UDC 546.3-19

SCOPUS CODE 2201

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2021-3-83-91>

შენადნობები ფორმის მეხსიერებით და შესაძლებლობები

ზურაბ მჭედლიშვილი	საინჟინრო გრაფიკისა და ტექნიკური მექანიკის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, საქართველო, 0160, თბილისი, მ. კოსტავას 68 ^ა E-mail: z.mchedlishvili@gtu.ge
მანანა თავხელიძე	არქიტექტურის საფუძვლებისა და თეორიის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, საქართველო, 0160, თბილისი, მ. კოსტავას 68 ^ა E-mail: mananiko@studiaarci.ge

რეცენზენტები:

დ. თავხელიძე, სტუ-ის აგრარული მეცნიერებებისა და ბიოსისტემების ინჟინერინგის ფაკულტეტის პროფესორი

E-mail: d.tavkhelidze@gtu.ge

ნია ნათბილაძე, სტუ-ის სატრანსპორტო და მანქანათმშენებლობის ფაკულტეტის პროფესორი

E-mail: n.natbiladze@gtu.ge

ანოტაცია. სტატიაში მოყვანილია მახსოვრობის მქონე ლითონების ჩამონათვალი და მოცემულია მათი სტრუქტურული ფორმულირება. მაგალითისათვის აღებულია ყველაზე აქტიური მახსოვრობის მქონე ნიკელისა და ტიტანის ინტერმეტალური ნაერთი - შენადნობები Ni_3Ti სახელად ნიტინოლი. გაკეთებულია ამ შენადნობის კრისტალური მესერის კონფიგურაციის ცვლილების ანალიზი, მასალის გახურებისა და გაციების სხვადასხვა ტემპერატურის შემთხვევაში.

საკვანძო სიტყვები: ნიტინოლი; შენადნობი მახსოვრობით; მარტენსიტი; კრისტალური მესერი.

შესავალი

თერმოდინამიკური მოდელირების მეთოდის გამოყენების საფუძველზე გაანალიზებულია ცვლილებები, რომლებითაც ხასიათდება ნიკელი-ტიტანის (ნიტინოლის), სპილენძ-ალუმინის და სხვა ფორმის მეხსიერების მქონე შენადნობების კრისტალურ სტრუქტურებში ტემპერატურის ცვლილებით გამოწვეული შენადნობების ფორმების ცვალებადობა და დადგენილია მათი დრეკადური სიმტკიცის მახასიათებლები.

გასული საუკუნის 40-იანი წლების ბოლოს სხვადასხვა ქვეყნის მეცნიერებმა ყურადღება გამახვილეს იმ ფაქტზე რომ მეტალებსა და შენადნობებს, რომლებიც გათბობისა და მექანიკური ზემოქმედების შედეგად ნიმუშში წარმოქმნილი

მაბევრების გარკვეულ პირობებში, შეუძლიათ გაიხსნონ თავიანთი თავდაპირველი ფორმა. ამ ფენომენის მექანიზმები განისაზღვრება პროცესებით, რომლებიც დაკავშირებულია ნიმუშის სტრუქტურული ბადის ცვალებადობასთან.

პირველად ნახსენები ეფექტი დააფიქსირა შვედმა მკვლევარმა არნე ოლანდერმა 1932 წელს კადმიუმისა და ოქროს შენადნობის საცდელ ნიმუშში, მაგრამ ფორმის მეხსიერების მქონე შენადნობების მიმართ ინტერესის განსაკუთრებული გამახვილება მოხდა მხოლოდ 60-იან წლებში, როდესაც აშშ-ში აღმოაჩინეს ნიტონის, ნიკელისა და ტიტანის ($Ni-Ti$) შენადნობის მოქცევის ფენომენი.

ძირითადი ნაწილი

ტიტანის ბაზაზე შენადნობები ბევრად უფრო ფართოდ გამოიყენება ვიდრე ტექნიკური ტიტანი, რომელიც ცნობილია $BTI-1$ და $BTI-2$ შენადნობების სახით. ტიტანის ამ შენადნობებში ნებადართულია მინარევების შემდეგი შემცველობა: აზოტი 0,04%-მდე, ჟანგბადი 0,15%-მდე, წყალბადი 0,015%-მდე, რკინა 0,3%-მდე სილიციუმი 0,15%-მდე, ნახშირბადი 0,1%-მდე და ვოლფრამი 0,05%-მდე. ტიტანის ლეგირება Fe, Al, Mn, Cr, V, Si, Ni-ით ზრდის მის სიმტკიცეს (σ_B , $\sigma_{0.2}$), ხოლო სითბომედეგობის გაზრდა წარმოებს Al, Zr, Mo, Ni ელემენტების გამოყენებით. ამავე დროს ცნობილია, რომ ტიტანს გააჩნია ორი ალოტროპული მოდიფიკაცია: 882°C - მდე საქმე გვაქვს α -ტიტანის სახესთან, რომლის სიმკვრივე შეადგენს $4,505 \text{ გ/სმ}^3$, რომლის კრისტალიზაცია წარმოებს ექვსკუთხა გისოსში მაღალ ტემპერატურაზე, რაც შეეხება β - სახის ტიტანს,

სიმკვრივე შეადგენს $4,32 \text{ გ/სმ}^3$, როდესაც ნიმუშის ტემპერატურა მიაღწევს 900°C . მას გააჩნია მოცულობითი ცენტრირებული კუბური მესერი. აქ უნდა აღინიშნოს, რომ ისეთი ელემენტები, როგორებიცაა Mo, V, Mn, Fe, Cr და Ni, ამცირებენ $\alpha \rightarrow \beta$ პოლიმორფული ტრანსფორმაციის ტემპერატურას და აფართოებს β - ფაზის არსებობას და შესაბამისად მათ უწოდებენ β - სტაბილიზატორებს. ზოგიერთი β - სტაბილიზატორები (Cr, Mn, Fe, Ni) ქმნის ინტერმეტალურ Ti_xM_y - შენაერთებს ტიტანთან. აქ უნდა არინიშნოს, რომ გაგრილების შემთხვევაში β - ფაზა განიცდის ევტექტოიდურ ტრანსფორმაციას $\beta \rightarrow \alpha + Ti_xM_y$.

ყველა აქ მოყვანილ მასალაში, ყველაზე განვითარებული მეხსიერების ეფექტი გააჩნია „ნიტინოლს“, რომელიც არის ნიკელისა და ტიტანის შენადნობი. იმ შემთხვევაში თუ ეს შენადნობი ექვემდებარება გარკვეულ თერმომექანიკურ დამუშავებას, მაშინ იგი ერთ ფორმას იღებს გაგრილების დროს, ხოლო მეორეს – გათბობისას.

ფორმის მეხსიერების ეფექტის მექანიზმი ეფუძნება ფაზის ტრანსფორმაციას, რომელიც წარმოებს მარტენზიტული (დიფუზიური) ტრანსფორმაციის მიხედვით. ფოლადებში პერლიტის მარტენზიტად გარდაქმნა შეუძლებელია, რადგან მარტენზიტს ყველა ტემპერატურაზე უფრო მაღალი თავისუფალი ენერგია გააჩნია, ვიდრე პერლიტს. საპირისპირო გარდაქმნა შეინიშნება ნახშირბადისგან თავისუფალ მაღალრეგილებულ შენადნობებში. ამალეული გარკვეული ფორმის მქონე ნიმუში აუსტენტულ მდგომარეობაში ტემპერატურის გაზრდის შემთხვევაში დეფორმირდება და შესაბამისად მარტენზიტული გარდაქმნა იწარმოებს უფრო დაბალ

ტემპერატურაზე. რაც შეეხება ნიმუშის გადახურების შემთხვევას მას თან ახლავს საპირისპირო ტრანსფორმაცია, რის შედეგადაც აღდგება ნიმუშის თავდაპირველი დამახასიათებელი ფორმა.

ფორმის მეხსიერების ეფექტი ვლინდება შენადნობებში, რომლებიც ხასიათდება თერმოელასტიკური მარტენზიტის ტრანსფორმაციით, ქსელის თანამიმდევრულობით, საწყისი აუსტენიტისა და მარტენსიტის ფაზებით და შედარებით მცირე ტრანსფორმაციის ჰისტერეზისით.

ნიმუშის თავდაპირველი ფორმის აღდგენა წარმოებს იმ შემთხვევაში, როდესაც ის ცხელდება A_H ტემპერატურაზე ზევით. ასეთი გარდაქმნის მამოძრავებელ ძალას არის საწყისი და მარტენსიტულ ფაზებს შორის წარმოქმნილი თავისუფალი ენერგიების სხვაობა. ნიმუშის საწყისი ფორმის სრულად აღდგენის მიზნით საჭიროა, რომ ნიმუშის მარტენსიტული მდგომარეობა იყოს კრისტალოგრაფიულად შექცევადი, რაც შესაძლებელია იმ შემთხვევაში, როდესაც შენადნობს გააჩნია ცენტრირებული მოცულობითი კუბური კრისტალური მესერი. იმისათვის, რომ კუბური მესერის გარდაქმნა წარმოებდეს სრიალის პროცესის გარეშე, რაც არის შეუქცევადი პროცესი, საჭიროა რომ დეფორმაციისას კრისტალოგრაფიული მესერი გარდაიქმნას მისი შემადგენელი ნაწილების დაწყვილებით.

ამ პირობებში, დეფორმაციისას წარმოებს დაწყვილებული მარტენსიტის კრისტალების ფორმირება, რომლებიც საწყისი სტრუქტურის კოგერენტულია, ხოლო გათბობისას საპირისპირო გარდაქმნისას, ნახსენები მარტენსი კრისტალები ქრებიან და მდოვრედ გადადიან მესერის საწყის ფაზაში.

საპირისპირო ტრანსფორმაციისას თანამიმდევრული კონგერენტული ინტერფაზური საზღვრების შექცევადი მოძრაობა იწვევს თავდაპირველი ფორმის აღდგენას.

ტრანსფორმაციის კრისტალოგრაფიული შექცევადო პროცესი გულისხმობს არა მხოლოდ კრისტალური სტრუქტურის აღდგენას, არამედ გარდაქმნის დაწყებამდე საწყისი ფაზის კრისტალოგრაფიული ორიენტაციის აღდგენას.

პრაქტიკული თვალსაზრისით, ძალზე მნიშვნელოვანია მარტენსიტული გარდაქმნების ტემპერატურული დიაპაზონის განსაზღვრა დატვირთვის გარეშე და ასევე ნიმუშში წარმოქმნილი მექანიკური დამაბულობის გაანგარიშება გათბობა-გაგრილების დროს. 1-ელ სურათში ნაჩვენებია ტემპერატურის ცვალებადობის გავლენის დიაგრამა შენადნობის ფაზურ მდგომარეობაზე შექცევადი მარტენსიტული გარდაქმნებისას.

ნიმუშის გაცივებისას აუსტენტური მდგომარეობიდან, მარტენსიტი იწყებს ჩამოყალიბებას გარკვეულ M_H ტემპერატურაზე. შემდგომი გაგრილების შედეგად, მარტენსიტის ფაზის რაოდენობა იზრდება და აუსტენიტის სრული გარდაქმნა მარტენსიტად დასრულდება გარკვეულ M_K ტემპერატურაზე. ამ ტემპერატურის ქვემოთ მხოლოდ მარტენსიტის ფაზა დარჩება თერმოდინამიკურად სტაბილური. მიუხედავად იმისა, რომ ნიმუშის გათბობისთანავე, მარტენსიტის გარდაქმნა აუსტენიტად იწყება გარკვეულ A_K ტემპერატურაზე, სრული თერმული ციკლის დამთავრების შედეგად მიიღება ჰისტერეზის მარყუჟი A_K-M_H ან A_H-M_K (იხ. ნახ. 1. A და b), რომელიც შეიძლება იყოს ფართო ან ვიწრო, რაც დაკავშირებულია ნიმუშის შემადგენელი მასალების სახეებზე

და მათ ფიზიკო - ქიმიურ თვისებებზე. ნახსენები ტემპერატურული დიაპაზონის გარდა, ჩვეულებრივ განიხილება კიდევ სამი დამახასიათებელი ტემპერატურა - T_0 , M_d , A_d , სადაც T_0 არის თერმოდინამიკური წონასწორობის ტემპერატურა, ხოლო M_d - ტემპერატურაა, რომლის დროსაც წარმოიქმნება მარტენსიტი. ტემპერატურული ფაქტორების გარდა, გარდაქმნისას ნიმუშზე ასევე მოქმედებს

შიგა და გარე მექანიკური ძაბვები. ნიმუშის გარდაქმნის ქცევაზე გავლენას ასევე ახდენს ტემპერატურების ფარდობითი მნიშვნელობები. მაგალითად: ვიწრო ჰისტერეზისის შემთხვევაში M_d ტემპერატურა შეიძლება აღმოჩნდეს აუსტენიტური ტრანსფორმაციის დასრულების A_k ტემპერატურის მარჯვნივ, ხოლო ფართო ჰისტერეზისით - ამ ტემპერატურის მარცხნივ.

სურ. 1

მეხსიერების მქონე ლითონების ფორმის ცვლილებას, როგორც წესი, თან ახლავს მძლავრი ინტერატომური ძალების გამოვლინება. ნიტინოლის, ალუმინის სპილენძის და სხვა ყველაზე გავრცელებული მეხსიერების შენადნობებისგან დამზადებული ნიმუშების ფორმის ცვალებადობა წარმოებს თითქმის ხმის სიჩქარით, გამოწვეული ტემპერატურის სწრაფი ვარდნით. თერმული დიაპაზონი, რომელზეც შეიმჩნევა ეს თვისებები ძალიან ფართოა - 170°C -დან $+260^{\circ}\text{C}$, ხოლო ძალები, რომლებიც წარმოიქმნება გარდაქმნისაგან გამოწვეული დეფორმაციებისაგან ასევე დიდია, ასე მაგალითად ამ ტიპის

მასალების გაფართოების წნევა ზოგჯერ აღწევს 7 ტ/სმ^2 . აქ ხაზი უნდა გაესვას იმ გარემოებას, რომ მასალის სახეზე და მის საწყის კონფიგურაციაზე დამოკიდებულია გარდაქმნისას მიღებული ნიმუშის გეომეტრია. ასე მაგალითად, ნიმუშს შეუძლია მოლუნვა, გაფართოება, შეკუმშვა და ასევე სპირალური ფორმის მიღება. ძალზედ მნიშვნელოვანია, ის რომ ნიმუშის ფორმის დაპროგრამება შესაძლებელია იმ ამოცანების გათვალისწინებით, რასაც მკვლევრები და ინჟინრები დასვავენ ამა თუ იმ კონსტრუქციის შექმნისას.

მაგალითისთვის განვიხილოთ ნიტინოლის ლენტის, რომელიც უნდა დაპროგრამირდეს ისე, რომ მივიღოთ გაღუნული კონფიგურაციის ლენტი წინასწარ დათქმული ტემპერატურის შემთხვევაში, საჭიროა რომ ნიმუში გაცხელდეს $+400^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურაზე და ნიმუშს მიეცეს ლათინური ასო C ფორმა, რის შემდეგ ნიმუში უნდა გაცივდეს $+40^{\circ}\text{C}$ -მდე დახურულ შტამპში და მოხდეს საპირისპირო მიმართულებით გაღუნვა. ამის შემდეგ, გათბობისა და გაგრილების მონაცვლეობით, მოხდება ფირის გაღუნვა და გასწორება.

ფორმის მესხიერების მქონე ნიმუშის კრისტალურ ბადეში, ფაზების ცვალებადობებისას, ყველა ატომი დაუბრუნდება კრისტალური ბადის საწყის მდებარეობებს მკაცრად იმ ტრაექტორიების გასწვრივ, რომლებზეც ისინი უკვე მიჰყვებოდნენ პროცესის მიმდინარეობისას.

სურ. 2

სურ. 2-ზე მოცემულია გამარტივებული დიაგრამა, რომელიც ხსნის ნიმუშის მესხიერების შენარჩუნების ეფექტს. აქ ნორმალურ პირობებში ატომები ქმნის რეგულარული ფორმის კრისტალურ გისოსებს, ხოლო გაცივებისას მოხდება ამ მესერის გარდაქმნა განსხვავებულ კონფიგურაციად, რაც შეესაბამება კრისტალურ გისოსებში წარმოქმნილი ძალური ფაქტორების დაბალ ენერგეტიკულ დონეს. შენადნობის შემდგომი დეფორმაციისას, ნიმუშში წარმოიქმნება შიგა ძაბვები და შესაბამისად მოხდება კრისტალური გისოსების უფრო მეტი ცვალებადობა. გარე ძალის ზემოქმედების შეწყვეტის შემდეგ ნიმუშის დეფორმაცია დარჩება იგივე სახით, რადგანაც ორივე მდგომარეობა ენერგეტიკულად ეკვივალენტურია. ხოლო იმ შემთხვევაში, როდესაც წარმოებს ნიმუშის გათბობა, კრისტალური მესერი კვლავ მიიღებს საწყის სწორ ფორმას და შესაბამისად ნიტონილისაგან დამზადებული ნიმუში აღიდგენს პირვანდელ კონფიგურაციას.

მახსოვრობის მქონე შენადნობების გამოყენება უკვე წარმოებს სხვადასხვა ტექნიკურ სისტემაში და ინტენსიურათ ფართოვდება გამოყენების არეალი, მათ შორის მედიცინაში, ავიაციაში და სხვ. გარდა ნათქვამისა უნდა აღინიშნოს შენადნობების გამოყენება დეკორატიული პროდუქციის შექმნისთვის. ნახსენები შენადნობების გამოყენება საწარმოო დიზაინის მხრივ წარმოებს სხვადასხვა მიმართულებით, ასე მაგალითად, იაპონელი დიზაინერის ოკი სატოს მიერ შექმნილ იქნა ჭადის ახალი დიზაინი (იხ. ნახ. 3).

სურ. 3

სურათიდან ჩანს, თუ როგორ იცვლება ჭადის ფორმა ნატურის ანთებასთან ერთად, როდესაც ნატურისგან გამოყოფილი სითბო ცვლის ჭადის

ფურცლების ფორმას. იგივე პრინციპითაა შექმნილი მე-4 სურათზე მოცემული იატაკის ბრა, რომლის ფურცლების გაშლა წარმოებს სინათლის ინტენსივობის გზრდასთან ერთად.

სურ. 4

ზემოთ მოყვანილის გარდა, უნდ ვახსენოთ მახსოვრობის მქონე შენადნობების გამოყენება კინეტიკურ არქიტექტურაში. მე-5 სურათზე მოცემულია ქ. ბრისბენში (ავსტრალია) მაღაზია „ზარას“ შენობის ფასადი, სადაც საჩრდილებლად გამოყენებულია ნახსენები შენადნობისგან დამზადებული პეპლების ფორმის ფირფიტები, რომლებიც მზის სითბური

რადიაციის ზემოქმედებით იცვლის ფორმას და მზისგან იცავს შენობის შიგა პერიმეტრს. მოცემული სისტემა მომგებიანად გამოიყურება იმ სქემებიდან, რომლებიც მოყვანილია [6], სადაც იმავე დანიშნულების სისტემების მოძრაობაში მოყვანა წარმოებს რთული მექანიკური სისტემების გამოყენების საფუძველზე.

სურ. 5

დასკვნა

ამრიგად, მახსოვრობის მქონე შენადნობების გამოყენება ინჟინერიაში გამოირჩევა პერსპექტიულობით, ოღონდ აღნიშნულისთვის საჭიროა შესაბამისი კვლევების ჩატარება, რომლებიც მოიცავს როგორც შენადნობების ფიზიკურ-ქიმიური მახასიათებლების დადგენას, ასევე ნახსენები შენადნობებისგან დამზადებული ნიმუშების მექანიკური

პარამეტრების განსაზღვრას, რაც შეესაბამება ნიმუშების დეფორმირების შედეგად მიღებული კონფიგურაციის ზუსტი გეომეტრიული ზომების გაანგარიშებას და ნიმუშის გარდაქმნისას განვითარებული ძალების ანალიზს. აქ ნათქვამი თანამედროვე მექანიკური სისტემების შექმნის ახალი სამეცნიერო მიმართულებაა.

ლიტერატურა

1. Akhmetov, N. S. (1981). General and inorganic chemistry. *Higher school*, 679.
2. Kireev, V. A. (1975). Course of physical chemistry. *Chemistry*, 775.
3. Geller, Yu. A., Rakhshadt, A. G. (1989). Materials science. *Metallurgy*, 455.
4. Arzamasov, V. N. (1986). Materials science. *Mechanical engineering*, 384.
5. Gulyaev, A. P. (1986). Metallurgy. *Metallurgy*, 541.
6. Tavkhelidze, M., Tavkhelidze, D. (2021). Kinetic Architectural Design. *Tbilisi: GTU Publishing House*, 93.

UDC 546.3-19

SCOPUS CODE 2201

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2021-3-83-91>

Alloys with Shape Memory and Their Physical and Mechanical Properties

Zurab Mchedlishvili	Department of Engineering Graphics and Technical Mechanics, Georgian Technical University, Georgia, 0160, Tbilisi, M. Kostava 68 ^a E-mail: z.mchedlishvili@gtu.ge
Manana Tavkhelidze	Department of Architecture Fundamentals and Theory, Georgian Technical University, Georgia, 0160, Tbilisi, M. Kostava 68 ^a E-mail: mananiko@studiaarci.ge

Reviewers:

D. Tavkhelidze, Professor, Faculty of Agrarian Sciences and Biosystems Engineering, GTU

E-mail: d.tavkhelidze@gtu.ge

N. Natbiladze, Professor, Faculty of Transport and Mechanical Engineering, GTU

E-mail: n.natbiladze@gtu.ge

Abstract. The article contains the list of alloys with shape memory and given their structural formulations. As an example, an alloy of nickel and titanium, named Nitinol ($\{Ni\}_3Ti$), characterized by the highest shape storage index. Here in the work, the analysis of changes in crystal structure of this alloy is made, at ground temperatures of material heating and cooling.

Key words: alloy with memory; crystal cell; martensitic; Nitinol.

UDC 546.3-19

SCOPUS CODE 2201

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2021-3-83-91>

Сплавы с памятью формы и их физико-механические свойства

Зураб Мchedlishvili Департамент инженерной графики и технической механики, Грузинский технический университет, Грузия, 0160, Тбилиси, М. Костава 68^ა
E-mail: z.mchedlishvili@gtu.ge

Манана Тавхелидзе Департамент основ и теории архитектуры, Грузинский технический университет, Грузия, 0160, Тбилиси, М. Костава 68^ა
E-mail: mananiko@studiaarci.ge

Рецензенты:

Д. Тавхелидзе, профессор факультета аграрных наук и инжиниринга биосистем ГТУ
E-mail: d.tavkhelidze@gtu.ge

Н. Натбиладзе, профессор факультета транспорта и машиностроения ГТУ
E-mail: n.natbiladze@gtu.ge

Аннотация. В статье приведен перечень сплавов с памятью формы и даны их структурные формулировки. В качестве примера можно привести сплав никеля и титана под названием нитинол (Ni_3Ti), характеризующийся наивысшим индексом сохранения формы. В работе выполнен анализ изменений кристаллической структуры этого сплава при температурах нагрева и охлаждения материала.

Ключевые слова: кристалл Мессер; мартенсит; нитинол; сплав с памятью.

განხილვის თარიღი 17.03.2021

შემოსვლის თარიღი 18.05.2021

ხელმოწერილია დასაბეჭდად 29.09.2021