

# საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

დიმიტრი მაჭარაძე

ფენოვანი კომპოზიტის ფოლად ალუმინის მყარ ფაზაში  
შეერთების ტექნოლოგია, დაწნევისა და ელექტრული  
ხურების პირობებში

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად  
წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი

2013 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის  
ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტის  
მეტალურგიის მასალათმცოდნეობის დეპარტამენტის და  
ლითონების წნევიით დამუშავების მიმართულებით

სამეცნიერო ხელმძღვანელები: პროფ. დავით ნოზაძე -----

პროფ. მიხეილ ოქროსაშვილი -----

რეცენზენტები: -----

-----

დაცვა შედგება ----- წლის „-----“, -----, ----- საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის -----

----- ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს

სხდომაზე, კორპუსი -----, აუდიტორია -----

მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 69.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს

ბიბლიოთეკაში, ხოლო ავტორეფერატის - ფაკულტეტის ვებ-გვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი -----

## ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალობა. თანამედროვე მანქანებმშენებლობაში ლითონშემცველი კონსტრუქციების შემცირება, მათი ტექნიკური მახასიათებლების ამაღლება და საიმედოობის გაზრდა, ერთ-ერთ აქტუალურ პრობლემას მიეკუთვნება. ამ მიმართულებით პრიორიტეტულია ლითონური ნაკეთობების სტრუქტურის სრულყოფა, ახალი თაობის ეკონომიური მასალების მიღება-დამუშავების გზით, რომელთაც განეკუთვნებიან ფენოვანი კომპოზიციური მასალებიც. ამდენად, განსხვავებული ფიზიკო-მექანიკური მახასიათებლების მქონე სხვადასხვაგვარი ლითონების შეერთების გზით, ფენოვანი კომპოზიტების მიღება, თანამედროვე მასალათმცოდნეობის აქტუალური პრობლემაა.

რთული ტექნოლოგიური ამოცანების გადაწყვეტისა და საექსპლუატაციო მახასიათებლების ამაღლების მიზნით, სხვადასხვა თვისებების მქონე ლითონების შედუღების (შეკავშირების) პრობლემის წარმატებით გადაჭრა მრავალი მეცნიერისა და ტექნიკური მუშაკის ყურადღების ცენტრშია მოქცეული. სხვადასხვაგვარი ლითონების შეერთების პროცესის შესწავლისას აუცილებელია მთელი რიგი პრობლემების გათვალისწინება, რომლებიც დაკავშირებულია შესაერთებელი ლითონების არაერთგვაროვან ფიზიკო-ქიმიურ თვისებებთან და გარდამავალი (შეერთების) ზონის მოთხოვნილი მახასიათებლების უზრუნველყოფასთან.

ფენოვანი კომპოზიციური მასალები (ფკმ) წარმოადგენენ პერსპექტიულ თანამედროვე კონსტრუქციულ მასალებს, რომლებშიც შესაძლებელია რეალიზებულ იქნას წინასწარ მოთხოვნილი ფუნქციონალური თვისებები. დაკვეთილი ფიზიკო-ქიმიური ფუნქციონალური თვისებების მქონე, კონსტრუქციული მასალების შექმნისას განსაკუთრებული ადგილი უკავია შეზღუდული შედუღებადობის მქონე, სხვადასხვაგვარი ლითონებისგან წარმოებულ კომპოზიციურ ფენოვან ნაკეთობებს. ასეთი სახის ფკმ-ის მიღება, რომელთა რიცხვს მიეკუთვნება ფოლად-ალუმინის ნაკეთობებიც, მოითხოვს შეერთების ზონის ტექნოლოგიური პარამეტრებისგან დამოკიდებული სტრუქტურულ-ფაზური მდგომარეობის დრმა და

საფუძვლიან კვლევას, ასევე შეერთების ზონის სტრუქტურისა და მისი მექანიკური მახასიათებლების კავშირ-ურთიერთობების დადგენას.

სხვადასხვაგვარი მასალების შეერთების აუცილებლობა განპირობებულია ნაკეთობის თითოეული ფენის უნიკალური, განსხვავებული თვისებებით. მაგალითად, ალუმინისა და მისი შენადნობების სხვადასხვა მარკის ფოლადებთან შეერთება იძლევა ალუმინის სიმსუბუქისა და კოროზიამდებობის შერწყმის შესაძლებლობას ფოლადის სიმტკიცესთან. ამით აიხსნება კომბინირებული ფოლად-ალუმინის ფკმ-ის ფართო გამოყენება საავიაციო, კოსმოსურ, ატომურ, ენერგეტიკულ, თავდაცვის და სხვა მრეწველობაში.

განსაკუთრებით დიდია მოთხოვნა მაგნიუმის შემცველ ალუმინის AlMg<sub>6</sub> და ქრომ-ნიკელიანი ფოლადების St<sub>0.5</sub> შენადნობებზე, რომლებიც სხვადასხვა დანიშნულების გადამყვანების სახით, ფართოდ გამოიყენება გემთ, ავია და ავტო მშენებლობებში. ასეთი მასალის გამოყენება რამდენჯერმე ამცირებს შრომატევადობას, კონსტრუქციის მასას და ზრდის მასალის კოროზიამდებობას.

დღეისათვის ავტომობილის ძარის კონსტრუქციის დეტალების შეერთება ძირითადად ხორციელდება მექანიკური პროცესებით, მოქლონვით, კლინჩერით, შეწებებით და წერტილოვანი შედუღებით, რაც სრულად ვერ აკმაყოფილებს სიმტკიცის მოთხოვნებს. ამ პრობლემასთან დაკავშირებით გერმანიაში, ბრაუნშვეიგის ტექნიკურ უნივერსიტეტში, INTAS-ის პროგრამით (ref. Nr 05-114-5449), გამოიცადა სისქით 1,2 მმ-ის AlMg<sub>6</sub>-St<sub>0.5</sub> ფკმ-ის მიღების ტექნოლოგიური ციკლი, შემუშავდა რეკომენდაციები ამ მეთოდით VolkswagenVW-ავტომობილის ძარის და სახურავის ელემენტების შესაერთებლად.

ფ.თავაძის მეტალურგიისა და მასალათმცოდნეობის ინსტიტუტსა და სტუ-ში მიღებულ ფენოვან კომპოზიციურ მასალებზე, DAAD (PKZ:A/09/77/888) გრანტის ფარგლებში ჩატარდა მექანიკური მახასიათებლების გამოცდა და მეტალოგრაფიული კვლევები კლაუსტალის ტექნიკურ უნივერსიტეტში.

ზემოთ მოყვანილი მაგალითები ნათლად მიუთითებენ ფკმ-ის გამოყენების მზარდ ტენდენციაზე, რაც პირდაპირ არის

დაკავშირებული სხვადასხვაგვარი შესაერთებელი ლითონების ნომენკლატურის გაფართოებასა და ტექნოლოგიის შემდგომ დახვეწასთან.

წარმოდგენილი სადისერტაციო ნაშრომი ეძღვნება ფოლად-ალუმინის შეერთების კომბინირებულ მეთოდს, რომელიც წარმოადგენს რამდენიმე აპრობირებული მეთოდის კომბინაციას, კერძოდ: წინაღობით ელექტროკონტაქტური გახურება – დიფუზური შეერთება – პლასტიკური დეფორმაცია – ნორმალიზაცია. ასეთი მიდგომა, აერთიანებს რამდენიმე მეთოდის დადებით ელემენტს, ანეიტრალებს უარყოფით მომენტებს და, როგორც შედეგი, ფკმ-ის ხარისხის გაზრდისა და სორტამენტის გაფართოების საშუალებას იძლევა.

#### მეცნიერული სიახლე:

- ელექტროფიზიკური და თერმოპლასტიკური ფაქტორების გავლენა/დადგენა ფკმ-ის მექანიკურ თვისებებზე და გარდამავალი ფენის სტრუქტურულ-ფაზურ ფორმირებაზე.
- ექსპერიმენტული მონაცემებისა და რეგრესული ანალიზის შედეგებზე დაყრდნობით ფოლად-ალუმინის შეერთების სიმტკიცის ზრდის კინეტიკური კვლევა.
- ფკმ-ის ფუნქციონალური თვისებების უზრუნველსაყოფად ოპტიმალური პარამეტრების და რეჟიმების დადგენა.
- ფკმ-ის პლასტიკურობისა და სიმტკიცის მახასიათებლების დაბალანსება, შესაერთებელი ზედაპირების აქტივაციის, დიფუზური და თერმოპლასტიკური ზემოქმედების საშუალებით.
- შეერთების მინიმალურ დროში გარდამავალ ფენაში, სითბოს მაღალი კონცენტრირების და მიკროპლასტიკური ლოკალიზების, უზრუნველყოფა.

ავტორის პირადი წვლილი. მიღებული შედეგების უტყუარობა ემყარება მათემატიკურ დაგეგმვას და რეგრესიულ ანალიზს, თეორიული კინეტიკური კვლევებისა და მეტალოგრაფიული ანალიზის შედეგების ურთიერთ თანხვედრას.

ფ.თავაძის მეტალურგიისა და მასალათმცოდნეობის ინსტიტუტში და ბრაუნშვეიგის ტექნიკურ უნივერსიტეტში (9 თვე INTAS-ის

პროგრამით) ავტორის მონაწილეობით დაგეგმარებული და შექმნილია მატერიალურ-ტექნიკური ბაზა, სადაც ჩატარებულია ექსპერიმენტალური კვლევები. მეტალოგრაფიული კვლევა და ანალიზი, მათ შორის რენტგენოსპექტრალური და სხვა, შესრულებულია კლასტალის ტექნიკურ უნივერსიტეტში (6 თვე DAAD-ის პროგრამის ფარგლებში).

მიღებული შედეგები არ ეწინააღმდეგება თანამედროვე წარმოდგენებს მასალადმცოდნეობაში, ელექტროტექნიკასა და ლითონების წნევით დამუშავებაში.

**სამუშაოს მიზანს** წარმოადგენდა დაგეგმილი (დაკვეთილი) ფუნქციონალური თვისებების მქონე AlMg<sub>6</sub>-St<sub>0,5</sub> ფკმ-ის მიღება, რომელიც ერთიან ტექნოლოგიურ ციკლში ითვალისწინებს შესაერთებელი ზედაპირების ელექტროფიზიკურ აქტივაციას, დიფუზურ შეერთებას და თერმოპლასტიკურ სტიმულირებას, დროის უმოკლეს მონაკვეთში შედარებით დაბალი ტემპერატურისა და წნევის პირობებში.

**ამოცანები:**

- გახურებისა და იზოთერმული დაყოვნების პერიოდში ძალოვანი და ელექტრული პარამეტრების გაანგარიშება - დადგენა;
- ერთკომპონენტიანი პლასტიკური დეფორმაციისა და ნორმალიზაციის თერმომექანიკური პარამეტრების დადგენა და ექსპერიმენტალური კვლევა;
- აქტივაციის ენერჯის განსაზღვრა, დიფუზური შეერთების პარამეტრების დადგენა, პროცესების მათემატიკური აღწერა-გაანგარიშება;
- დეფორმაციის კერაში ჟანგბადის შეღწევალობის შემზღუდავი დენმიმყვანი ინსტრუმენტის (პუანსონის) კონსტრუქციის შექმნა;
- ზედაპირების ოქსიდური ფენისგან გაწმენდა და ფიზიკური კონტაქტის ფორმირება;
- დამწნეხი მოწყობილობის, გამზომ-გადამწოდი, კონტროლისა და რეგულირების აპარატურის მონტაჟი-გაწყობა;
- ნიმუშების მექანიკური თვისებების გამოცდა-დადგენა;
- შეერთების გარდამავალი შრის კვლევა, სტრუქტურული და ფაზური ანალიზი.

**ნაშრომის აპრობაცია.** დისერტაციის ძირითადი შედეგები მოხსენებულია 2009÷12 წლებში, ოთხ საერთაშორისო კონფერენციაზე:

- First International Conference for Students and Young Scientists on Materials Processing Science, Tbilisi, 10 -13 October 2010
- Second International Conference for Students and Young Scientists on Materials Processing Science, Tbilisi, 10 -13 October 2012
- Materials Science Forum Vols. 706 – 709 2012, Trans Tech Publications, Switzerland pp. 373 – 376
- თანამედროვე ტექნოლოგიები და არაორგანული მასალადმცოდნეობის მეთოდები, საქართველო, თბილისი 4-6 ივნისი, 2012, 74 – 83 გვ
- მეტალურგიის და მასალადმცოდნეობის ყოველწლიურ სამეცნიერო – ტექნიკურ კონფერენციებზე.

**პუბლიკაციები.** დისერტაციის მასალებზე გამოქვეყნებულია 12 სტატია, მიღებულია პატენტი [№4864].

**ნაშრომის სტრუქტურა.** სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავალისგან, ხუთი თავისგან, დასკვნების, გამოყენებული ლიტერატურის სიასა და დანართისგან. მასალა მოიცავს 160 გვერდს მათ შორის 17 ცხრილს, 35 ნახაზს და 120 დასახელების გამოყენებულ ლიტერატურას.

### **ნაშრომის ძირითადი შინაარსი**

1. ნაშრომის **ლიტერატურულ მიმოხილვაში** გაანალიზებულია შეუთავსებადი ლითონების შეერთების არსებული ტექნოლოგიები რომლებიც საჭიროებენ ვაკუუმური და/ან ასაფეთქებელი კამერების გამოყენებას. ვაკუუმური – დიფუზური, გლინვით და აფეთქების მეთოდების გამოყენებისას, კარგ შედეგებს იძლევა დამატებით ფენათაშორისი საფენების გამოყენება, მაგრამ ეს იწვევს შრომატევადობის ზრდას.

დიფუზური პროცესების სტიმულირებისას, ერთ-ერთ ძირითად პრობლემას წარმოადგენს, ზედაპირულიდან და მოცულობით თბოგამოყოფაზე გადასვლა. ამ პრობლემის გადასაჭრელად გამოიყენება ლაზერულ-რკალური ან ლაზერულ-პლაზმური კომბინირებული, ასევე

თანამედროვე ტექნოლოგიები. ლაზერული ტექნოლოგიები გამოიყენება ზედაპირების გასასუფთავებლადაც, რაც იწვევს პროცესის საგრძნობ გაძვირებას. ფიზიკური კონტაქტის ფორმირებისას ელექტროდენით გახურება, როგორც პირდაპირი, ისე უკუ პოლარობის ან იმპულსური დენის გამოყენებით, საგრძნობლად ამარტივებს და აიაფებს პროცესს.

არსებული ტექნოლოგიებით აუცილებელია შესაერთებელი ზედაპირების ოქსიდური აკისა და მიკრონაწიბურების მოშორება, წინასწარი მექანიკური დამუშავება და ხურების პროცესში დაჟანგვისგან დაცვა, რაც დამატებით ხარჯებთანაა დაკავშირებული.

ფოლად-ალუმინის შეერთება გაძნელებულია მათი დნობის ტემპერატურის, წრფივი გაფართოების, თბოშემცველობისა და თბოგამტარობის კოეფიციენტების დიდი განსხვავების გამო, ამასთანავე ან დროს ადგილი აქვს თერმული ძაბვების წარმოქმნას. ამასთანავე, ასეთი შეერთებისას გარდამავალ ზონაში, გარკვეული ტემპერატურულ-დროითი რეჟიმების პირობებში, არსებობს ინტერლითონური ნაერთების წარმოქმნის საშიშროება. გასათვალისწინებელია ისიც, რომ ალუმინის შენადნობებში მაგნიუმის არსებობა საგრძნობლად ააქტიურებს ინტერლითონების წარმოქმნის პროცესს.

ზედაპირული ატომების კავშირების დაშლა-ადდგენა; დიფუზური ურთიერთქმედების გააქტიურება, ელექტროსტატიკური და მაგნიტური ველის ძირითად დენზე ზედდების გავლენა, დამატებით ამცირებს შეერთების დროს; ინტერლითონური წარმონაქმნების შეზღუდვებისათვის ეფექტურია იმპულსური (ჭედვითი) დატვირთვებით ზემოქმედება; აქტივაციის სხვადასხვა ეფექტების ერთდროულად გამოყენება, ხარისხის ზრდასთან ერთად საგრძნობლად ამცირებს შეერთების ტემპერატურას.

აღსანიშნავია, რომ ვერცერთი ცნობილი მეთოდი, დამოუკიდებლად ვერ წყვეტს ფოლად-ალუმინის შეერთებისას არსებულ პრობლემებს, კერძოდ: შეერთების ტემპერატურისა და დაყოვნების დროის შემცირებისას, საჭირო ხდება ლითონების პლასტიკური დეფორმაციის გაზრდა, რაც ყოველთვის არაა შესაძლებელი; გარდა ამისა ტემპერატურის დაწვეა ხშირად შეუძლებელს ხდის ძირითადი ლითონის პლასტიკური და სიმტკიცის მახასიათებლების ტოლფასი



შეერთება, და ა.შ. შესაბამისად, ნაშრომში დასახული მიზნის სრულად რეალიზაცია მოითხოვს ფოლად-ალუმინის შეერთების მეთოდების კომბინირებას და მათი ურთიერთქმედების უზრუნველყოფას.

ვაკუუმში დიფუზურ შეერთებას სხვა მეთოდებთან შედარებით გააჩნია რიგი უპირატესობები. კერძოდ, უზრუნველყოფილია შეერთების მაღალი ხარისხი და ზუსტი გეომეტრიული ზომები, თუმცა აუცილებელია ზედაპირების წინასწარი მექანიკური (ან ქიმიური) დამუშავება. ამასთანავე, დიფუზური შეერთება ვაკუუმში მიმდინარეობს საკმაოდ დიდ დროში (12-15 წუთი), რაც ზღუდავს წარმადობას.

ელექტროკონტაქტური გახურებისას, უფრო ეფექტურად ხდება სითბოს გამოყოფა გარდამავალ ზონაში, ამავე დროს, დიფუზური პროცესის გარეშე, წარმოებულ ფკმ-ში შეკავშირების ზონის პლასტიკურობა, ვერ აკმაყოფილებს წაყენებულ მოთხოვნებს. ამრიგად, ხარისხიანი შეერთების წარმოქმნისა და ფორმირებისათვის შესაკავშირებელი ზედაპირების აქტივაცია შესაძლოა მიღწეულ იქნას ელექტროდენით ინტენსიური გახურებისა და შეერთების დიფუზური პროცესების ერთობლიობით.

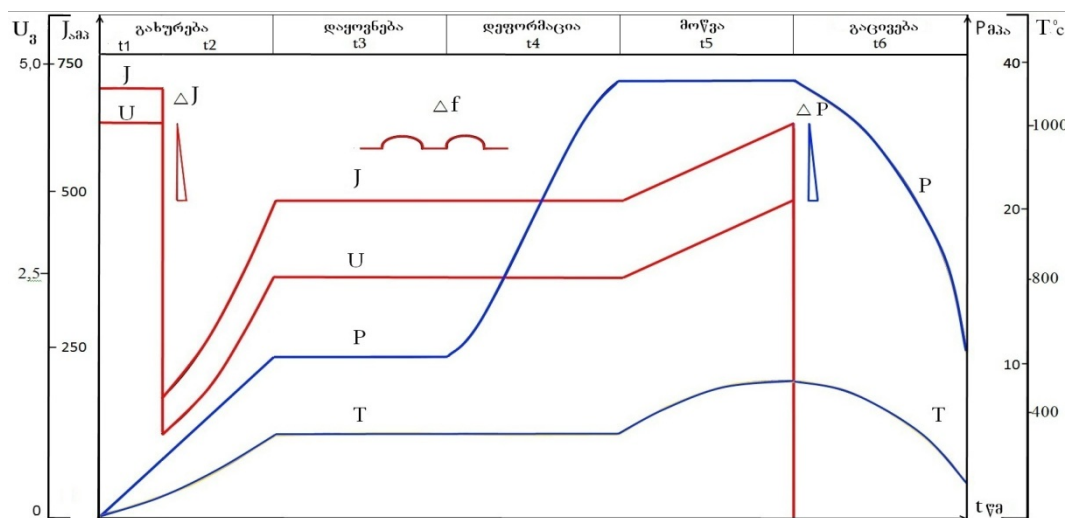
**2. მათემატიკური მოდელირებისა და ექსპერიმენტალური კვლევების მონაცემების საფუძველზე, შერჩეულია ტექნოლოგიური პარამეტრები და დადგენილია შეერთების რეჟიმები.**

ჩამოყალიბებულია კომპოზიციური მასალებისადმი წაყენებული მოთხოვნები, ზომები, შეკავშირების ზონის სიმტკიცე და პლასტიკურობა, სტრუქტურა და ფაზური შემადგენილობა. კომპოზიტის ფუნქციონალური დანიშნულება სრულ თანხვედრაშია მექანიკურ და სტრუქტურულ თვისებებთან (სტანდარტი DIN. X12CrNiTi 18-9).

**ცხრილი 1. ფკმ-ის მოთხოვნილი მექანიკური და სტრუქტურული თვისებები**

მექანიკური მონაცემები		სტრუქტურული მონაცემები	
სიმტკიცე ჰიმვადობაზე $\sigma_B$ , მპა	210	მიკროსისალე HV	1200
სიმტკიცე წყვეტაზე $\sigma_{ფკმ}$ , მპა	>120	ალუმინის შემცველობა, %	<70%
სიმტკიცე წაჭრაზე $\sigma_{წაჭ}$ , მპა	>70	ფენის სისქე, მკმ	<10
ფარდობით წაგრძელებაზე $\delta\%$	15÷20	ინტერლითონები, %	<3

ფოლად-ალუმინის ელექტროკონტაქტური გახურების და დიფუზური შეერთების მეთოდების კომბინირება, საფუძვლად დაედო ტექნოლოგიურ ციკლის შემუშავებას (სქემა 1).



სქემა 1 AlMg<sub>6</sub>-St<sub>0.5</sub> შეერთების ტექნოლოგიური ციკლი,  
სადაც -  $J, U, \Delta J, \Delta f$  – ელექტროფიზიკური,  $T, P, \Delta P$  – თერმომექანიკური პარამეტრებია

სქემა 1-ის მიხედვით, პირველ სტადიაში ( $t_1$ ) მინიმალური დაწნევის (0,5 მპა) პირობებში დენის ძალა აღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას, გარდამავალ ფენაში მყისიერად გახურება იწვევს მიკროდეფორმაციას და ოქსიდური აპკის რღვევას. ფიზიკური კონტაქტის ფორმირება გრძელდება მეორე სტადიაშიც ( $t_2$ ) და მთავრდება შესაერთებელი ზედაპირების და ოქსიდური აპკის სრული მოთელვა-რღვევით. მესამე სტადიაში ( $t_3$ ) ელექტრული წინაღობა უტოლდება ნულს, ტემპერატურა აღწევს 450°C რაც შესაერთებელი ზედაპირების მაღალი აქტივაციის და დიფუზური შეერთების წინაპირობას წარმოადგენს.

აღსანიშნავია, რომ ცხელი პლასტიკური დეფორმაციისას დეფორმირებული ალუმინი ხასიათდება დისლოკაციების გაზრდილი სიმკვრივით, რაც წარმოადგენს გარდამავალ შრეში თერმოდინამიკურ სტიმულს. თერმომექანიკური დამუშავება, მოიცავს “გახურება-დეფორმაცია-გაცივება” პროცესების ერთობლიობას, რაც კრისტალური წყობის დეფექტების სიმკვრივის ზრდასთან ერთად, აუმჯობესებს გარდამავალი ფენის პლასტიკურ თვისებებს.

აღნიშნული ეფექტის გამოყენების მიზნით, “იზოთერმული დაყოვნების” პროცესის შემდგომ, როცა ზედაპირების შეკავშირება დასრულებულია, გათვალისწინებულია ერთკომპონენტიანი დაბალი ინტენსიობის (350-450<sup>0</sup>C) პლასტიკური დეფორმაცია.

თერმომექანიკური დამუშავება, მოიცავს პლასტიკურ დეფორმაციას და “ნორმალიზაციას”, რაც უფრო ეფექტური გავლენას ახდენს გარდამავალი ზონის თვისებათა მახასიათებლების ერთგვაროვნების კუთხით. ამრიგად მეოთხე სტადიაში (t<sub>4</sub>) თერმოპლასტიკური აქტივაციის მიზნით გამოყენებულია ერთკომპონენტიანი პლასტიკური დეფორმაცია ისეთი დაწნევის ძალით, რომელიც უმნიშვნელოდ აღემატება AlMg<sub>6</sub> მასალის დენადონის ზღვარს. როგორც სქემიდან ჩანს ძირითადი პარამეტრები, მათ შორის (**T**, **J**), ინარჩუნებენ იგივე მნიშვნელობებს, რაც იზოთერმული დაყოვნებისთვის არის დამახასიათებელი.

მექანიკური თვისებების სტაბილიზაციის მიზნით, მეხუთე სტადიაში (t<sub>5</sub>) შეერთების დასრულებისთანავე გათვალისწინებულია “ნორმალიზაცია”, სადაც შენარჩუნებულია დეფორმაციის მაღალი დონე (40 მპა), ხოლო დენის ხვედრითი მნიშვნელობა გაზრდილია 15 ა/მმ<sup>2</sup>-მდე.

არსებული მიდგომისგან განსხვავებით, ამ შემთხვევაში “ნორმალიზაცია” ახანგძლივებს “იზოთერმულ დაყოვნებას” ზედაპირების უფრო მზარდი აქტივაციის პირობებში. ამასთან, გახურების ტემპერატურა უფრო ნაკლებად მოქმედებს პლასტიკურობის ზრდაზე, ვიდრე “ნორმალიზაციის” ტემპერატურა და მისი ხანგრძლივობა.

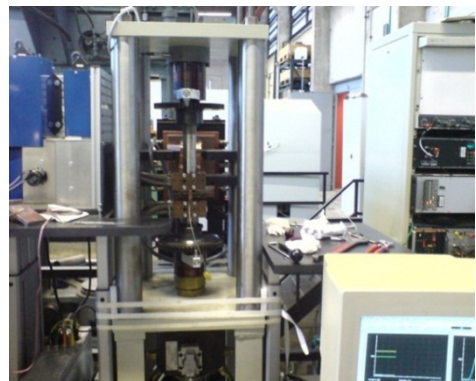
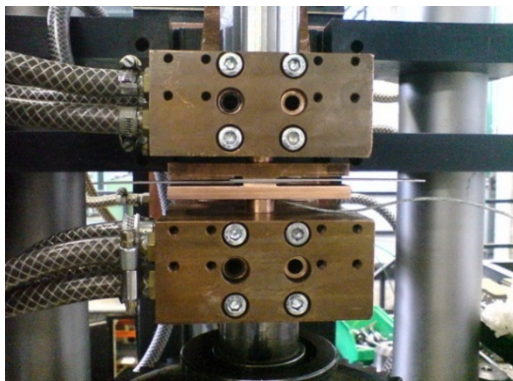
ამიტომ, მიზანშეწონილია სწრაფი გახურება 550<sup>0</sup>C-მდე, შემდგომ დაყოვნება და ჰაერზე ინტენსიური გაცივება. ასევე დადგინდა, რომ ნორმალიზაციის პერიოდში, იზოთერმული გარდაქმნები უზრუნველყოფენ უფრო წვრილმარცვლოვანი სტრუქტურის მიღებას.

ჩატარებული ანგარიშის და ექსპერიმენტალური მონაცემების შეჯერების შედეგად, ტექნოლოგიური პარამეტრების საბოლოო მნიშვნელობები მოცემულია მე-2 ცხრილში.

**ცხრილი 2. ტექნოლოგიური ციკლის პარამეტრები**

1 სტადია	ძაბვა U, V	სვედრიითი დენი ა/მმ <sup>2</sup>	წნევა P, მპა	ტემპერატურა T °C	დრო τ, წმ
გახურება	8	40	0,5	0÷100	2
t1	1,5÷4	2÷7,5	0÷10	100÷450	8
t2					
დაყოვნება	3	7,5	10	420	30
t3					
დეფორმაცია	3	7,5	5÷30	420	15
t4					
ნორმალიზაცია	3÷4,5	7,5÷20	30÷40	420÷550	15
t5					
გაცივება	4,5-0	20÷0	40÷15	550÷150	20
t6				ჯამი	90

3. შექმნილია მატერიალურ-ტექნიკური ბაზა, - ჰიდრაულიკური წნეხი და გაცივების სისტემა (ნახ. 2), ტექნოლოგიური აღჭურვილობა ელექტრო კონტაქტური გახურების სისტემა დენის ძალის (ძაბვის) რეგულირებით (0-20 kA, 2-24 V) და სხვა მოწყობილობანი, მათ შორის გადამწოდები და რეგულირების სისტემები (ნახ.3).



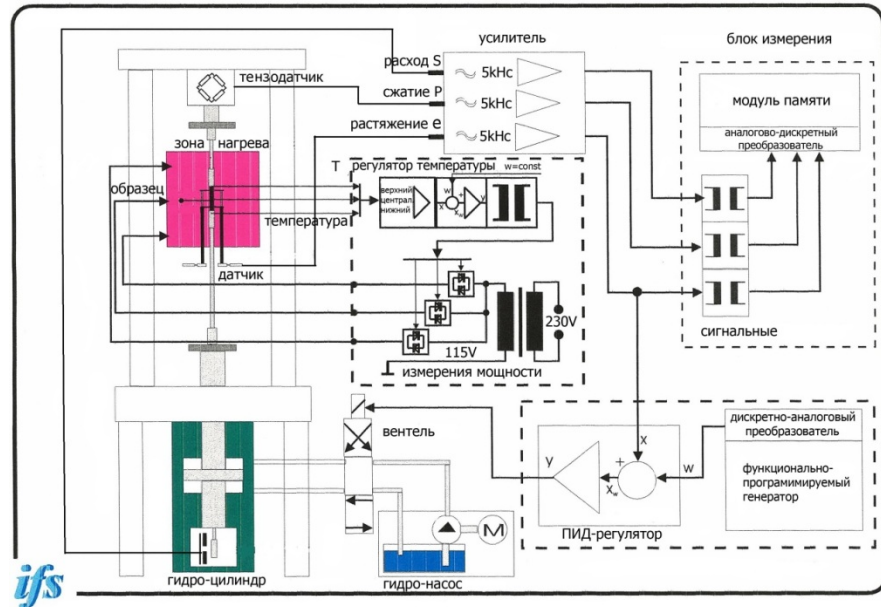
**ნახ. 2 წნეხის დამწოლი მოწყობილობების საერთო ხედი**

შემუშავდა წნეხ – ფორმის მსგავსი პუნსონი, რომელიც მოცულობითი დეფორმაციის გარდა, კონსტრუქციულად გამორიცხავს (ზღუდავს) ჟანგბადის შეღწევადობას გახურების პერიოდში, და ნიმუშის წყლით გაცივებას შესაძლებლობას იძლევა.

ნამზადების თვისებების გათვალისწინებით, გაანგარიშებულია კონტაქტური გახურების სისტემის ელექტრული პარამეტრები, ჩართვის

ხანგძლივობა, დენის ძალისა და სიმძლავრის მიხედვით შეირჩა ძალოვანი ტრანსფორმატორი, დენმიმცვანი სისტემა და ა.შ.

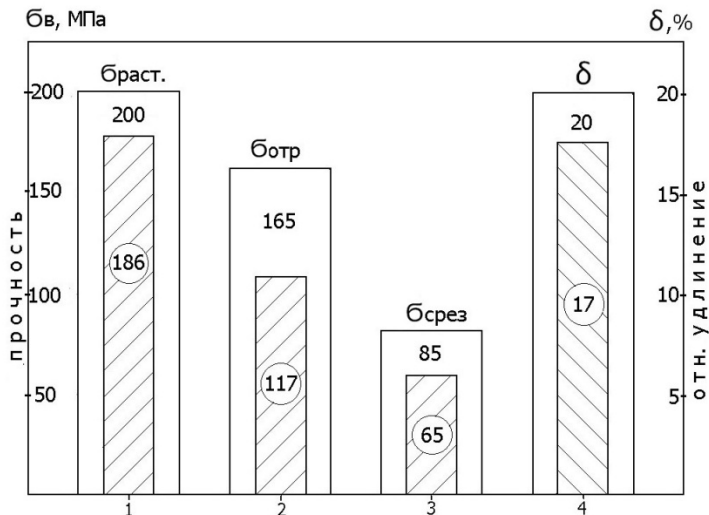
ნიმუშის ცენტრში და მის პერიმეტრზე განლაგდა შვიდი თერმოწყვილი, მათი სიგნალების გასაშუალოებული მნიშვნელობა აისახება გრაფიკულად და ვიზუალურად, სიზუსტით  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ . ასევე დიდი სიზუსტით ხდება დენის ძალისა ( $\pm 1\%$ ) და წნევის ( $\pm 3\%$ ) გაზომვები, მათი დროში ცვალებადობა ტექნოლოგიური ციკლის ფარგლებში.



ნახ.3 წნევის რეგულირების ბლოკ-სქემა

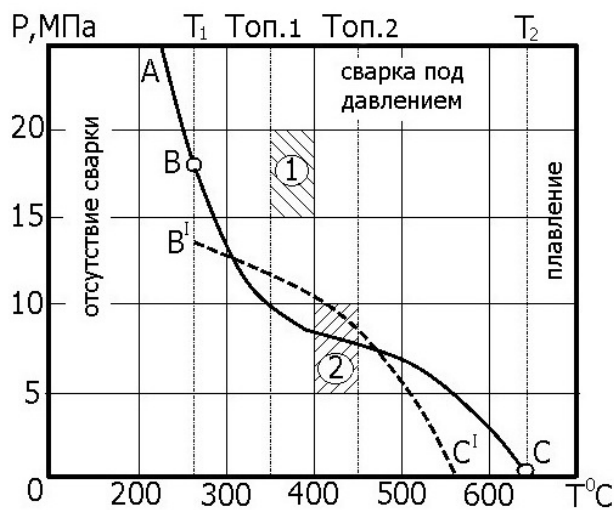
წნევის რეგულირების სისტემა (ნახ. 3) ჰიდრო – ცილინდრისა და ტუმბოს გარდა, შედგება გადამწოდებისგან და პროგრამული მართვისგან. გათვალისწინებულია ტემპერატურის პროგრამულად მართვა. სტადიების მიხედვით, მათი ასახვა გრაფიკულად და მონაცემთა დამუშავება კომპიუტერის მეშვეობით. შედეგად ხდება სასურველი რეჟიმების დამახსოვრება და მათი განმეორებითი უზრუნველყოფა, რაც საგრძნობლად აადვილებს კვლევითი სამუშაოების დაგეგმვას და შესრულებას.

4. ფკმ-ის სიმტკიცის მახასიათებლების შესწავლის მიზნით, ჩატარდა ნიმუშების მექანიკური გამოცდა – კვლევა (ნახ. 4) გაჭიმვაზე ( $\sigma_B$ ), წყვეტაზე ( $\sigma_{წყვ}$ ) და წაჭრაზე ( $\sigma_{წაჭ}$ ) აგრეთვე ფარდობით წაგრძელებაზე ( $\delta\%$ ), როგორც პლასტიკური დეფორმაციის პირობებში (ნიმუში სისქით 4 მმ), ასე დეფორმაციის გარეშე (სისქით 1,2 მმ).



ნახ.4 ფ.კ.მ. მექანიკური გამოცდის შედეგები: გაჭიმვაზე (1); წვევტაზე (2); ჭრაზე (3); და ფარდობით წაგრძელებაზე (4). დაშტრიხული უბნები შეესაბამება არეებს დეფორმაციის გარეშე, ხოლო ნათელი – დეფორმირებულ არეებს

ექსპერიმენტალური კვლევისა და ნიმუშების გამოცდის შედეგებზე დაყრდნობით დადგინდა ტემპერატურის (T), წნევის (P) და შეერთების დროის ხანგრძლივობის (τ) ურთიერთკავშირები (ნახ.5)

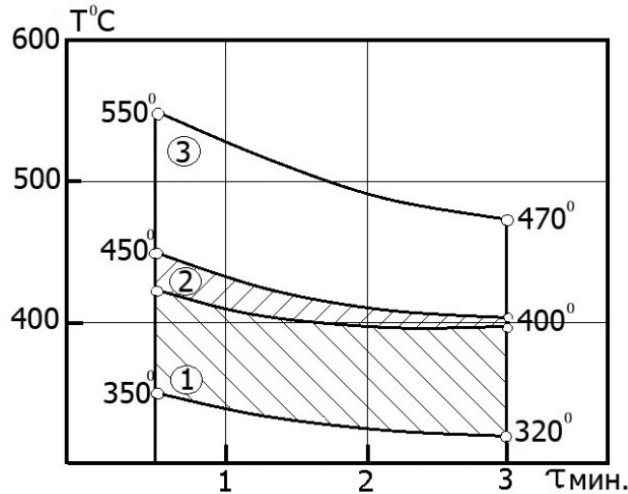


ნახ.5 შეერთების ტემპერატურული და წნევის პირობები სადაც ოპტიმალური რეჟიმები დაშტრიხულია  
 ① – P=15 მპა, T<sub>ოპტ. 1</sub>=350°C დეფორმაციით  
 ② - P=7,5 მპა, T<sub>ოპტ. 2</sub>=425°C დეფორმაციის გარეშე  
 BC –გაკუუმში შედუღების ზღვარი;  
 B'C' –მყარად შეერთების ზღვარი

ტექნოლოგიური პარამეტრების T და P ურთიერთკავშირის მხრივ შეერთებასა და შედუღებას შორის გამოყოფილია ABC გამყოფი არე, სადაც T<sub>1</sub>-ს ქვემო ზღვარზე უფრო მეტი დაწნევაა საჭირო, ხოლო T<sub>1</sub> და

T<sub>2</sub> ფარგლებში წნევა იკლებს T-ს ზრდასთან ერთად. დადგინდა დეფორმაციის გარეშე ოპტიმალური რეჟიმი T=400-450<sup>0</sup>C და P=(5÷10) მპა ფარგლებში (დაშტრიხულია ②).

გარდა ამისა, ელექტრო კონტაქტური გახურებისა და დიფუზური შეერთების პირობებში (ვაკუუმის გარეშე) ტემპერატურა იცვლება ნახ.6-ზე მოცემული კანონზომიერებით, სადაც ③-არეს ქვემოთ ინტერლითონები არ წარმოიქმნებიან.



ნახ. 6 შეერთების ტემპერატურული და დროითი პირობები, ოპტიმალური რეჟიმები დაშტრიხულია

- ①-T=350<sup>0</sup>C, დეფორმაციით,
- ②- T=425<sup>0</sup>C, დეფორმაციის გარეშე,
- ③- ინტერლითონების შეზღუდვის არე

მე-6 ნახაზის მიხედვით, (400÷450<sup>0</sup>C) ინტერვალში ტემპერატურის ცვლილების ფარგლებში, ხარისხიანი შეერთება ხდება 1,5 წუთში, რაც 5-7-ჯერ ნაკლებია ვაკუუმში დიფუზური შეერთებისათვის საჭირო დროსთან შედარებით.

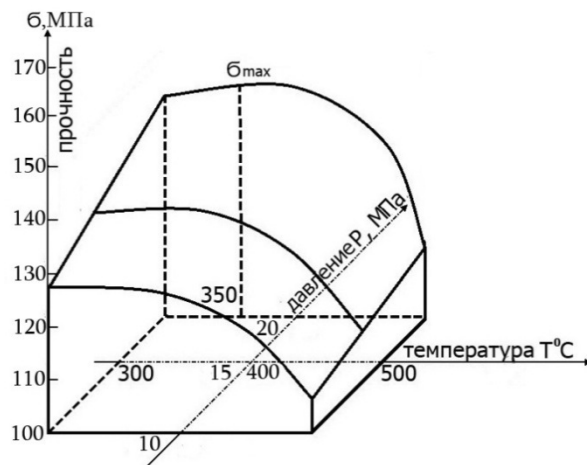
ამრიგად, დადგენილია შეერთების ოპტიმალური პარამეტრები (დაშტრიხულია ②) ტემპერატურული, წნევისა (ნახ.5) და დროითი (ნახ.6) პირობებიდან გამომდინარე:

T=425<sup>0</sup>C, P=7,5 მპა, τ=1,5 წუთი

პლასტიკური დეფორმაციის გათვალისწინებით ოპტიმური ტემპერატურა (T<sub>ოპტ.</sub>) გადაინაცვლებს უფრო მაღალი წნევისა P=(15÷20) მპა და დაბალი ტემპერატურული (350<sup>0</sup>C) პირობებისკენ (დაშტრიხული ①), რაც 75<sup>0</sup>C-ით უფრო ნაკლებია იმ ტემპერატურასთან შედარებით,

რაც დეფორმაციის გარეშე ( $T_{\text{ობტ.2}}$ ) პირობებშია აუცილებელი. ამავე დროს დეფორმაციის პირობებში სიმტკიცის მაქსიმალური მნიშვნელობა 0,5 წუთით ადრეა მიღწევადი, ვიდრე დეფორმაციის გარეშე შესაბამისად, დადგენილია შეერთების ოპტიმალური პარამეტრები (დაშტრისულია ①) პლასტიკური დეფორმაციის პირობებში:  $T=350^{\circ}\text{C}$ ,  $P=7,5$  მპა,  $\tau=1,5$  წუთი.

ჩატარდა ორ და სამ ფაქტორიანი ექსპერიმენტის მათემატიკური დაგეგმვა, შესწავლილია  $T$ ,  $P$  და  $\tau$  გავლენა სიმტკიცის მახასიათებლებზე ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{\text{წყვ}}$ ,  $\sigma_{\text{ჭრა}}$ ). რეგრესიული ანალიზის შედეგად, მაგალითის სახით (ნახ.7) მოყვანილია სიმტკიცის ( $\sigma_{\text{წყვ}}$ ) დამოკიდებულება შეერთების პროცესების ტემპერატურისა ( $300-500^{\circ}\text{C}$ ) და წნევის ( $10 \div 20$ ) მპა ცვლილებასთან დროში  $\tau=1,5$  წუთი მუდმივობის პირობებში.



**ნახ.7 შეერთების სიმტკიცის დამოკიდებულება ტემპერატურასა და წნევაზე**

როგორც ნახაზიდან ჩანს, შეერთების პროცესში დეფორმაციის გაზრდის შედეგად ( $15 \div 20$ ) მპა-მდე, შეერთების სიმტკიცე აღწევს 165 მპა-ს დონეს, უფრო დაბალ ტემპერატურაზე  $350^{\circ}\text{C}$ , რაც ასევე შეესაბამება ექსპერიმენტალურ მონაცემებს.

ჩატარდა ნიმუშების გამოცდა ფარდობით წაგრძელებაზე და სიმტკიცეზე ჭრაზე. შედეგები სრულად აკმაყოფილებს სტანდარტის მოთხოვნებებს (ნახ.3, ცხრილი 1).

აღსანიშნავია, რომ ექსპერიმენტის მათემატიკური დაგეგმვა და რეგრესიული ანალიზი, საგრძნობლად ამცირებს საკვლევი ნიმუშების



საჭირო რაოდენობას (27 დან 8-მდე) და შესაბამისად, კვლევის შედეგების ცდომილებას.

შეერთების პროცესების აღეკვადური აღწერის მიზნით გამოყენებულია მყარი ფაზის წარმოქმნის ცნობილი კინეტიკური მექანიზმი [5, 6]:

შეერთების სიმტკიცის კინეტიკა :

$$\omega(t) = \frac{\sigma(t)}{\sigma(m)} = \left[ 1 - b \exp - \left( \frac{K}{m} t \right)^m \right]; \quad (1)$$

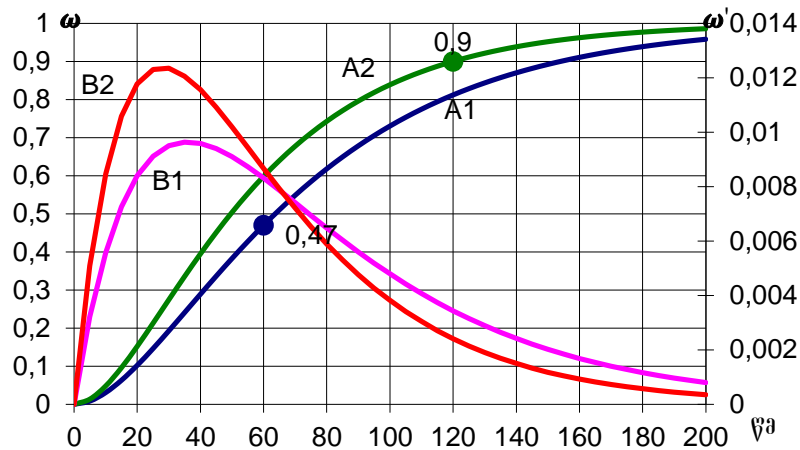
შეერთების სიმტკიცის სიჩქარის კინეტიკა

$$f(x) = \frac{d\omega}{dt} = K_1 b \exp \left( - \frac{K_2}{m} t \right) \left[ 1 - b \exp \left( - \frac{K_2}{m} t \right) \right]^{m-1}; \quad (2)$$

$$b = 1 - \omega_0^{1/m} \quad (3)$$

სადაც  $\omega(t) = \frac{\sigma(t)}{\sigma(m)}$  – მიმდინარე და მაქსიმალური სიმტკიცის თანაფარდობა

მე-8 ნახაზზე წარმოდგენილი მრუდები აგებულია (1, 2) თანახმად და გამოხატავს სიმტკიცისა (A1, A2) და მისი სიჩქარის (B1, B2) ზრდას დროში.



ნახ. 8 შეერთების სიმტკიცის (A1, A2) და სიჩქარის (B1, B2) კინეტიკური მრუდები

კინეტიკური მრუდები (A1, A2) გამოირჩევიან ზრდის გარკვეული ინერციულობით და დროში გაჯერებით ( $\tau > 100$  წმ.), ხოლო მათი წარმოებული მრუდები (B1, B2) აღწევენ მაქსიმუმს, როცა ფარდობითი სიმტკიცის ზრდა შეესაბამება  $\omega = 0,7 - 0,9$  და  $\tau = 20 \div 30$  წმ.

სიმტკიცის ზრდის მუდმივა  $K$  განისაზღვრება ფორმულა (1)-დან და ტოლია:

$$K = \frac{m}{\tau} \ln \frac{1}{1 - \left(\frac{\sigma(\tau)}{\sigma(m)}\right)^{\frac{1}{m}}} \quad (4)$$

სადაც  $m=2$ , ორგანოზომილებიანი Fe-Al შეერთებისას,  $\tau$ -შეერთების დროა სიმტკიცეზე გამოცდისას.

ქვემოთ ცხრილში მოყვანილია ორი ნიმუშის გამოცდის მონაცემებით, საფუძველზე მე-4 ფორმულით გამოთვლილი შედეგები

ნიმუში	T, C <sup>0</sup>	P მპა	$\tau$ წმ.	$\frac{\sigma(\tau)}{\sigma(m)}$	$K\left(\frac{1}{\text{წმ}}\right)$
№ 1	500	15	60	0.7	$3.8 \cdot 10^{-2}$
№ 2	550	5	120	0.9	$4.9 \cdot 10^{-2}$

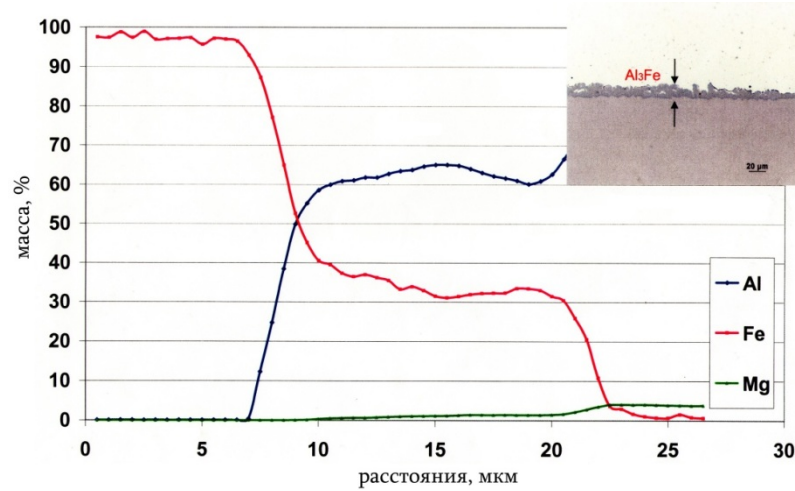
სიჩქარის მუდმივა ( $K$ ) გათვალისწინებით, (1) და (2) ფორმულების მიხედვით ანგარიში დროის ნებისმიერ მონაკვეთში შეერთების სიმტკიცის ცვლილების პროგნოზირების საშუალებას იძლევა. გარდა ამისა, არენიუსის ცნობილი ფორმულით  $K$ -ს შესაბამისი ტემპერატურული მონაცემების გამოყენებით, შესაძლებელია აქტივაციის ენერჯიის გაანგარიშება სიმტკიცის მახასიათებლების ზრდასთან დაკავშირებით.

ამრიგად, თეორიული და ექსპერიმენტალური კვლევის შეჯერებული მეთოდის გამოყენება, საშუალებას იძლევა, მხოლოდ ორი ნიმუშის მონაცემით ( $\omega(t) = 0,47; 0,9$ ) დადგინდეს შეერთების სიმტკიცის ზრდის შესაბამისი ტექნოლოგიური პარამეტრები.

**5. ფკმ-ის სტრუქტურული თვისებები, ფაზური შედგენილობა და მათთან დაკავშირებული პროცესები, შევისწავლეთ იზოთერმულ – დიფუზურ რეჟიმში, ტემპერატურის მუდმივობიდ პერიოდში. დადგენილია, ახალი ფაზის ინკუბაციური პერიოდის ხანგლივობა, რაც გამორიცხავს ინტერლითონების წარმოქმნის ალბათობას.**

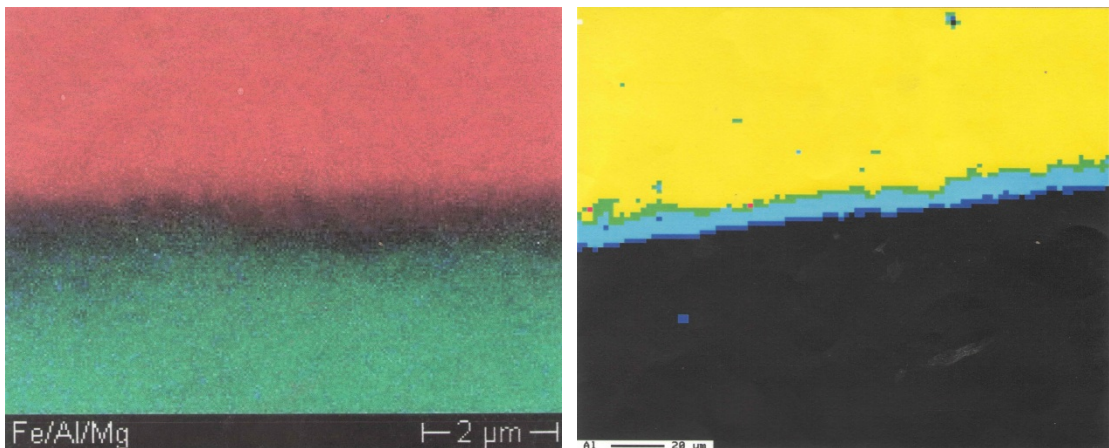
ამასთან ერთად, AlMg<sub>6</sub>-St<sub>0,5</sub> ურთიერთ დიფუზური შეღწევალობის მაქსიმუმი, სრულ შესაბამისობაშია, ოპტიმალურ პირობებთან (ნახ.4,5) დეფორმაციის გარეშე (დაშტრიხული ②), საგულისხმოა ისიც რომ მიკრორენტგენოსპექტრული ანალიზის თანახმად, AlMg<sub>6</sub> და St<sub>0,5</sub> თანაბარი პროცენტული (50%) შემცველობა (ნახ. 9), უზრუნველყოფს

გარდამავალი ფენის საჭირო სტრუქტურულ თვისებებს: ფენის სისქე 5 მკმ, Mg – 3% (6% ნაცვლად), Al<70% ინტერლითონების გარეშე.



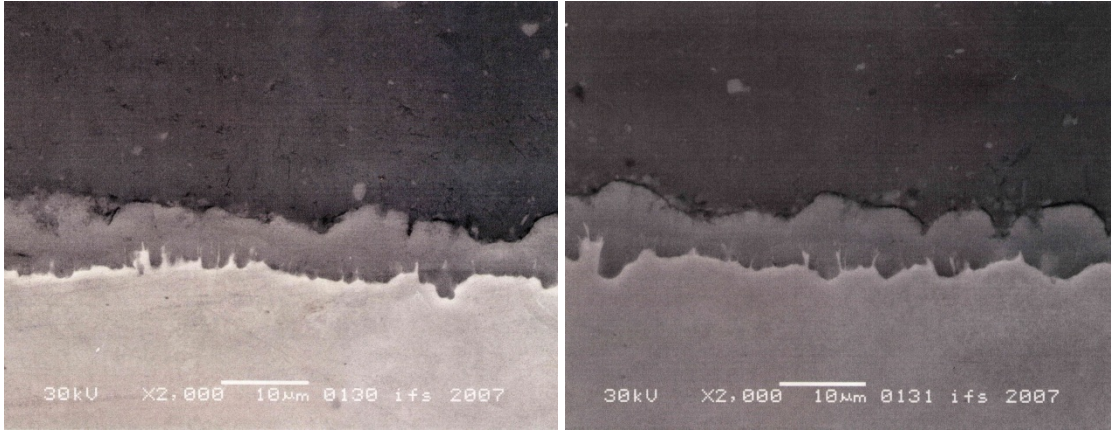
ნახ.9 შეერთების არეში ელემენტების კონცენტრირება %

გარდამავალ ფენაში ელემენტების ასეთი კონცენტრირება სრულად შეესაბამება მიკროსტრუქტურას დეფორმაციის გარეშე (ნახ.10).



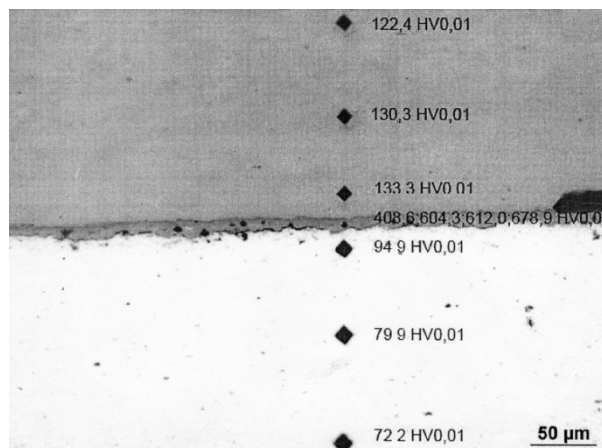
ნახ.10 მიკროსტრუქტურა დეფორმაციის გარეშე

მიკროსტრუქტურა შედარებით უფრო წვრილდისპერსიულია პლასტიკური დეფორმაციის პირობებში (ნახ. 11), რაც ოპტიმალურ პირობებთან (ნახ. 4,5) სრულ შესაბამისობაშია (დაშტრიხული ①), სადაც გარდამავალი ფენის სისქე შეადგენს 20 მკმ, რაც დასაშვებია ინტერლითონების გარეშე სიმტკიცეზე მოთხოვნებით.



ნახ.11 მიკროსტრუქტურა პლასტიკური დეფორმაციით

ლოკალური მიკრორენტგენული ანალიზის საფუძველზე შესწავლია არეში მიკროსისალის განაწილება, რის შედეგად ნიმუშის ჭრილში და გაგდინდა დიფუზური შეღწევადობის სიღრმე, ელემენტების გაერთიანების არეალი, მათ შორის  $Mg \rightarrow AlMg_6$  (ნახ.12)

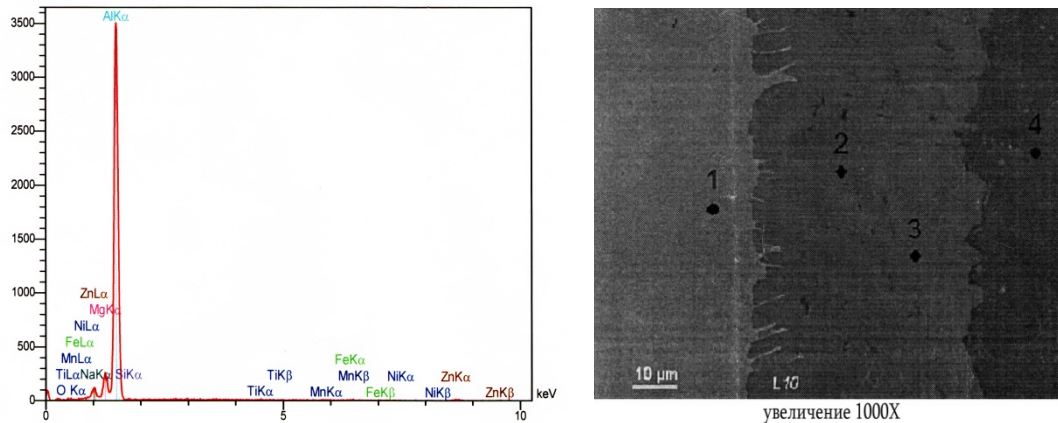


ნახ.12 მიკროსისალის განაწილება შეერთების ჭრილში, დეფორმაციის გარეშე

როგორც ნახ.12-დან ჩანს,  $AlMg_6$  ფაზის მიკროსისალე შეესაბამება  $120 \div 130$  HV, ხოლო  $St_{0,5}$   $800 \div 950$  HV, მათ შორის გარდამავალი შრის მაქსიმალური მიკროსისალე, შუალედური მნიშვნელობა 680 HV, აკმაყოფილებელს სიმტკიცის მოთხოვნებს.

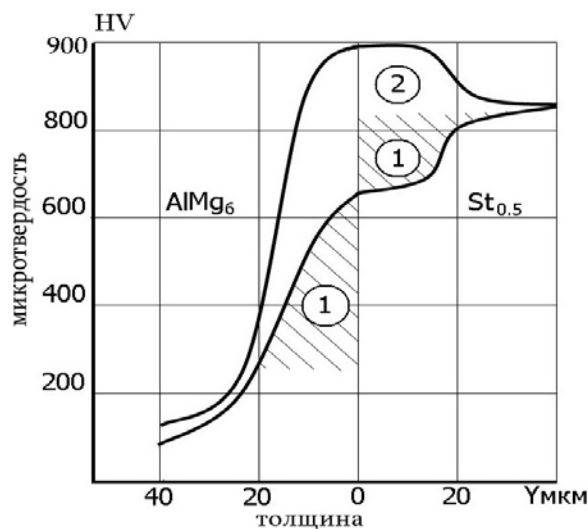
ელემენტების (Al, Mg, St) ტიპური გადანაწილება გარდამავალ ფენაში მოყვანილია ნახ. 13-ზე, სადაც Mg-ის პროცენტული შემცველობა ორჯერ ნაკლებია, ვიდრე მისი შემცველობა ძირითად ლითონში, რაც დიფუზური პროცესების ელექტროსტიმულირების გავლენით აიხსნება. შეერთების სხვა მეთოდებთან შედარებით (გარდა ელექტროკონტაქტური

გახურებისა) Mg - ის შემცველობა, გარდამავალ ფენაში არ არის ნაკლები 6%.



ნახ.13 დიფუზიურ არეში ელემენტების შეღწევადობა

ჩატარებული კვლევით დადგინდა იზოთერმული დაყოვნების პერიოდის გავლენა მიკროსისალეზე, როგორც გარდამავალ არეში, ასევე ძირითად ლითონებში (ნახ. 14)



ნახ. 14 იზოთერმული დაყოვნების გავლენა მიკროსისალეზე  
 ①-შეერთების ოპტიმალური რეჟიმი  $\tau=1,5$  წუთი  
 ②-დიფუზიური შეერთება ვაკუუმში  $\tau=12 - 15$  წუთი

როგორც ნახ. 14 - დან ჩანს,  $AlMg_6$  და  $St_{0,5}$  ფაზების მიკროსისალეები უფრო ნაკლებია მნიშვნელობით და თანაბრად არის გადანაწილებული, ვიდრე ვაკუუმში დიფუზიური შეერთებისას მიიღება, რაც იზოთერმული დაყოვნების დროის ფაქტორზეა დამოკიდებული.

აღსანიშნავია, რომ ოპტიმალური რეჟიმების განხილულ დიაპაზონში, სრულად გამოირიცხა ფორიანობა, არამთლიანობა და



სხვა წუნი, ხოლო სტრუქტურული თვისებები და ფაზური შემადგენლობა სრულ შესაბამისობაშია მოთხოვნებთან (ცხრილი 1).

ფოლად ალუმინის ელექტროგახურება და დიფუზური შეერთება არსებით გავლენას ახდენს შრის მყარფაზურ ფორმირების პირობებზე: უზრუნველყოფს შესაერთებელი ზედაპირების უკეთეს ფიზიკურ კონტაქტს, ზედაპირების მოთელვას (გასუფთავებას) მტკიცე შეჭიდვის კვანძების წარმოქმნა-შენარჩუნებას, ამასთან საკონტაქტო ზედაპირების აქტივაცია გაცილებით უფრო სწრაფად და ეფექტურად მიღწევადია, ვიდრე მექანიკური ან ქიმიური დამუშავებისას.

ნაირგვაროვანი ლითონების მყარ ფაზაში შეერთების კომბინირებული ტექნოლოგია ეფუძნება რომელიც ეფუძნება რამდენიმე აპრობირებულ მეთოდის ერთობლივობას: ელექტროკონტაქტური გახურებას და დიფუზურ შეერთებას, პლასტიკურ დეფორმაციას და ნორმალიზაციას. მიღებულია, დაგეგმილი ფუნქციანალური თვისებების მქონე, კომპოზიციური  $AlMg_6-St_{0.5}$  მასალა, რომლის მიღება დღემდე არსებული ტექნოლოგიებით პრობლემატურია (ვაკუუმის და აფეთქების კამერები), ან შეუძლებელია (შედუღება, გლინვა). აღსანიშნავია ისიც, რომ შემოთავაზებული ტექნოლოგია არსებულ ტექნოლოგიებთან შედარებით, გაცილებით უფრო ნაკლებ კაპიტალურ დაბანდებებს მოითხოვს, გაადვილებულია პროცესის განმსაზღვრელი პარამეტრების გაზომვები, კონტროლი და რეგულირება, დაბალია ნაკეთობის თვითღირებულება.

აღსანიშნავია, რომ თავდაცვითი ჯავშან ფილების წარმოებაში, დიდი მოთხოვნილებაა გრადიენტული მექანიკური თვისებების მქონე მასალების შექმნაზე. ასეთად პირველ რიგში მოიაზრება ფოლად-ალუმინის ბაზაზე მიღებული ფენოვანი კომპოზიციური ნაკეთობები, რომელთა წარმოებისას პერსპექტიულად გვესახება აფეთქებისა და ელექტროგლინვის მეთოდების შერწყმული ტექნოლოგიური პროცესის გამოყენება, შემდგომი ცხლად გლინვისა და თერმოდამუშავების მიზნით. ჩვენი აზრით, შემოთავაზებული ასეთი ჰიბრიდული პროცესი საშუალებას იძლევა სხვადასხვა სისქის, ნაირგვაროვანი მასალების აფეთქებით მიღებულ იქნას მაღალი სიმტკიცის ფენოვანი კომპოზიტები ელექტროგლინვით დამუშავების პირობებში.

## დასკვნა

1. შემუშავებულია ტექნოლოგია, რომელიც უზრუნველყოფს:
  - შესაერთებელი ზედაპირების ფიზიკური კონტაქტის ფორმირებას;
  - ზედაპირების აქტივაციას და მყარ ფაზაში შეერთებას (შეჭიდულობას);
  - მოცულობით ურთიერთქმედებას ფოლადსა და ალუმინს შორის;
  - ოქსიდური აპკისა და მიკროწარმონაქმნების რღვევას და მოთელვას;
  - ფკმ-ს მექანიკური თვისებების გაუმჯობესებას, გაჭიმვაზე, წყვეტასა და მოჭრის სიმტკიცეზე სტანდარტის (DIN X12 CrNiTi 18-9) მოთხოვნების შესაბამისად;
  - საჭირო ფაზურ შემადგენლობას და მექანიკურ თვისებებს;
  - ელემენტების (Al, Mg, Fe) საჭირო კონცენტრირებას გარდამავალ შრეში;
  - მიკროსისალის თანაბარ გადანაწილებას, წვრილმარცვლოვან მიკროსტრუქტურას, გარდამავალი შრეს სისქით 5 მკმ-ის ფარგლებში.
2. შექმნილია მატერიალურ – ტექნიკური ბაზა:  
წნეხი, ტრანსფორმატორი, ტექნოლოგიური ადჭურვა (პუანსონი), ჰიდრაულიკის და გაცივების სისტემა, პარამეტრების გაზომვები და კონტროლი, ტექნოლოგიური ციკლის რეგულირება და მართვა.
3. მიღებული შედეგები უზრუნველყოფენ:
  - შეერთების ტემპერატურული ქვედა ზღვარის შემცირებას  $350^{\circ}\text{C}$  – მდე (მინიმუმ  $70^{\circ}\text{C}$ -ით);
  - წნეხის ორჯერ შემცირებას;
  - გარდამავალ ზონაში Mg – ის % შემცველობის ორჯერ შემცირებას  $\text{AlMg}_6$ -თან შედარებით.
4. ფოლად-ალუმინის შეერთების ტექნოლოგიის, უპირატესობებია:
  - გამოირიცხა ზედაპირების მექანიკური (ქიმიური) დამუშავება;
  - პუანსონის კონსტრუქცია გამოირიცხავს ჰაერის შეღწევალობას და ზედაპირების დაუანგვას;
  - დაბალანსებულია პლასტიკური თვისებების და სიმტკიცის მახასიათებლები მოთხოვნების შესაბამისად;
  - უზრუნველყოფილია კონსტრუქციულად დასრულებული ფორმების და ზომების ნაკეთობების მიღება;
  - მიღწეულია პროდუქციის სორტამენტის გაფართოება, ერთკომპონენტიანი პლასტიკური დეფორმაციისას;
  - ვაკუუმში დიფუზურ შეერთებასთან შედარებით ფოლად-ალუმინის შეერთების დროის პერიოდი შემცირებულია 5-7ჯერ;
  - შემოთავაზებულია გამარტივებული, ეკოლოგიურად სუფთა ტექნოლოგიური სქემა;
  - მიღებულია ფოლად ალუმინის შეერთება ზონა საჭირო თვისებებით საშუალოდ საფენის გარეშე.

დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია

შემდეგ შრომებში:

1. Т.Г.Намичеишвили, Д.А.Нозадзе, К.А. Хундадзе. Технологический процесс диффузионной сварки слоистого композита под давлением, методом электро-контактного нагрева. Проблемы металлургии, сварки и материаловедения, 2005, №3 (9), 10-13 с
2. Г.Г.Отарашвили, В.Г.Эристави, Д.А.Нозадзе, Т.Г.Намичеишвили, Д.М.Мачарадзе. Исследование границ раздела биметалла Fe-Al с помощью оже-электронного спектрометра. Проблемы металлургии, сварки и материаловедения, 2006, №4 (14), 41- 44 с
3. D. Nozadze, T. Namicheishvili, Z. Liluashvili, and D. Macharadze, Advanced Technology for Manufacturing of Layered Composite Materials by the Method of Electro-Contact Heating Under Pressure, **Volume 4: New, Improved and Existing Technologies: Nonferrous Materials Extraction and Processing**, California, 2006, pp.595-598.
4. Д.А.Нозадзе, Д.М.Мачарадзе, Я.Н.Таварткиладзе, Т.Г.Намичеишвили. Исследования кинетики развития прочности соединения на границе раздела системы сталь – алюминий в твердой фазе. Проблемы металлургии, сварки и материаловедения, 2007, №4 (18), 14 - 18 с
5. Я.Н.Таварткиладзе, Д.А.Нозадзе, Д.М.Мачарадзе. Исследование кинетики развития в твердой фазе. Сборник трудов Грузинского технического Университета, №1 (467) ISSN 1512-0996, Тбилиси, 2008
6. Д.М.Мачарадзе, Д.А.Нозадзе. Диффузионное соединение слоистого композита Steel – Al. Транспорт и Машиностроение ISSN 1512-3537. №1(13), 2009, 11-18 с
7. D.Macharadze, D.Nozaдze, M, Okrosashvili, T.Namicheishvili, Ya.Tavartkiladze, S.Bohm. Combined method of electric contact heating and diffusion connection of steel – aluminum. First International Conference for Students and Young Scientists on Materials Processing Science, Tbilisi, 10 -13 October 2010, pp. 108 – 113
8. Д.М.Мачарадзе, Д.А.Нозадзе, М.Н.Окросашвили, Н.Т.Лоладзе. Комбинированный метод электроконтактного нагрева и диффузионного соединения сталь – алюминий. Сборник трудов Грузинского технического Университета, №2 (480) ISSN 1512-0996, Тбилиси, 2011
9. D.Nozaдze, D.Macharadze. Combined method of electric contact heating and diffusion connection of steel – aluminum. Materials Science Forum Vols. 706 – 709 2012, Trans Tech Publications, Switzerland pp. 373 – 376
10. D.Macharadze, T.Namicheishvili, D.Nozaдze, M, Okrosashvili, Jurgen G. Heinrich. Second International Conference for Students and Young Scientists on Materials Processing Science, Tbilisi, 10 -13 October 2012, pp. 91 – 95



11. Д.М.Мачарадзе, Т.Г.Намичеишвили, Д.А.Нозадзе, М.Н.Окросашвили. Электростимулирование диффузионного соединения сталь – алюминий, под термопластической обработкой в твердой фазе. Сборник докладов. Современные технологии и методы неорганического материаловедения. Тбилиси, Грузия, 4-6 Июнь, 2012, 74 – 83 с
12. საქართველოს ინტელექტუალური საკუთრების ეროვნული ცენტრი საქპატენტი, დიპონირების დამადასტურებელი მოწმობა №4864, დიმიტრი მაჭარაძე, ნაწარმოები: Combined method of electric contact heating and diffusion connection of steel – aluminum, დეპონირებულია: 29.09.2011

## რეზიუმე

კომპოზიციური მასალები ფოლად-ალუმინის და მათი შენაერთების ბაზაზე ძირითადად გამოიყენება ავიაციაში, მანქანადმშენებლობასა და გემთმშენებლობაში, სადაც შესაძლებელია შენარჩუნებულ იქნას თოთოეული მათგანის საჭირო თვისებები. შემოთავაზებულია ფენოვანი მასალების იზოთერმული ელექტროკონტაქტური ხურებისა და დიფუზიური შეერთების ახალი მეთოდი. დამუშავებულია ტექნოლოგიური სქემა და დამზადებულია ლაბორატორიული დანადგარი, მიღებულია ფოლად-ალუმინის კომპოზიციური მასალები, მოცემულია მათი მექანიკური და მეტალოგრაფიული კვლევების ანალიზის შედეგები. ფენოვანი კომპოზიციური მასალების გამოყენება შესაძლებლობას იძლევა ახალი კონსტრუქციების შექმნის, ძვირადღირებული ფერადი ლითონების ეკონომიისა, მასისა და ღირებულების შემცირებისა. ჩატარებული თეორიული და ექსპერიმენტალური კვლევები საშუალებას იძლევა მივიღოთ ისეთი კომპოზიციური მასალები რომლებიც სრულად აყმაყოფილებენ ფიზიკო-მექანიკურ თვისებების გათვალისწინებით მოქმედ სტანდარტებს.

შემოთავაზებულია ფოლად-ალუმინის ელექტროკონტაქტური ხურების და დიფუზიური შეერთების კომბინირებული მეთოდი, რომელიც არსებით გავლენას ახდენს შეერთების ზონის მყარფაზური ფორმირების პირობებზე: უზრუნველყოფს შესაერთებელი ზედაპირების უკეთეს ფიზიკურ კონტაქტს, საკონტაქტო ზედაპირების მოთელვას, მტკიცე შეჭიდვის კვანძების წარმოქმნას და შენარჩუნებას. ამასთან, საკონტაქტო ზედაპირების აქტივაცია უფრო სწრაფად და ეფექტურად მიიღწევა მექანიკურად ან ვაკუუმში დამუშავებასთან შედარებით. ჩატარებული ექსპერიმენტული მონაცემების თანახმად, ფიზიკური კონტაქტისა და შეჭიდვის ძალების წარმოქმნა შეესაბამება მყარი სხეულების მოდელისა და შეკავშირების სიმტკიცის განვითარების კინეტიკის თანამედროვე წარმოდგენებს. შემუშავებულია რეჟიმები, რომლის დროსაც (10-15) მპა ძალით ზედაპირების დაწნევისასთან ერთად ხდება (5-10) ა/მმ<sup>2</sup> სიმკვრივის დენის გატარება. (3-5) წამის განმავლობაში გახურების პროცესში, მიკროშვერილების მთლიანად მოხსნისა და დასმის შემდეგ, მიიღწევა ზედაპირების აქტივაციის ის აუცილებელი დონე, რაც მყარ მდგომარეობაში მტკიცე შეკავშირებას უზრუნველყოფს. გახურების დამთავრების შემდეგ, (20-30) წამის განმავლობაში იზოთერმული დაყოვნების რეჟიმში, მარცვლებს შორის წარმოქმნილ ზედაპირებზე ვითარდება მტკიცე კავშირების დასამყარებლად საკმარისი შეჭიდვის ძალები. ჩატარებულია მექანიკური გამოცდები სტატიკურ და დინამიკურ რეჟიმებში, განსაზღვრულია სტრუქტურა და ფაზური შედგენილობა ფოლად-ალუმინის შეერთების საზღვარზე.

მოყვანილია მეტალოგრაფიული ანალიზებისა და მექანიკური გამოცდების შედეგები. დადგენილია, რომ ფოლად-ალუმინის კონტაქტის ზონაში წარმოიქმნება ინტერმეტალური ნაერთი FeAl<sub>3</sub>. მიღებული ექსპერიმენტალური შედეგების ანალიზისათვის შემოთავაზებულია მეთოდიკა პროცესების კინეტიკური მახასიათებლების განსაზღვრისა და ფუნქციური ახალი ფაზის განვითარების კინეტიკის ანალიტიკურ ამოხსნაზე.

## Abstract

A combined method of electric contact heating and diffusion connection of steel-aluminum is proposed which makes an essential effect on three phase shaping conditions, provides better physical contact and contact surface cleaning, formation and conservation of solid setting units. Activation of contact surfaces is achieved more effectively and quickly than at mechanical and vacuum treatment. Formation of physical contact and setting corresponds to contemporary conceptions of solid body model and kinetics of development of connection strength by the data of the carried out tests.

Combined use of well approved means of steel and aluminum compound, “electric contact heating –diffusion connection” in extended version of “plastic deformation and thermal treatment” is presented. Technological plan combining positive elements of several means is elaborated. The received results well harmonized with the requirements of strength standard of mechanical properties of AlMg<sub>6</sub>-St<sub>0,5</sub> could be transported to other pairs of dissimilar metals. There is carried out mechanical testing in static and dynamic models. There is determined structure and phase composition in steel-aluminum joint.

Elaboration and improvement of the method of steel- aluminum connection permit to reduce mass and increase corrosion resistance, as well as to realize the properties inherent to each metal separately. Layered composites of magnesium bearing aluminum and stainless alloys are widely used as adapters in steel-aluminum structures, shipbuilding, automobile industry, aircraft casing, etc. Rational use of metal, improvement of its quality and introduction of new technologies may solve the problem of provision of industry with constructional materials. The important role in perfection of metal product structure and expansion of new generation saving shapes belong to layered composite materials: steel-aluminum and their alloys. In shipbuilding the connections are performed in deck superstructures from aluminum alloy AlMg<sub>3</sub> with a metallic body. Composition units of steel-aluminum are used for casing of the body of flying vehicle. Connections AlMg<sub>6</sub>-1.4878 (DIN. X12CrNiTi 18-9) became a serious problem because of the extension of their use in motor industry. At present the constructions of car body are connected by the method of combining of mechanical properties (riveting, clincher), bonding and spot welding which is inconsistent with the requirements on strength.

Connections steel-aluminum are characterized by instability because of the considerable difference between chemical-physical and mechanical properties, thermal stresses, etc; the presence of oxide film on the surfaces and intermetallic inclusions in transition zone are the main problems of strong connection; The necessity of mechanical purification from the films, vacuum and blasting chambers, interlayers between steel-aluminum is yet complicating the production of composition materials.

Samples of layered composite of Steel-Al are received by method of diffusion welding and pressure. Mechanical tests on the samples were performed and results of the metallographic researches are received. It is established, that in a zone of contact of Steel-Al it is formed intermetallic layer FeAl<sub>3</sub>. For the analysis of the received experimental data on kinetic growth of durability of connection of materials in a solid phase the technique of definition of kinetic characteristics of process on the basis of the analytical decision of the fundamental equation kinetic developments of a new phase is offered.