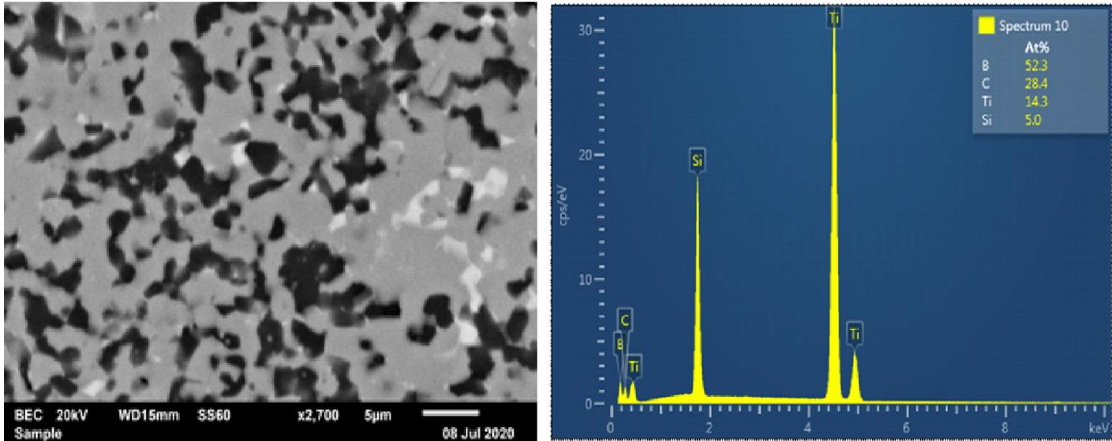


სურ. 5 $\text{TiB}_2\text{-TiC-SiC-AlMgB}_{14}$ სისტემის კომპოზიტის (SPS-733) რენტგენოდიფრაქტოგრამა

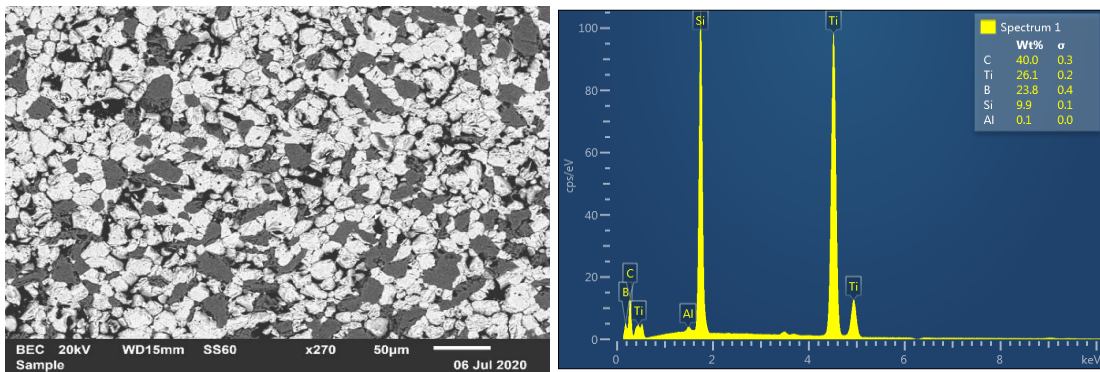


სურ. 6 $\text{TiB}_2\text{-TiC-SiC-FeNi}$ სისტემის კომპოზიტის (SPS-780) რენტგენოდიფრაქტოგრამა

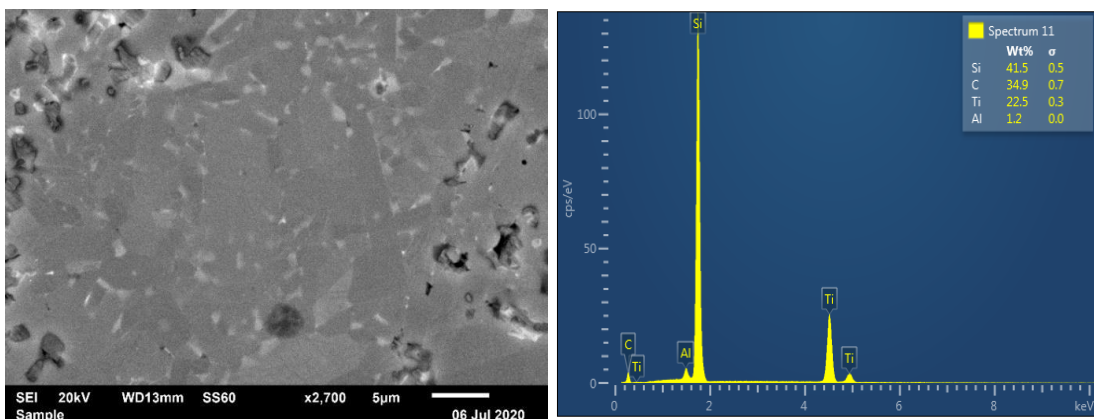
როგორც სურათი 7-დან ჩანს ნიმუში საკმაოდ კარგადაა შემცხვარი. ფორები ნაკლებად დაიმზირება. რენტგენოდიფრაქციით ნაჩვენები ფაზური შემადგენლობა დასტურდება მიკრორენტგენო სპექტრალური ანალიზითაც.



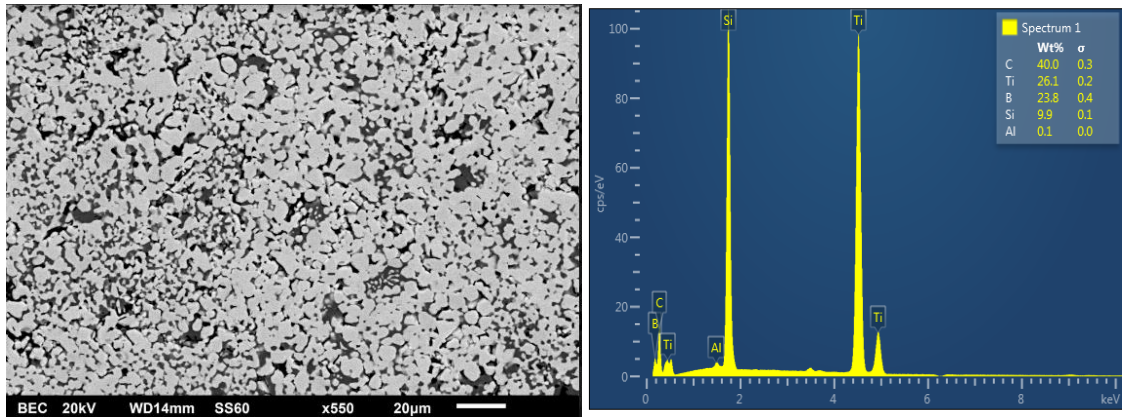
სურ. 7. TiB_2 - TiC - SiC სისტემის კომპოზიტის (SPS-760) ელექტრონული მიკროფოტოსურათი და ენერგოდისპერსიული მიკრორენტგენული სპექტრი.



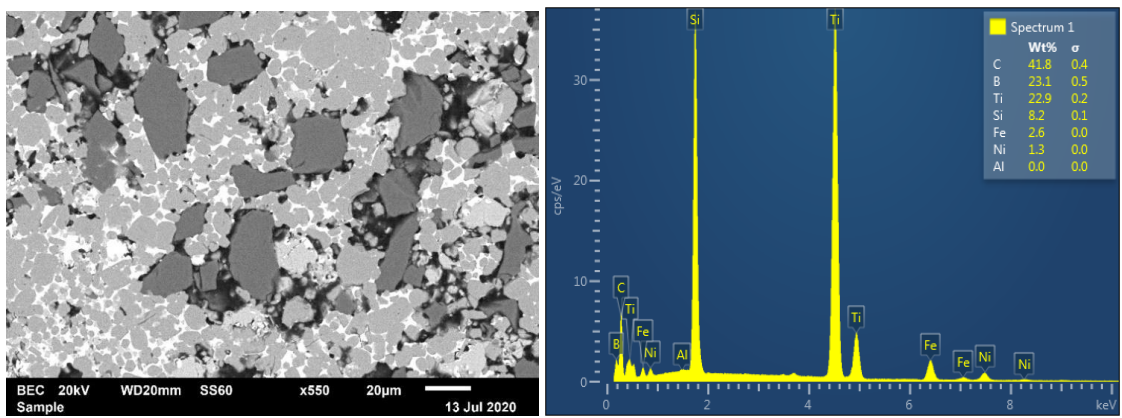
სურ. 8. TiB_2 - TiC - SiC - Al_8SiC_7 სისტემის კომპოზიტის (SPS-742/746) ელექტრონული მიკროფოტოსურათი და ენერგოდისპერსიული მიკრორენტგენული სპექტრი.



სურ. 9. TiB_2 - TiC - SiC - Al_4SiC_4 სისტემის კომპოზიტის (SPS-772) ელექტრონული მიკროფოტოსურათი და ენერგოდისპერსიული მიკრორენტგენული სპექტრი.



სურ. 10. $\text{TiB}_2\text{-TiC-SiC-AlMgB}_{14}$ სისტემის კომპოზიტის (SPS-733) ელექტრონული მიკროფოტოსურათი და ენერგოდისპერსიული მიკრორენტგენული სპექტრი.

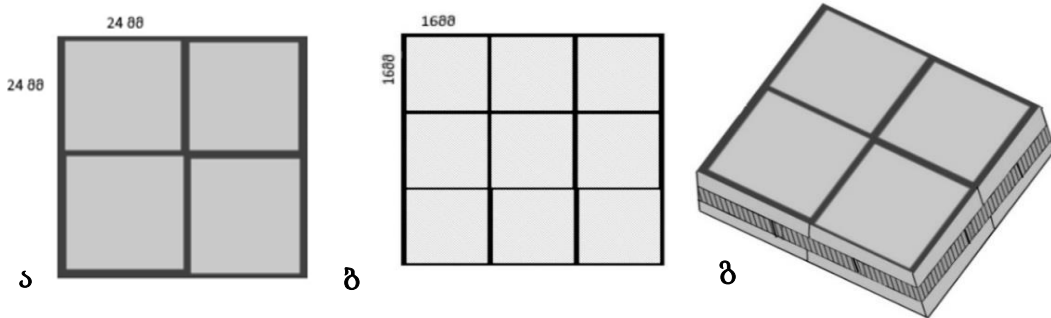


სურ. 11 $\text{TiB}_2\text{-TiC-SiC-Fe-Ni}$ სისტემის კომპოზიტის (SPS-780) ელექტრონული მიკროფოტოსურათი და ენერგოდისპერსიული მიკრორენტგენული სპექტრი.

ჯავშანჭილეტისათვის ფილები ჩვეულებრივ მზადდება დიდი ზომის წინა და უკანა მხარისათვის, გამოსაცდელად იყენებენ 50X50მმ ზომის, 8-10მმ სისქის ფილებს. აღნიშნული ზომის ფილების დამზადება დაკავშირებულია ენერჯის დიდ დანახარჯებთან და ისეთ ტექნიკურ სირთულეებთან, როგორცაა მიღებული ფირფიტის არათანაბარი შეცხოვა, კერძოდ ტემპერატურის არათანაბარი განაწილების გამო კიდეებთან ნაკლებად ხდება შეცხოვა, რის გამოც მასალა მიიღება არასრული სიმკვრივით და მაღალი ფორიანობით.

აღნიშნული პრობლემის გადასაჭრელად დამზადდა 2 სხვადასხვა ზომის ფირფიტები (24X24X3 მმ და 16X16X3 მმ) და აწყობილ იქნა საჯავშნე ფილა (სურ. 12). ყოველი მომდევნო ფენის მიერ ხდება წინა ფენის კიდეების გადაფარვა. გარდა იმისა, რომ ზემოთ აღწერილ პრობლემას გადაჭრის, ამ მეთოდით ფილის აწყობა აგრეთვე საშუალებას მოგვცემს ფირფიტა ავაწყოთ

სხვადასხვა მასალის გამოყენებით. მასალების სხვადასხვაგვარი განლაგებით მოხდება ოპტიმალური კონფიგურაციის შერჩევა. სურათებზე 17-20 ნაჩვენებია ბალისტიკური ტესტირებისათვის მომზადებული საჯავშნე ფილების ნიმუშები.



სურ. 12 საჯავშნე ფილის სქემატური ნახაზი:
 ა) I და III ფენა; ბ) ფირფიტების II ფენა; გ) აწყობილი საჯავშნე ფილა

სურ. 13-14 ნაჩვენებია საჯავშნე ფილები ერთი და იგივე შედგენილობისაა. განსხვავება მათ შორის ის არის, რომ სურ. 13-ზე ნაჩვენებია ზემოთ აღწერილი მეთოდით 2 სხვადასხვა ზომის ფირფიტებისაგან აწყობილი ფილა, ხოლო მე-14 სურათზე ნაჩვენებია იგივე ზომის მთლიანი ფილა, რომლის მისაღებადაც საჭიროა უფრო მაღალი მცხოვრების რეჟიმები, ვიდრე აწყობილი ფილის შემადგენელი ფირფიტების მისაღებად, რაც ენერჯის შედარებით დიდ დანახარჯებთან არის დაკავშირებული. სურ.15-16 ნაჩვენებია ცხლად დაწნევის მეთოდით მიღებული B_4C-SiC და $TiB_2-TiC-SiC-Al_4SiC_4$ შემადგენლობის ფილები.



- $TiB_2-TiC-SiC-FeNi$
- 45X45X10
- 70 გრამი

სურ. 13. აწყობილი საჯავშნე ფილა $TiB_2-TiC-SiC-FeN$



- $\text{TiB}_2\text{-TiC-SiC-FeNi}$
- 45X45X10
- 81გრამი

სურ.14. საჯავშნე ფილა $\text{TiB}_2\text{-TiC-SiC-FeNi}$.



- $\text{B}_4\text{C-SiC}$
- $\text{Ø} = 70 \text{ მმ}$
- 92 გრამი

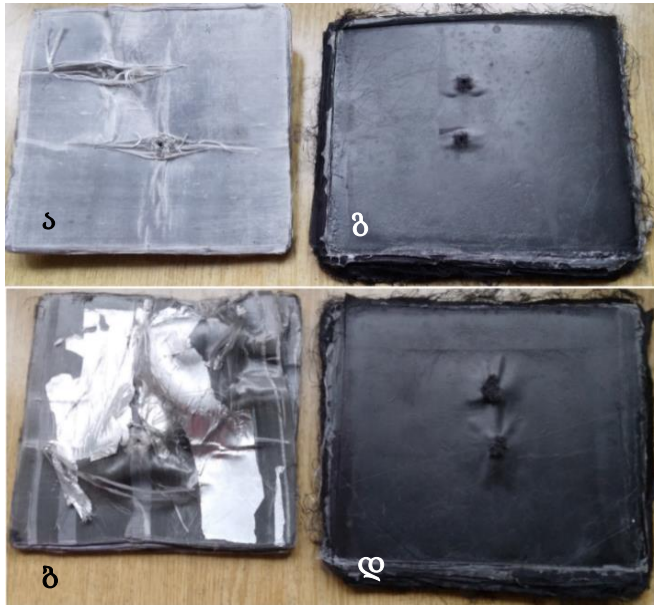
სურ. 15. საჯავშნე ფილა $\text{B}_4\text{C-SiC}$



- $\text{TiB}_2\text{-TiC-SiC- Al}_4\text{SiC}_4$
- $\text{Ø} = 70 \text{ მმ}$
- 105 გრამი

სურ.16. საჯავშნე ფილა $\text{TiB}_2\text{-TiC-SiC- Al}_4\text{SiC}_4$

უშუალოდ ნიმუშების ბალისტიკური გამოცდის ჩატარებამდე ტარდება ნიმუშების უკან დასაფენი ქსოვილების ბალისტიკური ტესტირება, რადგან ნიმუშის ვარგისიანობა დგინდება აღნიშნული ქსოვილის უკანა ზედაპირის (ტყვიის გამოსვლის მხარე) დათვალიერებითა და გაზომვით. პისტოლეტის ტყვიის სროლის შემდეგ ქსოვილი არ უნდა გაიხვრიტოს, მხოლოდ უნდა გამოიზნიქოს უკანა მხარეს. სურ. 17-ზე ნაჩვენებია 2 სხვადასხვა ქსოვილის წინა და უკანა მხარეები ტესტირების შემდეგ. ერთმა მათგანმა გაუძლო გამოცდას. ნიმუში ვარგისია, თუ ბალისტიკური ტესტირების შემდეგ ქსოვილის უკანა მხარის გამოზნიქილობა არ აღემატება 44 მმ-ს.



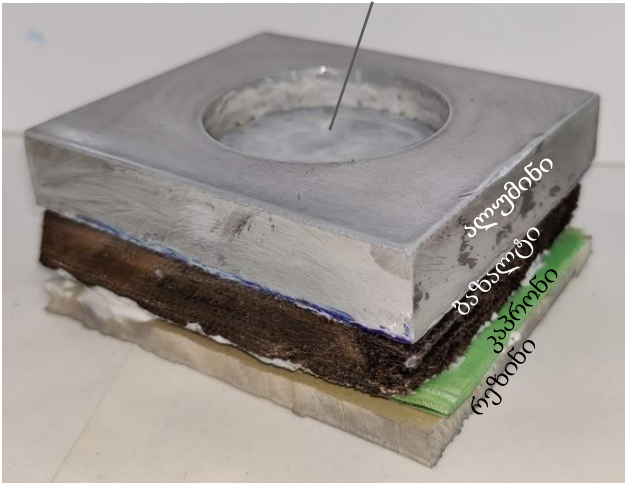
სურ. 17. გამოსაცდელი ნიმუშების უკან დასაფენი ქსოვილების წინა და უკანა მხარე ბალისტიკური ტესტირების შემდეგ: ა-ბ) აბრეშუმის ქსოვილის წინა და უკანა მხარე; გ-დ) ნახშირბადის ქსოვილის წინა და უკანა მხარე.

სურათზე 18 ნაჩვენებია ბალისტიკური ტესტირებისათვის მომზადებული 5 სხვადასხვა ჯავშან ნაკეთობა. თითოეულის შემადგენლობა მოცემულია ცხრილში 4. ჯავშან ნაკეთობები აწყობილია სურათ 19-ზე მოყვანილი ნიმუშის მიხედვით. გამოსაცდელი საჯავშნე ფილა მოთავსებულია ალუმინის დამცავ ჩარჩოში რომელსაც ქვემოდან მოსდევს ბაზალტის 10 მმ-იანი, კაპრონის 3მმ-იანი და რეზინის 8 მმ-იანი ფენები.



სურ. 18. ბალისტიკური ტესტირებისათვის მომზადებული ჯავშან ფილები:
 1- $TiB_2-TiC-Ni$, 2- B_4C-SiC , 3- $TiB_2-TiC-SiC-FeNi$, 4- $TiB_2-TiC-SiC-FeNi$, 5-
 $TiB_2-TiC-SiC-Al_4SiC_4$

გამოსაცდელი საჯავშნე ნიმუში



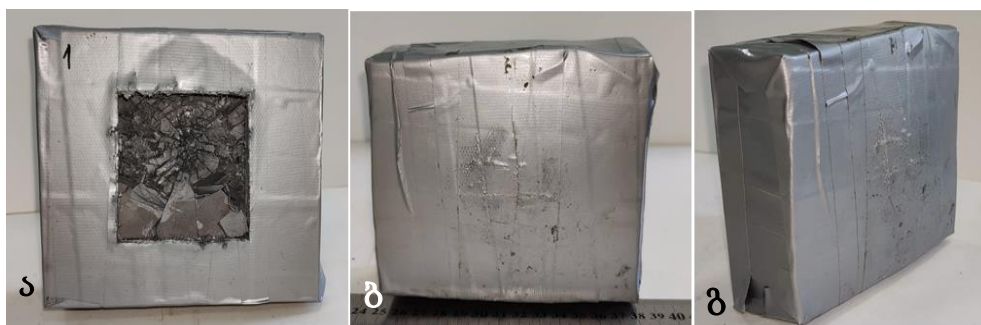
სურ. 19. საჯავშნე ფილა დამცავ ალუმინის ჩარჩოსა, ბაზალტის, კაპრონის და რეზინის სადებთან ერთად.

ცხრილი 4. ბალისტიკური ტესტირებისათვის გამზადებული ნიმუშების მონაცემები და ტესტირების შედეგები.

ნიმუშის #	შემადგენლობა	წონა , გ	ერთეული ფართის წონა, გ/სმ ²	შედეგი	BFS (Max44mm)
1	TiB ₂ -TiC-Ni	159	4.27	გააჩერა ტყვია	<3 მმ
2	B ₄ C-SiC	92.5	2.33	გახვრიტა	~
3	TiB ₂ -TiC-SiC-FeNi ფოროვანი	81	3.24	გახვრიტა ბოლომდე	~
4	TiB ₂ -TiC-SiC-FeNi აწყობილი ფირფიტებისაგან	70	3.8	გახვრიტა ბოლომდე	~
5	TiB ₂ -TiC-SiC-Al ₄ SiC ₄	105	2.73	გააჩერა ტყვია	≈15 მმ

გამოცდის წინ ჯავშან ნაკეთობები შეიფუთა სპეციალური წებოვანი ლენტების საშუალებით. ბალისტიკური ტესტირება ჩატარდა სტუ-ს ბაზაზე არსებულ ტირში, უსაფრთხოების შესაბამისი ნორმების დაცვით. გასროლა განხორციელდა 25 მ-ის მანძილიდან, იარაღით-Tikka T3x -Tac. A1 (ლულის

სიგრძე: 20"). გამოყენებული იყო ვინჩესტერის 308 კალიბრიანი ტყვია, მონაცემებით: 7,62x51, FMJ 180 გრენი, წონა-11,7 გ, სიჩქარე-800 მ/წმ. ცხრილში 4 მოცემულია გამოსაცდელად გამზადებული ნიმუშების მონაცემები და ბალისტიკური ტესტირების შედეგები. 5 სხვადასხვა ნაკეთობიდან ტყვიის შეჩერება მოახერხა 2-მა ნიმუშმა. ნიმუში #1 შემადგენლობით $TiB_2-TiC-Ni$ აღმოჩნდა ყველაზე მდგრადი მოცემული ტყვიის მიმართ. სურათზე 20 მოყვანილია აღნიშნული ნიმუშის წინა და უკანა მხარის ფოტოსურათები ტესტირების შემდგომ. სურ. 20 ა-დან ნათლად ჩანს დამსხვრეული საჯავშნე ფილა, რომელმაც სრულად გაანეიტრალა ტყვიის ენერგია, რის გამოც უკანა მხრიდან (სურ. 20 ბ, გ.) გამოზნექილობა ოდნავ შესამჩნევია. გაიზომა უკანა მხარის ანაბეჭდის პარამეტრი (BFS-Back Face Signature), რომელიც არ აღემატება 3 მმ-ს. აღსანიშნავია რომ ნატოს სტანდარტით (NIJ standart-0101.06) აღნიშნული პარამეტრის დასაშვები მაქსიმალური სიდიდეა 44მმ. ასევე კარგი შედეგი აჩვენა ნიმუში #5 (სურ. 21), შემადგენლობით: $B_4C-TiB_2-SiC-Al_4SiC_4$. ამ შემთხვევაშიც ტყვიის ენერგია შთანთქა ფილამ, თუმცა უკანა ანაბეჭდის სიდიდე უფრო მაღალია ≈ 15 მმ, პირველ ნიმუშთან შედარებით.



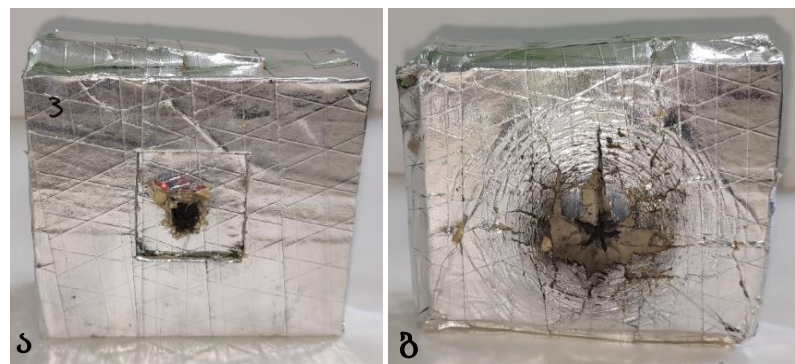
სურ. 20. ნიმუში #1- $TiB_2-TiC-Ni$. ა: წინა მხარე.
ბ: უკანა მხარე. გ: გვერდხედი

ნიმუში #3 და #4 მიღებულია ერთიდაიგივე შემადგენლობით $TiB_2-TiC-SiC-FeNi$, თუმცა სხვაობა მდგომარეობს საჯავშნე ფილის სტრუქტურაში. კერძოდ ნიმუში #3-ში ჩასმულია მთლიანი ფირფიტა (სურ.22), ხოლო ნიმუში #4 აწყობილია მცირე ზომის ფირფიტებისაგან (სურ.23). აღნიშნული წყობა

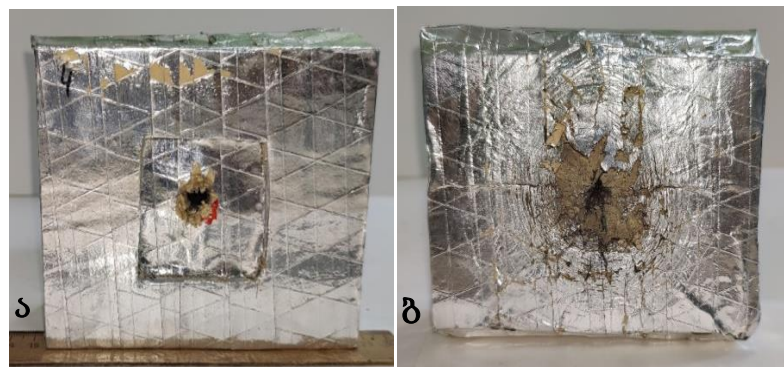
სქემატურად გამოსახულია სურ. 12-ზე. ამ ნიმუშების დაბალმა სიმკვრივემ განაპირობა მათი ცუდი ბალისტიკური მაჩვენებელი. შემდგომი სამუშაოები მიმართული იქნება ამ კომპოზიციის მაქსიმალურად შეცხოვისაკენ, რათა ჩატარდეს ნიმუშების განმეორებითი ტესტირება. აღწერილი ბალისტიკური ტესტირება აკმაყოფილებს ნატოს სტანდარტის (NIJ standart-0101.06) მესამე ტიპით გათვალისწინებულ მოთხოვნებს.



სურ. 21. ნიმუში #5- $TiB_2-TiC-SiC-Al_4SiC_4$. ა: წინა მხარე.
ბ: უკანა მხარე. გ: გვერდხედი



სურ.22. სურ. ნიმუში #3- $TiB_2-TiC-SiC-FeNi$ (მთლიანი ფილა):
ა- წინა მხარე. ბ- უკანა მხარე



სურ.23. ნიმუში #4- $TiB_2-TiC-SiC-FeNi$ (აწყობილი ფილა):

ა- წინა მხარე. ბ- უკანა მხარე

დასკვნები

1. შემუშავებული და დამზადებულია ახალი ტიპის კომპოზიციური მასალების ნიმუშები TiB_2 - TiC - SiC ფუძით, სადაც მალეგირებელ ნაერთებად გამოყენებულია Al_8SiC_7 , Al_4SiC_4 , $AlMgB_{14}$, $Ti_3Al_{0.5}Si_{0.5}C_2$ და $Fe-Ni$ კომპოზიციები;
2. გამოკვლეულია შემუშავებული კომპოზიციური მასალების ფიზიკო-მექანიკური თვისებები;
3. კომპოზიციური მასალების სტრუქტურული თავისებურებების დასადგენად შემუშავებულია შლიფის მომზადების ტექნოლოგია;
4. შემუშავებულია ახალი ტიპის ფენოვანი აგებულების საჯავშნე ფილის კონსტრუქცია;
5. დამზადდა შესაბამისი ფილები ბალისტიკური ტესტირებისათვის
6. ბალისტიკური ტესტირების შედეგად გამოიკვეთა კომპოზიციები რომელთა გამოყენებაც ცალსახად შესაძლებელი იქნება საჯავშნე ნაკეთობებში.

აპრობაცია.

- ნაშრომის მნიშვნელოვანი საკითხები წარმოდგენილი იყო ინფორმატიკის და მართვის სისტემების ფაკულტეტის თემატურ სემინარებზე
- 17th Advanced Nano Materials Conference, 2021 July 22 – 24, Aveiro, Portugal – ANM 2021 (მოწინავე ნანომასალების მე-17 კონფერენცია, 2021 წლის 22 – 24 ივლისი, ავეირო, პორტუგალია – მნმ 2021) – ამ კონფერენციაზე წარმოსადგენი მოხსენება სტატიის სახით გამოსაქვეყნებლად არის წარდგენილი მაღალრეიტინგულ ჟურნალში Materials Today: Proceedings – იხ. მიმაგრებული ფაილი.

■ 8th International Conference & Exhibition on Advanced & Nano Materials, 2021 August 9 – 11, Ottawa, Canada – ICANM 2021 (მოწინავე და ნანომასალების მე-8 საერთაშორისო კონფერენცია და გამოფენა, 2021 წლის 9 – 11 აგვისტო, ოტავა, კანადა – მნმსკ 2021) – ამ კონფერენციაზე წარმოსადგენი მოხსენება სტატიის სახით გამოსაქვეყნებლად არის წარდგენილი კონფერენციის მასალათა კრებულში, რომელსაც გამოსცემს International Academy of Energy, Minerals and Materials – IAEMM (ენერჯის, მინერალებისა და მასალების საერთაშორისო აკადემია – ემმსა)

გამოქვეყნებული ნაშრომები.

დისერტაციის საკვანძო საკითხები გამოქვეყნებულია შემდეგ შრომებში:

1. L. Nadaraia, N. Jalabadze, L. Khundadze, L. Rurua, M. Japaridze, R. Chedia. Effects of graphene on morphology, fracture toughness, and electrical conductivity of titanium dioxide. *Diamond and Related Materials*, 2021, Volume 114, 108319.
2. Natia Barbakadze, Levan Chkhartishvili, Archil Mikeladze, Otari Tsagareishvili, Ketevan Sarajishvili, Tamar Korkia, Maguli Darchiashvili, Lamara Rurua, Nikoloz Jalabadze, Roin Chedia. Method of Obtaining Multicomponent Fine-Grained Powders for Boron Carbide Matrix Ceramics Production. *Materials Today: Proceedings*, In Press.
3. L. Chkhartishvili, A. Mikeladze, R. Chedia, O. Tsagareishvili, N. Jalabadze, N. Barbakadze, V. Kvatchadze, M. Darchiashvili, K. Sarajishvili, L. Rurua, T. Korkia, R. Tsiskarishvili. Boron carbide based nanocomposites with advanced mechanical properties. *International Academy of Energy, Minerals and Materials*. In Press
4. ლ. რურუა. რკინა-ნიკელის შენადნობის გავლენა კომპოზიციური მასალების მიღებასა და თვისებებზე. *Nano Studies #21*, 2021.

Abstract

In almost all areas of modern industry, traditional materials can no longer meet the requirements placed on them, due to increased necessity to use new materials having combined properties. New generation materials must possess a number of unique properties, such as low density, high strength, heat resistance and much more... At the same time manufacturing process should be easy and cheap. Similar requirements apply to metals and non-metals materials, as well as their combinations. A material obtained by combining two or more materials with different properties is called a composite material. With combination of different combinations of constituent elements it is possible to obtain composite material tailored specific tasks and the industry. Basically, composite materials is a combination of a metal or ceramic matrix reinforced by various elements and compositions.

The present study aimed to obtain composite materials based on carbide and boride compounds of titanium and silicon, reinforced by different high-temperature and plastic materials, in order to use as armor materials. The widely used boride material is titanium diboride, as well as carbides of titanium and silicon. Consequently, TiB₂-TiC-SiC has been selected as a base and matrix of the researched composite materials. Mainly attention has been due to the fact that they are characterized by high melting temperature, high hardness and corrosion-resistance. Different additives and systems of raw materials are used to increase the hardness and strength of composite materials.

Matrix of TiB₂-TiC-SiC composite has been obtained from elements (by reaction $7\text{Ti}+3\text{B}_4\text{C}+3\text{Si}=6\text{TiB}_2+\text{TiC}+3\text{SiC}$) or using desired ratio of TiB₂, TiC, SiC compounds. Composite materials has been produced as a multi-phase matrix and with reinforcement elements. Reinforcement elements have been chosen to reduce brittleness, increase hardness and strength, considering that researched materials were to be used as armor. Mentioned materials have been reinforced by AlMgB₁₄, Al₈B₄C₇, Al₈SiC₇, Al₄SiC₄, Ti₃Al_{0.5}Si_{0.5}C₂, FeNi materials and their combinations. In some cases titanium nitride TiN was also used. Has been developed technology of obtaining armor tiles and their assembling. Initially has been calculated ratio of composite components in order to prepare mixture of precursor element. Appropriate amount of powders of elements (Ti, Al, Si, C, B, Mg, Fe, Ni and so on...) or compounds (TiB₂, TiC, SiC, B₄C, AlMgB₁₄ and so on...) have been mixed and prepared for synthesis.

The sample have been sintered by spark-plasma synthesis/sintering (SPS) method. The sintering has been performed in a vacuum, in a laboratory-made device. In order to prevent the release of low-temp. elements/compounds from the system, the pressure and temperature have been adjusted accordingly. Density and porosity have been determined of samples obtained after sintering process. Hydrostatic method has been used for density measurements. Hardness tests have been conducted by Vickers micros-hardness method. Morphology and microstructure have been investigated by optical (LEITZ WETZLAR) and scanning

electron (SEM-JEOL JSM-6510LM) microscopes. Phase and elemental analysis have been performed by X-ray diffractometer XZG 4A.

This research also aimed to design armor tiles from the developed composite materials and their ballistic examination. Composite materials with low density, high strength and toughness were selected for the construction of armor tiles. Mainly, armors are made by one whole plate, customized on human body or combat vehicle. While elite military corps uses armors made from the small rectangular or hexagonal shaped low-weight tiles. Armor tiles with size-50X50mm and 8-10mm thick are usually used for ballistic testing. Making a plate of this size is associated with high energy costs and technical difficulties such as uneven sintering. An anisotropic temperature distribution through the sample body leads to the insufficient density and hardness.

To solve this problem, relatively small plates were sintered and used to assemble an armor plate of appropriate size. Different three-layer armor tile has been obtained, which was assembled from 2 different size plates (8pieces-24x24x3mm and 9pieces-16x16x3 mm). The first and third layers were assembled from 4pieces of large plate, while the middle layer consisted of 9pieces of small plate. The edges of the previous layer were overlapped by each subsequent layer. Assembling the tile with this method will also allow us to construct the plates using different materials. With different layouts of materials it is possible to achieve the optimal configuration.

Ballistic testing was conducted at the GTU-based shooting range in compliance with required safety standards. The conducted ballistic testing meets the requirements of the NATO standard-NIJ standart-0101.06 typeIIIA. Five different samples were tested and two of the appeared to be bullet resistant. The sample TiB₂-TiC-Ni was found to be the most resistant to the used bullets, which could fully neutralize bullet energy and sample showed back face signature (BFS) less than 3mm. Also good results showed sample made by B₄C-TiB₂-SiC-Al₄SiC₄. In this case BFS was around 15mm. According to the NIJ standart maximum allowed BFS is 44mm.

Results of ballistic testing showed the compositions that definitely can be used for armor application.