

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ნინო ფცქიალაძე

ბეტონის ცოცვადობა ზედაპირულად აქტიურ გარემოში
მუდმივი და მრავალჯერადი სტატიკური დატვირთვების დროს

სადოქტორო პროგრამა მშენებლობა

შიფრი 0732

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარდგენილი დისერტაციის
ავტორეფერატი

თბილისი

2024 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში

სამშენებლო ფაკულტეტი

სამოქალაქო და სამრეწველო მშენებლობის ტექნოლოგიების და საშენი მასალების დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: მერაბ ლორთქიფანიძე

რეცენზენტები: მალხაზ ტურძილაძე

ირაკლი გიორგაძე

დაცვა შედგება 2024 წლის 11 ივლისს, 14:00 საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის

სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის სხდომაზე

კორპუსი I, აუდიტორია 508

მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,

ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი

დ. ტაბატაძე

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალობა. მშენებლობა საქართველოს ეკონომიკის სიდიდით მეოთხე სექტორია. საქართველოს სხვადასხვა რეგიონებში აქტიურად მიმდინარეობს ინფრასტრუქტურული პროექტების განხორციელება, რასაც თან ახლავს მრავალმხრივი და რთული პრობლემები, სწორედ ამიტომ, აუცილებელია ქართულმა სამშენებლო ბაზარმა თანდათანობით დაწეროს, ფეხი აუწყოს განვითარებული ქვეყნების ტექნოლოგიებს, მოხდეს კონსტრუქციული მასალების, მაგალითად, ბეტონის კვლევა/შესწავლა მათი საექსპლუატაციო მახასიათებლების გასაუმჯობესებლად. მყარი სხეული ეს არის ნივთიერების ერთ-ერთი აგრეგატული მდგომარეობა, რომელიც სხვა აგრეგატული მდგომარეობებისაგან, კერძოდ, აირისებრი, თხევადი, პლაზმური, ატომების სითბური მოძრაობის ხასიათითა და ფორმის მდგრადობით განსხვავდება. მყარისხეულების ატომურ-მოლეკულურისტრუქტურისა მისი შემადგენელი ნაწილაკების მოძრაობის ხასიათის ცოდნა ხსნის დასაკვირვებელ მოვლენებს, ეს ყოველივე იძლევა საშუალებას განვსაზღვროთ მყარი სხეულის ჯერ კიდევ აღმოუჩენელი თვისებები, ამასთანავე, მიზანდასახულად შევცვალოთ მისი სტრუქტურა და სხვა.

ბეტონი ერთ-ერთ ყველაზე გავრცელებულ კონსტრუქციულ სამშენებლო მასალას წარმოადგენს. შედგება რთული, ქიმიურად ინერტული ნაწილაკებისგან, რომელიც ცნობილია როგორც აგრეგატი (აგრეგატებში შეიძლება შევიდეს ხრეში, ქვიშა, დამსხვრეული ქვა, წიდა, დამწვარი თიხა, ფერფლი და დამწვარი ფიქალი) და რომელიც ერთმანეთთან დამაგრებულია ცემენტისა და წყლის საშუალებით. იგი სამოქალაქო, სატრანსპორტო, ჰიდროტექნიკურ და სამრეწველო მშენებლობაში ფართოდ გამოყენებადი პროდუქტია. ბეტონის ასეთი გავრცელებადობა აიხსნება იმით, რომ მისგან წინასწარგამიზნული ზომების, ზედაპირისა და თვისებების მქონე კონსტრუქციული ელემენტების მიღებაა შესაძლებელი. ამასთან ერთად, ბეტონი იძლევა საშუალებას სამშენებლო სამუშაოები განხორციელდეს მექანიზაციის გამოყენებით, სწრაფად და წლის ნებისმიერ დროს და იაფია სხვა მასალებთან შედარებით. მიუხედავად, ყველა ზემოთ ჩამოთვლილი დადებითი თვისებისა ბეტონს ახასიათებს უარყოფითი თვისებებიც,

მაგალითად, როგორცაა სიმყიფე, ანიზოტროპულობა და სხვა. სწორედ, ამიტომ მნიშვნელოვანია მათი შესწავლა და ლოკალურ-გლობალური პრობლემების ინოვაციური, ეკოლოგიურად და ეკონომიკურად გამართლებული ტექნოლოგიების შემუშავებით აღმოფხვრა.

დისერტაციის მიზანია სამშენებლო მასალების, კერძოდ ბეტონის, თავისებურებების ანალიზი და შესწავლა, ზედაპირულად აქტიურ გარემოში. ასევე, ბეტონის ცოცვადობის დროს დეფორმაციის შეზღუდვის დასაბუთება.

სამეცნიერო სიახლე. ბეტონის გამძლეობის ზღვარის გაანგარიშების სიზუსტის გაუმჯობესების მიზნით, შემოთავაზებულია ახალი მეთოდი, რომელიც მდგომარეობს მასში, რომ შეკუმშვის ან გაჭიმვის დროს საგულდაგულოდ განისაზღვრება მისი ზღვრული დეფორმაცია, რისთვისაც დამატებითი ნიმუში მიყვანილია რღვევამდე. შემდეგ ის ექვემდებარება განმეორებით დატვირთვას გამძლეობის ქვედა ზღვარს ქვემოთ, სანამ არ მიიღწევა ცოცვადობის დეფორმაცია.

პრაქტიკული მნიშვნელობა. ზედაპირულად აქტიურ გარემოში მყოფ მყარ ტანს(მაგ.: ბეტონს), აქვს შექცევადი არაწრფივი დეფორმაციის სტადია(შად) - დეფორმაციის განვითარების დამახასიათებელი თავისებურება, რომელიც გარე ძაბვის შედეგადაა გამოწვეული. სწორედ ამიტომ, მნიშვნელოვანია შექცევადი არაწრფივი დეფორმაციისა და დეფორმირებული სხეულის გარე მახასიათებლებს შორის დამოკიდებულების შესწავლა, რაც მოგვცემს შესაძლებლობას წინასწარ მოხდეს შად-ის დროში სვლის განსაზღვრა. ყოველივე, ზემოთ აღნიშნულის გამოკვლევაკი გარკვეულწილად ხელს შეუწყობს კონსტრუქციების უეცარი კატასტროფული რღვევების ბუნებისა და მექანიზმების გაგებას.

პუბლიკაციები. სამეცნიერო სტატიები გადაცემულია გამოსაქვეყნებლად.

დისერტაციის სტრუქტურა და მოცულობა: სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლის, 3 თავის, დასკვნებისა და 46 გამოყენებული ლიტერატურისგან, რომელიც საბოლოო ჯამში მოიცავს 115 გვერდს. ნაშრომში, ასევე, მოცემულია ცხრილები და გრაფიკები.

ნაშრომის შინაარსი

ნაშრომის შესავალი აერთიანებს საკვლევ თემის აქტუალობას, სამეცნიერო სიახლეს და ნაშრომის პრაქტიკულ ღირებულებას.

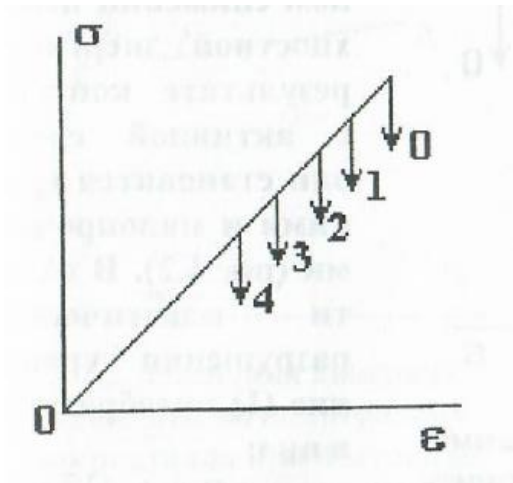
ნაშრომის პირველი თავი მოიცავს ლიტერატურის მიმოხილვას ბეტონის ცოცვადობის შესახებ სხვადასხვა ავტორთა მოსაზრებები და კვლევები, რომელთა როლი და მნიშვნელობა სადისერტაციო ნაშრომის აქტუალობის ხაზგასმას უწყობს ხელს. განხილულია ბეტონის შენელებული შექცევადი დეფორმაცია ზედაპირულად-აქტიურ გარემოში.

მყარი სხეულების თხევად ან გაზისებურ გარემოსთან ურთიერთქმედების მრავალფეროვან სახეობებს შორის რეზინდერის ეფექტი იკავებს განსაკუთრებულ ადგილს, თუმცა ზოგიერთ შემთხვევაში რთულია ზუსტად განისაზღვროს საზღვარი რომელიც გამიჯნავს ამ ჯგუფის მოვლენებს სხვებისგან, აგრეთვე გამოყოს ის სუფთა სახით გარემოს მთლიანი ზემოქმედებიდან. რეზინდერის ეფექტის ქვეშ ჩვენ მოვიაზრებთ მოვლენების ჯგუფს გარემოს ზემოქმედებისა მყარი სხეულების მექანიკურ თვისებებზე, განპირობებული მყარი სხეულის თავისუფალი ზედაპირული ენერჯის შემცირებით გარემოსთან მის ფაზათაშორის საზღვარზე.

მყარი სხეულების სიმტკიცის შემცირება და სიმყიფის ზრდა შესწავლილია მრავალ სისტემაზე: ლითონის მონო- და პოლიკრისტალებზე, რომლებიც კონტაქტშია ან ზედაპირი აქვთ დაფარული უფრო ადვილადდნობადი თხევადი ლითონის თხელი ფენით, კოვალენტურ კრისტალებზე – გერმანიუმი დაფარული ოქროს ფენით, და სხვა ლითონები-თიონურ მონო-და პოლიკრისტალებზე – მარილები, ოქსიდები, ჰიდროქსიდები, მთის ქანები, რომლებიც კონტაქტში არიან წყალთან, ზედაპირული აქტიური ნივთიერებების წყალხსნარებთან და ელექროლიტებთან, იონურ ნადნობთან; გრაფიტზე. ორგანული ნაერთების მოლეკულურ მონო- და პოლიკრისტალებზე (ნაფტალინი, ანტრაცენი და სხვა.) სხვადასხვა პოლარობის ორგანული სითხეების და მათი წყალხსნარების კონტაქტში მყოფი თერმოპლასტიკურ პოლიმერებზე.

მყარი სხეულებისათვის, ცოცვადობის ზღვრამდე მსხვრევადი, ზედაპირულ-აქტიურ გარემოს მოქმედებას მცირე გაჭიმულობისა და დეფორმაციისას მიყავს რღვევამდე. ამასთან დრეკადობის მოდული, ანუ წრფის დახრილობა, გაჭიმულობა-

დეფორმაცია კოორდინატებისას, პრაქტიკულად არ იცვლება (ნახ.1.)

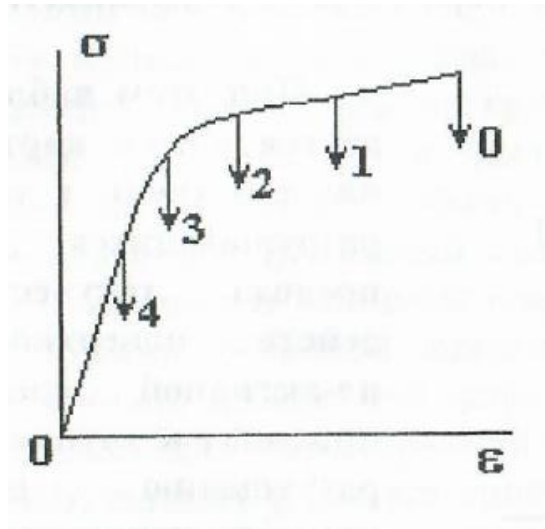


ნახ.1. დრეკად-მყიფე სხეულის დეფორმაციის ტიპური დიაგრამა ზედაპირულ-აქტიური გარემოს არარსებობის (0) და არსებობისას (1-4) აქტიურობის 1 დან 4-მდე გაზრდისას. ისრებით აღნიშნულია რღვევა.

ამან შესაძლებელი გახადა მოხდეს შედარება მნიშვნელობისა: რღვევაზე სიმტკიცისა და გაზომილი ან გამოთვლილი ფაზათაშორისი ენერგიისა საზღვარზე მყარი სხეული-გარემო (თხევადი ან გაზისებური). ყველა შესწავლილ შემთხვევაში დაცული იყო გრიფიტის ფარდობა, ანუ სიმტკიცე σ აღმოჩნდა პროპორციული კვადრატული ფესვი ფაზათაშორისი ენერგიის γ სიდიდედან:

$$\sigma = a \left(\frac{G\gamma}{c} \right)^{1/2} \quad (1.1.)$$

სადაც G -დრეკადობის მოდული; c -რღვევის ჩანასახოვანი ბზარის ზომა; a -ერთთან მიახლოებული უგანზომილებო მამრავლი. დრეკად-პლასტიკური მასალების რღვევა იწყება მცირე გაჭიმვებისა და დეფორმაციებისას.



ნახ.2. დრეკად-პლასტიკური სხეულის დეფორმაციის ტიპური დიაგრამა ზედაპირულ-აქტიური გარემოს არარსებობის (0) და არსებობისას (1-4) აქტიურობის 1 დან 4-მდე გაზრდისას. ისრებით აღნიშნულია რღვევა.

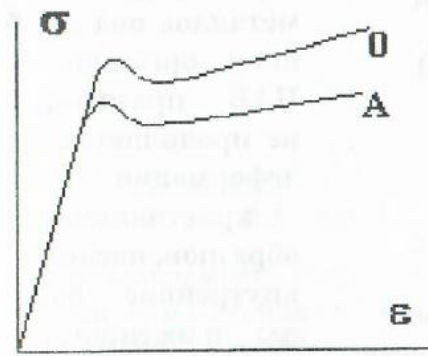
ზედაპირული ენერგიის მნიშვნელოვანი შემცირებისას, აქტიურ გარემოსთან კონტაქტის შედეგად, ისინი მყიფე და ნაკლებად მტკიცე ხდებიან (ნახ.2). პლასტიკური რღვევის ადგილას ტოლობა (1.1) იღებს ასეთ სახეს:

$$\sigma = a \left(\frac{\epsilon \gamma^*}{c} \right)^{1/2} \quad (1.2.)$$

სადაც γ^* - ახალი ზედაპირის წარმოქმნის მუშაობა და მისი თანმხლები პლასტიკური დეფორმაციები, ან ეფექტური ზედაპირული ენერგია, რომელიც ჩვეულებრივ ერთი-ორი რიგით მეტია ნამდვილზე.

ყველაზე სრულად რეზინდერის ეფექტი შესწავლილია ლითონებზე, რომელთა ზედაპირები უფრო მარტივად დნობადი ლითონის ფენით არის დაფარული (იგულისხმება ჯეროვნად შესწავლილი ლითონით). დაწვრილებითი გამოკვლევები მონო- და პოლიკრისტალურ ლითონებზე ჩატარებული იქნა პ.არეზინდერის სკოლის წარმომადგენლების მიერ (ვ.ი.ლიხტმანის, ე.დ.შუკინის, ნ.ვ.პერცოვის, ი.ვ.გორუნოვის და სხვა თანამშრომლების მიერ, აგრეთვე ს.ტ.შიშკინის, ი.მ.პოტაკის, ა.ვესტეუდის,

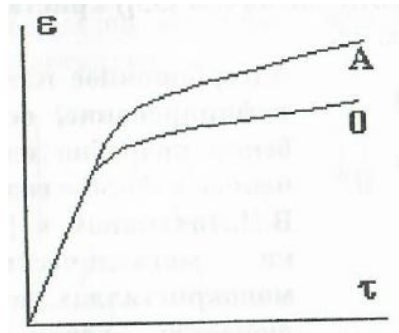
უ.როსტოკერის და სხვების მიერ; იონურ კრისტალებზე (ვ.ი.ტრასკინის, ზ.ნ.სკვორცოვის და მოლეკულურ კრისტალებზე ე.ა.სინევიჩის და სხვა მასალებზე.



ნახ.1.3. ლითონის მონოკრისტალის გაჭიმულობის ტიპური დიაგრამა დეფორმაციის მუდმივი სიჩქარისას $d\varepsilon/dt$ ჰაერზე (0) და ზედაპირულ-აქტიურ გარემოში (A).

ადსორბციული პლასტიფიცირება, განსაკუთრებით დაწვრილებით შესწავლილი 40–50 –იან წლებში ვ.ი.ლიხტმანის მიერ ლითონის მონოკრისტალებზე, მდგომარეობს ძირითადად ცოცვადობის ზღვარის და გამკვრივების კოეფიციენტის შემცირებაში (დეფორმაციის მუდმივი სიჩქარით ნიმუშის გაჭიმულობისას) და მცოცავი სიჩქარის (მუდმივი დატვირთვის ზემოქმედების ქვეშ გაჭიმვისას) (ნახ 1.3, 1.4). შეინიშნებოდა აგრეთვე დეფორმაციული სტრუქტურის მნიშვნელოვანი ცვლილება: სრიალის დასტების ძლიერი დაფშვნა. ამ მოვლენის დისლოკაციური თეორია შემუშავებული იქნა იმ წარმოდგენის საფუძველზე, რომელიც გულისხმობს დისლოკაციის გასასვლელის ზედაპირული პოტენციური ბარიერის შემცირებას ზედაპირზე საფეხურების წარმოქმნით–ლითონის ზედაპირული ენერჯის შემცირების შედეგად ზედაპირულ-აქტიური ნივთიერებების ადსორბციისას და შესაბამისად ახალი ზედაპირის წარმოქმნის მუშაობის შემცირებით. თხევადი ლითონის ზედაპირულ-აქტიური საფარები აგრეთვე იწვევენ ლითონის პლასტიფიცირებას, თუმცა ეს ეფექტი განსაზღვრულ პირობებში

ინილბება ლეგირებით დეფორმირებულ ნუმუშში ლითონის საფარის მოცულობითი დიფუზიის შედეგად.

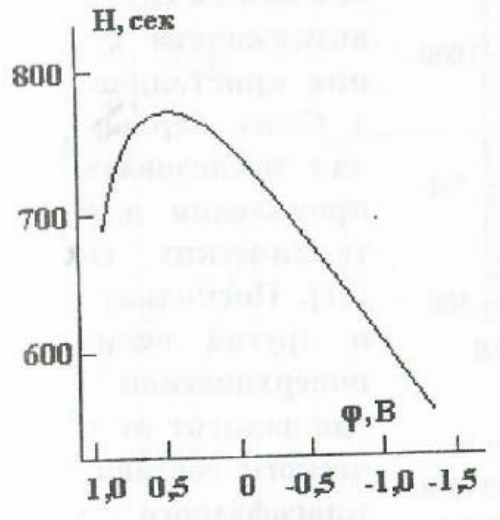


ნახ.1.4. ლითონის მონოკრისტალის ცოცვადობის უნარის ტიპური დიაგრამა მუდმივი დაძაბულობის σ ზემოქმედებისას ჰაერზე (0) და ზედაპირულ-აქტიურ გარემოში (A).

ლითონების ადსორბციული პლასტიფიცირება ორგანული ზედაპირულ-აქტიური ნივთიერებების ზემოქმედების ქვეშ პრაქტიკულად არ გამოვლინდება პოლიკრისტალური ნიმუშების დეფორმაციისას, რამდენადაც დისლოკაციის მოძრაობის შიგა ბარიერები (პირველ რიგში მარცვლების საზღვრები) არსებითად უფრო მოქმედია, ვიდრე ზედაპირული პოტენციური ბარიერები. თუმცა ისინი არსებით გავლენას ახდენენ ლითონის წნევით დამუშავებაზე. ზედაპირული ფენის პლასტიფიცირებისას ზედაპირულ-აქტიური ნივთიერებები თითქოს მას ლუბრიკანტად გადააქცევს, რომელსაც მოცემული ფორმაცვლილებასთან შედარებით, თვითონ მიაქვს ყველა ჭარბი პლასტიკური დეფორმაცია, მნიშვნელოვნად ამცირებს შიგა ძაბვას და ძალისხმევას წნევით დამუშავებისას.

სიმტკიცის შემცირების ელექტროკაპილარული ეფექტი აღმოჩენილი იქნა და გამოკვლეული ე.კ.ვენსტრემის და ვ.ნ.ლიხტმენის მიერ პ.ა.რებინდერის ლაბორატორიაში. ის მდგომარეობს დისპერგირების პროცესის შემსუბუქებაში (მაგალითად, შუქურისებური სკლერომეტრის დახმარებით) ან ცოცვის უნარის დაჩქარებით, ელექტროლიტის ხსნარში მოთავსებული გამოსაცდელი ლითონის ელექტროდული პოტენციალის გადაადგილებით ნულოვანი მუხტიდან კათოდურ ან ანოდურ მხარეს (ნახ.1.5, 1.6). აქ შეინიშნება სრული ანალოგია ლიპმანის

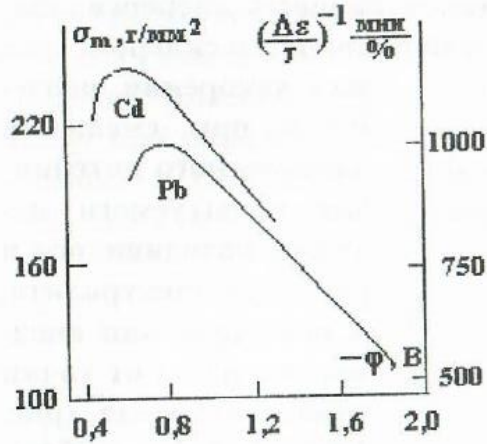
ელექტროკაპილარულ მრუდთან, რაც პირდაპირ და უპირობოდ მოწმობს მასზედ, რომ რეზინდერის ეფექტის ბუნება მდგომარეობს მყარი სხეულის ზედაპირული ენერჯის შემცირებაში. ეს მოვლენა გამოყენებული იქნა რიგი ლითონების ნულოვანი მუხტის წერტილის განსაზღვრისათვის, აგრეთვე ლითონის მექანიკური დამუშავების ინტენსიფიკაციისათვის.



ნახ.1.5. ტალიუმის სიმტკიცის დამოკიდებულება პოტენციალზე 1N Na₂SO₄ ხსნარში

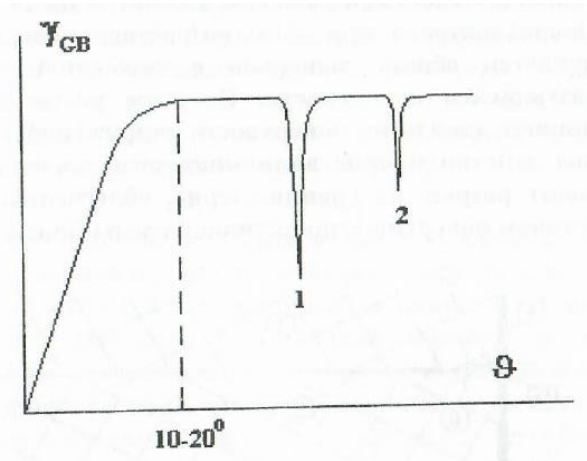
პოლიკრისტალებში მარცვლებს შორის საზღვრებშია სითხის თვითნებური შეღწევა ხდება მაშინ, როცა მყარი სხეულის დასველებისას ფაზათაშორის ენერჯია აღმოჩნდება ისე დაბალი, რომ სრულდება ეგრეთწოდებული გიბსი-სმიტის პირობა, რომლის თანახმად ფაზათაშორისი ენერჯის გაორმაგებული სიდიდე საზღვარზე, სითხე-მყარი სხეული, γ_{SL} აღმოჩნდება უფრო ნაკლები, ვიდრე მარცვლის საზღვრის ენერჯია γ_{GBGB} :

$$2\gamma_{SL} < \gamma_{GBGB} \quad (1.3)$$



ნახ.1.6. კადმიუმის მონოკრისტალის ცოცვადობის ზღვარის დამოკიდებულება 1N KCl-ში და ტყვიის მონოკრისტალის ცოცვადობის უნარის სიჩქარის შეზღუდვებულ სიდიდისა Na₂S₄O₆-ში 0,1N პოტენციალიდან

გიბსმა პირველად მიანიშნა ამ პირობაზე როგორც შემთხვევა კრისტალების შეზღუდვის შეუძლებლობაზე, ხოლო სმიტმა პირველად დაიწყო მისი გამოვლენის გამოკვლევა ლითონური სისტემისათვის. რამდენადაც როგორც ის, ისევე სხვა სიდიდეები ზედაპირული ენერჯისა დამოკიდებული არიან ქიმიურ შემადგენლობაზე (მრავალფაზიან მყარი სხეულისა) და შეხებაში მყოფი მარცვლების კრისტალოგრაფიულ ორიენტაციაზე, თანაფარდობის საერთო სურათი გაცილებით რთულად გამოიყურება. მარცვლის საზღვრის ენერჯია იზრდება ამ საზღვრის წარმოქმნილი მარცვლებს შორის სხეულებრივი კუთხის გაზრდასთან ერთად. დეზორიენტაციის შედარებით მცირე კუთხეებისათვის ეს კავშირი სწორხაზოვანია, დიდი კუთხეებისათვის აღარ არის დამოკიდებული ამ სიდიდეზე, ეგრეთწოდებული „სპეციალური საზღვრის“ შემთხვევის გარდა (ნახ.1.7). ამასთან დაკავშირებით, რეალურ პოლიკრისტალში შეიმჩნევა მარცვლების საზღვრების ფართოდ გადანაწილება მათი ენერჯების მიხედვით. ვ.ი.ტრასკინის მიერ დადგენილია, რომ ასეთი გადანაწილება ნორმალურად ითვლება. თუკი შეღწევადი საზღვრების წილი შეადგენს 1/4-ზე მეტს, მაშინ წარმოიქმნება თხევადი ფენების უწყვეტი სისტემა, ანუ პერკოლაციური სისტემა თხევადი ფაზისათვის შეღწევადობის დამახასიათებელი მთელი რიგი თვისებებით.



ნახ.1.7. ორი მარცვლის შეერთების საღვრის ჭარბი თავისუფალი ზედაპირული ენერჯის დამოკიდებულება მათი დეზორიენტაციის სხეულბრივი კუთხის სიდიდეზე: 1 და 2 – კონტაქტირებული მარცვლების ჩარჩოების ახლო დამთხვევის „სპეციალური საზღვრები“

თერმოდინამიკური პირობის (ზედაპირული ენერჯის შემცირება) გარდა რეზინდერის ეფექტს აქვს მკვეთრად გამოხატული კინეტიკური ბუნება, რომელიც პირველ რიგში მდგომარეობს მასში, რომ მყარ სხეულში კავშირების გადაწყობა ან წყვეტა უნდა მოხდეს ერთდროულად ამ გაწყვეტილი კავშირების კომპენსაციასთან ერთად, ზედაპირულ აქტიური ნივთიერებით, რომელიც ბუნებრივია, უნდა იყოს რღვევის ადგილას და მომენტში. ამას გარდა არსებობს რიგი სხვა კინეტიკური პირობები.

მნიშვნელოვანი ეტაპი რეზინდერის ეფექტის თერმოდინამიკური საფუძვლების შესწავლაში დაკავშირებულია იმ აზრის განვითარებასთან, რომ მყარი სხეულის ზედაპირულ-აქტიური ენერჯის შემცირებას და შესაბამისად მისი სიმტკიცის შემცირებას უნდა ველოდოთ სითხესთან შეხებისას, რომელიც ახლოსაა მასთან მოლეკულური ბუნებით. ლითონებისათვის ასეთ ზედაპირულ-აქტიურ გარემოს წარმოადგენს თხევადი, უფრო ადვილადდნობადი ლითონები; იონური კრისტალებისათვის – ნადნობი და ხსნარები იონური ნაერთებისა (მარილების, ოქსიდების, ჰიდროქსიდების), აგრეთვე წყალი; მოლეკულური ორგანული კრისტალებისა და პოლიმერებისათვის – მათთან

პოლარობით ახლოს მყოფი ორგანული სითხეები. რეზინდერის ეს წარმოდგენები გახდა ფართო მასშტაბის, მრავალწლიანი კვლევის საფუძველი, რომლებმაც მოახდინეს დემონსტრირება ერთის მხრივ რეზინდერის ეფექტის საყოველთაო თერმოდინამიკური ხასიათის, ხოლო მეორეს მხრივ – მისი მკვეთრად გამოხატული სპეციფიკურობის, ანუ თვისების, გამოვლინდეს მხოლოდ მკვეთრად გამოხატულ თერმოდინამიკურ, კინეტიკურ და სტრუქტურულ პირობებში.

რეზინდერის ეფექტის მნიშვნელოვანი განსაკუთრებულობა არის დროისა და ორი აქტის განხორციელების ადგილის ერთობა: მყარ სხეულში კავშირის გაწყვეტა და ადსორბციის–გაწყვეტილი კავშირების ენერგეტიკული კომპენსაცია. ეს სვამს სამ პირობას: 1) ზედაპირულ–აქტიური ნივთიერების არსებობა დაშლისწინა ზონაში. ანუ აქტიური ნივთიერება დაუყოვნებლივ უნდა მიჰყვეს მზარდ ბზარს; 2) აქტიური ნივთიერების ქიმიური ან ფიზიკო–ქიმიური ურთიერთზემოქმედება უნდა მოესწროს კავშირების გაწყვეტის მომენტში; 3) პლასტიკურ მასალაში ბზარის წვერში დამაბულობა უნდა იყოს არანაკლებ გარკვეული სიდიდისა, ანუ მან საკმაოდ სწრაფად არ მოახდინოს რელაქსირება პლასტიკური ძვრის შედეგად, ხოლო მყოფე სხეულებისათვის იმაზე მეტი არ იყოს, რაც უზრუნველყოფს აქტიური გარემოს მონაწილეობის გარეშე დაშლას.

პოლიკრისტალურ მასალებში სტრუქტურის ძირითად ელემენტს, რომელიც განსაზღვრავს რღვევის მახასიათებელ თვისებურებებს ზედაპირულ–აქტიური გარემოს არსებობისას, წარმოადგენს მარცვლების საზღვრები. რღვევა ხდება პრაქტიკულად ყოველთვის მარცვლების საზღვრებზე, რომლის მიმართულებაც გაჭიმვის მაქსიმალური დამაბულობის პერპენდიკულარულად, ანუ, ბზარის დატოტვის შემთხვევაში დიდი ძალის მოდებისას,– მცირე კუთხით ამ მიმართულებასთან. აქ შეიძლება დაშლის პროცესის განვითარების რამდენიმე მახასიათებელი შტრიხის დაკვირვება.

1. მთელი ნიმუშის ან მექანიზმის დეტალის ან კონსტრუქციის კონტაქტისას ზედაპირულ –აქტიურ გარემოსთან დაშლა იწყება დამაბულობის კონცენტრაციის ან სტრუქტურის შესუსტების ადგილას (მარცვლების საზღვრები, ჭრილები, ნაკაწრები, მახვილი კუთხეები, ფორები) და ვითარდება მაგისტრალური ბზარის სახით. თუკი დამაბულობა საკმაოდ მაღალია, მაშინ რღვევა შეიძლება მოხდეს აქტიური გარემოს

მონაწილეობის გარეშეც კი.

2. თუკი სხეულში არსებობს შიდა დამაბულობა, რომელიც აქტიური გარემოს არსებობისას აჭარბებს მასალის სიმტკიცეს, მოხდება გახლეჩვა, ვიზუალურად შესამჩნევი სურათი, რომელსაც წარმოქმნის მაქსიმალური გაჭიმვის დამაბულობის განაწილება.

3. რთულ–დამაბულობის მდგომარეობაში, როცა გამორიცხულია მაგისტრალური ბზარის განვითარება (მაგალითად, შეკუმშვა დაძვრით), ხდება მასალის მოცულობითი დისპერგირება მაქსიმალურ დაძვრით დამაბულობის ზონაში.

4. გაჭიმულ ან მოხრილ ფირფიტაზე ზედაპირულ–აქტიური ხსნარის წვეთის დატანისას მის ორივე მხარეს იწყება ბზარის გაზრდა. გამჭოლი ბზარის წარმოქმნისათვის სიგრძით 10 სმ და 3მმ სისქის ფირფიტაზე საკმარისია 1 მგ აქტიური ხსნარი. თუკი მოდებული დამაბულობა შესამჩნევად აჭარბებს მასალის სიმტკიცეს აქტიური გარემოს კონტაქტისას, ბზარი დაიტოტება. დამაბულობის ზრდასთან ერთად დაშორება წვეთიდან დატოტვის დასაწყისამდე მცირდება, ტოტების განფენის კუთხე და მათი რიცხვი იზრდება, ხოლო ბზარის სიგრძე მცირდება.

5. გიბსი–სმიტის პირობის შესრულებისას (რომლის თანახმად ფაზათაშორისი ენერგიის გაორმაგებული სიდიდე საზღვარზე, სითხე–მყარი სხეული, γSL აღმოჩნდება უფრო ნაკლები, ვიდრე მარცვლის საზღვრის ენერგია $\gamma GBGB$):

$$2 \gamma SL < \gamma GBGB$$

თხევადიზედაპირულ–აქტიური ფაზა თვითნებურად აღწევს მარცვლების საზღვრებამდე თხელი აპკის სახით და წარმოქმნის უწყვეტ პერკოლაციურ სისტემას, თუკი „დასველებული“ საზღვრების წილი აჭარბებს 25%-ს. მექანიკური დამაბულობა ზრდის „დასველებული“ საზღვრების წილს; გაჭიმვის დამაბულობა იწვევს მარცვალთშორისი არხების გაფართოებას და სითხის შეღწევის დაჩქარებას, ხოლო შემკუმშველი – ანელებს ამ პროცესს.

6. მყარ სხეულში რთული–დამაბულობის არსებობისას დევიატორის დიდი წილის(არაჰიდროსტატიკური) შემადგენლობით, როგორც ეს, მაგ. ადგილი აქვს ღრმა ჭაბურღილებში ან შახტებში, ხდება მასალის მრავალჯერადი დასკდომა, რომელიც იწვევს დეფორმაციას, ხსნის ან ამცირებს დევიატორის დამაბულობას. ამას მივყავართ საფრთხის,

მასალის „გამოტყორცნა“ კედლიდან, და შესაბამისად ტრავმატიზმის შემცირებასთან. ხოლო ღრმა და განსაკუთრებით ზეღრმა ჭაბურღილებისათვის – კლდის ქანის ატყორცნა ჭაბურღილის კედლებიდან.

7. ფოროვანი სხეულები ღია ფორებით, შევსებული ზედაპირულ–აქტიური გარემოთი, განსაკუთრებით მგრძნობიარეა მათი მოქმედებისადმი, რამდენადაც არ არის კინეტიკური შეზღუდვა დაშლის ზონამდე გარემოს მიტანისა. ამის საწინააღმდეგოდ გაუჟღენთავი ფოროვანი მასალა– ღია ფორებით – არამგრძნობიარეა თხევადი გარემოს მოქმედებისადმი, რომელიც მათ ზედაპირზეა დატანილი. ფოროვან სხეულებში დახურული ფორებით, ასევე ადგილი აქვს სირთულეებს ზედაპირულ–აქტიური სითხის ტრანსპორტირებისა, რამდენადაც ის იხარჯება იმ ფორების შესავსებად, რომლებიც მოხვდება მზარდი ბზარის გზაზე.

ნაშრომის მეორე თავში განხილულია რეზინდერის ეფექტის გამოვლინების ფორმები. მნიშვნელოვანი ეტაპი რეზინდერის ეფექტის თერმოდინამიკური საფუძვლების შესწავლაში დაკავშირებულია იმ აზრის განვითარებასთან, რომ მყარი სხეულის ზედაპირულ–აქტიური ენერჯის უდიდეს შემცირებას და შესაბამისად მისი სიმტკიცის შემცირებას უნდა ველოდოთ სითხესთან შეხებისას, რომელიც ახლოსაა მასთან მოლეკულური ბუნებით. ლითონებისათვის ასეთ ზედაპირულ–აქტიურ გარემოს წარმოადგენს თხევადი, უფრო ადვილადდნობადი ლითონები; იონური კრისტალებისათვის – ნადნობი და ხსნარები იონური ნაერთებისა (მარილების, ოქსიდების, ჰიდროქსიდების), აგრეთვე წყალი; მოლეკულური ორგანული კრისტალებისა და პოლიმერებისათვის – მათთან პოლარობით ახლოს მყოფი ორგანული სითხეები. რეზინდერის ეს წარმოდგენები გახდა ფართო მასშტაბის, მრავალწლიანი კვლევის საფუძველი, რომლებმაც მოახდინეს დემონსტრირება ერთის მხრივ რეზინდერის ეფექტის საყოველთაო თერმოდინამიკური ხასიათის, ხოლო მეორეს მხრივ – მისი მკვეთრად გამოხატული სპეციფიკურობის, ანუ თვისების, გამოვლინდეს მხოლოდ მკვეთრად გამოხატულ თერმოდინამიკურ, კინეტიკურ და სტრუქტურულ პირობებში.

რეზინდერის ეფექტის მნიშვნელოვანი განსაკუთრებულობა არის დროისა და ორი აქტის განხორციელების ადგილის ერთობა: მყარ სხეულში კავშირის გაწყვეტა და

ადსორბციის–გაწყვეტილი კავშირების ენერგეტიკული კომპენსაცია. ეს სვამს უსათუოდ სამ პირობას: 1) ზედაპირულ–აქტიური ნივთიერების არსებობა დაშლისწინა ზონაში. ანუ აქტიური ნივთიერება დაუყოვნებლივ უნდა მიჰყვეს მზარდ ბზარს; 2) აქტიური ნივთიერების ქიმიური ან ფიზიკო–ქიმიური ურთიერთზემოქმედება უნდა მოესწროს კავშირების გაწყვეტის მომენტში; 3) პლასტიკურ მასალაში ბზარის წვერში დამაბულობა უნდა იყოს არანაკლებ გარკვეული სიდიდისა, ანუ მან საკმაოდ სწრაფად არ მოახდინოს რელაქსირება პლასტიკური ძვრის შედეგად, ხოლო მყიფე სხეულებისათვის იმაზე მეტი არ იყოს, რაც უზრუნველყოფს აქტიური გარემოს მონაწილეობის გარეშე დაშლას.

დიფუზიურ–მიგრაციული კინეტიკა. სპეციალურ ექსპერიმენტებში შესწავლილი იყო კინეტიკის სხვა სახე, რომელიც უზრუნველყოფდა ზედაპირულ–აქტიური ნივთიერებების არსებობას დაშლის წინა ზონაში, ცილინდრული ნიმუშის გაჩარხვით ზედაპირული დიფუზიის საშუალებით გარემოში, რომელიც წარმოადგენს ზედაპირულ–აქტიურს მოცემული მყარი სხეულისათვის. ფიქსირდებოდა გაჩარხვის მაქსიმალური სიჩქარე, რომლის დროსაც გარემოს მოქმედება წყდებოდა. იკვლევდნენ ფოლადი 45–ის გაჩარხვას მეთილის იოდიდის CH_2I_2 –ის პროპილის სპირის ხსნარში. იოდიდის მეთილი ამსუბუქებს ფოლადის ჭრას ხსნარის კონცენტრაციის მიუხედავად 5–50%–ის საზღვრებში, ხოლო პროპილის სპირტი პრაქტიკულად ინაქტიურია. კრიტიკული ჭრის სიჩქარე, რომელიც არ არის დაკავშირებული სიბლანტესთან, ადასტურებს მის უცვლელ მნიშვნელობას იოდის ხსნარებში, სიბლანტის მიხედვით ისეთ მკვეთრად განსხვავებულ ნივთიერებებში, როგორცაა გლიცერინი, ეთილენ–გლიკოლი, პროპილის სპირტი. კრიტიკული სიჩქარის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების კვლევა, ჩატარებული ფოლადის მიმართ ზედაპირულ–აქტიურ სხვადასხვა ნივთიერებებზე, საშუალება მოგვცა აქტივაციის ენერჯის და კინეტიკურ ტოლობაში წინაექსპონენციალური მამრავლის მნიშვნელობების მიღების, რომელიც აღწერს აქტიური ნივთიერების ზედაპირული დიფუზიის მიგრაციის სიჩქარეს დაშლის ზონაში:

$$V_c = V_0 \exp(-U_a/RT)$$

საზღვრების კინეტიკა. ბზარის გაჩენისას სხვაგვარ კინეტიკას ადგილი აქვს მაშინ, როცა ბზარის განვითარება იოლდება ქიმიური რეაქციით, რომელსაც აქვს საკმარისად

დიდი აქტივაციის ენერგია და კავშირების გაწყვეტის დრო მნიშვნელოვნად აჭარბებს მიგრაციის ან აქტიური ნივთიერებების დინების დროს დაშლის ზონაში. უფრო ნათელი და შესწავლილია ასეთი სიტუაცია დაშლისას, ბზარის ზრდისას ან მასალებში დაბზარულობისას, რომლებიც შეიცავენ სილოქსანურ კავშირებს და დეფორმირდებიან წყალში, წყლის ორთქლში ან პოლარულ სითხეებში: მინაში, კვარცში, ქვიშაში, მთის ქანებში. ადრეულ შრომებში, მიძღვნილი კვარცული მასალების დაშლის გაიოლებას წყლის ზემოქმედებით, წყლის მოქმედება ახსნილია იმით, რომ ბზარის წვერში ადგილი აქვს დაძაბულობის კონცენტრაციას და მასალის ხსნადობა გაზრდილია; ამიტომ ბზარი იზრდება დაძაბული მასალის ლოკალური ხსნადობის შედეგად. წყალში მინის და სხვა მასალების ასეთი დაშლა მიაკუთვნეს დაძაბულობის ქვეშ განვითარებულ კოროზიას. ჩარლზის და ჰილინგის მიერ გამოკვლეული იქნა წყლით დასველებული კვარცის ბზარის ზრდის სიჩქარის დამოკიდებულება სხვადასხვა ტემპერატურაზე მოდებული დაძაბულობაზე. არენიუსის ტოლობით გამოთვლილი აქტივაციის პროცესის ენერგია აღმოჩნდა 85 კჯ/მოლი. წარმოდგენილი იყო ტოლობა, რომელიც აღწერდა ექსპერიმენტალურ შედეგებს:

$$V = V_0 \exp[E + \sigma V_m - \gamma V_m / \rho] / RT,$$

სადაც V – ბზარის ზრდის სიჩქარე; V_0 – წინაექპონენციალური მამრავლი; E – აქტივაციის ენერგია, ექსრტაპოლირებული ნულოვან დაძაბულობაზე; γ – ფაზათაშორისი ენერგია; V_m – მოლური მოცულობა; ρ – გამრუდების რადიუსი და σ – გამჭიმი დაძაბულობა ბზარის წვერში.

რაც შეეხება რეზინდერის ეფექტის გამოვლენის მოლეკულურ-კინეტიკურ მოდელებს. პირველი მოდელი, რომელიც ახდენს ასეთ გავრცელებულ და მრავალმხრივ ბუნებრივ მოვლენის რეალიზებას – რეზინდერის ეფექტს, – შემოთავაზებული იქნა თვითონ პ.ა.რეზინდერის მიერ 1947წ. მის მიერ შემოთავაზებული მოდელი იმდენად ნათელი და ხატოვანია, რომ მთლიანად უნდა იქნას მოყვანილი. „ადსორბცია (Γ) იწვევს ზედაპირული დაძაბულობის (σ) შემცირებას მყარი სხეულის ზედაპირებზე $\sigma_0 - \sigma_1 = RT\Gamma$ სიდიდით საკმაოდ მცირე Γ ზღვრულ არეალში. ადსორბციული ფენების მოქმედება მცირდება მათი ორგანზომილებიანი მიგრაციით მიკრონაპრალების პირის ზედაპირებზე

სტერიულ დაბრკოლებამდე, განპირობებული ადსორბირებული მოლეკულების ზომებით და შესაბამისია მიკრონაპრალში არსებული ღრეჩოს კრიტიკული სისქის. ამ კრიტიკულ ღრეჩოში ადსორბირებული ფენის ბუნებრივი საზღვარი წარმოქმნის წრფივ ბარიერს, რომლის სიგრძის ყოველ ერთეულზე მოქმედებს ორგანოზომილებიანი წნევა $\sigma_0 - \sigma_1$ მისი შემდგომი გადაადგილების მიმართულებით მიკრონაპრალის სიღრმეში, რითაც ამ სახით ხელს უწყობს მიკრონაპრალის განვითარებას (გარე პირობების მუდმოვობისას) და დეფორმაციის მატებას. ამ წნევის ეფექტი ექვივალენტურია გარე F ძალის მატების $\Delta F \approx \sigma_0 - \sigma_1$ სიდიდეზე, რომელიც ჩაანაცვლებს ადსორბირებული ფენების მოქმედებას და წარმოადგენს მათ მექანიკურ ექვივალენტს.“ მომავალში, რეზინდერის ეფექტის მოლეკულური მექანიზმის ასეთი ახსნა არ გამოიყენებოდა არც მის სკოლაში და არც სხვა დაწესებულებებში.

ჩარლზმა და ჰილინგმა 1962 წელს, როდესაც ხსნიდნენ წყლის გავლენის მიზეზებს მინის სიმტკიცეზე, წამოაყენეს იდეები გარემოს კოროზიული ხასიათის მოქმედების შესახებ - „კოროზიის დამაბულობის ქვეშ“ გამოვლინება. ამ მექანიზმს საფუძვლად უდევს ბზარის წვეროს გახსნის შესაძლებლობა, რომელიც აქვს დამაბულობის სიჭარბით ქიმიური პოტენციალის სიჭარბის გამო დამაბულობის კონცენტრაციის შედეგად და უფრო დიდი ხსნადობით. ეს ჰიპოთეზა დიდი ხანი გამოიყენებოდა ფართო გავრცელებით, და იყო მათი გამოყენების მცდელობებიც, ლითონური ნადნობების ზემოქმედების ქვეშ ლითონების სიმყიფის აღსაწერად. შედეგად თვითონ ავტორებმა უარი თქვეს ამ წარმოდგენებზე, და უპირატესობა მიანიჭეს ახსნას ფორების წარმოშობას სპილენძის დეფორმირებად პოლიკრისტალის მარცვლების საზღვრებზე ვაკანსიის წარმოქმნის გამარტივებით, სპილენძის დასველებისას ბისმუტით. რაც შეეხება წყლის გავლენას მინის სიმტკიცეზე, ბერნშტეინის ნაშრომში დიდი მტკიცებულებით ნაჩვენებია, რომ აქ ლაპარაკია დაშლის აქტივაციის ენერჯის შემცირებაზე კავშირების ჰიდროლითიური განშრევების, გახეთქვის ხარჯზე. არსებითად შესაძლებელია ვილაპარაკოთ მთლიან ექვივალენტურობაზე მოსაზრებისა მექანიკური დამაბულობის გავლენით ქიმიური რეაქციის დაჩქარებისა და ქიმიური კავშირების მექანიკური დამაბულობის შემსუბუქებისა ქიმიური რეაქციის ზემოქმედებით (ფიზიკო-ქიმიური ურთიერთქმედება).

ნაშრომის მესამე თავი დათმობილი აქვს ბეტონისა და სხვა მყარი ნივთიერებების შექცევადი ცოცვადობის ანალიზს ზედაპირულ–აქტიურ გარემოში, სადაც განხილული და გაანალიზებულია კვლევა ბეტონის მდგომარეობის შესახებ თავისუფალი და შეზღუდული დეფორმირებისას და მოყვანილია მისი დიაგრამის ექსპერიმენტული დადასტურება.

თუ დამაბულ მასალაში არის თავისუფალი ზედაპირულ– აქტიური ნივთიერება (ან თუ მას შეიცავს ის გარემო, რომელშიც მასალა არის მოთავსებული), მაშინ აკადემიკოს რებინდერისა და მისი თანამშრომლების აზრით, მას აქვს ადსორბციული ეფექტი მის მიკრობზარებზე და მიკროფორმაციებზე, უფრო სწორად, მათ ახლად წარმოქმნილ ზედაპირებზე, ძირითადად გამოხატული ზედაპირული აქტიური ნივთიერებების ადსორბციული მოქმედებით დამაბულ მასალაში ზოგადად და, კერძოდ, წყლისა ბეტონში.

ადსორბციის თეორიის პოზიციიდან გამომდინარე მყარი სხეულების წრფივი ცოცვადობის ბუნების შესახებ, ექსპერიმენტულად იქნა შესწავლილი ბეტონის სიმტკიცის ზღვრული და დეფორმაციის მახასიათებლები თავისუფალ და შეზღუდული დეფორმირებისას ღერძული შეკუმშვისას და ცენტრალური გაჭიმვისას.

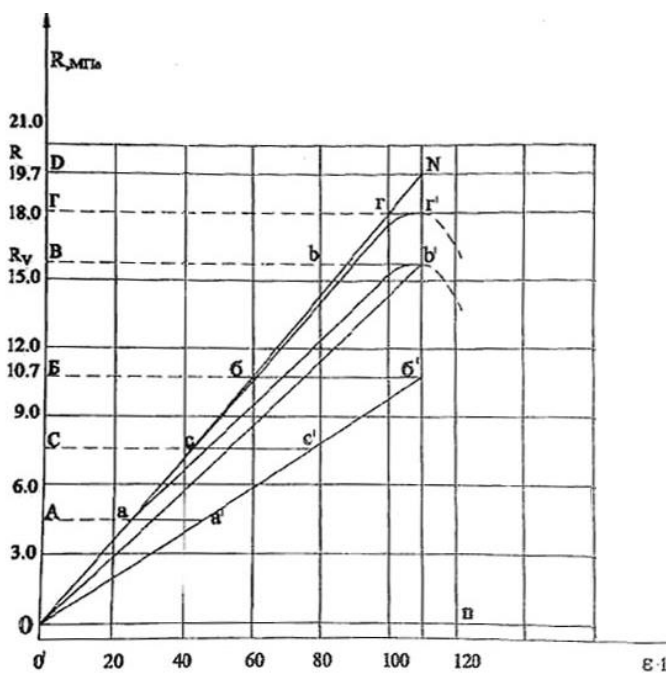
ბეტონის ნიმუშები–პრიზმები 10x10x40სმ და კუბურები 10x10x10სმ მომზადდა გარეცხილ 5–20 მმ მშრალ ხრეშზე და ქვიშაზე, გაცრილი 5მმ საცრით, მდინარე ყვირილას კარიერიდან. შემკვრელად გამოყენებული იქნა რუსთავის ცემენტის ქარხნის წიდაპორტლანდცემენტი M 400 ის მასალების ხარჯით 1მ³ –ზე, კგ , ცემენტი –320; ხრეში– 1180; ქვიშაა 650; წყალი 180 (2330 კგ/მ³). მობილურობა კონუსის გასწვრივ სპრიცილი-3 სმ, ხანგრძლივობა ვიბრაციის 20 წმ; ტენიანობა 90%; ტემპერატურა 20°C.

ნიმუშებს განყალიბება მოხდა დამზადებიდან ორი დღის შემდეგ, შემდეგ მოთავსებული იქნენ რეჟიმის ოთახში ნორმალური სითბური პირობებით.

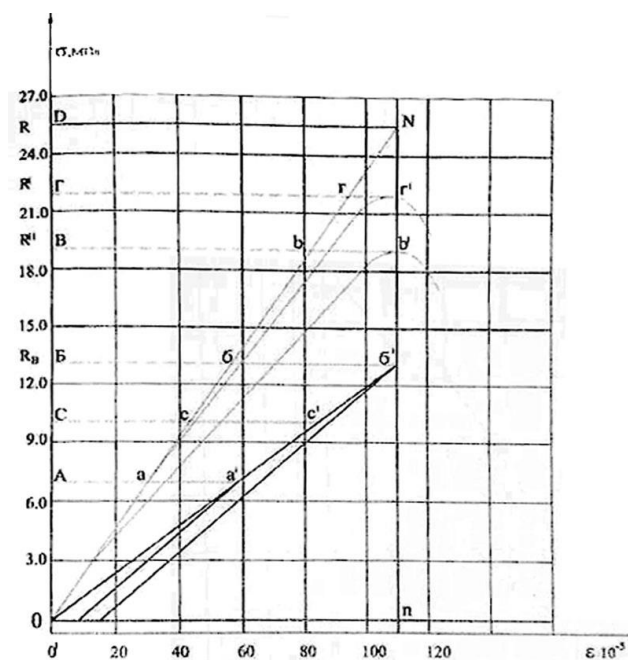
ამავდროულად, ექსპერიმენტები დეტალურად არის აღწერილი მხოლოდ სამი თვის ასაკის ნიმუშებისათვის, ვინაიდან ერთთვიანი, 9 და 16 თვის ასაკის ნიმუშები ანალოგიურად იქნა შემოწმებული. (ნახ.3)

ნახ.3.ექსპერიმენტალური დასაბუთება უნივერსალური გრაფიკისა ბეტონის შეკუმშვისას

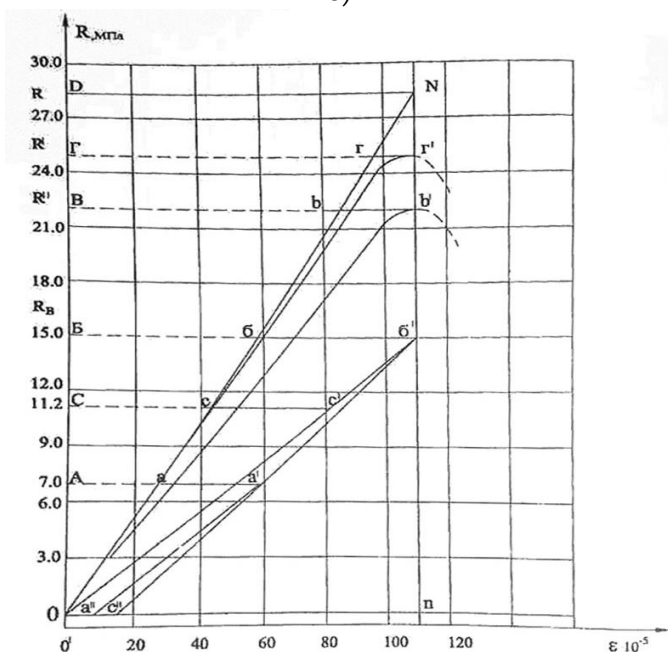
ასაკში 1თვის(ა); 3თვის(ბ); 9თვის(გ) და 16თვის (დ)მრუდები OB66*, OCc*, OAaa*,წარმოადგენენ გამძლეობის ზღვარის აღნიშვნას მრავალჯერადი განმეორებადი სტატისკური დატვირთვისას.



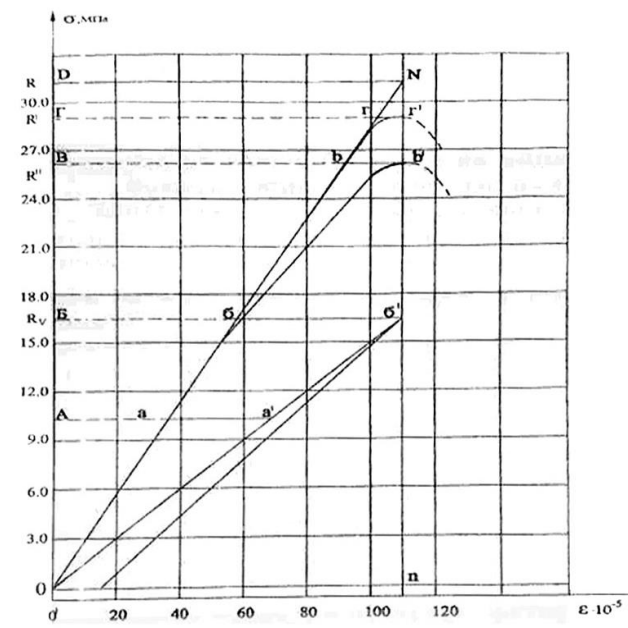
ა)



ბ)



გ)



დ)

ბეტონის პრიზმები 10x10x40სმ გამოსცადეს ლერძულ კუმშვაზე H-50 წნეხზე. ხახუნი პრიზმის წახნაგებს და პრესის ფირფიტებს შორის აღმოიფხვრა პრიზმის წახნაგებზე

პარაფინის წასმის გზით.

გრძივი დეფორმაციები ზომავდნენ წინააღმდეგობის სენსორებით 50 მმ ბაზით, რომლებიც დამაგრებული იყო პრიზმის ორი საპირისპირო წახნაგის შუაში. სენსორების მონაცემებს არეგისტრირებდნენ ორი მოწყობილობით АИД (თითოეულ სენსორზე ცალ-ცალკე დეფორმაციების დასაფიქსირებლად) დანაყოფის მნიშვნელობით 10^{-5} .

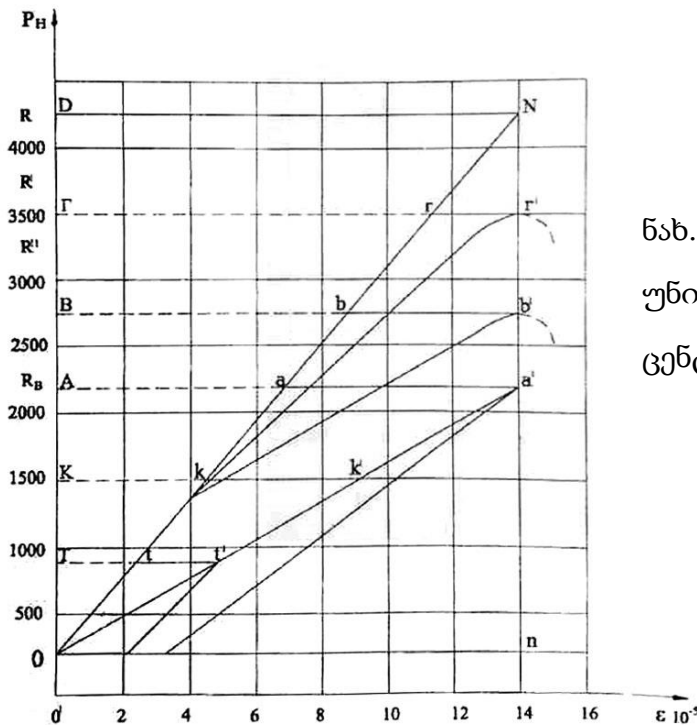
დადგინდა, რომ გარკვეულ დატვირთვამდე (განსახილველ შემთხვევაში 300 ნ) ბეტონი არ დეფორმირდა. ეს მნიშვნელობა იქნა მიღებული, როგორც მართკუთხა კოორდინატთა σ, ϵ რეალური საწყისი (0) (ნახ.4.). შემდგომში უზრუნველყვეს მყისიერი მაქსიმალური რღვევის დატვირთვა, რომელიც გამოყენებული იქნა 15,0 მპა/წმ სიჩქარით. ნიმუშის რღვევის მომენტში, ერთდროულად მანომეტრის ჩვენებამ დააფიქსირა მრღვევი დატვირთვა, ხოლო ორი АИД-ის მიხედვით – ზღვრული დეფორმაცია.

ორდინატთა ღერძზე გადაზომილია OD-სიმტკიცის რეალური ზღვარის მნიშვნელობა $R=25,0$ მპა. D წერტილიდან ჰორიზონტალურად გადაზომილია DN-ბეტონის ზღვრული დეფორმაციის (შემოკლების) მნიშვნელობა $\epsilon=104 \times 10^{-5}$. N წერტილიდან გაყვანილია ვერტიკალური ხაზი N_n აბსცისა ღერძთან გადაკვეთამდე. წერტილი N –ს აერთებენ რეალურ საწყის კოორდინატ 0–სთან. ამგვარად ცდის მონაცემებით შეაფასეს მხოლოდ ერთი ექსპერიმენტული ბეტონის ნიმუშის ფაქტობრივი სიმტკიცის ზღვარი, მისი შესაბამისი ზღვრული ელასტიური დეფორმაცია ϵ_{np} და სწორი ხაზი ON, რომელიც გამოხატავს დამოკიდებულებას ბეტონის ძაბვებსა და დეფორმაციებს შორის, რომლის დახრის კუთხის ტანგენსი აბსცისა ღერძზე წარმოადგენს მის დრეკადობის მოდულს. ძალიან მნიშვნელოვანია ასევე ის, რომ ამ შემთხვევაში მიღებული სამკუთხედის ფართობი OD N, წარმოადგენს ბეტონის მუშაობას მისი რღვევისას.

შემდეგ განსაზღვრავდნენ სიმტკიცის ზღვარს და მის შესაბამის ზღვრულ დეფორმაციას ჩვეულებრივი საშუალებით, ანუ დატვირთვის მოდების სიჩქარისას 0,2 მპა/წმ. აგებული იქნა მრუდი დამაბულობა-დეფორმაცია. შედეგად, სიმტკიცის ზღვარმა შეადგინა $R^*=21,6$ მპა, ხოლო ზღვრული შეკუმშვადობა – $\epsilon=108 \times 10^{-5}$. დამახასიათებელია, რომ მრუდის Γ^* გადატეხის წერტილი რღვევის მომენტში აღმოჩნდა N_n ვერტიკალზე. შემდეგ გამოსცადეს გამოცდილი ნიმუში-ტყუპისცალი, რომელზეც მოდებული იქნა

დამრღვევი დაძაბულობა $R^*=21,6$ მპა. ამასთან საბოლოო დრეკადობის დეფორმაციამ შეადგინა $\epsilon=90 \times 10^{-5}$, რომლის საბოლოო წერტილი აღმოჩნდა ბეტონის დრეკადობის ($r\Gamma$) მოდულის სწორ ხაზზე. შემდგომში დეფორმაცია გაგრძელდა დროში და მისი ბოლო წერტილი Γ^* რღვევის მომენტში აღწევდა ვერტიკალს Nn .

ბეტონის ზღვრული მახასიათებლების ბუნების უფრო ფართოდ გაცნობისათვის ჩატარებული იქნა ცდა შემკუმშავი დამშლელი დატვირთვის მოდებით მნიშვნელოვნად დაბალი სიჩქარით, კერძოდ $V=0,005$ მპა/წმ, და აიგო მრუდი დაძაბულობა-დეფორმაციის სიმტკიცის ზღვარი $R''=19,6$ მპა., ხოლო საბოლოო წერტილი ზღვრული დეფორმაციის ($\epsilon=110 \times 10^{-5}$) დაემთხვა დიაგრამის გარდატეხის წერტილს და აღმოჩნდა აგრეთვე თითქმის Nn ვერტიკალზე, რაც მოწმობს მის თანასწორობას მნიშვნელობით ელვისებურ მაქსიმალურ დრეკად დეფორმაციასთან. ელვისებური მაქსიმალური დამრღვევი დატვირთვის მოდებისას $R''=19,6$ მპა დრეკადობის დეფორმაციის ბოლო მივიდა დრეკადობის მოდულის ხაზამდე, ხოლო მთელი დეფორმაცია (დრეკადი+ დეფორმაცია დროში) მივიდა Nn ვერტიკალზე, დაემთვა რა გარდატეხის წერტილს მოცემული მრუდისა.



ნახ.4. ექსპერიმენტალური დასაბუთება უნივერსალური გრაფიკისა ბეტონის ცენტრალური შეკუმშვისას

ბეტონის ზღვრული მახასიათებლების უნივერსალური გრაფიკის თეორიული საფუძვლები და მისი მუშაობის თავისებურებები სრულად არის დადასტურებული ცენტრალური გაჭიმვის შემთხვევაში (ნახ.4.).

ამ გრაფიკების ანალიზიდან შეიძლება ითქვას, რომ ბეტონის სტრუქტურული ცვლილებების საზღვრებია: სიმტკიცის ფაქტობრივი საზღვარი, რომელიც წარმოადგენს მაქსიმალურ დამაბულობას და რომელიც მიიღება ბეტონის ელემენტის სამუშაო მონაკვეთის ფართობზე მყისიერად მოდებული დამრღვევი დატვირთვის შეფარდებით მის შესაბამის ზღვრულ ელასტიური დეფორმაციასთან. ბეტონის სიმტკიცე (R) იცვლება დროთა განმავლობაში და დამოკიდებულია დატვირთვის გამოყენების სიჩქარეზე, ხოლო ზღვრული დეფორმაცია ε_{np} , რომელიც არის მთლიანად ელასტიური, აქვს მხოლოდ მისი თანდაყოლილი თვისება: ბეტონის მოცემული შემადგენლობისათვის და მოცემული ხარისხის შეზღუდვისათვის, ის მუდმივია, არ არის დამოკიდებული ბეტონის ასაკისა და მოდებული დატვირთვის გამოყენების სიჩქარეზე. დროთა განმავლობაში ბეტონის სიმტკიცის ცვლილების კანონზომიერებას აქვს იგივე ხასიათი, როგორც მისი დრეკადობის მყისიერი მოდულის ცვლილების კანონზომიერებას, ვინაიდან $\varepsilon_{np} = \text{const}$, ხოლო $R = \varepsilon F$, რომელიც დასტურდება ექსპერიმენტით. ნებისმიერი რღვევა ხდება მაშინ, როდესაც ბეტონი მიაღწევს ფაქტობრივ სიმტკიცის ზღვარს და ზღვრულ ელასტიურ დეფორმაციას ε_{np} . ამ შემთხვევაში, სრულდება მუშაობა, რომელიც ტოლია ONn სამკუთხედის ფართობის ნახ.4.–ზე. მოდებული დატვირთვის სიჩქარის შემცირებით მცირდება ბეტონის R' სიმტკიცეც. მშრალ, ჰაერზე–მშრალ და წყალში გაჯერებულ ბეტონზე ჩატარებულმა ექსპერიმენტებმა აჩვენა, რომ დამატებითი დამაბულობას იწვევს წყლის განსოლების მოქმედება ან რაღაც იგივე, – სორბციული დატვირთვით. მაშასადამე ბეტონის დაშლა დროში ხდება გარე ძალების ჯამური მოქმედებიდან, რომელიც გამოხატულია $OBB'n$ ტრაპეციის ფართობით და წყლის განსოლებითი დამატებითი სამუშაოების მოქმედებისაგან, რომელიც ტოლია $BB'N$ სამკუთხედის ფართობისა, და ჯამში მთლიანობაში უდრის ONn სამკუთხედის ფართობს.

ბეტონის ზღვრულ მახასიათებლებზე განივი გაჭიმვის დეფორმაციის შეზღუდულობის ეფექტის ზემოქმედების შესაფასებლად დამზადდა და გამოიცადა

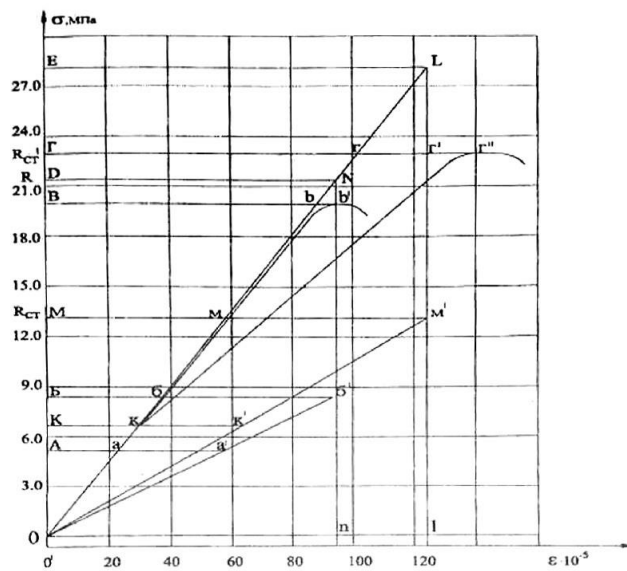
ბეტონის 48 პრიზმა 10x10x30სმ. ბეტონი მომზადდა გარეცხილ 5–20 მმ მშრალ ხრეშზე და ქვიშაზე, გაცრილი 5მმ საცრით, მდინარე ყვირილას კარიერიდან. შემკვრელად გამოიყენებოდა წიდაპორტლანდცემენტი რუსთავის ცემენტის ქარხნიდან M400 ხარჯით, კგ მასალა 1მ³ –ზე: ცემენტი 320; ხრეში– 1120; ქვიშა –650; წყალი– 180 (2330 კგ/მ³). მობილურობა კონუსის გასწვრივ стройЦНИИЛ-3 სმ, ხანგრძლივობა ვიბრაციის– 20 წმ; ნიმუშების განყალიბება მოხდა დამზადებიდან ორი დღის შემდეგ, შემდეგ მოთავსებული იქნენ რეჟიმის ოთახში ნორმალური სითბური პირობებით. (ფარდობითი ტენიანობა 70%; ტემპერატურა 20°C.). 2,5 თვის შემდეგ ნიმუშების ნახევარი მოთავსდა წყალში, ხოლო დარჩენილი ნახევარი ინახებოდა მშრალ ჰაერის გარემოში. სამი თვის ასაკში ბეტონის პრიზმები შემოწმდა ღერძულ შეკუმშვაზე H–50 წნეხზე. აღსანიშნავია, რომ თითოეული სერიიდან 12 ნიმუში ხახუნის გარეშე შემოწმდა, ხოლო დანარჩენი 12 ნიმუში ხახუნით. ხახუნი აღმოიფხვრა პრიზმის წახნაგებსა და პრესის ფირფიტებს შორის პარაფინის შეტანით.

გრძივი დეფორმაციები გაზომილი იყო პრიზმის მოპირდაპირე წახნაგებზე შუა ადგილას დამაგრებული წინააღმდეგობის სენსორებით 50 მმ ბაზით. სენსორები იზოლირებული იყო წყლის ზემოქმედებისაგან მათზე რეზინის წებო– 88 ის თხელი ფენის დატანით. სენსორების მონაცემებს არეგისტრირებდნენ ორი მოწყობილობით АИД (თითოეულ სენსორზე ცალ–ცალკე დეფორმაციების დასაფიქსირებლად) დანაყოფის მნიშვნელობით 10⁻⁵.

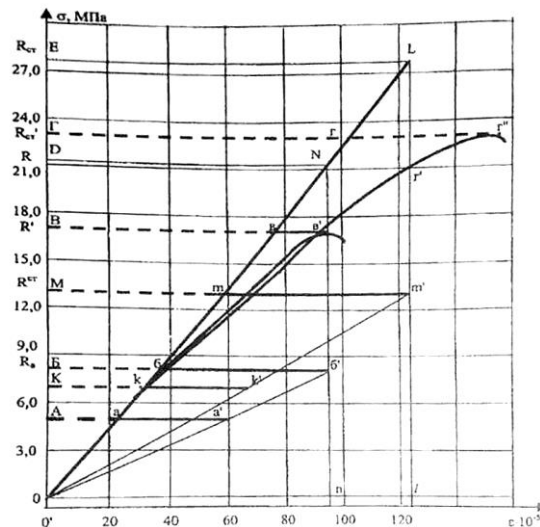
ცდების ჩატარების თანმიმდევრულობა ანალოგიური იყო. თავიდან თითოეული სერიის სამ ნიმუშზე განსაზღვრეს სიმტკიცის მყისიერი საზღვარი დატვირთვის სიჩქარით 15,0 მპა/წმ და მისი შესაბამისი ზღვრული დეფორმაციით. ნიმუშებისათვის, რომელსაც აქვთ ჰაერი–მშრალი შენახვის შეზღუდული დეფორმაცია, სიმტკიცის მომქმედი საზღვარი შეადგენს $R=27,5$, ზღვრული დეფორმაცია $\epsilon=122 \times 10^{-5}$, ხოლო დრეკადობის მოდული $E= 25 \times 10^2$. წყლით გაჯერებული ნიმუშებისათვის შეზღუდული დეფორმაციით $R=27,0$; $\epsilon=125 \times 10^{-5}$, $E= 25 \times 10^6$. მშრალი–ჰაერის ბეტონის პრიზმებისათვის ხახუნის გარეშე $R=22$; $\epsilon=98 \times 10^{-5}$; $E= 2500$ და წყლით გაჯერებული ნიმუშებისათვის ხახუნის გარეშე $R=21$; $\epsilon=98 \times 10^{-5}$; $E= 2500$.

შემდეგ დაადგინეს სიმტკიცის ზღვარი და მისი შესაბამისი ზღვრული დეფორმაცია ჩვეულებრივი გზით, ე.ი დატვირთვის სიჩქარით 0,2 მპა/წმ. აიგო დამაბულობა-დეფორმაციის მრუდი. გამოსაცდელი პრიზმის სამი ნიმუშის გამოცდის შედეგად სიმტკიცის ზღვარი და ზღვრული დეფორმაცია ბეტონის ჰაერი-მშრალი შეზღუდულობისას შეადგინა $R=23,8$; $\epsilon=17,0 \times 10^{-5}$; ბეტონის წყლით გაჯერებული შეზღუდულობისას $R=23$ მპა; $\epsilon=175 \times 10^{-5}$; ჰაერი-მშრალი თავისუფალი ბეტონის $R=13,2$ მპა; $\epsilon=100 \times 10^{-5}$;

გამოკვლევის შედეგები მოცემულია ნახ.5. და ნახ.6. -ზე



ნახ.5. ჰაერი-მშრალი ბეტონის $\sigma - \epsilon$ მრუდები თავისუფალი OB' და შეზღუდული OL'



ნახ.6. წყლით გაჯერებული ბეტონის σ – ემრუდებითავისუფალი OB' დაშეზღუდული OF'

5–6ნახაზების საფუძველზე ბეტონის ელასტურობის საწყისი მოდული, მიღებული დატვირთვის მყისიერი გამოყენებისას, ყველა განხილული შემთხვევისათვის (მშრალი, ჰაერით მშრალი, წყლით გაჯერებული ბეტონი, ხახუნით ან მის გარეშე) აღმოჩნდა მუდმივი. სიმტკიცის ფაქტობრივი ზღვარი და მისი შესაბამისი ზღვრული შეკუმშვა ჰაერი–მშრალი და წყლით გაჯერებული შეზღუდული ბეტონის მცირედ განსხვავდება ერთი მეორისაგან და მოდებული დატვირთვის სიჩქარე მნიშვნელოვნად არ მოქმედებს სიმტკიცეზე. ჰაერით მშრალი ბეტონის სიმტკიცის ზღვარი უფრო მეტია, ვიდრე წყლით გაჯერებული თავისუფალი ბეტონის. მისი მნიშვნელობა მით მეტია, რაც უფრო ნელა მოქმედებს დატვირთვა, თუმცა მათი ზღვრული დეფორმაცია ტოლია. ხახუნის არარსებობის შემთხვევაში მრუდების $\sigma - \varepsilon$ წერტილები განთავსდება Nn ვერტიკალზე და ამავდროულად წარმოადგენს ზღვრული დეფორმაციის საბოლოო წერტილებს B', G' .

თუმცა ხახუნის არსებობისას, Nn ვერტიკალი გადაადგილდება Ll –დან მარჯვნივ და გარდატეხის წერტილები დაიკავებს პოზიციებს Γ' –ს მარჯვნივ და ზემოთ. ამ მრუდების გადაკვეთის წერტილები იქნება ზღვრული დეფორმაციის რეალური საბოლოო წერტილები და განლაგებული იქნება ახალ ვერტიკალურ Ll –ზე მარჯვნივ და mm' –ის ზემოთ. მითითებული ზღვრული ელასტიური დეფორმაციები არის სწორედ შეზღუდული ბეტონის მიკრობზარწარმოქმნის საზღვარი, ან მისი ელასტიური დეფორმაციის არეალი. ამ შემთხვევაში ბეტონი არ დაირღვევა, თუმცა მასში უკვე გაჩნდა და განვითარდა შეუქცევადი მიკრობზარები.

ბეტონის გაჭიმვის დეფორმაციის შეზღუდვა განპირობებული არმირების, ხახუნის და ა.შ., აჭარბებს ზღვრულ დაჭიმულობას და ბეტონის სიმტკიცის ზღვარი მით უფრო დიდია, რაც უფრო მაღალია შეზღუდვის ხარისხი, კერძოდ რაც მეტია არმატურა რაც უფრო დისპერსიულადაა განაწილებული იგი. თავდაპირველად ეს აიხსნება იმით, რომ ბეტონი, როგორც უხეშად არაერთგვაროვანი მასალა, შეიცავს მრავალ განსხვავებულ დეფექტს, რომლის კიდევზე არის დამაბულობის კონცენტრაცია, რაც მნიშვნელოვნად ამცირებს მის სიმტკიცეს და დაჭიმულობას. ამ პირობებში ბეტონის სიმტკიცის გასაზრდელად საჭიროა აღმოიფხვრას ან მინიმუმ შემცირდეს დამაბულობის კონცენტრაციის ეფექტი, რაც

შეიძლება მოხდეს ბეტონის გაჭიმვის დაძაბულობის შეკუმშვით.

სამრეწველო, ჰიდრავლიკური, ენერგეტიკული, სატრანსპორტო საშუალებების ბეტონის და რკინაბეტონის კონსტრუქციები ექსპლოატაციის დროს ექვემდებარება მრავალჯერად განმეორებით დატვირთვას, ზოგიერთ მათგანზე სისტემატიურად მოქმედებს წყალი და მინერალური ზეთები. ბუნებრივია, ასეთი სტრუქტურების გამოთვლა აუცილებელია გამძლეობაზე განმეორებითი დატვირთვის ციკლების რაოდენობისა და გარემოს ზემოქმედების გათვალისწინებით. იმავდროულად, ნორმებში მოცემულია გამოთვლილი წინააღმდეგობა მხოლოდ ბუნებრივი ტენიანობის ბეტონისათვის და მხოლოდ $n=2 \times 10^6$ ციკლებისათვის.

ბეტონის რამდენიმე განმეორებითი სტატიკური დატვირთვისას კომპრესიული დატვირთვით იცვლება მისი სიმტკიცის და დეფორმაციის მახასიათებლები. ბეტონის დაბალი ციკლის სიმტკიცის განმსაზღვრელი ფაქტორებია დატვირთვის დონე რბილ რეჟიმში ან დეფორმაციის ამპლიტუდა მძიმე რეჟიმში, ციკლის ასიმეტრიის კოეფიციენტი და წყალგაჯერებულობა.

დადგენილია, რომ ზოგიერთ შემთხვევაში ბეტონისა და რკინაბეტონის კონსტრუქციების ელემენტების ხანმოკლე სიმტკიცე ხანგრძლივი შედარებით მაღალი კომპრესიული დატვირთვის შემდეგ იზრდება.

გრძელვადიანი შეკუმშვის შემდეგ, არაცენტრიული შეკუმშვის და ღუნვის ძალებით, რომლებიც მუდმივად ან მონოტონურად იზრდება დროთა განმავლობაში, მაგრამ არა უმეტეს $0,8-0,89$ დამშლელი დატვირთვის გამოყენების მომენტში $t=28$ დღის განმავლობაში, ის უფრო მაღალია ან ტოლია არადატვირთული ელემენტების სიმტკიცის. ამ უკანასკნელის სიმტკიცე, როგორც წესი, შეიძლება განხილული იქნას როგორც დატვირთული ელემენტების სიმტკიცის ქვედა შეფასებად. ეს შეიძლება აიხსნას იმით, რომ ბეტონზე განმეორებითი დატვირთვების მოქმედებით, დატვირთვა-გათავისუფლების რამდენიმე ციკლის შემდეგ, დგინდება სწორხაზოვანი დამოკიდებულება, ე.ი. ბეტონი იწყებს მუშაობას ელასტიურად. ამ შემთხვევაში მიიღწევა ზღვრული დრეკადი დეფორმაცია ϵ_{np} , რომელიც წარმოადგენს მიკრობზარწარმოქმნის საზღვარს. თუ ბეტონზე მოქმედი დატვირთვა აღემატება გამძლეობის ზღვარს, მაშინ

შემდგომი განმეორებითი დატვირთვებით რღვევა აუცილებლად მოხდება. ამიტომ, მაღალი დატვირთვების დროს, სწორხაზოვანი σ, ϵ დამოკიდებულების დადგენის შემდეგ, დატვირთვა უნდა შეწყდეს.

ერე ფარგლებში მცოცავი დეფორმაცია, სხვადასხვა კვლევების მიხედვით შექცევადია და მითითებულ საზღვრებში არ ხდება დესტრუქციული მოვლენები, ხოლო ადგილი აქვს ბეტონის გამკვრივებას. ახალგაზრდა ბეტონში შეინიშნება სიმტკიცის უფრო ინტენსიური მატება დატვირთვის ქვეშ. ამიტომ, დაბალი ციკლის შედარებით მაღალი კომპრესიული დატვირთვების შემდეგ, მიიღწევა რეალური ზღვრული სიმტკიცე, რაც გარკვეულწილად აღემატება არადატვირთული ბეტონის პრიზმების სიმტკიცეს დატვირთვის სტანდარტული სიჩქარისას.

დასკვნა

1. ბეტონისა და სხვა მყარი ნივთიერებების და მასალების შექცევადი დეფორმაციის (შენელებული დენადობის) ხასიათის მრავალწლიანი კვლევის ანალიზმა საშუალება მოგვცა დაგვედგინა შემდეგი: შენელებული შექცევადი დეფორმაცია წარმოიქმნება და ვითარდება მხოლოდ მყარი ზედაპირის აქტიურ გარემოსთან კონტაქტის პირობებში; პროცესი შექცევადია და მოიცავს დატვირთვის ქვეშ ცოცვადი დეფორმაციის თანდათანობით გაქრობას, როგორც კი ზედაპირულად – აქტიური გარემო მოცილდება; მიღევადი შექცევადი ცოცვადობა – რეზინდერის ეფექტის გამოვლინების ახალი ფორმაა.

2. ბეტონში ნარჩენი დეფორმაცია შეინიშნება მხოლოდ პირველი ჩატვირთვა–გადმოტვირთვის დროს. ზედაპირულად–აქტიური გარემოს შეყვანის შემდეგ იწყებს განვითარებას ცოცვადობა, დროთა განმავლობაში მიიღევა და მთლიანად შექცევადია. მაღალი დატვირთვის დროს, შექცევად ცოცვადობასთან ერთად შეინიშნება შეუქცევადი ცოცვადობაც, რომელიც არ ქრება გარემოს მოხსნის შემდეგაც. ის მით უფრო დიდი აღმოჩნდება, რაც უფრო მაღალია დამაბულობა. შექცევადი დენადობის დეფორმაციის დაბრუნების კინეტიკა, ზედაპირულ–აქტიური გარემოს მოცილებისას, როგორც დენადობისას ახლოსაა ექსპონენციალურთან და დამოკიდებულია გარემოს მოცილების ინტენსივობაზე.

3. მიღებულ შედეგებზე დაყრდნობით აიგო პროცესის ფიზიკური მოდელი, რომელიც საფუძველს იძლევა ვიფიქროთ, რომ მყარი ნივთიერებების შექცევადი დენადობის მთელი დაგროვილი დეფორმაცია უზრუნველყოფილია კრიტიკულამდე (გრიფიტის მიხედვით) ჩანასახოვანი ბზარების წარმოქმნით და განვითარებით, რომლებთანაც შესაძლებელია გამოყენებული იყოს თერმოდინამიკული თეორიის წარმოდგენები ჩანასახწარმოქმნაზე.

4. დადგენილია, რომ მაკროსკოპულად ერთგვაროვანი სილიკატური და ორგანული მინებისათვის დენადობის მთელი დეფორმაცია განპირობებულია მიკრობზარების წარმოქმნით და გახსნით, რომლებიც თანაბრად არის გადანაწილებული დატვირთვის ქვეშ მყიფი მასალის მთელ მოცულობაზე. პოლიკრისტალებში (ტუფი, თაბაშირი, ლითონი) მიკრობზარები უმეტესად წარმოიქმნება მარცვლების საზღვრებზე. რეზინის ცოცვადობა

განპირობებულია მისი გაჯირჯვებით, რომელიც აქტივირებულია მოდებული დამაბულობით.

5. თეორიულად და ექსპერიმენტალურად დასაბუთებულია და შემუშავებულია თავისუფალი და შეზღუდული ბეტონის ზღვრული მახასიათებლების უნივერსალური გრაფიკის აგებულების თეორია: ფაქტობრივი ზღვარი სიმტკიცის, ზღვრული დეფორმაციის, დრეკადობის მოდულის, ზღვარი გამძლეობის და ხანგრძლივადიანი წინააღმდეგობის და შესაბამისი ზღვრული დეფორმაციის, რამაც უზრუნველყო ერთიანი მიდგომა ამ პარამეტრების ცვლილებისადმი. დადგენილია, რომ ხანგრძლივი წინააღმდეგობის ზღვარზე ერთდროულად მიიღწევა: დენადობის დეფორმაციის მიღევა, მისი მაქსიმალური ზღვრული სიდიდე, დროთა განმავლობაში ბეტონის სიმტკიცის ზრდის დასრულება და მისი სიმტკიცის რეალური ზღვარი. მრავალჯერადი – განმეორებადი დატვირთვისას, რომელიც შეესაბამება გამძლეობის ზღვარს, მოცემულ ასაკის ბეტონში მოკლე დროში მიიღწევა მაქსიმალური დრეკადი ზღვრული დეფორმაცია. იმის გათვალისწინებით, რომ დროთა განმავლობაში ნიმუშებს ემატებათ სიმტკიცე და დრეკადობის მოდული, მაქსიმალური დეფორმაციის მუდმივობის შენარჩუნებისათვის საჭიროა გაიზარდოს განმეორებითი დატვირთვა ბეტონის სიმტკიცის ზრდის საბოლოო მომენტამდე. შესაბამისად, ბეტონის მოცემული შემადგენლობის მაქსიმალური ზღვრული დეფორმაცია განმეორებითი და მუდმივი დატვირთვისას აგრეთვე, როგორც შეფარდება ბეტონის სიმტკიცისა ბეტონის გამძლეობასთან, – მუდმივი სიდიდეა და არ არის დამოკიდებული მის ასაკზე.

6. შემოთავაზებულია ახალი მეთოდი ბეტონის გამძლეობის ზღვარის დასადგენად – ბეტონის წინასწარ განსაზღვრული ზღვრული დეფორმაცია შეკუმშვისა და გაჭიმვის დროს. იდენტური ნიმუში ექვემდებარება განმეორებით დატვირთვას გამძლეობის ზღვარს ქვემოთ, დენადობის დეფორმაციის მთლიანად გაჯერებამდე, მრავლდება დონის თანაფარდობაზე, რომელიც მიღწეულია ნიმუშის გამძლეობის გამოცდისას შესაბამის მაქსიმალურ დენადობის დეფორმაციასთან.

7. შემუშავებულია ბეტონის დენადობის მაქსიმალური ზღვრული დეფორმაციის პროგნოზირების მეთოდი, რომლის არსიც მდგომარეობს იმაში, რომ საკმარისია

ზემოქმედება მოხდეს ბეტონის გამოცდილ ნიმუშებზე განმეორებითი სტატიკური დატვირთვებით, გამძლეობის ზღვარის შესაბამისად და დადგენილი წრფივი დამოკიდებულებით σ, ϵ ამ დროს მიღებული დეფორმაციის დენადობის დაფიქსირება, რომელიც იქნება ზღვრულად მაქსიმალური.

8. შემუშავებულია ციკლური დატვირთვის დროს მყარი სხეულების მოქმედების ფიზიკური მოდელი და ნაჩვენებია, რომ ზედაპირულად-აქტიური გარემოს ფაზური მდგომარეობა უმთავრეს როლს ასრულებს .

9. დადგენილია მყარი სხეულების დენადობის სრული შექცევადობის მოვლენა ზედაპირულ-აქტიურ გარემოში. ნიმუშის მონაცვლეობითი მოთავსება აქტიურ გარემოში და შემდეგ მისი მოცილება გარემოდან არ მოქმედებს მის თვისებებზე, რაც მიუთითებს კრიტიკულამდე ბზარების წარმოქმნის პროცესების შექცევადობაზე როგორც თერმოდინამიკური, ასევე მექანიკური გაგებით.