

# სპეცდანიშნულების ლითონკერამიკული მასალების თმს<sup>1</sup>-ელექტროგლინვისას დეფორმაციის კერაში სინთეზირებული მასალის დენადობის მოდელირებით მასათა დენადობის კვლევა და მის საფუძველზე სინთეზისა და გლინვის სიჩქარეთა კორექტირება

## **ზაქარია მელაშვილი**

ფერდინანდ თავაძის მეტალურგიისა და მასალათმცოდნეობის ინსტიტუტის  
ლითონური მასალების წნევით დამუშავების  
ლაბორატორიის უფროსი, უფროსი მეცნიერ თანამშრომელი,  
ტექნიკურ მეცნიერებათა აკადემიური დოქტორი

## **თეიმურაზ ნამიჩიშვილი**

ფერდინანდ თავაძის მეტალურგიისა და მასალათმცოდნეობის ინსტიტუტის  
დირექტორის მრჩეველი სამეცნიერო დარგში,  
ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორი

## **ზურაბ ასლამაზაშვილი**

ფერდინანდ თავაძის მეტალურგიისა და მასალათმცოდნეობის ინსტიტუტის თმს  
ლაბორატორიის მთავარი მეცნიერ თანამშრომელი,  
ტექნიკურ მეცნიერებათა აკადემიური დოქტორი

## **გიორგი პარუნაშვილი**

ფერდინანდ თავაძის მეტალურგიისა და მასალათმცოდნეობის ინსტიტუტის  
ლითონური მასალების წნევით დამუშავების  
ლაბორატორიის მკვლევარი მთავარი სპეციალისტი

## **მიხეილ ჩიხრაძე**

ფერდინანდ თავაძის მეტალურგიისა და მასალათმცოდნეობის ინსტიტუტის თმს  
ლაბორატორიის უფროსი მეცნიერ თანამშრომელი,  
ტექნიკურ მეცნიერებათა აკადემიური დოქტორი

## **გიორგი ბასილაია**

ფერდინანდ თავაძის მეტალურგიისა და მასალათმცოდნეობის ინსტიტუტის  
ლითონური მასალების წნევით დამუშავების ლაბორატორიის მკვლევარი სპეციალისტი

## **აბსტრაქტი**

სამუშაოში განხილულია თმს-ელექტროგლინვით Ti-B და Ti-BN სისტემის ფუძეზე, ლითონკერამიკული მასალების პლასტიკური დეფორმაციისას, მასათა დინების კვლევა. თერმოდინამიკური გათვლებით განსაზღვრულია კაზმების ოპტიმალური შემადგენლობა და სინთეზზე მოქმედი პარამეტრები. მოყვანილია, დეფორმაციის კერაში, გარდამავალი პროცესისას, შესვლის კვეთიდან გამოსვლის კვეთამდე კაზმის სიმკვრივის განმსაზღვრელი კორექტირებული ემპირიული ფორმულა. გაანალიზებულია ე.წ. "უარყოფითი" გამოჭიმვის მოვლენა და მის საფუძველზე განსაზღვრულია სინთეზირებული მასალის სიგრძის მატება სხვადასხვა მოჭიმვის რეჟიმებსა და კაზმის სიმკვრივის ცვლილებისას. დეფორმაციის კერამდე, სინთეზის წვის ფრონტის კვეთის მუდმივი დაშორების პირობიდან გამომდინარე (დაყოვნების დროის მუდმივობა), გათვლილია გლინვის სიჩქარის ცვლილება სინთეზის სხვადასხვა სიჩქარისას.

### **საკვანძო სიტყვები:**

ჯავშანკერამიკა, სიმკვრივე, თვითგავრცელებადი მაღალტემპერატურული სინთეზი, ელექტროგლინვა, კომპაქტირება, მასათა დენადობა, გლინვის სიჩქარე, გლინების ბრუნვათა რიცხვი

1 თვითგავრცელებადი მაღალტემპერატურული სინთეზი

# **Study of the Mass Flow by Modeling the Flow of the Synthesized Material in the Deformation Center during SHS<sup>2</sup>-Electrical Rolling of Special Purpose Metal-Ceramic Materials and Relevant Adjustment of the Synthesis and Rolling Speeds**

## **Zaqaria Melashvili**

Head of Metal Materials Pressure Processing Laboratory,  
Senior Research Scientist,  
LEPL - Ferdinand Tavadze Metallurgy and Materials Science Institute,  
Doctor of Technical Science

## **Teimuraz Namicheishvili**

Scientific Advisor of Director,  
Ferdinand Tavadze Metallurgy and Materials Science Institute,  
Doctor of Technical Science

## **Zurab Aslamazashvili**

Chief Research Scientist of SHS Laboratory,  
Ferdinand Tavadze Metallurgy and Materials Science Institute,  
PhD in Technical Sciences

## **Giorgi Parunashvili**

Researcher-Chief Specialist of Metal Materials Pressure Processing Laboratory, Ferdinand Tav-  
adze Metallurgy and Materials Science Institute

## **Mikheil Chikhradze**

Senior Research Scientist of SHS Laboratory,  
Ferdinand Tavadze Metallurgy and Materials Science Institute,  
PhD in Technical Sciences

## **Giorgi Basilaia**

Research Specialist of Metal Materials Pressure Processing Laboratory,  
Ferdinand Tavadze Metallurgy and Materials Science Institute

## **Abstract**

The study of mass flow during plastic deformation of metal-ceramic materials on the basis of Ti-B and Ti-BN system with SHS-electrical rolling is discussed in the work. Thermodynamic calculations determine the optimal composition of the cells and the parameters affecting the synthesis. A corrected empirical formula for determining the density of the case in the center of deformation, during the transition from the entry section to the exit section, is given. The so-called “negative” stretching event is analyzed and the length increase of the synthesized material is determined on the basis of different stretching regimes and changes in case density. Based on the condition of a constant distance of the intersection of the synthesis combustion front to the center of deformation (constant delay time), the change in the rolling speed at different synthesis speeds is calculated.

### **Keywords:**

Armor ceramics, density, self-propagating high-temperature synthesis, electrical rolling, compaction, mass flow, rolling speed, number of rotations of rolls

---

2 Self-propagating high-temperature synthesis

## შესავალი

თანამედროვე ტექნიკის განვითარება მოითხოვს მაღალი ხარისხის სპეცთვისებების მასალებს, რომელიც მოიცავს ერთდროულად სხვადასხვა აგრესიული გარემოსადმი წინააღმდეგობას (კოროზია-მედეგობა, ცვეთამედეგობა და სხვა), გამორჩევიან მაღალი მექანიკური თვისებებით (დარტყმამედეგობა, სისალე, სიმტკიცე) და ავლენენ მდგრადობას მაღალი ტემპერატურებზე ექსპლუატაციისას (მზურვალ-მედეგობა, ხენჯმედეგობა). ასეთ მასალებს მიეკუთვნება ლითონკერამიკული და კერამიკული, ერთ-შრიანი და მრავალშრიანი, ფენოვანი, გრადიენტული თვისებების მქონე მასალები, რომელთა მიღების მეთოდები თმს წნეხვით, ლიტერატურაში ფართოდაა განხილული. ზემოთ მოყვანილი თვისებების, შეუზღუდავი გრძივი და გაზრდილი განივი გაბარიტების ლითონკერამიკული და კერამიკული ფილების მიღების შესაძლებლობას იძლევა ფ.თავაძის მეტალურგიისა და მასალათმცოდნეობის ინსტიტუტში დამუშავებული თვითგავრცელებადი მაღალტემპერატურული სინთეზისა (თმს) და ელექტროგლინვის შერწყმული პროცესი<sup>1</sup>. ამ პროცესის სირთულიდან გამომდინარე სინთეზირებული მასის ძვრითი დეფორმაციისა და სასურველი ხარისხის კომპაქტირებისათვის საჭიროა თხიერი ფაზა, ამიტომ ასეთი ფილების მისაღებად შერჩეულია Ti-B და Ti-BN სისტემის ფუძის ნაერთები, რომლებიც აკმაყოფილებენ დაგეგმილ თვისებებს. ამ ნაერთების სინთეზისას წარმოიქმნება TiB, TiB<sub>2</sub>, TiN და Ti<sub>2</sub>N მარცვლები და ტიტანის თხიერი ფაზა. კომპაქტირებისას, ეს უკანასკნელი ასრულებს შემკვრელისა და ე.წ. საპოხის როლს.

თმს პროცესის თერმოდინამიკური ანალიზი საშუალებას იძლევა გამოვთვალოთ წვის პროდუქტების ტემპერატურა და შემადგენლობა, იმ დაშვებით, რომ პროცესი ადიაბატურია და სინთეზის პროდუქტებში დამყარებულია სრული ქიმიური წონასწორობა.

## თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევები

ჩატარებული თერმოდინამიკური გათვლებით შეირჩა საკაზმე ნარევის შემადგენლობა, კერძოდ:

Ti-B სისტემისათვის: Ti-75%, B-25%; Ti-80%, B-20%;

Ti-B-Cu სისტემისათვის: Ti-70%, B-26%, Cu-4%; Ti-75%,

Ni-Ta-Ni-Cr-C სისტემისათვის: Ti-20%, Ta-51,9%, Ni-10%, Cr-18%, C-0,1%;

Ti-10%, Ta-61,9%, Ni-10%, Cr-18%, C-0,1%

თმს-ელექტროგლინვით ხარისხიანი ფილების მიღების პროცესზე (მაღალი:სისალე,კოროზიამედეგობა,ცვეთამედეგობა,ბალისტიკური დარტყმამედეგობა და დაბალი ფორიანობა) მოქმედებს შემდეგი პარამეტრები:

1. კაზმის დისპერსიულობა, გამოშრობის ხარისხი, აქტივიზაცია და არევის ხარისხი;
2. ცივად წინასწარი დაბრიკეტების ძალები;
3. კონტეინერში ბრიკეტების განლაგება;
4. კონტეინერის ზომები.

სინთეტიკური კომპოზიციური კერამიკული მასალის (სკკმ) სინთეზი ხორციელდება ტექნოლოგიური სქემის მიხედვით, რომლის პირველი ეტაპი მოიცავს:

1. საწყისი კომპონენტების გამოშრობას;
2. კაზმის დოზირებას;
3. კომპონენტების შერევას;
4. კაზმის წინასწარი დაწნეხვას - ნიმუშის ფორმირებას;

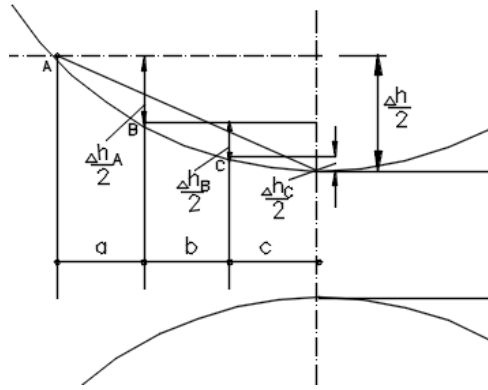
დიდი განივი გაბარიტებისა და შეუზღუდავი სიგრძის ფილების მისაღებად შემუშავებული თმს-ელექტროგლინვის პროცესის ტექნოლოგიური სქემების დასამუშავებლად საჭიროა სინთეზირებული მასის დენადობის კანონზომიერების კვლევა დეფორმაციის კერაში.

კვლევებმა აჩვენა, რომ თმს -ელექტროგლინვის პროცესში ძირითადი ტექნოლოგიური პარამეტრები განიცდიან მოსალოდნელზე მეტ ცვლილებებს<sup>2</sup>. მაგალითად, თმს-ელექტროგლინვის პროცესში, კომპაქტური ლითონების გლინვისაგან განსხვავებით, ბლანტი, ცხელი სინთეზირებული მასალის გამოჭიმვა ხორციელდება არა მარტო გლინვის მიმართულეებით, არამედ საწინააღმდეგო მიმართულეებითაც. ამ მოვლენის შესასწავლად, დეფორმაციის კერას მთელ სიგრძეზე წარმოსახვით ვყოფთ თანაბარი სიგრძის მონაკვეთებად. თითოეული უბნის წინა და უკანა კვეთები განიხილება

1 T.Namichishvili, A.Tutberidze, Z.Melashvili, G.Tavadze, Z.Asalmazashvili, G.Oniashvili, G.Zakharov. Method for obtaining inorganic product from powder exothermic chasm, Saqpatenti. Patent P 6541 . LEPL Ferdinand Tavadze Metallurgy and Materials Science Institute, 2016.

2 Melashvili Z, Tutberidze A.,Namichishvili T. ,Asalmazashvili Z., Papava K.,Parunashvili G., Basilaia G. Investigation of the Fluidity of the Synthesized Charge in the Deformation Site on SHS-Electrical Rolling. Bull. Georg. Natl. Acad. Sci., vol. 14, no. 4, 2020

როგორც დეფორმაციის კერაში ნამზადის შესვლისა და გამოსვლის კვეთები (სურ.1).



სურ.1. დეფორმაციის კერის წარმოსახვით დაყოფა თანაბარი სიგრძის a=b=c მონაკვეთებად

დეფორმაციის პროცესში, ყოველ უბანში, გახურებული ბლანტი პლასტიკური მასალა მიედინება სამი, კუმშვის ვერტიკალური, განივი და გრძივი მიმართულებით. ამასთან, გრძივი დეფორმაცია მიმდინარეობს როგორც გლინვის („დადებითი“ გამოჭიმვა), ისე მის საწინააღდეგო („უარყოფითი“ გამოჭიმვა) მიმართულებით. ეს მოვლენა შემდეგნაირად აიხსნება: ვინაიდან ბლანტი მასის გადინება ძირითადად ნაკლები წინააღმდეგობის მიმართულებით მიმდინარეობს, ჩვენს შემთხვევაში კი, ყოველი წინა უბნის ფორიანობა მეტია შემდგომი უბნის ფორიანობაზე, მასალის გარკვეული ნაწილი სწორედ ამ, ნაკლები წინააღმდეგობის მიმართულებით მიედინება.

დეფორმაციის კერის გასწვრივ საწყისი უბნიდან ბოლო უბანამდე ზოგადად მიმდინარეობს საკაზმე მასალის თანდათანობითი გამკვრივება, მცირდება ე.წ. კერძო  $\Delta h_i$  მოჭიმვა (უბანზე მოქმედი მოჭიმვა). მცირდება აგრეთვე უბნებს შორის მასალათა სიმკვრივის (ფორიანობის) განსხვავება, აქედან გამომდინარე, თანდათანობით იზრდება „დადებითი“ და მცირდება „უარყოფითი“ გამოჭიმვა. „უარყოფითი“ კერძო გამოჭიმვების ჯამი იწვევს ნაგლინის გარკვეულწილად „უარყოფით“ გამოჭიმვას. აქედან, თმს-ელექტროგლინვის პროცესში ნაგლინის გრძივი მიმართულების სრული ნამატი არის „დადებითი“ და „უარყოფითი“ გამოჭიმვების ჯამი.

თმს-ელექტროგლინვისას, დეფორმაციის კერაში, გარდამავალ პროცესში, შესვლის კვეთიდან გამოსვლის კვეთამდე, მოჭიმვების (დეფორმაციის) გავლენით გამკვრივების მნიშვნელობების დასადგენად გამოყენებულია ემპირიული კორექტირებული გამოსახულება:

$$\rho_x = \rho_0 + (\rho_1 - \rho_0) (\epsilon_x / \epsilon)^{(1-0,01L_x)}, \quad (1)$$

სადაც:  $\rho_x$  - სიმკვრივეა სამიებელ კვეთში, გ/სმ<sup>3</sup>;  $\rho_0$  - საწყისი სიმკვრივეა, გ/სმ<sup>3</sup>;  $\rho_1$  - ნაგლინის სიმკვრივეა, გ/სმ<sup>3</sup>;  $\epsilon_x$  და  $\epsilon$  - დეფორმაციის კერის სამიებელი კვეთისა და ჯამური ფარდობითი დეფორმაცია, %;  $L_x$  - დეფორმაციის კერის სიგრძე ნამზადის შესვლის კვეთიდან სამიებო კვეთამდე, მმ.

(1) გამოსახულება გვაძლევს საშუალებას განვსაზღვროთ დეფორმაციის კერის გასწვრივ გაგლინული მასალის ნებისმიერი კვეთის, ფარდობითი დეფორმაციისაგან დამოკიდებული სამიებელი სიმკვრივის მნიშვნელობები. ემპირიული გამოსახულების სანდოობა შემოწმებულია ექსპერიმენტებით Ti-B და Ti-BN სისტემის ფუძეზე ლითონკერამიკული მასალის თმს ელექტროგლინვისას ცვლადების ფართო დიაპაზონში. ფარდობითი ცდომილება შეადგინა 2-4%.

თმს-ელექტროგლინვისას, დამყარებულ პროცესში ნაგლინის ბოლო მონაკვეთი (საერთო სიგრძის დაახლოებით 10%) ირღვევა, ან წყდება ძირითად ტანს. ეს აიხსნება იმით, რომ „უარყოფითი“ გადინება ცვლის ნამზადის ელექტროგლინვის ტემპერატურულ რეჟიმს. „უარყოფითი“ გადინების მაღალ ტემპერატურის სინთეზირებილი კაზმი მასაგადატანით შეაღწევს რა შეტაცების კვეთის წინ არსებულ კაზმის წვის ზონაში, იწვევს მისი სიმკვრივის გარვეულწილად ზრდას და ახლომდებარე ჯერ აუნთებელი მასის ე.წ. „შეხურების ზონის“ დამატებით გათბობას. ანალოგიურ ზეგავლენას ახდენს ფორებში დაგროვილი მაღალტემპერატურული აირი, რომელიც ფილტრაციული რეჟიმით ინტენსიურად ვრცელდება ნამზადის ამ აუნთებელ ნაწილებსკენ. ამით ადვილდება კაზმის შემდეგი ულუვის ანთების პროცესი, რის გამოც იზრდება წვის ფრონტის გადაადგილების სიჩქარე. წვის ფრონტი თანდათანობით ცილდება გლინებში შეტაცების კვეთს, ამავე დროს ნამზადის ბოლო გადაადგილდება შეტაცების კვეთისაკენ ე.ი. ისინი მოძრაობენ შემხვედრი მიმართულებებით და მათი შეხვედრის კვეთში წყდება სინთეზური წვა, ნამზადის ეს ბოლო მონაკვეთი აღარ ღებულობს დამატებით თბურ ენერგიას, იწყება მისი დაჩქარებული გაცივება და შეტაცების კვეთამდე მიღწევისას ასწრებს გაცივებას თმს ფაზური ჩამოყალიბების ტემპერატურაზე დაბლა, მასალა ხდება არადეფორმირებადი, მყიფე და შემდგომი დეფორმაცია იწვევს მასში ბზარების გაჩენას და ნამზადის რღვევასაც კი<sup>3</sup>.

3 ზ.მელაშვილი, თ.ნამიჩიშვილი, ზ.ასლამაზაშვილი, გ.პარუნაშვილი, გ.ზახაროვი, მ.ჩიხრაძე, კ.პაპავა. მაღალი ბალისტიკური ეფექტიანობის ლითონკერამიკული ფილების მიღების ტექნოლოგიის კვლევა-

ზემოთქმულიდან გამომდინარე ნაგლინის ბოლო მონაკვეთის რღვევის ძირითადი მიზეზი არის გლინვის სიჩქარისა და კაზმის წვის ფრონტის გადაადგილების სიჩქარეთა სინქრონიზაციის დარღვევა, კერძოდ, გლინვის სიჩქარის ჩამორჩენა.

კაზმის წვის ფრონტის გადაადგილების სიჩქარის გლინვის სიჩქარესთან სინქრონიზაციისათვის საჭირო ხდება გლინვის ჩქაროსნული რეჟიმის კორექტირება. გლინვის ისეთი სიჩქარის შერჩევა, რომ ნამზადის ბოლო მონაკვეთი შეტაცების კერას მიადგეს გაზურებულ ბლანტ პლასტიკურ მდგომარეობაში.

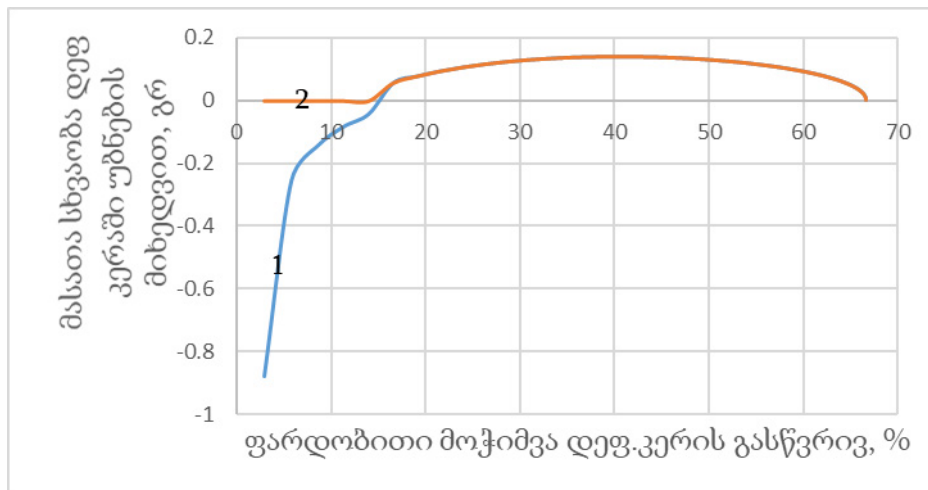
დეფორმაციის კერის გარკვეულ კვეთებში საერთო ჯამურ მოჭიმვაზე დამოკიდებული კერძო  $\Delta h_i$  მოჭიმვების განსაზღვრისათვის, დეფორმაციის კერის გეომეტრიდან გამომდინარე მიღებულია ფორმულა, რომლის საშუალებითაც შესაძლებელია გამკვერივების პროცესის ანალიზი:

$$\Delta h_i = \frac{2i+1}{n^2} \Delta h \quad (2)$$

სადაც: n- პირობითად დაყოფილი უბნების რაოდენობა;  $i = 0 \div (n-1)$ ;  $\Delta h$  – ჯამური მოჭიმვა.

დეფორმაციის კერა არ წარმოადგენს დიდ არეს და სინთეზირებული მასის სტრუქტურული ჩამოყალიბება ხდება მცირე დროში, ამიტომ ბლანტ პლასტიკურ მდგომარეობაში მყოფი მასა განიცდის მრავალმხრივ გადაადგილებას. კომპაქტირების ხარისხის გაზრდის მიზნით, ვირჩევთ კალიბრში გლინვას, რომლის დროსაც განივი გადაადგილება შეზღუდულია. უნდა აღინიშნოს, რომ კომპაქტური ლითონების ცხლად გლინვისგან განსხვავებით, რომლის დროსაც მოქმედებს მოცულობის მუდმივობის კანონი, უგაზო წვისას თმ სინთეზირებული ფორიანი მასალების გლინვისას ადგილი აქვს მასათა მუდმივობის პირობებს. ე.ი. დეფორმაციის კერაში შესვლის კვეთსა და გამოსვლის კვეთებში მიწოდებული კაზმისა და ნაგლინი მასალის მასები თითქმის უცვლელია. მოცულობები მცირდება დეფორმაციის კერის გასწვრივ და კაზმის კომპაქტირების ხარჯზე იზრდება მასალის სიმკვრივე. Ti-B და Ti-BN სისტემის ფუძეზე  $TiB_{0.6}$ ,  $TiB_2$ , TiBN კაზმების გლინვისათვის, სხვადასხვა საწყისი ნიმუშის და მისაღები მასალის გაბარიტული ზომებისათვის, აგრეთვე კაზმის სხვადასხვა სიმკვრივის მნიშვნელობებისათვის, დეფორმაციის კერის თითოეული უბნისათვის განისაზღვრა: კერძო მოჭიმვები, კვეთის მოცულობები, სიმკვრივეები, უბნების მიხედვით შესაბამისი გამკვერივებისათვის (კომპაქტირებისათვის) საჭირო და წარმოსახვით მიწოდებული სინთეზირებული კაზმის მასა და ამ მასებს შორის სხვაობა, რომელიც შემდგომ ნაწილდება ნაგლინის სიგრძეზე გამოჭიმვის სახით.

ცივად დაბრიკებული  $\rho_0=2,50$  გ/სმ<sup>3</sup> სიმკვრივის,  $24 \times 210 \times 350$ მმ<sup>3</sup>-ის ზომის კონტეინერში მოთავსებული TiBN კაზმის, 66,7% ფარდობითი დეფორმაციისას გაგლინული მასალის თეორიული ანგარიშის მონაცემები მოყვანილია სურ.2.



სურ.2. გარდამავალი პროცესისას, წარმოსახვით მიწოდებული და დაკომპაქტირებული მასალის მასათა სხვაობა დეფორმაციის კერაში პირობითად დაყოფილი უბნების მიხედვით (1-პირველადი ანგარიშით, 2-კორექტირებული).

სურ.2-დან ჩანს, რომ გლინვის გარდამავალ პროცესში პირველიდან მეხუთე უბნამდე მიწოდებულ და დაკომპაქტირებული მასალის მასათა სხვაობა უარყოფითი მნიშვნელობისაა (მრუდი 1), ანუ დაკომპაქტირებული მასალის მასა აღემატება მიწოდებულ მასალის მასას, რაც შეუძლებელია. ეს განპიროვნებულია იმით, რომ მასალის დეფორმაციის კერაში შესვლის მომენტიდან კალიბრის შევსებამდე ხდება პლასტიკური მასის თავისუფალი განივი გადაადგილება. იზრდება უბნის მოცულობა და არსებული მოჭიმვა ვერ უზრუნველყოფს შესაბამის სიმკვრივის ჩამოყალიბებას. ეს კი თავისთავად დამუშავება. სსიპ-დავით აღმაშენებლის სახ. საქ. ეროვნ. თავდაცვის აკადემიის სამეცნ. პრაქტ. კონფერენციის ნაშრომთა კრებ. გორი, 2021, გვ. 61-68

ამცირებს კომპაქტირების ხარისხს. ამ დროს (1) გამოსახულებით გამოთვლილი სიმკვრივის მნიშვნელობა აცდენილია რეალურს და საჭიროა მისი კორექტირება. ამ შემთხვევაში მიწოდებული და დაკომპაქტირებული მასები ტოლია და შესაბამისად მოსალოდნელია მასალის დაბალი სიმკვრივე. მეექვსე უბნიდან, ყუთოვანი კალიბრი შევსებულია და მისი გვერდები ზღუდავს მასის გვერდით გადაადგილებას, შემდგომი უბნების მოცულობები მცირდება და კომპაქტირების ხარისხიც იზრდება (მრუდი 2). ჭარბი მასა ნაკლები წინააღმდეგობის გამო გადაადგილდება მეტად ფორიანი და ნაკლები სიმკვრივის მქონე უკანა უბნებისაკენ და მაქსიმალურ მნიშვნელობას აღწევს დამყარებული პროცესისას. დამყარებულ პროცესში ჭარბი მასა თანდათანობით იზრდება და როგორც ზემოთ იქნა აღნიშნული აწევა რა შეთბობის უბანს, ზრდის სინთეზის ტალღის გადაადგილების სიჩქარეს და ანთების ზონა თანდათანობით ცილდება დეფორმაციის კერაში შესვლის კვეთს, ანუ გვიანდება სინთეზირებული მასალის დეფორმაცია. თმს-ელექტროგლინვის პირობიდან გამომდინარე, რომელიც ითვალისწინებს სინთეზისა და გლინვის სიჩქარეთა ტოლობას, საჭიროა ანთების კვეთიდან დეფორმაციის კერაში შესვლის კვეთამდე, მასალის სიგრძის ზრდის შესაბამისად, გაზრდილი იქნას გლინვის სიჩქარე. სხვადასხვა რეჟიმებისათვის, ნამზადის სიგრძეზე, მასალის სიგრძის მატება მოცემულია ცხრ.1 და 2-ში.

ცხრ.1. TiBN მასალების თმს ელექტროგლინვისას სიგრძეთა ნამატი და სიმკვრევები, კაზმის სხვადასხვა სიმკვრივისას და დეფორმაციის რეჟიმებისას, მოსალოდნელი ნაგლინი მასალის სიმკვრივე  $\rho_1=5,2$  გ/სმ<sup>3</sup>.

ε%	კაზმის სიმკვრივე $\rho_0=2,10$ გ/სმ <sup>3</sup> ფორიანობა 59,6%				კაზმის სიმკვრივე $\rho_0=2,49$ გ/სმ <sup>3</sup> ფორიანობა 52,1%				კაზმის სიმკვრივე $\rho_0=3,05$ გ/სმ <sup>3</sup> ფორიანობა 41,3%			
	$\rho_1$ გ/სმ <sup>3</sup>	ფორ II.%	Δl სმ	$\rho_1$ კორექტ გ/სმ <sup>3</sup>	$\rho_1$ გ/სმ <sup>3</sup>	ფორ II.%	Δl სმ	$\rho_1$ კორექტ გ/სმ <sup>3</sup>	$\rho_1$ გ/სმ <sup>3</sup>	ფორ II.%	Δl სმ	$\rho_1$ კორექტ გ/სმ <sup>3</sup>
50	4,67	-5	10,2	4,01	4,73	9,1	0,2	-	4,80	7,7	+7,5	-
52,4	4,73	-4,9	9,1	4,21	4,78	8,1	1,5	-	4,84	6,9	+9,2	-
54,5	4,79	-2,8	7,9	4,41	4,83	7,1	2,9	-	4,88	6,2	+10,9	-
56,5	4,83	-1,6	7,1	4,61	4,87	6,4	4,3	-	4,91	5,6	+12,7	-
58,3	4,88	-0,5	6,2	4,81	4,91	5,6	5,7	-	4,94	5,0	+14,5	-
61,9	4,96	+2,1	4,6	-	4,98	4,2	8,8	-	5,00	3,9	+18,5	-
63,6	5,00	+3,6	3,9	-	5,01	3,7	10,7	-	5,02	3,5	+20,7	-
65,2	5,04	+5,0	3,8	-	5,04	3,8	12,5	-	5,05	2,9	+23,0	-
66,7	5,07	+6,5	2,5	-	5,07	2,5	14,2	-	5,07	2,5	+25,3	-

ცხრ.2. TiB მასალების თმს ელექტროგლინვისას სიგრძეთა ნამატი და სიმკვრევები კაზმის სხვადასხვა სიმკვრივისას და დეფორმაციის რეჟიმებისას მოსალოდნელი ნაგლინი მასალის სიმკვრივე  $\rho_1=4,52$  გ/სმ<sup>3</sup>

ε%	კაზმის სიმკვრივე $\rho_0=2,0$ გ/სმ <sup>3</sup> ფორიანობა 55,8%				კაზმის სიმკვრივე $\rho_0=2,5$ გ/სმ <sup>3</sup> ფორიანობა 44,7%				კაზმის სიმკვრივე $\rho_0=2,67$ გ/სმ <sup>3</sup> ფორიანობა 40,9%			
	$\rho_1$ გ/სმ <sup>3</sup>	ფორ II.%	Δl სმ	$\rho_1$ კორექტ გ/სმ <sup>3</sup>	$\rho_1$ გ/სმ <sup>3</sup>	ფორ II.%	Δl სმ	$\rho_1$ კორექტ გ/სმ <sup>3</sup>	$\rho_1$ გ/სმ <sup>3</sup>	ფორ II.%	Δl სმ	$\rho_1$ კორექტ გ/სმ <sup>3</sup>
50	4,16	8,0	-2,9	3,82	4,22	6,6	+4,6	-	4,25	6,0	+7,0	-
52,4	4,21	6,9	-1,7	4,01	4,26	5,8	+6,2	-	4,28	5,3	+8,8	-
54,5	4,25	6,0	-0,4	4,20	4,30	4,9	+7,7	-	4,32	4,4	+10,4	-
56,5	4,29	5,1	+0,8	-	4,33	4,2	+9,3	-	4,35	3,8	+12,4	-
58,3	4,33	4,2	+2,0	-	4,36	3,5	+11,0	-	4,37	3,3	+14,0	-
61,9	4,40	2,7	+4,9	-	4,42	2,2	+14,6	-	4,42	2,2	+18,0	-
63,6	4,43	2,0	+6,5	-	4,44	1,8	+16,7	-	4,45	1,6	+20,1	-
65,2	4,46	1,3	+8,1	-	4,47	0,7	+18,7	-	4,47	0,7	+22,3	-
66,7	4,49	0,7	+9,6	-	4,49	0,7	+21,8	-	4,49	0,7	+24,9	-

ცხრ.1 და 2-დან ჩანს, რომ საწყისი სინთეზირებული მასალის დაბალი სიმკვრივისა ( $\rho_0=2,10$  და  $\rho_0=2,0$  გ/სმ<sup>3</sup>) და ფარდობითი დეფორმაციისას ( $\epsilon=50-58,3\%$  და  $\epsilon=50-54,5\%$ ) ნაგლინის სიგრძე იკლებს. ეს ნიშნავს იმას, რომ აღნიშნული პარამეტრები ვერ უზრუნველყოფენ მოსალოდნელი სიმკვრივის მნიშვნელობებით კომპაქტირებას. ე.ი. გაგლინული მასალის სიმკვრივე მოსალოდნელზე დაბალია. რეალური სიმკვრივის განსაზღვრისათვის საჭიროა მათი კორექტირება. რეალური სიმკვრივის მნიშვნელობები მოყვანილია ცხრილის ბოლო გრაფაში. სხვა დანარჩენ შემთხვევაში აღინიშნება სიგრძის ნამატი და როგორც ზემოთ იქნა აღნიშნული, ეს ნამატი ნაწილდება სინთეზირებული, გასაგლინი მასალის სიგრძეზე.

ამრიგად, სინთეზირებული მასის ელექტროგლინვის პროცესისას საჭიროა ტექნოლოგიური პარამეტრების (გეომეტრიული, ჩქაროსნული და ძალოვანი) გათვალისწინებით, გლინვის სიჩქარის ცვლილება, რომ არ დაირღვეს სიჩქარეთა ბალანსი.

თმს-ელექტროგლინვისას აუცილებელი პირობაა თმს და ელექტროგლინვის სიჩქარეთა თანხვედრა, ანუ  $V_{სინ} = V_{გლ}$ ,

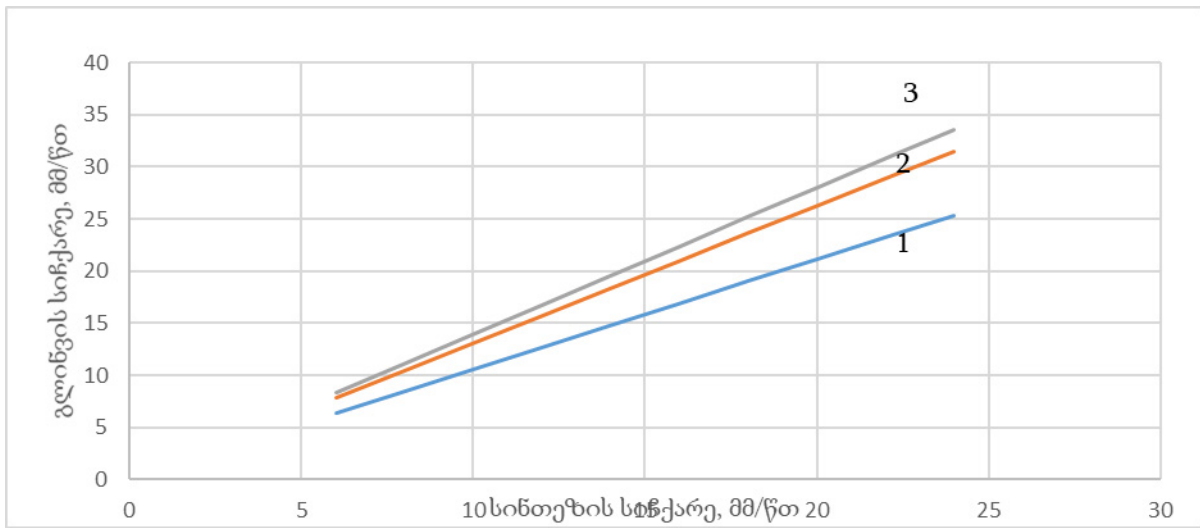
გასაგლინი  $L_0$  სიგრძის ნამზადის სინთეზირების და გლინვის დრო ტოლია

$$t_{სინ} = L_0 / V_{სინ} \quad t_{გლ} = L_0 / V_{გლ}$$

ნამზადის სიგრძის მატება ხდება სინთეზის შემდეგ და რადგან  $t_{სინ} = t_{გლ} = (L_0 + \Delta L) / V_1$ , ამიტომ ნამზადის ნამეტი სიგრძის, გლინვის სიჩქარე იქნება:

$$V_1 = (L_0 + \Delta L) / t_{სინ} \quad (3)$$

ქვემოთ მოყვანილია სხვადასხვა სინთეზის სიჩქარეზე, კორექტირებული გლინვის სიჩქარეები  $\epsilon=58,3\%$  ფარდობითი მოჭიმვაზე გლინვისას ( ნახ.3):



სურ.3. კორექტირებული გლინვის სიჩქარე, სინთეზის სხვადასხვა სიჩქარისგან დამოკიდებულებით ( $\epsilon=58,3\%$ ); 1- L=370მმ, 2- L=460მმ, 3- L=490მმ,

ცხრ.3-ში მოყვანილია გლინვის სიჩქარის ნამატი სინთეზის სხვადასხვა სიჩქარისგან დამოკიდებულებით ( $\epsilon=58,3\%$ ).

ცხრ.3.გლინვის სიჩქარისა და გლინების ბრუნთა რიცხვის ნამატი სინთეზის სხვადასხვა სიჩქარისგან დამოკიდებულებით ( $\epsilon=58,3\%$ )

ს <sub>სინ</sub> , მმ/წთ	n <sub>გლ</sub> , ბრ/წთ	Δ s, მმ/წმ				Δ n, ბრ/წთ		
		ნაგლინის სიგრძე, L=350მმ	ნაგლინის სიგრძე, L=370მმ	ნაგლინის სიგრძე, L=460მმ	ნაგლინის სიგრძე, L=490მმ	ნაგლინის სიგრძე, L=370მმ	ნაგლინის სიგრძე, L=460მმ	ნაგლინის სიგრძე, L=460მმ
6	0,48	0,35	1,89	2,4	0,03	0,15	0,19	
8	0,64	0,45	2,50	3,19	0,04	0,20	0,26	
10	0,80	0,57	3,14	4,00	0,05	0,25	0,32	
12	0,96	0,67	3,75	4,78	0,05	0,30	0,38	
14	1,12	0,80	4,40	5,60	0,06	0,35	0,45	
16	1,28	0,89	5,01	6,37	0,07	0,40	0,51	
18	1,44	1,07	5,71	7,26	0,08	0,46	0,58	
20	1,60	1,14	6,29	8,00	0,09	0,50	0,64	
22	1,76	1,27	6,93	8,82	0,10	0,57	0,71	
24	1,92	1,34	7,51	9,56	0,11	0,60	0,77	

თმს-ელექტროგლინვის სიჩქარეთა ბალანსის შენარჩუნების მიზნით, აუცილებელია ნამატი გლინვის სიჩქარის გადანაწილება ნამზადის სიგრძეზე. რადგან უგაზო წვისას სინთეზის სიჩქარე მუდმივია, ამიტომ საჭიროა გლინვის სიჩქარე მისი საწყისი მნიშვნელობიდან თანაბრად გაიზარდოს.

## შედეგები

თერმოდინამიკური გათვლებით შერჩეულია კაზმების შემადგენლობა, რომელიც უზრუნველყოფს ხარისხიანი მაღალი სისალისა და დარტყმამდეგი, კოროზიამდეგი, ცვეთამდეგი თვისებების ლითონ-კერამიკული ფილების მიღებას;

-ექსპერიმენტალური კვლევების საფუძველზე შემოთავაზებულია დეფორმაციის კერაში, გარდამავალ ეტაპზე სიმკვრივის განმსაზღვრელი ემპირიული გამოსახულება.

-თეორიული და პრაქტიკული კვლევების საფუძველზე, შესწავლილ და გაანალიზებულ იქნა სპეცდანიშნულების ლითონკერამიკული მასალების თმს-ელექტროგლინვისას, დეფორმაციის კერაში სინთეზირებული მასალის დენადობის მოდელირებით მასათა დენადობის კვლევა და მის საფუძველზე სინთეზისა და გლინვის სიჩქარეთა კორექტირება;

-დადგენილ იქნა სპეცდანიშნულების ლითონკერამიკული ფილების მიღების შემდეგი ტექნოლოგიური სქემა: კაზმების შერჩევა; კაზმების არევა ბურთულებიან წისქვილში 24 საათის განმავლობაში; ცივად დაბრიკეტება ძალებით - 5-100ტ დიაპაზონში; თმს სიჩქარე და მისი ცვლილების შესაბამისი ნამზადის გადაადგილების გრძივი სიჩქარე და გლინების ბრუნვათა რიცხვი; კონტინერი, ზომებით 25x126x210მმ 0,5 მმ სისქის თუნუქის ფურცლიდან

საგლინავი დგანის აწყობისათვის გამოყენებულ იქნა გლინებზე ყუთოვანი კალიბრება და გლინვისათვის შეირჩა ფარდობითი მოჭიმვა 55-66%; გლინვის შემდეგ ხორციელდება ნაგლინის დატვირთვის ზემოქმედების ქვეშ მდორე გაციება.

### გამოყენებული ლიტერატურა

- T.Namicheishvili, A.Tutberidze, Z.Melashvili, G.Tavadze, Z.Asalmazashvili, G.Oniashvili, G.Zakharov. Method for obtaining inorganic product from powder exothermic chasm, Saqpatenti. Patent P 6541 . LEPL Ferdinand Tavadze Metallurgy and Materials Science Institute, 2016;
- Melashvili Z, Tutberidze A.,Namicheishvili T. ,Aslamazashvili Z., Papava K.,Parunashvili G., Basilaia G. Investigation of the Fluidity of the Synthesized Charge in the Deformation Site on SHS-Electrical Rolling. Bull. Georg. Natl. Acad. Sci., vol. 14, no. 4, 2020;
- ზ.მელაშვილი, თ.ნამიჩეიშვილი, ზ.ასლამაზაშვილი, გ.პარუნაშვილი, გ.ზახაროვი, მ.ჩიხრაძე, კ.პაპავა. მაღალი ბალისტიკური ეფექტიანობის ლითონკერამიკული ფილების მიღების ტექნოლოგიის კვლევა-დამუშავება. სსიპ-დავით აღმაშენებლის სახ. საქ. ეროვნ. თავდაცვის აკადემიის სამეცნ. პრაქტ. კონფერენციის ნაშრომთა კრებ. გორი, 2021, გვ. 61-68.