

მალხაზ ბიბილური

ნამზადთა საიმედოობის გაზრდის მიზნით
ნეიტრონული დასხივების გავლენა ლითონების
ფიზიკო-მექანიკურ თვისებებზე

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის
მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
თბილისი, 0175, საქართველო
ივნისი, 2008 წელი

საავტორო უფლება © , 2008 მალხაზ ბიბილური

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავცანით მაღსახ ბიბილურის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ნამზადთა საიმედოობის გაზრდის მიზნით ნეიტრონული დასხივების გავლენა ლითონების ფიზიკო-მექანიკურ თვისებებზე“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი

ხელმძღვანელი:

სრული პროფესორი

ზ. ჩაჩხიანი, რ. ცხვედაძე

რეცენზენტი:

სრული პროფესორი

გიორგი დარსაველიძე

რეცენზენტი:

სრული პროფესორი

გელა ყიფიანი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2008 წელი

ავტორი: მაღსაზ ბიბილური

დასახელება: ნაშადთა საიმედობის გაზრდის მიზნით
ნეიტრონული დასხივების გავლენა ლითონების ფიზიკო-მექანიკურ
თვისებებზე

ფაკულტეტი : ინფორმატიკისა და მართვის სისტემები

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: თარიღი

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ
ზემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის
შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების
უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც
მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან
სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი
ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო
უფლებებით დაცულ მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა
იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ
მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია
სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს
პასუხისმგებლობას.

რეზიუმე

ატომური ენერგიის პრაქტიკულმა გამოყენებამ წარმოშვა რადიაციულად მედეგი მეტალების დამუშავების პრობლემა ბირთვული რეაქტორების ახალი და უკიდურესად რთული აღჭურვილობისათვის. ამ პრობლემის წარმოქმნამდე აინტერესებდათ ისეთი ჩვეულებრივი საკითხები, როგორიცაა: მექანიკური და ფიზიკური თვისებების გაუმჯობესება, მეტალების გამოყენება მაღალი ტემპერატურისას, კოროზიული მედეგობის ამაღლების შესწავლა აიროვან და თხევად გარემოში, ნამზადის ქცევის წინასწარმეტყველების შესაძლებლობა მათი სტრუქტურის ცვლილების საფუძველზე. ატომური ტექნიკის განვითარებასთან ერთად ამ პრობლემებს დაემატა მაღალი ენერგიების ნაწილაკების დასხივების გავლენა მეტალების ყოფაქცევაზე.

დასხივების მოქმედება მასალაზე არ იყო შესწავლილი საკმარისად პირველი ბირთვული რეაქტორის გაშვებამდე. ითვლებოდა, რომ დასხივების მოქმედება საზიანო იყო შესასწავლი მეტალებისათვის და მიიღეს კიდევაც ტერმინი რადიაციული დაზიანების სახელწოდებით. მრავალი ცდების შედეგად დადგინდა, რომ დასხივების დოზის ინტენსიობის მიხედვით ხდება მასალის თვისებების ცვლილება. აღმოჩნდა, რომ ზოგიერთი მასალის დენადობის ზღვარი იზრდება 10-ჯერ და მეტად. რაც შეეხება დრეკადობის მახასიათებლებს, მათი ცვლილება უფრო უმნიშვნელოა.

ნაშრომში განხილულია:

1. დასხივების შედეგად ნამზადთა ფიზიკური და მექანიკური თვისებების ცვლილებების ზოგადი კანონი და გაანალიზებულია ამ საკითხებისადმი მიძღვნილი ლიტერატურის მიმოხილვა. ის თვისება, რომ დასხივების შედეგად იზრდება დენადობის ზღვარი და რომ ეს პროცესი მდგრადია, შეიძლება გამოყენებული იქნეს მტკიცე და ამავე დროს მსუბუქი ნამზადის შესაქმნელად. ეს განსაკუთრებით გამოსაყენებელია მაშინ, როცა სხვადასხვა მოსაზრებების გამო ნამზადის გეომეტრიული მახასიათებლები და დატვირთვის სახე შეზღუდულია. ამის გამო ბუნებრივია ასეთი კონსტრუქციები წინასწარ მოვათავსოთ ნეიტრონული დასხივების ქვეშ და დასხივების დოზად ავიღოთ ნეიტრონების ის რიცხვი, რომელიც მოცემული მასალის მაქსიმალურ სიმტკიცეს უზრუნველყოფს. მრავალი ცდების შედეგად დადგენილია ცხრილები, რომლებიც ამყარებენ კავშირს დასხივების დოზასა და დენადობის ზღვარს შორის.

2. წარმოდგენილია წრიული (რგოლური) ფირფიტისა და დამრეცი კონუსური გარსის გაანგარიშების დაწვრილებითი ანალიზი. დასხივების დროს, დატვირთვის ინტენსივობის სიდიდე და ფირფიტის სისქე ისეთნაირად არის შერჩეული, რომ ადგილი ჰქონდეს ფირფიტის ოპტიმალურ დაპროექტებას. იგივე ითქმის ბრუნვითი კონუსური გარსის შემთხვევაში. მათემატიკური თვალსაზრისით საკითხი დაიყვანება ცვლად-კოეფიციენტებიან დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემის ინტეგრებაზე.

3. მოცემულია ლითონის ფირფიტებისა და გარსების ოპტიმალურად დაგეგმარების საკითხი. ასეთი ვითარების დროს საჭიროა გამოინახოს პრინციპულად განსხვავებული გზები ნამზადთა ტოლი წინააღობის

მისაღწევად. ერთ-ერთი მათგანი შეიძლება მდგომარეობდეს ლითონის გარსის რადიოაქტიურ დასხივებაში წინასწარ შერჩეული არათანაბარი დოზების მიხედვით.

დასხივების პროცესში შექმნილი მექანიკური თვისებების სტაბილური ხასიათის გამო მიზანშეწონილია ნამზადს მიენიჭოს ისეთი „ოპტიმალური“ არაერთგვაროვნება, რომელიც უზრუნველყოფს მათი ტოლი წინააღობის უნარს. შესაბამისად, თხელკედლიანი კონსტრუქციის ოპტიმალური დაგეგმარება მდგომარეობს დასხივების დოზების სათანადო კანონის შერჩევაში.

წმინდა მათემატიკური თვალსაზრისით დასმული ამოცანის შესწავლა მოითხოვს კერძოწარმოებუდიანი დიფერენციალური განტოლებების ისეთი არაწრფივი სისტემის ამოხსნას, რომელიც წონასწორობის განტოლებების გარდა, მოიცავს აგრეთვე ემპირიული ხასიათის ორ დამოკიდებულებას

$$E = f_1(N)$$

და

$$\sigma_s = f_2(N)$$

სადაც N -ით აღნიშნულია ნეიტრონული დასხივების დოზა.

მიღებული სისტემის ინტეგრების მიზნით ხელსაყრელია მივმართოთ მიმდევრობითი მიახლოების ხერხს, რომელიც ემყარება ფიზიკური ხასიათის მოსაზრებებს.

რამდენადაც დრეკადი მახასიათებლების ცვლილება დასხივების შედეგად შედარებით უმნიშვნელოა, ამდენად დრეკადობის მოდული შეგვიძლია მუდმივად მივიჩნიოთ პირველი მიახლოების დროს. მაშინ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ ძალები და მომენტები. ნაპოვნი ძალებისა და მომენტების მიხედვით, შესაბამისად, განისაზღვრება დასხივების დოზის ცვლილების „ოპტიმალური“ კანონი და ის გავლენა, რასაც დასხივება ახდენს გარსის მასალის დრეკადობის მოდულზე. პრინციპული თვალსაზრისით თუ მიუხედავად, მეორე მიახლოება მოითხოვს ისეთივე პროცედურის შესრულებას, რასაც პირველი, იმ განსხვავებით მხოლოდ, რომ იუნგის მოდული ამჯერად უკვე ცვლადი სიდიდეა და არა მუდმივი. ე.ი. ხდება წრფივი ამოცანის ამოხსნა დრეკადი არაერთგვაროვანი გარსისათვის. როგორც კონკრეტული საინჟინრო მაგალითების განხილვა გვარწმუნებს, პროცესი სწრაფად კრებადია და პრაქტიკულად ამოიწურება ორი-სამი მიახლოების შესრულებით.

გადმოცემულია ფოლადისაგან დამზადებული ბრტყელი ღეროვანი კონსტრუქციების ექსპერიმენტალური გამოკვლევა რადიოაქტიური დასხივების დროს. ნიმუშების გამოცდა ტარდებოდა საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში. აღწერილია სტენდის აღჭურვილობის და მოწყობილობების სქემები. გამოკვლეულია შემოთავაზებული კვანძების მუშაობა საცდელ კონსტრუქციებში რადიოაქტიური დასხივების დროს. ექსპერიმენტულმა გამოკვლევებმა აჩვენა, რომ გამოცდის პროცესში გაზომილი ჩაღუნვების სიდიდე და ხასიათი დატვირთვის საანგარიშო სიდიდემდე ზრდისას კვანძების გადაადგილების დატვირთვის პროპორციულია, რაც საშუალებას იძლევა შეფასებულიყო კვანძური შეერთების მუშაობა კონსტრუქციის შემადგენლობაში.

ნაშრომის მეცნიერულ და პრაქტიკულ ღირებულებას წარმოადგენს:

1. რადიაციული დასხივების პროცესში მასალების თვისებების მახასიათებლებისა და დასხივების დოზებს შორის ურთიერთკავშირის დადგენა, რაც მნიშვნელოვანია მეტალების თვისებების დიაგნოსტიკასა და პროგნოზირების საკითხისათვის.
2. კონსტრუქციების გაანგარიშების მათემატიკურ მეთოდს, რაც მნიშვნელოვანია რეაქტორების საკონსტრუქციო მასალების საიმედოობის პრობლემისათვის.
3. მაღალი ენერგიების ნაწილაკებით დასხივებული ფოლადისაგან დამზადებული კონსტრუქციული კვანძების და მთლიანად წამწის სიმტკიცისა და დეფორმაციის კვლევის შედეგები.

Summary

Application of nuclear energy in reactors evoked a problem of creating radiation resistant metals for highly sophisticated equipment. Before that scientists were mostly engaged in simple study of metal properties for improving its physical and mechanical features, possibilities of application at high temperature, corrosion resistance, durability forecast based on its structural changes and others. In addition to these problems, development of nuclear technologies required special research of radiation impact on the behavior of metals by high energy particles.

This problem hadn't been sufficiently studied before the installation of the first nuclear reactor. Besides, radiation was considered to have negative effect on metals. Later, multiple tests proved that radiation seldom resulted in visual damage, though various intensities caused changes in the properties of metals. Namely, the extension limit became ten times as high as before. As for the flexibility features, changes in this case were negligible.

The present research includes the following;

1. Analyses of the basic laws of radiation impact and the literature dedicated to it. The fact, that the increase in extension limit is a constant feature, can be used for creating highly durable lightweight metals. This is especially convenient when the geometrical parameters and the type of loading are restricted due to certain conditions. Obviously, these types of structures can be previously exposed to neutron radiation of required intensity to provide maximum durability of the metal. Numerous tests revealed relationship between the radiation dose and extension limit and provided data to compile interdependence charts of these values.
2. Detailed analysis of a round plate and a conical surface calculation. When exposed to radiation, the values of loading intensity and plate thickness are selected to meet the designed requirements. The same is characteristic to a rotating conical surface. The mathematical approach to this problem results in the integrity of non-constant differential equation systems.
3. The ways for optimal designing of metal plates and their surfaces. In this case it is important to find different ways to achieve equal resistance. One of them can be the radiation of metal surfaces by previously selected doses of different intensity.

Due to the stable character of mechanical properties acquired during the exposure to radiation, it seems reasonable to give to the structure the optimal variety that will provide their equal resistance. Relatively, the optimal design of thin wall structures envisages the selection of proper equation of radiation dosage.

From the mathematical viewpoint, the study of this problem requires solution of non linear.

Differential equations which besides the balance equation comprises two empiric formulas:

$$E = f_1(N)$$

and

$$\sigma_s = f_2(N)$$

where N indicates neutron radiation dosage.

In order to integrate the acquired system, it is reasonable to use the method of consecutive approach.

As far as the fluctuation of flexibility properties is negligible, the flexibility module can be considered as constant during the first approach. In this case the differential equation system enables us to determine resistance forces and moments. Consequently, the resistance force and moments which had been determined can be used to create an “optimal” law of radiation dosage change and envisage the impact of radiation on the surface of material. The second approach, based on the same principle, requires procedures similar to the first approach, but the Young module in the case is a variable value. As the survey of definite engineering examples has proved, the procedure is fast integrated and can be carried out in two or three approaches.

4. Research of steel structures with flat surfaces exposed to radiation, including the behavior of joints. Samples were tested at Georgian Technical University. The thesis provides charts and schemes of the used equipment. Research of the value and nature of bending, measured during the test have revealed that increase in the loading is proportional of joint movement. This enables us to estimate the behavior of joints inside the structures.

The practical value of the thesis is possibility to produce durable, light and reliable structures by the application of neutron radiation.

The results of the study have revealed as follows:

1. Interrelation between the metal properties and radiation dosage, which is very important to determine further application of the structures.
2. Mathematical method for structural design to provide high security of nuclear reactors.
3. Data on durability and deformation of steel joints of different structures exposed to the radiation of high energy particles.

შინაარსი

შესავალი	16
1. ლიტერატურის მიმოხილვა	
1.1. დასხივების გავლენა ელექტრონული სქემების მასალასა და ელემენტებზე	19
1.1.1. საკონსტრუქციო მეტალები	19
1.1.2. ფოლადი და შენადნობები რკინის საფუძველზე	22
1.1.3. დაბალნახშირბადიანი და დაბალლეგირებული ფოლადი .	22
1.1.4. უჟანგავი ფოლადი	39
2. შედეგები და მათი განსჯა	
2.1 ფერადი ლითონები და შენადნობები	50
2.1.1. ნიკელი და შენადნობები ნიკელის საფუძველზე	60
2.1.2. სპილენძი	69
2.1.3. ბერილიუმი	71
2.1.4. ძნელად დნობადი ლითონები	72
2.1.5. ფიზიკური თვისებები	76
2.1.5.1. კუთრი ელექტროწინაღობა	77
2.1.5.2. თერმული გაფართოების კოეფიციენტი	82
2.1.6. მაღალი ენერგიების ნაწილაკების დასხივების გავლენა ნაკეთობათა სიმტკიცე-მდგრადობაზე	83
2.1.7. დამრეცი კონუსური გარსის გაანგარიშება რადიოაქტიური დასხივების გზით	97
2.1.8. მთლიანი წრიული ფირფიტა	104
2.2. ლითონის ფირფიტებისა და გარსების ოპტიმალური დაპროექტება უწყვეტი არაერთგვაროვანი მასალის გამოყენებით	109
2.3. ფოლადის მიღებისგან დამზადებული ბრტყელი ღეროვანი კონსტრუქციების ექსპერიმენტული გამოკვლევა	118
2.3.1. ფოლადის მიღოვანი ელემენტების კვანძური შეერთებების ექსპერიმენტული გამოკვლევის მეთოდოლოგია	118
2.3.2. წამწებზე სტატისტიკური დატვირთვის მოქმედების ექსპერიმენტული გამოკვლევის მეთოდოლოგია	126

2.3.3. მაღალი ენერგიების ნაწილაკების დასხივების გაგლეჩა წამწის მთელი კონსტრუქციის, სიმტკიცისა და დეფორმირების ექსპერიმენტული გამოკვლევისას	132
2.3.4. ნეიტრონებით დასხივებული კვანძების სიმტკიცისა და დეფორმირების ექსპერიმენტული გამოკვლევის შედეგების ანალიზი	142
2.3.5. დასხივების დროს ბრტყელი ღეროვანი კონსტრუქციების შემადგენლობაში კვანძის მუშაობის თავისებურებები	153
3. დასკვნა	155
გამოყენებული ლიტერატურა	156

ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1. ფოლადის ქიმიური შედგენილობა, წონა %	25
ცხრილი 2. ნეიტრონული დასხივების გავლენა ნახშირბადოვანი და ლეგირებული ფოლადის სიმტკიცის თვისებებზე .	26
ცხრილი 3. ნეიტრონული დასხივების გავლენა ფერმეტული ფოლადის დარტყმით მახასიათებლებზე	32
ცხრილი 4. ნეიტრონული დასხივების გავლენა მომატებული ტემპერატურისას, ფერიტული ფოლადის დარტყმით მახასიათებლებზე	36
ცხრილი 5. ნეიტრონული დასხივების გავლენა ფოლადის მექანიკურ თვისებებზე	43
ცხრილი 6. ნეიტრონული დასხივების გავლენა ცირკონიუმის და მისი შენადნობების მექანიკურ თვისებებზე	54
ცხრილი 7. გამოწვის დროის გავლენა დასხივებული ცირკალი-2-ის სიმტკიცის თვისებებზე	59
ცხრილი 8. გამოწვის ტემპერატურის გავლენა ცირკალი-2-ის სიმტკიცის თვისებებზე	59
ცხრილი 9. ნეიტრონული დასხივების გავლენა ნიკელის და მის საფუძველზე შენადნობების მექანიკურ თვისებებზე .	64
ცხრილი 10. დასხივებული და დაუსხივებელი სპილენძის მექანიკური თვისებები	70
ცხრილი 11. ნეიტრონული დასხივების გავლენა ალუმინის და მაგნიუმის შენადნობების მექანიკურ თვისებებზე	74
ცხრილი 12. ნეიტრონული დასხივების გავლენა ბიონიუმის სიმტკიცის თვისებებზე, 20°C	76
ცხრილი 13. ნეიტრონული დასხივების გავლენა ტანტალის და Ta-W შენადნობის მექანიკურ თვისებებზე	76
ცხრილი 14. ნეიტრონული დასხივების გავლენა ლითონების კუთრ ელექტროწინააღობაზე	78
ცხრილი 15. სხვადასხვა მასალის კუთრი ელექტროწინააღობის ფარდობითი მომატება ნეიტრონების ნაკადით დასხივების შედეგად, $7 \cdot 10^{19}$ ნეიტრონი/სმ ² , 10°K	80
ცხრილი 16. დეფექტების წარმოქმნისა ($E_{წარ}$) და გადაადილების (E_g) აქტივაციის ენერგიის მნიშვნელობები. სპილენძის, ოქროს და პლატინის თვითდიფუზიის აქტივაციის ენერგია, ევ	81
ცხრილი 17. ფილის სიგრძის დანაყოფის წერტილის მომენტების მნიშვნელობები	117

ცხრილი 18. T, P და K -სებრი კვანძების გეომეტრიული მახასიათებლები და მათი დაშლის მახასიათებლები	121
ცხრილი 19. ღერძული ძალვა და დაძაბულობა წამწის ღეროებში დატვირთვის ეტაპების მიხედვით კვანძების სიხისტის გაუთვალისწინებლად (თეორიული ფაქტობრივ კვებებში)	140
ცხრილი 20. თეორიული და ექსპერიმენტული დატვირთვა და დაძაბულობა წამწის ღეროებში	141

ნახაზების ნუსხა

ნახ. 1. რადიაციული ზემოქმედების ხუთი მექანიზმი. გადაკვეთები კოორდინატულ ბადეზე მიუთითებს ატომების წონასწორულ მდგომარეობას	21
ნახ. 2. ნეიტრონული დასხივების გავლენა ნახშირბადოვანი და დაბალლეგირებული ფოლადის დენადობის ზღვარზე. დასხივების ტემპერატურა 100°C-ზე ნაკლებია	23
ნახ. 3. ნეიტრონული დასხივების გავლენა ნახშირბადოვანი და დაბალლეგირებული ფოლადის სიმტკიცის ზღვარზე დასხივების ტემპერატურა 100°-ზე ნაკლებია	24
ნახ. 4. V-ებრი ჭრილიანი შარპის და საურნალე ნიმუშების გამოცდის შედეგების შედარება ზოგიერთი მასალისთვის, დასხივებული შემდეგ ტემპერატურაზე	31
ნახ. 5. ნეიტრონული დასხივების გავლენა ნახშირბადოვანი და დაბალლეგირებული ჭრილიანი ნიმუშების დარტყმით სიბლანტეზე, დასხივებული 260°C-ზე, დაბალ ტემპერატურაზე	39
ნახ. 6. ნეიტრონული დასხივების გავლენა ნახშირბადოვანი და დაბალლეგირებული ფოლადის ჭრილიანი ნიმუშების დარტყმით სიბლანტეზე გადატეხისას. დასხივების ტემპერატურა 260°C-ზე დაბალი	40
ნახ. 7. ნეიტრონული დასხივების გავლენა აუსტენიტური უჟანგავი ფოლადების გაწყვეტა წინააღმდეგობაზე. რიცხვები წერტილთან აღნიშნავს ფოლადის მარკას	42
ნახ. 8. ნეიტრონული დასხივების გავლენა აუსტენიტური უჟანგავი ფოლადების დენადობის ზღვარზე	42
ნახ. 9. მასალის კოროზია (1–რეაქტორის გარეთ, 2–რეაქტორში) 316°C წყალში (pH=8.9-9.5). ინტეგრალური ნაკადი 1.1·10 ²¹ ნეიტრონი/სმ ² -მდე	48
ნახ. 10. დამრეცი გარსი ცვლადი სიხისტით (არასიმეტრიული დისკო)	106
ნახ. 11. დასხივების ფუნქციის გრაფიკი	110
ნახ. 12. „T“ სერიის კვანძის გამოცდა: ა – ნიმუში T-3, ბ – ნიმუში T – 1	115
ნახ. 13. «P» სერიის კვანძის გამოცდა	120
ნახ. 14. «K» სერიის კვანძის გამოცდა	122
ნახ. 15. T, P და K სერიის კვანძების გამოსაცდელი სტენდის, აღჭურვილობისა და ხელსაწყოების სქემა	124

ნახ. 16. ტენზორგადამწოდების განლაგების სქემა T, P და K სერიის კვანძებზე	125
ნახ. 17. გამოყენებული მასალის (მიღების) მექანიკური მახასიათებლების გამოკვლევის სტენდი გაჭიმვაზე	128
ნახ. 18. გამოყენებული მასალის (მიღების) მექანიკური მახასიათებლების გამოკვლევის სტენდი გაჭიმვაზე	128
ნახ. 19. ა) გამოსაცდელ წამწებში ტენზორგადამწოდის განლაგების სქემა; ბ) წამწის ყველაზე დამახასიათებელი კვანძები	130
ნახ. 20. წამწის გამოცდის სქემა	131
ნახ. 21 ა. წამწის შეკუმშული ღეროების დაძაბულობის კვანძის დატვირთვაზე დამოკიდებულების გრაფიკი	134
ნახ. 21 ბ. წამწის დაჭიმული ღეროების დაძაბულობის კვანძის დატვირთვაზე დამოკიდებულების გრაფიკი	134
ნახ. 22. ა) გამოკვლეული წამწების გეომეტრიული სქემა ბ) დაძაბულობის განაწილება ღეროების სიგრძეზე	135
ნახ. 23. წამწის დატვირთვის და ჩაზნექის სქემა	136
ნახ. 24. გამოსაცდელი წამწების კვანძების ვერტიკალურ გადაადგილების დამოკიდებულება დატვირთვაზე	138
ნახ. 25. T-2 კვანძის გამოკვლევის შედეგები	144
ნახ. 26. T-3 კვანძის გამოკვლევის შედეგები	145
ნახ. 27. P-1 სერიის კვანძის გამოკვლევის შედეგები	147
ნახ. 28. P-2 სერიის კვანძის გამოკვლევის შედეგები	148
ნახ. 29. P-3 სერიის გამოკვლევის შედეგები	149
ნახ. 30. K-1 სერიის კვანძის გამოკვლევის შედეგები გამოკვლევა	150
ნახ. 31. K-2 სერიის კვანძის გამოკვლევის შედეგები	152

მადლიერება

დიდ მადლობას ვუხდით ფიზ.-მათ. მ. დოქტორს ზურაბ ჩახიანს. ასევე სამშენებლო მექანიკისა და სეისმომედეგობის კათედრის ტ.მ.დ. რევაზ ცხვედაძეს, აწ გარდაცვლილ კონსტრუქციების დაზიანების ტექნიკური დიაგნოსტიკის კათედრის პროფესორს ტ.მ.დ., ჯემალ ბახტაძეს და ამავე კათედრის პროფესორს მალხაზ წიქარიშვილს, რომელთა უშუალო მხარდაჭერით და თანადგომით შესრულდა ექსპერიმენტული სამუშაოები.

შესავალი

ატომური ტექნიკის განვითარებასთან ერთად იმატა მაღალი ენერგიების ნაწილაკების დასხივების გავლენამ მასალების თვისებებზე. დადგენილია, რომ მასალის თვისებების ძირითადი ცვლილებები ხდება კრისტალურ მესერში, ატომების ნორმალური მდგომარეობიდან წანაცვლების შედეგად. ლითონების თვისებების ცვლილების ხელშემწყობი მექანიზმების მოკლე მიმოხილვა ნათლად გვიჩვენებს, რომ პირველი რეაქტორების კონსტრუირებისათვის საჭიროა ლითონების სტრუქტურაზე დასხივების გავლენის ცოდნა. ამის შედეგად ბოლო პერიოდში შესაძლებელი იყო ამ საკითხისადმი მიძღვნილი მოვლენების მნიშვნელოვანი რაოდენობა. გადმოცემულია, რომ ფერიტი სწრაფად კარგავს პლასტიკურობას. დასხივების მოქმედების შედეგად, ხოლო კარბიდული გამონათვლების მაღალნახშირბადოვან ფოლადში ეს პროცესი შედარებით მდორედ მიმდინარეობს. ნახშირბადოვან და დაბალლეგირებულ ფოლადზე დასხივების გავლენის შედარების კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი კრიტერიუმია მასალის პლასტიკური მდგომარეობიდან მყიფეში გადასვლის ტემპერატურის ცვლილება. დაუსხივებელი საქვაბე ფოლადისათვის ეს ტემპერატურა 0°C -ზე ქვემოთ მდებარეობს. ნიმუშების უმრავლესობის ჭრილისადმი მგრძნობიარობა იზრდება სწრაფი ნეიტრონებად დასხივების შედეგად. დასხივების მოქმედების შედეგად და დასხივებისწინა თერმული დამუშავების გავლენაზე არსებობს საკმაოდ შეზღუდული მონაცემები დადლილობისა და ცოცვადობის თვისებების ცვლილების შესახებ.

ბოლომდე რომ გავერკვიოთ დასხივების მოქმედების ფაზური გარდაქმნების პროცესებს, საჭიროა ჯერ კიდევ ბევრი სამუშაოს ჩატარება. თუ დასხივება მოქმედებს მეტასტაბილურ შენადნობებზე, რომლებიც დაძველებისას უფრო მტკიცდება, მაშინ იგი ასევე ახდენს გავლენას ახალი ფაზების შექმნით გამოწვეულ განმტკიცებაზე. საბოლოო თვისებებმა შეიძლება ასახოს მატრიცის განმტკიცების გავლენა, რომელიც დამოკიდებულია დასხივების ტემპერატურაზე ან დაძველებაზე დამოუკიდებელი პირობების გავლენა.

კონსტრუქციულ მასალაზე დასხივების გავლენის მონაცემების

მიმოხილვის და შეფასების შემდეგ ნათელი გახდა, რომ დასხივების შედეგად ხდება მათი თვისებების ბევრი მკვეთრად გამოხატული ცვლილება. თვისებების ამ ცვლილებას კავშირი აქვს ლითონების კონსტრუქციულ მახასიათებლებთან. კონსტრუქციული ლითონების და შენადნობების თვისებების ცვლილების ხარისხზე გავლენას ახდენს ცვლადები: კრისტალური სტრუქტურა, მარცვლის სიდიდე, ქიმიური შედგენილობა, დნობის ტემპერატურა, აგრეთვე დამზადების ტექნოლოგია და თერმული დამუშავება. გარდა ამისა, კონსტრუქციული მასალის თვისებებზე გავლენას ახდენს რეაქტორში დასხივების პირობები: ნეიტრონების ნაკადის სიმკვრივე, ინტეგრალური ნაკადის სიდიდე, დასხივების ტემპერატურა, დაძაბული მდგომარეობა და ნიმუშის მომცველი გარემო.

გადმოცემულია მაღალი ენერგიების ნაწილაკების დასხივების გავლენა ნაკეთობათა სიმტკიცეზე და მდგრადობაზე. მყარი სხეულები რადიაქტიური დასხივების შედეგად იცვლიან როგორც ფიზიკურ, ასევე მექანიკურ თვისებებს, ის თვისება, რომ დასხივების შედეგად იზრდება დენადობის ზღვარი და რომ ეს პროცესი საკმაოდ მდგრადია, შეიძლება გამოყენებულ იქნას მტკიცე და ამავე დროს მსუბუქი კონსტრუქციებს შესაქმნელად. ასევე რადიაქტიული დასხივების შედეგად დამრეცი კონუსური გარსის გაანგარიშებისას დრეკადობის მოდელი იცვლება. მოცემულია ლითონის ფირფიტებისა და გარსების ოპტიმალური დაპროექტება უწყვეტი არაერთგვაროვანი მასალის გამოყენებით.

ტექნიკის მრავალ დარგში და განსაკუთრებით რეაქტორების მშენებლობაში გვხვდება ისეთი შემთხვევები, როდესაც ზოგიერთი კონსტრუქციული მოსაზრების გამო შეზღუდულია კონსტრუქციის გეომეტრიული მახასიათებლები და დატვირთვის სახეობები.

ასეთ შემთხვევებში შესაძლებელია გამოყენებული იქნეს ისეთი მასალებისგან შედგენილი კონსტრუქცია, რომელსაც გააჩნია უწყვეტად ცვლადი დრეკადობის მახასიათებელი.

ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე ნამზადთა საიმედოობის გაზრდის მიზნით ნეიტრონული დასხივების გავლენა, როგორც ლითონების, ასევე სივრცითი კონსტრუქციების, კერძოდ გარსებისა და ფირფიტების გაანგარიშების მდგომარეობის გამოკვლევის პრობლემა

საკმაოდ რთულია, აქტუალურია და მოითხოვს გაანგარიშების განსაკუთრებული მეთოდების შემუშავებას.

ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს ბირთვული რეაქციების კონსტრუქციებისათვის საჭირო ლითონების სტრუქტურაზე დასხივების გაგენის შესწავლა; დასხივების მოქმედების შედეგად დადლილობისა და ცოცვადობის თვისებების ცვლილებას შორის კავშირის დადგენა; დამრეცი კონუსური გარსის გაანგარიშებას რადიაქტიული დასხივების გზით; კონსტრუქციული კვანძებზე და წამწეზე მაღალი ენერგიების ნაწილაკების დასხივებისას დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის გამოკვლევა ექსპერიმენტული გზით.

განხილულია დიფერენციალური განტოლებების შედგენის ზოგადი მეთოდები, მისი გამარტივების ხერხები, კერძო შემთხვევებში, არაწრფივი დეფორმაციის პირობებში წყვეტილპარამეტრებიანი გარსებისა და ფირფიტების გაანგარიშება დასხივების დროს.

ნაშრომის პრაქტიკული ღირებულება მდგომარეობს დამუშავებული მეთოდებისა და პროგრამების გამოყენების შესაძლებლობებისა კოსმოსმშენებლობაში, ავიამშენებლობაში და რადიოელექტრონიკაში.

შედეგების უტყუარობა განპირობებულია იმით, რომ გადამწყვეტი განტოლებების ფორმირებისას გამოიყენება საყოველთაოდ მიღებული ჰიპოთეზები და დაშვებები, რომელთა კორექტულობა დამტკიცებულია; უტყუარობა მტკიცდება ავტორის მიერ მიღებული თეორიული და ექსპერიმენტული შედეგების დამაკმაყოფილებელი თანდამთხვევით.

1. ლიტერატურის მიმოხილვა

1.1. დასხივების გავლენა ელექტრონული სქემების მასალასა და ელემენტებზე

1.1.1. საკონსტრუქციო მეტალები

ატომური ენერგიის პრაქტიკულმა გამოყენებამ გამოიწვია მასალების პრობლემა ბირთვული რეაქტორების ახალი და უკიდურესად რთული აღჭურვილობისთვის. ამ პრობლემის წარმოქმნამდე ლითონის სივრცითი კონსტრუქციების სპეციალისტებს აინტერესებდათ ისეთი ჩვეულებრივი საკითხები, როგორიცაა: მექანიკური და ფიზიკური თვისებების გაუმჯობესება, მასალის გამოყენება მაღალი ტემპერატურისას, კოროზიული მედეგობის გაზრდის ხერხების შესწავლა აიროვან და თხევად გარემოში, მასალის ქცევის წინასწარმეტყველების შესაძლებლობა მათი სტრუქტურის ცოდნის საფუძველზე. ატომური ტექნიკის განვითარებასთან ერთად ამ პრობლემებს დაემატა მაღალი ენერგიების ნაწილაკების დასხივების გავლენა მასალების თვისებებზე.

დასხივების მოქმედება მასალაზე სერიოზულად არ იყო შესწავლილი პირველი ბირთვული რეაქტორის გაშვებამდე. დასხივების მოქმედების პირველი შემჩნეული შედეგები საზიანო იყო შესასწავლი მასალებისთვის, რისთვისაც მიიღეს რადიაციული დაზიანების სახელწოდება. სამწუხაროდ ეს ტერმინი მიღებულია და გამოიყენება ბევრ შემთხვევაში, თუმცა დასხივება ხშირად არ იწვევს მასალის აშკარა დაზიანებას. ეს დეფექტები შეიძლება იყოს მაღალი ენერგიის და გარკვეული მასის ნებისმიერი ნაწილაკის ნივთიერებაში გავლის შედეგი, მაგრამ, ჩვენ უმეტესად საქმე გვაქვს ნეიტრონებთან. ენერგიების ფართო ინტერვალის გამო ნეიტრონები იყოფა სამ კლასად: სითბური (ან ნელი), რომლებსაც აქვს დაახლოებით 0,025 ევ ენერგია; სწრაფი, რომელთა ენერგია აღემატება 1 მევ-ს და ზესითბური, რომლის ენერგია შუალედურ მონაკვეთშია.

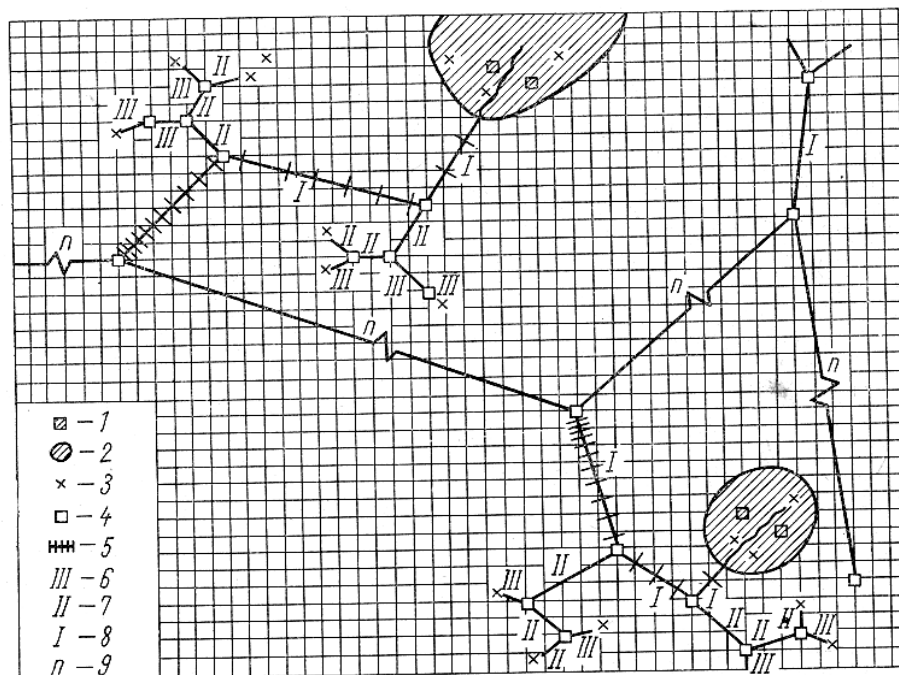
დადგენილია, რომ მასალის თვისებების ძირითადი ცვლილებები ხდება კრისტალურ მესერში, ატომების ნორმალური მდგომარეობიდან წანაცვლების შედეგად. ექსპერიმენტულად დამტკიცებულია, რომ ატომების

ასეთი წანაცვლებისთვის საჭიროა 25ევ-ზე მეტი ენერგია [1]. მაშასადამე, ატომის წანაცვლების გამო სითბური ნეიტრონები თვისებების ცვლილებაში ნაკლებად მონაწილეობს. ლითონებზე ნებისმიერი ნაწილაკის საერთო ზემოქმედება, რა თქმა უნდა, დამოკიდებულია მის სრულ ენერგიაზე. რაც მეტია ნაწილაკის ენერგია, მით მეტი სტრუქტურული ცვლილების გამოწვევა შეუძლია მას მეორეული ეფექტების ხარჯზე.

1-ელ ნახაზზე სქემატურადაა ნაჩვენები გამოსხივების მოქმედების ხუთი შესაძლო მექანიზმი. ვაკანსიები ჩნდება, როგორც ნეიტრონის ატომთა პირველადი შეჯახების შედეგი. ეს ნეიტრონი აგრძელებს ატომებთან შეჯახებას მანამ, სანამ არ დახარჯავს მთელ ენერგიას. მეორეული ეფექტი არის ნეიტრონის მიერ ატომისთვის ენერგიის გადაცემის შედეგი. ეს ატომი ეჯახება სხვა ატომებს, ამოაგდებს მათ კრისტალურ მესერში დაკავებული ადგილებიდან და მათ გადასცემს ენერგიას. საბოლოოდ, ამოგდებული ატომი კარგავს მთელ ენერგიას და რჩება კრისტალური მესრის შუალედურ მდგომარეობაში. ამრიგად, ნეიტრონის და მესრის ატომის შეჯახებისას წარმოიქმნება ორი ტიპის წერტილოვანი დეფექტი – ვაკანსიები და წანაცვლებული ატომები, განლაგებული კვანძებს შორის. დინსმა და ვინარლმა [2] გამოითვალეს ვაკანსიის წყვილების რაოდენობა: წანაცვლებული ატომი სპილენძში, წარმოქმნილი ერთი სწრაფი ნეიტრონის შეჯახებით ატომთან და ამოგდებული ატომების სხვა ატომებთან შემდგომი შეჯახებების შედეგად, რომელიც აღმოჩნდა 1000-ის ტოლი. ასეთი რაოდენობის წანაცვლებისას ნიმუშის ატომების დაახლოებით 40% წანაცვლებული იქნებოდა თავისი პოზიციებიდან ოთხი თვის განმავლობაში $1 \cdot 10^{13}$ ნეიტრონ/სმ²·წმ სწრაფი ნეიტრონების ნაკადით დასხივების შემდეგ.

ნეიტრონული დაბომბვის მეორეული ეფექტი თერმული პიკებით გამოწვეული სტრუქტურის ცვლილებაა. ითვლება, რომ ზოგიერთ შემთხვევაში ამოგდებული ატომის ენერგია შეიძლება მცირე მოცულობაში გაიბნეს სითბური იმპულსის სახით, რის შედეგადაც შეიძლება განვითარდეს ძალიან მაღალი ტემპერატურა დროის მოკლე მონაკვეთში [3, 4, 5, 1]. მოცულობა, რომელზეც მოქმედებს ასეთი სითბური

იმპულსი, შეიძლება შეიცავდეს ვაკანსიებს, წანაცვლებულ ატომებს, ორიენტაციადაკარგულ არეებს და დისლოკაციებს.



ნახ. 1. რადიაციული ზემოქმედების ხუთი მექანიზმი. გადაკეთები კოორდინატულ ბადეზე მიუთითებს ატომების წონასწორულ მდგომარეობას [14]:

- 1 – მინარევი ატომი; 2 – თერმული პიკი ანუ წანაცვლების პიკი;
3 – წანაცვლებული ატომი; 4 – ვაკანსია; 5 – ძლიერი იონიზაცია;
6 – მესამეული ამოგდებული ატომის გზა; 7 – მეორეული
ამოგდებული ატომის გზა; 8 – პირველადი ამოგდებული ატომის
გზა; 9 – ნეიტრონის გზა

გაყოფის პროცესებისას წარმოიქმნება სხვადასხვა გარეშე ატომები (ნატეხები), რომელთა მოქმედება ასევე ხელს უწყობს თვისებების ცვლილებას. ზოგიერთ მასალაში ასეთი ეფექტი შეიძლება მივიღოთ ძირითადი მასალის ატომების სხვა ელემენტის ატომებად გადაქცევის შედეგად. ეს ეხება მაგალითად, ტანტალს, რომელიც სითბური ნეიტრონების ზემოქმედებით ვოლფრამად გადაიქცევა. მეხუთე მექანიზმი, რომელმაც შეიძლება ხელი შეუწყოს თვისებების ცვლილებას ცალკეულ მონაკვეთებში ინტენსიური იონიზაციის შედეგად, გამოწვეულია თერმული პიკების მაღალი ტემპერატურის მოქმედებით.

ლითონების თვისებების ცვლილების ხელშემწყობი მექანიზმების მოკლე მიმოხილვა ნათლად გვიჩვენებს, რომ ბირთვული რეაქტორების კონსტრუირებისთვის საჭიროა ლითონების სტრუქტურაზე დასხივების

გავლენის ცოდნა. ამის შედეგად ბოლო პერიოდში შესრულებული იყო ამ საკითხისადმი მიძღვნილი გამოვლენების მნიშვნელოვანი რაოდენობა.

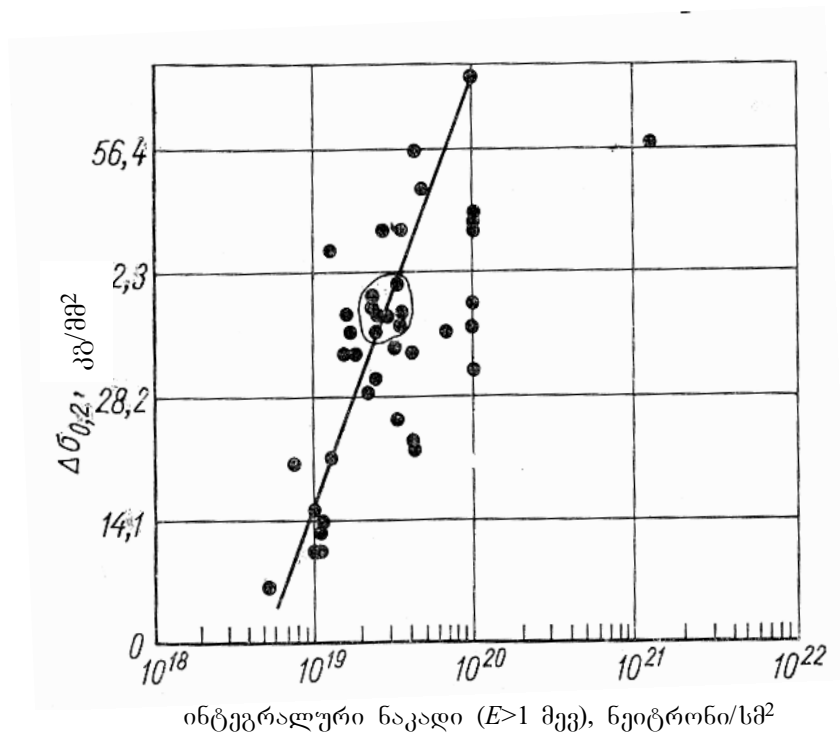
1.1.2. ფოლადი და შენადნობები რკინის საფუძველზე

მასალების ამ კლასს ორ ჯგუფად ყოფენ: ნახშირბადოვანი, დაბალლეგირებული და უჟანგავი ფოლადი. მასალათა აღნიშნული ჯგუფების თვისებები მოცემულია მათი ჩამოთვლის თანამიმდევრობით, სადაც შესაძლებელია, გაკეთებულია მათი თვისებების ცვლილებაზე ნეიტრონული დასხივების გავლენის კორელირების და განზოგადების მცდელობა. ნაშრომში განხილული დამახასიათებელი მასალების ქიმიური შედგენილობა მოყვანილია 1-ლ ცხრილში. ზოგიერთ შემთხვევაში (ქიმიური ანალიზის მონაცემების არ არსებობისას) მითითებულია ნომინალური სამარკო შედგენილობა.

1.1.3. დაბალნახშირბადიანი და დაბალლეგირებული ფოლადი

ზოგიერთი ნახშირბადოვანი და დაბალლეგირებული ფოლადის სიმტკიცის მაჩვენებლები დასხივებულ და დაუსხივებელ მდგომარეობაში მოცემულია მე-2-ე ცხრილში. ეს არის ერთ-ერთი, რომელიც შეადგინა პორტერმა [6] ფოლადზე დასხივების მოქმედების მიხედვით. მოცემულ ნაწილში მოვიყვანოთ შედეგები, რომელიც ეხება ფოლადს და ბევრ შემთხვევაში აღებულია მისი შესანიშნავი ნაშრომიდან.

2-ე და 3-ე ნახაზებზე ნაჩვენებია დენადობის და სიმტკიცის ზღვარის გაზრდა სწრაფი ნეიტრონების ნაკადის მიხედვით. ეს მონაცემები გვიჩვენებს, რომ ინტეგრალური ნაკადისას $5 \cdot 10^{18}$ ნეიტრონ/სმ² ვლინდება თვისებების შესამჩნევი ცვლილება. თვისებების ცვლილების სიჩქარე $5 \cdot 10^{18}$ - $1 \cdot 10^{20}$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალში საკმაოდ დიდია, მაგრამ ზოგიერთი შედეგი მიუთითებს, რომ ეს სიჩქარე რამდენადმე მცირდება $2 \cdot 10^{21}$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადის შემდეგ. პოსტერის დაკვირვების მიხედვით ფოლადის შედგენილობა და სიმტკიცე დასხივებამდე, როგორც ჩანს, გავლენას არ ახდენს მისი

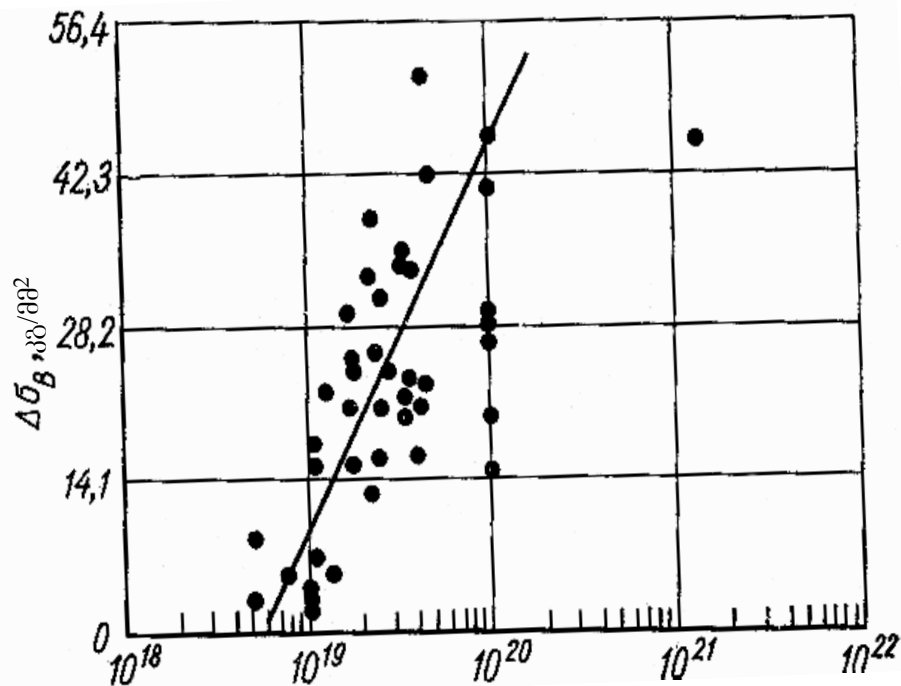


ნახ. 2. ნეიტრონული დასხივების გავლენა ნახშირბადოვანი და დაბალლეგირებული ფოლადის დენადობის ზღვარზე. დასხივების ტემპერატურა 100°C-ზე ნაკლებია [6].

სიმტკიცის თვისებებზე დასხივების შემდეგ. პოსტერმა გამოყო რამდენიმე ექსპერიმენტული წერტილი, რომელიც მე-2-ე ნახაზზე წარმოადგენს რამდენიმე დასხივებულ ფოლადს. ამ ფოლადებს დასხივებამდე ჰქონდა დენადობის ზღვარი 28.1-დან 105.5 კგ/მმ²-მდე. როგორც მე-2-ე ნახაზიდან ჩანს, რომ ამ ფოლადების დენადობის ზღვარი დასხივების შემდეგ დაახლოებით ერთნაირი სიდიდით იცვლება.

პორტერის მიხედვით, სიმტკიცის ზღვარის გადიდება ნაჩვენებია მე-3-ე ნახაზზე. დასხივების მოქმედებით სიმტკიცის ზღვარი არც თუ დიდად იცვლება, როგორც დენადობის ზღვარი, მაგრამ ნახშირბადოვანი და დაბალლეგირებული ფოლადის შემთხვევაში სიმტკიცის ზღვარის მომატება თითქმის უტოლდება დენადობის ზღვარის მატებას. ნახშირბადოვანი და დაბალლეგირებული ფოლადისთვის ფარდობითი წაგრძელების პროცენტული ცვლილება ნაჩვენებია 2-ე ცხრილში. იგი ფართო საზღვრებში მერყეობს 6-დან 80%-მდე.

ვილსონის და ბერგრენის მონაცემები [7] 106 ფოლადის რადიაციული თვისებების შესახებ მიუთითებს, რომ წვრილმარცვლოვანი



ინტეგრალური ნაკადი ($E > 1$ მევ), ნეიტრონი/სმ²

ნახ. 3. ნეიტრონული დასხივების გავლენა ნახშირბადოვანი და დაბალმკვრივებული ფოლადის სიმტკიცის ზღვარზე. დასხივების ტემპერატურა 100°-ზე ნაკლებია [66].

ფოლადი უფრო ნაკლებად აღიქვამს დასხივებას, ვიდრე მსხვილმარცვლოვანი. ანალოგიური შედეგები მიიღეს წვრილმარცვლოვანი ფოლადისთვის ჩერჩმენმა და სხვებმა, რომლებმაც დასხივებამდე დააქუცმაცეს მარცვლები გახლეჩილ ნიმუშებში, 200 და 500 მარცვლამდე 1 მმ³-ში. დაუსხივებელ ნიმუშებს კარგი პლასტიკურობა ჰქონდათ. $1.5 \cdot 10^{19}$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით დასხივების შემდეგ მსხვილმარცვლოვანი ნიმუშები მყიფე გახდა.

წვრილმარცვლოვან ნიმუშებს ჰქონდა გარკვეული პლასტიკურობა სწრაფი ნეიტრონების $9 \cdot 10^{17}$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით დასხივების შემდეგ.

ნახშირბადის შემცველობის გავლენა შეისწავლეს ოკ-რიჯის ნაციონალურ ლაბორატორიაში [8]. მცირენახშირბადოვან ფოლადს ნაკლებად თანაბარი პლასტიკურობა ჰქონდა, ვიდრე მაღალნახშირბადოვანს $1.7 \cdot 10^{19}$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით დასხივების შემდეგ. გამოითქვა ვარაუდი, რომ ფერიტი სწრაფად კარგავს

ფოლადის ქიმიური შედგენილობა, წონა %* [62]

ფოლადი	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Mo	სხვა ელემენტები
301	<0,15	2,00	1,00	16-18	6-8	0,045	0,030	—	Ti > 5C Nb ≥ 10C
302	<0,15	2,00	1,00	17-19	8-10	0,045	0,030	—	
302B	<0,15	2,00	2-3	17-19	8-10	0,045	0,030	—	
304L	<0,03	2,00	1,00	18-20	8-12	0,045	0,030	—	
304	<0,08	2,00	1,00	18-20	8-12	0,045	0,030	—	
305	<0,12	2,00	1,00	17-19	10-13	0,045	0,030	—	
309	<0,20	2,00	1,00	22-24	12-15	0,045	0,030	—	
316	<0,08	2,00	1,00	16-18	10-14	0,045	0,030	2-3	
321	<0,08	2,00	1,00	17-18	9-12	0,045	0,030	—	
347	<0,08	2,00	1,00	17-19	9-13	0,045	0,030	—	
410	<0,12	0,50	0,35	12,25	0,40	—	—	0,30	
431	0,20	1,00	1,00	15,00	1,25	—	—	—	
440C	0,95	1,00	1,00	16,00	—	—	—	0,75	
A106	<0,24	0,72	0,20	—	—	0,018	0,023	—	
A212B	0,07	0,70	0,45	0,09	0,14	0,012	0,024	0,48	
A203D	0,13	0,60	0,22	—	3,40	0,022	0,032	—	
A302B	0,10	1,37	0,41	0,09	0,72	0,010	0,017	0,49	Cu – 0,7; V – 0,11
A353	0,09	0,71	0,11	0,23	8,83	0,015	0,015	0,04	
HY-65	0,12	0,48	0,21	—	2,16	0,013	0,032	0,39	
HY-80	0,18	0,25	1,34	2,38	—	—	—	—	Cu – 0,33; V – 0,06; B – 0,0031
T-1	0,16	0,93	0,26	0,50	0,87	0,014	0,023	0,45	
A.O. Smith-1146	0,23	1,16	0,29	—	0,51	—	—	0,006	
Smithweld-91	0,05	1,18	0,24	0,06	3,54	—	—	0,62	Al – 0,05; Sn – 0,003
USS “W”	0,12	—	—	17,00	7,0	—	—	—	
E 9016	0,11	1,70	0,30	—	—	—	—	0,40	
E 10016	0,07	0,78	0,32	—	1,68	—	—	0,32	V – 0,15
Fe – Al	—	—	—	—	—	—	—	—	
DB-2	—	—	—	5,00	—	—	—	—	
DB-2 გაუმჯობეს.	0,032	—	—	4,68	—	—	—	2,12	Pb – 1,2; Al – 7,73; Zr – 1,34

ნეიტრონული დასხივების გავლენა ნახშირბადოვანი და ლეგირებული
ფოლადის სიმტკიცის თვისებებზე*

ფოლადი	დასხივების პირობები		დენადობის ზღვარი კგ/მმ ²			სიმტკიცის ზღვარი კგ/მმ ²			ფარდობითი წაგრძელება, %		
	ტემპერატურა, °C	ინტეგრირებული ნაკადი (E>1მეგ) ×10 ¹⁹ ნეიტრონი/სმ ²	საკონტროლო ნიმუში	დასხივებული ნიმუში	ცვლილება	საკონტროლო ნიმუში	დასხივებული ნიმუში	ცვლილება	საკონტროლო ნიმუში	დასხივებული ნიმუში	ცვლილება, %
A106 წერტილოვანი	60	1,0	40,5	51,0	+10,5	53,1	55,1	+2,0	18,8**	23,2**	+23,4
	<93	10	33,3	67,9	+34,6	74,7	71,7	+20,0	34,0	11,5	-66,2
	299	0,5	40,5	43,9	+3,4	54,9	54,9	+1,9	18,8**	20,2**	+7,5
	304	2,0	28,1	57,0	+28,9	71,7	71,7	+18,3	18,0**	8,0**	-55,5
	360	2,0	28,1	38,7	+10,6	61,2	61,2	+7,8	18,0	11,0**	-39,0
	404	2,0	28,1	33,7	+5,6	57,7	57,7	+4,3	18,0	12,0**	-33,3
	304	8,0	28,1	55,5	+27,4	74,5	74,5	+21,2	18,0	6,0**	-66,7
	416	8,0	28,1	33,0	+4,9	55,5	55,5	+2,1	18,0	11,0**	-39,0
მსხვილმარცვლოვანი	60	1,0	35,4	50,3	+14,9	59,8	62,9	+3,1	20,2**	16,0**	-20,8
	<93	10	33,4	81,6	+48,2	58,4	85,1	+26,7	29,0	6,5	-77,6
	299	0,5	35,4	37,9	+2,5	59,8	60,8	+1,0	20,2**	17,7**	-12,4
	304	2,0	32,3	65,4	+33,1	56,2	80,8	+24,6	14,0**	8,0**	-42,8
	360	2,0	32,3	47,1	+14,8	56,2	68,9	+12,7	14,0	9,0**	-35,7
	404	2,0	32,3	30,2	-2,1	56,2	59,1	+2,9	14,0	14,0**	0
	304	7,0	32,3	61,2	+28,9	56,2	72,4	+16,2	14,0	3,0**	-78,5
	416	7,0	32,3	45,0	+12,7	56,2	66,1	+9,9	14,0	11,0**	-21,4

ცხრილი 2-ის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A201	<93	0,76	33,4	53,8	+20,4	52,7	57,8	+5,1	31,0	17,0	-45
	<93	1,5	33,4	54,5	+21,1	52,7	58,2	+5,5	31,0	15,0	-51,6
	<93	2,2	33,4	62,2	+28,8	52,7	65,2	+12,5	31,0	14,0	-58,4
	<93	4,0	33,4	66,3	+32,9	52,7	68,9	+16,2	31,0	9,5	-69,5
	218-268	1,0	33,4	42,0	+8,6	52,7	59,2	+6,5	31,0	16,3	-47,5
	274-371	2,5	33,4	37,7	+4,3	52,7	58,1	+5,4	31,0	21,0	-32,2
A201A	93-204	14	28,4	87,7	+59,3	47,0	87,2	+49,4	49,4	10,3	-79,2
A201B	316	4,0	30,2	32,7	+2,5	51,1	53,4	+2,3	41,0	29,0	-29,3
A212B	<93	1,0	35,2	46,0	+10,8	53,0	56,8	+3,8	22,0	18,0	-18,2
	<93	10	35,2	65,9	+30,7	53,0	68,3	+15,3	22,0	5,0	-77,3
	299	1,0	35,2	40,0	+4,8	53,0	59,0	+6,0	22,0	12,0	-45,4
	<93	1,7	29,0	64,6	+35,6	53,0	68,9	+15,9	36,0	11,6	-67,7
	<93	10	29,0	76,3	+47,3	53,0	81,3	+28,3	36,0	7,0	-80,5
	293	2,0	28,1	53,4	+25,3	52,7	71,7	+19,-	25,00**	9,0**	-64,0
	360	2,0	28,1	42,9	+14,8	52,7	63,3	+10,6	25,00**	12,0**	-52,0
	404	2,0	28,1	39,4	+11,3	52,7	59,1	+6,4	25,00**	14,0**	-44,0
	371	6,0	28,1	57,7	+29,6	52,7	73,8	+21,1	25,00**	6,0**	-76,0
	416	6,0	28,1	41,5	+13,4	52,7	57,0	+4,3	25,00**	13,0**	-48,0
სუფთა რკინა	<94	3,6	11,8	28,9	+17,1	24,3	28,6	+4,3	59,5	29,5	-50,4
	80	12	13,4	33,2	+19,8	34,5	34,5	+10,0	56,7	34,4	-39,3
დაბალმარგანეციანი ფოლადი	<93	17	40,1	61,6	+21,5	54,8	63,3	+8,5	28,2	14,0	-50,3
წონის 0,21% C, Ti	<93	10	40,1	60,3	+20,2	54,8	71,1	+16,3	28,2	13,6	-51,7
0,07 წონის % C, Al, Cu, Ti	<93	1,7	19,4	58,1	+38,7	39,0	58,1	+19,1	45,0	9,5	-79,0
	<93	10	19,4	68,6	+49,2	39,0	69,3	+30,3	45,0	8,5	-81,2

ცხრილი 2-ის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,05% წონის C, Al, Cu, Zr	<93	1,7	32,1	58,3	+26,2	35,9	56,6	+20,7	35,0	10,5	-70,0
	<93	10	32,1	69,2	+37,1	35,9	68,9	+33,0	35,0	7,5	-78,6
ფოლადი	385	1,2	30,4	50,1	+19,7	57,7	71,1	+13,4	34,6	20,3	-41,2
1,25% წონის Cr	427	2,4	30,4	40,1	+9,7	57,7	66,2	+8,5	34,6	21,9	-36,6
0,5% წონის Mo	788	2,4	30,4	43,6	+13,2	57,7	59,8	+2,1	34,6	26,6	-23,0
	871	3,0	30,4	35,8	+5,4	57,7	60,7	+3,0	34,6	31,3	-9,5
	927	3,0	30,4	30,1	-0,3	57,7	45,6	-12,1	34,6	34,6	+8,3

*რამდენი ნიმუშის გამოცდისას მითითებულია საშუალო შედეგი

** მითითებულია თანახარი წაგრძელება

პლასტიკურობას დასხივების მოქმედების შედეგად, ხოლო კარბიდული გამონაყოფების მაღალნახშირბადოვან ფოლადში უკეთ ეწინააღმდეგება დასხივებით გამოწვეულ პლასტიკურობის დაკარგვას.

სატონმა, ლი ლიზურმა [9] აჩვენეს, რომ ნახშირბადოვანი ფოლადის დასხივების შედეგად მნიშვნელოვნად მატულობს მისი სიმტკიცე, თანაც მთლიანად გამომწვარ მასალაში უფრო მეტად, ვიდრე წინასწარ გამოწრთობილ ფოლადში. როგორც მოსალოდნელი იყო დასხივება მომატებული ტემპერატურისას არ იძლევა ასეთივე ეფექტს. მასალის სიმაგრის რადიაციული გაზრდა არის თვისებრივი მითითება დასხივების მოქმედებაზე; სიმაგრის მატების თვისებრივი თანაფარდობები, ისევე როგორც დენადობისა და სიმტკიცის ზღვარის, არასაკმარისად არის შესწავლილი, რათა შესაძლებელი იყოს მათი უპირობო გამოყენება.

ნახშირბადოვან და დაბალლეგირებულ ფოლადზე დასხივების გავლენის შედარების კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი კრიტერიუმი – მასალის პლასტიკური მდგომარეობიდან მყიფეში გადასვლის ტემპერატურა. დაუსხივებელი საჭვაბე ფოლადისთვის ეს ტემპერატურა 0°C -ზე ქვემოთ მდებარეობს. ბევრმა ექსპერიმენტატორმა გამოიკვლია სხვადასხვა პირობებში დასხივებული სხვადასხვა გეომეტრიის ჭრილიანი ნიმუში. ნიმუშების უმრავლესობას ჭრილისადმი მგრძნობიარობა ეზრდებოდა სწრაფი ნეიტრონებით დასხივების შედეგად.

3-ე და 4-ე ცხრილებში მოყვანილია მონაცემები დასხივებული ნახშირბადოვანი და დაბალლეგირებული ფოლადის დარტყმითი სიბლანტის შესახებ. ცხრილიდან ჩანს, რომ მასალის პლასტიკური მდგომარეობიდან მყიფეში გადასვლის ტემპერატურა დასხივების შედეგად მატულობს. ამ მატებამ შეიძლება 260°C -ს მიაღწიოს. ყველა წარმოდგენილი მონაცემის შესაბამისობაში მოყვანა საკმაოდ ძნელია, ნიმუშების გეომეტრიის და დასხივების პირობების განსხვავების გამო. მაგრამ, ხაუტორნმა და სტილმა [10] გამოაქვეყნა, რომ მიღწეული დარტყმით სიბლანტის მნიშვნელობების კარგი თანხვედრა რამდენიმე ფოლადისათვის მიღებული იყო საურნაღე და შარპის ნიმუშებზე V -ებრი ჭრილით (ნახ. 4). ამ ცდებით ილუსტრირებულია ის ფაქტი, რომ მრავალი რადიაციული დარღვევა, თუ დარტყმით აისახება სიბლანტის

ცვლილებაზე, შეიძლება შევამციროთ ან მოვსპოთ მაღალტემპერატურული გამოწვის საშუალებით (ცხრ. 3).

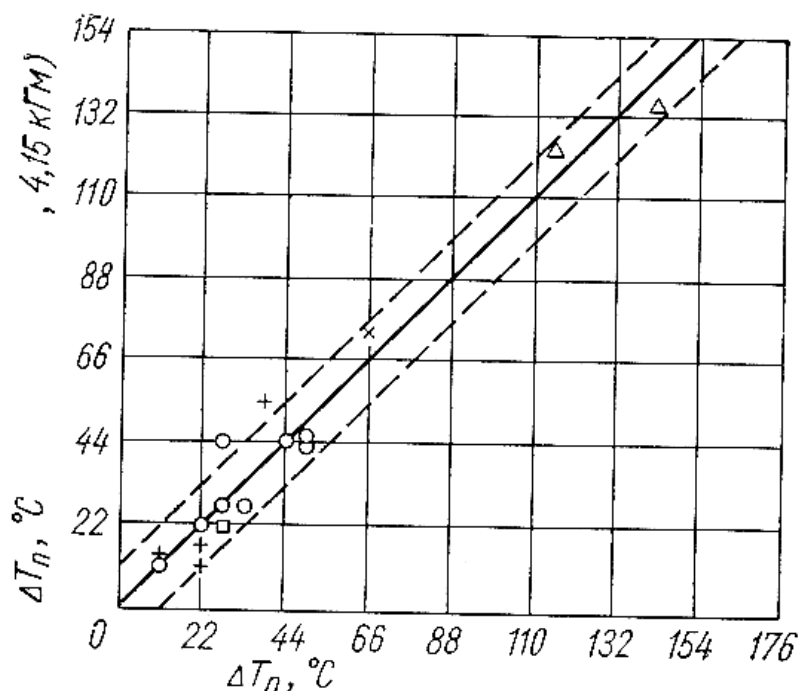
პოსტერმა სცადა კავშირი დაედგინა გადასვლის ტემპერატურის მომატებასა და ნეიტრონებით დასხივებას შორის. შედეგების ოპტიმალური მრუდი და გადახრის ფარგლები პლასტიკურობის დაკარგვასთან ერთად მოყვანილია მე-5- ნახაზზე, რასაც მოწმობს ამ მასალის გადასვლის ტემპერატურის მომატება, ნიმუშის გარდატეხისას დახარჯული ენერგია, რომელიც მცირდება ნეიტრონების ინტეგრალური ნაკადის მიხედვით. დახარჯული ენერგიის მაქსიმუმის შემცირება, პორტერის მიხედვით მოყვანილია მე-6-ე ნახაზზე. მე-5-ე ნახაზზე სამი ექსპერიმენტული წერტილი მიღებულია $1 \cdot 10^{21}$ ნეიტრონი/სმ²-ზე მეტი ინტეგრალური ნაკადისას, რომელიც მიუთითებს გაჯერების დონის მიღწევაზე გადასვლის ტემპერატურის ცვლილებაზე. როგორც ჩანს, ტემპერატურის შემდგომი მნიშვნელოვანი მატება ინტეგრალური ნაკადის მატებასთან ერთად მოსალოდნელი აღარ არის. კოტრელმა აჩვენა [4], რომ ემპირიული დამოკიდებულება:

$$BT = 55\Phi^{\frac{1}{3}},$$

სადაც $\Phi=10^{18}$ -ია ნეიტრონი/სმ²-ია, საკმაოდ კარგად აკმაყოფილებს ექსპერიმენტულ შედეგებს. ხარისმა [11] ახლახან აჩვენა, რომ ამ გამოსახულებაში მუდმივს შეიძლება ჰქონდეს მნიშვნელობა 23-დან 57-მდე.

დასხივების მოქმედების შედეგად და დასხივებისწინა თერმული დამუშავების გავლენაზე არსებობს საკმაოდ შეზღუდული მონაცემები დადლილობასა და ცოცვალობის თვისებების ცვლილების შესახებ.

ლიზერს [12] მოჰყავს მონაცემები A212 ფოლადზე ნეიტრონების დასხივების ($1 \cdot 10^{19}$ ნეიტრონი/სმ²) გავლენის შესახებ. იგი აფიქსირებს, რომ ჭრილიანი ნიმუშების დადლილობის ზღვარი იზრდება, ხოლო გაუჭრელის კლებულობს. როგორც ჩანს, დაძაბულობის კონცენტრაცია ჭრილზე, ნაკლებად ეფექტურია დასხივების შემდეგ და ჭრილიანი ნიმუშების დადლილობის მრუდი უახლოვდება გაუჭრელი ნიმუშების დადლილობის მრუდს. 3-ე და 4-ე ცხრილებში ასევე მოყვანილია შედუღებული ნიმუშების დარტყმითი მახასიათებლები.



ნახ. 4. V-სებრი გრილიანი შარპის და საურნალე ნიმუშების მკვეთრი გამოცდის შედეგების შედარება ზოგიერთი მასალისთვის, დასხივებული შემდეგ ტემპერატურაზე

შედეგების შედარება გვიჩვენებს, რომ ხშირ შემთხვევაში ნადნობი ლითონის და ნაკერის მახლობელი ზონის დარტყმითი მახასიათებლები აღემატება ძირითადი ლითონის მახასიათებლებს დასხივებამდე. დასხივების შემდეგ შედეგების ნაკერის ლითონის დარტყმითი მახასიათებლები ასევე აღემატება ძირითადი ლითონის ან ნაკერის მახლობელი ზონის ლითონის დარტყმით მახასიათებლებს.

გატსონმა [13] აჩვენა, რომ დაბალტემპერატურული ფოლადის 1.25 წონ.% Cr-0,5 წონ.% Mo, დასხივებამ $385-649^\circ\text{C}$ ტემპერატურულ ინტერვალში, $3 \cdot 10^{10}$ ნეიტრონი/სმ² ($E > 1$ მევ) ინტეგრალური ნაკადით, შეიძლება მკვეთრი გავლენა მოახდინოს სიმტკიცის თვისებებზე ოთახის ტემპერატურისას. სიმტკიცის ყველაზე მაღალი მნიშვნელობა აქვს დასხივების ტემპერატურისას 285°C -ზე, შემდეგ მცირდება და ერთნაირი რჩება, სანამ მიღწეული არ იქნება 871°C -ზე მაღალი ტემპერატურა. დასხივების ტემპერატურისას 927°C -ზე სიმტკიცის თვისებები გაუარესდება, ვიდრე დაუსხივებელი მასალის თვისებები.

ნეიტრონული დასხივების გავლენა ფერიტული ფოლადის დარტყმით მახასიათებლებზე

ფოლადი	დასხივების პირობები		ნიმუში V -სებრი ჭრილით	პლასტიკური მდომარეობიდან მყიფეში გადასვლის ტემპერატურა, °C			ნიმუშის დაშლა, დახარჯული მაქსიმალური ენერგია		
	ტემპერატურა °C	ინტეგრალური ნაკადი $(E>1.0\text{ევ})\times 10^{18}$ ნეიტრონი/სმ ²		საკონტროლო	დასხივებული	ცვლილება	საკონტროლო	დასხივებული	ცვლილება
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A106									
წერილმარცვლოვანი	<93	5,0	a=5.08 მმ კვადრატული	-46	-9	+37	11,5	11,5	0
	<93	130	კვეთის, კონსოლური	-46	-74	+120	11,5	11,5	0
	299	5,0	იგივე	-46	-30	+16	11,5	8,1	-30
მსხვილმარცვლოვანი	<93	5,0	იგივე	+10	+146	+136	11,5	11,5	0
	<93	50	“-“	+10	+16	+6	11,5	11,5	0
	299	5,0	“-“	+10	-1	+6	11,5	6,6	-43
A212B	<93	10	იგივე	-7	+52	+59	9,2	9,2	0
	<93	100	“-“	-7	+8	+15	9,2	5,8	-38
	<93	5,0	“-“	-7	+110	+117	8,6	8,2	-7
	79	20	“-“	-7	+124	+131	8,4	5,4	-36
	<93	40	“-“	-7	+138	+145	8,6	4,9	-43
	79	170	“-“	-7	+124	+172	8,4	3,7	-56
თერმული ზემოქმედების ზონა შედუღებისას	93	76	“-“	-48	+124	+172	13,6	5,8	-58

ცხრილი 3-ის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
A212B ცხლადნაგლინი	79	1,0	სტანდარტული შარპი	-65	-35	+30	-	-	-	
	79	5,0	“-“	-65	-4	+61	-	-	-	
	302	5,0	“-“	-65	-40	+25	-	-	-	
	79	7,0	“-“	-65	+38	+103	4,0	2,9	-29	
	79	12	“-“	-65	+74	+139	4,0	2,5	-34	
	132	56	“-“	-65	+168	+233	4,0	1,8	-54	
	166	100	“-“	-54	+168	+233	4,0	1,8	-54	
	ნორმალიზებული	79	1,0	სტანდარტული შარპი	-54	-29	+25	-	-	-
		79	5,0	“-“	-54	+13	+67	-	-	-
		302	5,0	“-“	-54	+35	+89	-	-	-
		79	7,0	“-“	-54	+27	+81	4,4	3,5	-21
		79	12	“-“	-54	-93	+147	4,4	2,9	-34
		132	56	“-“	-54	+154	+208	4,4	2,0	-45
		166	100	“-“	-54	+154	+208	4,4	2,0	-35
		A212B (შედულების ნაკერის ლითონი)	288	5,0	სტანდარტული შარპი	-62	-21	+41	11,5	9,8
A302 B	<93	24	d=4.76 მმ კონსოლური	-75	+25	+100	10,8	6,3	-42	
	<93	36	სტანდარტული შარპი	-75	+40	+115	10,8	6,0	-45	
	260	0,73	“-“	+10	+33	+23	9,5	7,6	-20	
	269	0,43	“-“	+18	+8	-10	6,5	6,0	-7	
	371	0,43	“-“	+17	+10	-7	8,1	6,9	-16	
	79	5,0	“-“	-	-	+83	-	-	-	
	79	200	“-“	-	-	+195	-	-	-	
	A302 B (შედულების ნაკერის ლითონი)	288	5,0	d=4.76 მმ კონსოლური	-57	-18	+39	10,9	8,6	-21
E9016 (შედულების ნაკერის ლითონი)			სტანდარტული შარპი							
	260	0,63	d=4.76 მმ კონსოლური	-35	-13	+22	10,7	9,2	-14	
			სტანდარტული შარპი							

ცხრილი 3-ის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A353	<93	5,0	a=5.08 მმ კვადრატული კვეთის, კონსოლური	-208	-178	+30	5,2	4,3	-18
	<93	20	“-“	-208	-84	+124	5,2	3,5	-31
	<93	40	“-“	-208	-84	+124	5,2	2,9	-45
	<93	70	“-“	-208	-68	+140	5,2	2,4	-53
	<93	12	“-“	-191	-130	+61	14,4	9,7	-33
	<93	44	“-“	-191	-112	+79	14,4	7,8	-46
HY-65	<93	18	d=4.76 მმ. კონსოლური	-86	+44	+130	10,8	6,8	-37
	<93	34		-86	+111	+197	10,8	6,3	-41
E10016 (შედულების ნაკერის ლითონი)	260	0,68	შარპის სტანდარტი	+14	+33	+19	8,3	7,4	-11
HY-80	79	100	a=5.08 მმ კვადრატული	-84	+82	+155	13,0	6,5	-50
	282-293	200-1200	კვეთის, კონსოლური	-84	-57÷	+27÷	13,0	11,3	-13
					÷(-32)	÷(+52)			
	<93	25	d=4.76 მმ კონსოლური	-153	-33	+120	9,9	5,8	-42
	<93	48		-153	-33	+120	9,9	6,7	-32
T1	<38	1300	d=5.08 მმ კონსოლური	-140	+75	+179	7,7	2,5	-67
	<93	5,0	a=5.08 მმ კვადრატული კვეთის, კონსოლური	-151	-40	+111	5,5	4,6	-17
	<93	70	იგივე	-151	-82	+217	5,5	2,65	-52
	302	5,0	“-“	-151	-7	+69	5,5	5,5	0
	<93	23	d=4.76 მმ კონსოლური	-137	+20	+130	9,9	6,0	-40
	<93	33	იგივე	-137	+20	+157	9,9	6,0	-40
თერმული	<38	1300	d=5.08 მმ კონსოლური	-76	+104	+180	71	2,5	-65
ზემოქმედების ზონა	~52	5,4	შარპის სტანდარტი	-18	+25	+43	-	-	-
დაბალნახშირბადოვანი	~85	5,4	იგივე	-17	+28	+46	-	-	-
ფოლადით	~74	5,4	“-“	-18	+29	+47	-	-	-

ცხრილი 3-ის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ფოლადი 410	~85	5,0	კვადრატული შარპი a=7 მმ გრძივი ორიენტა- ცია. კვადრატული შარპი	-48	0	+48	-	-	-
	~85	5,0	კვადრატული შარპი; a=7 მმ განივი ორიენტა- ცია	-27	+17	+44	-	-	-
	~88	13	a=5.08 მმ კვადრატული კვეთის, კონსოლური	+52	+57	+5	9,7	9,0	-7
	~88	160	იგივე	+52	+85	+33	9,7	8,3	-14
	~88	87	“-“	+38	+60	+22	9,0	7,6	-15
	93	17	d=4.76 მმ კონსოლური	-153	-70	+83	14,5	10,4	-28
ქრომნიკელის ექსპე- რიმენტული კვლევა: მაღალი და კომერციუ- ლი სისუფთავის	93	17	იგივე	-140	-40	+100	+11,5	7,1	-38

ნეიტრონული დასხივების გავლენა მომატებული ტემპერატურისას ფერიტული ფოლადის
დარტყმით მახასიათებლებზე

ფოლადი	დასხივების პირობები			ნიმუშის ტიპი	პლასტიკური მდგომარეობიდან მყიფე მდგომარეობაში გადასვლის ტემპერატურა, °C		
	ტემპერატურა °C	ინტეგრალური ნაკადი ($E>1$ მეე $\times 10^{18}$ ნეიტრონი/სმ ²)	რეაქტორი		საკონტროლო	დასხივებული	ცვლილება
1	2	3	4	5	6	7	8
A201 (5 სმ სიგრძის ფირფიტა)	302	~3	BGR	შარპი V-ებრი ჭრილით	-15	+8	+23
	302	~3	“	იგივე	-1	+27	+28
	302	~3	“	დარტყმითი, მილისებრი	-35	-12	+23
	<03	~3	LITR	შარპი V-ებრი ჭრილით	-12	+27	+39
	<93	~3	“	იგივე	+2	+46	+44
A212B (16 სმ სიგრძის ფირფიტა)	<93	~3	“	“-“	-4	+46	+50
	<93	~3	“	“-“	+6	+53	+47
	302	~3	BGR	“-“	-4	+24	+28
	302	~3	“	“-“	+4	+41	+37
	302	~3	“	დარტყმითი, მილისებრი	-23	+10	+33
A212B (16,5 სმ სიგრძის ფირფიტა)	302	~3	BGR	შარპი V-ებრი ჭრილით	+2	+46	+44
	302	~3	“	იგივე	+35	+77	+42
	302	~3	“	დარტყმითი, მილისებრი	-18	+32	+50

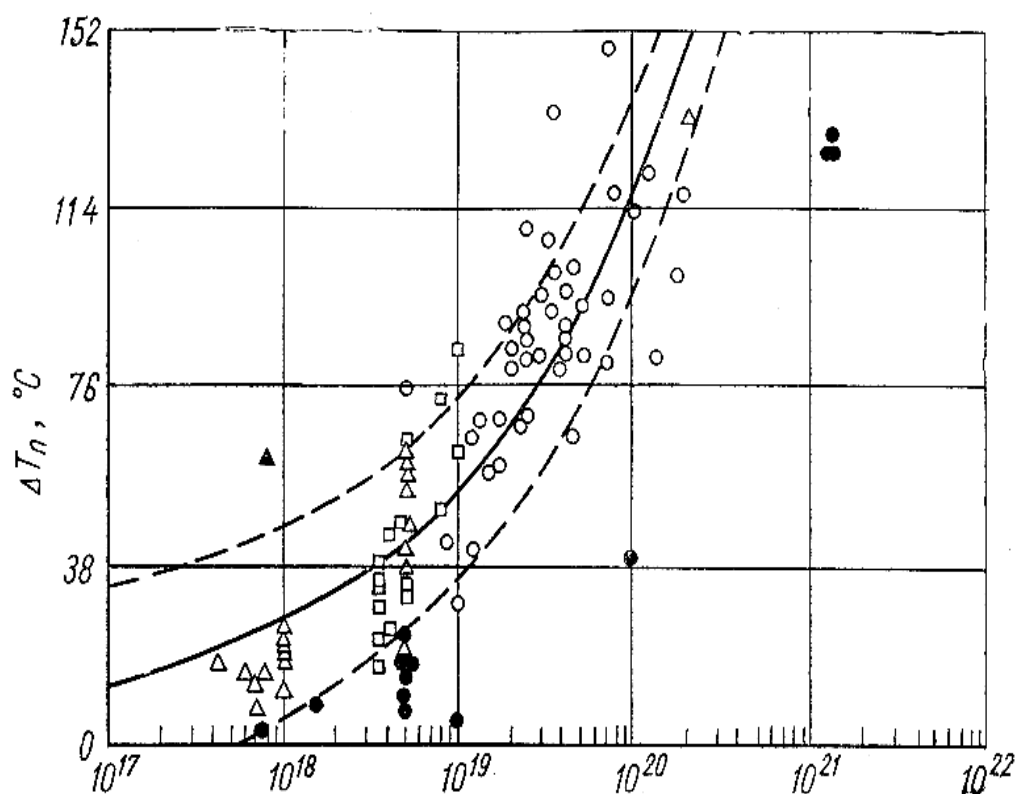
ცხრილი 4-ის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7	8
A212B (16,5 სმ სიგრძის შედუღებული ფირფიტა)	302	~5	BGR	შარპი V-ებრი ჭრილით	-40	-12	+28
	302	~5	“	იგივე	-18	+8	+26
	302	~5	“	დარტყმითი, მილისებრი	-35	-7	+28
	302	~5	LITR	შარპი V-ებრი ჭრილით	-40	-23	+17
	302	~5	“	იგივე	-21	-7	+14
	302	~5	“	დარტყმითი, მილისებრი	-35	-12	+23
	93	~3	“	შარპი V-ებრი ჭრილით	-37	-12	+23
	93	~3	“	იგივე	-18	+13	+31
	93	~6	“	იგივე	-35	+41	+76
	93	~6	“	იგივე	-18	+41	+59
	93	~6	“	დარტყმითი, მილისებრი	-35	+32	+67
	93	~3	“	შარპი V-ებრი ჭრილით	+2	+52	+50
	93	~3	“	იგივე	+36	+64	+28
	93	~10	MTR	იგივე	-40	+85	+125
A212B (16,5 სმ სიგრძის შედუღებული ფირფიტა)	93	~10	“	იგივე	-18	+82	+100
	93	~10	“	იგივე	-35	+82	+117
	177	~10	“	იგივე	-40	+35	+75
	177	~10	“	დარტყმითი, მილისებრი	-18	+43	+61
	177	~10	“	იგივე	-18	+43	+61
A302B (10 სმ სიგრძის ფირფიტა)	302	~3	BGR	შარპი V-ებრი ჭრილით	-1	+4	+5
	302	~3	“	იგივე	+32	+43	+11
	302	~3	“	დარტყმითი, მილისებრი	-1	+4	+5
	302	~5	“	შარპი V-ებრი ჭრილით	-43	+2	+45
A302B (10 სმ სიგრძის შედუ- ღებული ფირფიტა)	302	~5	“	იგივე	-18	+32	+50
	302	~5	“	დარტყმითი, მილისებრი	-18	+10	+28

ცხრილი 4-ის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7	8
A302B (10 სმ სიგრძის ფირფიტა) A302B (14 სმ სიგრძის შედუღებული ფირფიტა) A302B (20 სმ სიგრძის ფირფიტა)	302	~5	LITR	შარპი V-ებრი ჭრილით	-46	+10	+56
	302	~5	“	იგივე	-18	+38	+56
	302	~5	“	დარტყმითი, მილისებრი	-18	+21	+39
	<93	~3	“	შარპი V-ებრი ჭრილით	-43	+2	+45
	<93	~3	“	იგივე	-1	+46	+47
	<93	~3	“	დარტყმითი, მილისებრი	-23	+27	+50
	<93	~3	“	შარპი V-ებრი ჭრილით	-1	+27	+28
	316	~10	MTR	იგივე	-12	+10	+22
	316	~10	“	დარტყმითი, მილისებრი	+4	+32	+28
	316	~10	“	შარპი V-ებრი ჭრილით.	+32	+63	+31
	260	~10	“	იგივე	+32	+93	+61
	269	~10	“	იგივე	-23	+54	+77
	260	~10	“	ისეთი სიმაღლე, როგორცაა დაუსხივებელი ნიმუში			

- გამოწვა 150 სთ, 343°C დასხივების შემდეგ იმავე რეაქტორში.



ნახ. 5. ნეიტრონული დასხივების გავლენა ნახშირბადოვანი და დაბალლეგირებული ჭრილიანი ნიმუშების დარტყმით სიბლანტეზე, დასხივებული 260°C-ზე, დაბალ ტემპერატურაზე [6]:

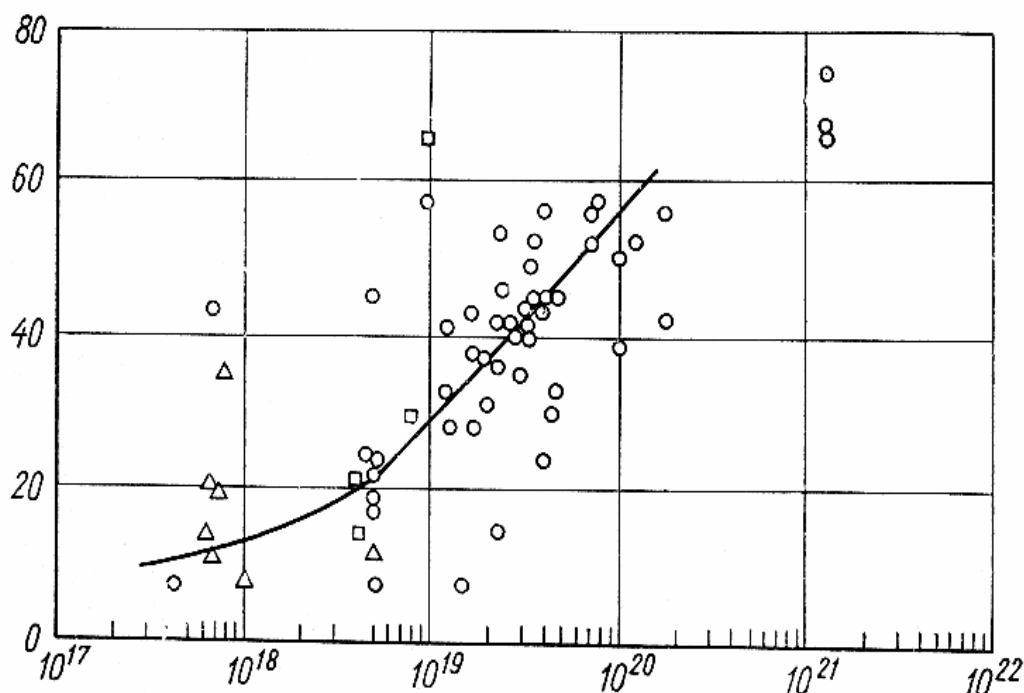
- o – შემცირებული კონსოლური დარტყმითი ნიმუშები;
- Δ – შარპის დარტყმითი ნიმუშები V-ებრი ჭრილით;
- – იგივე ნელი გაღუნვისთვის (• და წერტილები სტატისტიკისთვის არ გამოიყენება) — - საშუალო მნიშვნელობა;
- - - 75% გადახრა (95% საიმედოობა)

რიცინი [14] დიდ მნიშვნელობას ანიჭებს დასხივებისას ნეიტრონების სპექტრის ცოდნას. იგი თვლის, რომ რადიაციული დაზიანებების მნიშვნელოვანი ნაწილი გამოწვეულია 1 გეე-ზე ნაკლები ენერგიის ნეიტრონებით.

1.14. უჟანგავი ფოლადი

დასხივების გავლენა უჟანგავი ფოლადის სიმტკიცის თვისებების ცვლილებაზე ჩანს 5-ე ცხრილის მონაცემებიდან. ნახშირბადოვან და დაბალლეგირებულ ფოლადში ადგილი აქვს დენადობის ზღვარის დიდ ცვლილებებს. სიმტკიცის და პლასტიკურობის ზღვარის ცვლილება

დასხივების შედეგად მნიშვნელოვნად ნაკლებია, ვიდრე ნახშირბადოვან ფოლადში. ხშირ შემთხვევაში აღინიშნება პლასტიკურობის შემცირება



ნახ. 6. ნეიტრონული დასხივების გავლენა ნახშირბადოვანი და დაბალლეგირებული ფოლადის ჭრილიანი ნიმუშების დარტყმით სიბლანტეზე გადატეხისას. დასხივების ტემპერატურა 260°C-ზე დაბალი [6]:

- o – შემცირებული კონსოლური დარტყმითი ნიმუშები;
- Δ – შარპის დარტყმითი ნიმუშები V-ებრი ჭრილით;
- – შარპის ნიმუშები V-ებრი ჭრილით იგივე ნელი გაღუნვისთვის

50%-ზე ნაკლებად, $1 \cdot 10^{21}$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით დასხივების შემდეგ. ზოგიერთი შედეგი [15] მიუთითებს, რომ $5 \cdot 10^{21}$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით დასხივების შემდეგ 347 ტიპის უჟანგავი ფოლადის დენადობის ზღვარი ოთახის ტემპერატურაზე უტოლდება დენადობის ზღვარის სიდიდეს მცირე ნაკადებისთვის, რაც მიუთითებს გაჯერების მიღწევაზე ამ მახასიათებლის ცვლილებას. ასეთ გაჯერებას ანუ პლასტიკურობის დაცემის სიჩქარის შემცირებას, აქვს ადგილი ამ ფოლადისთვის.

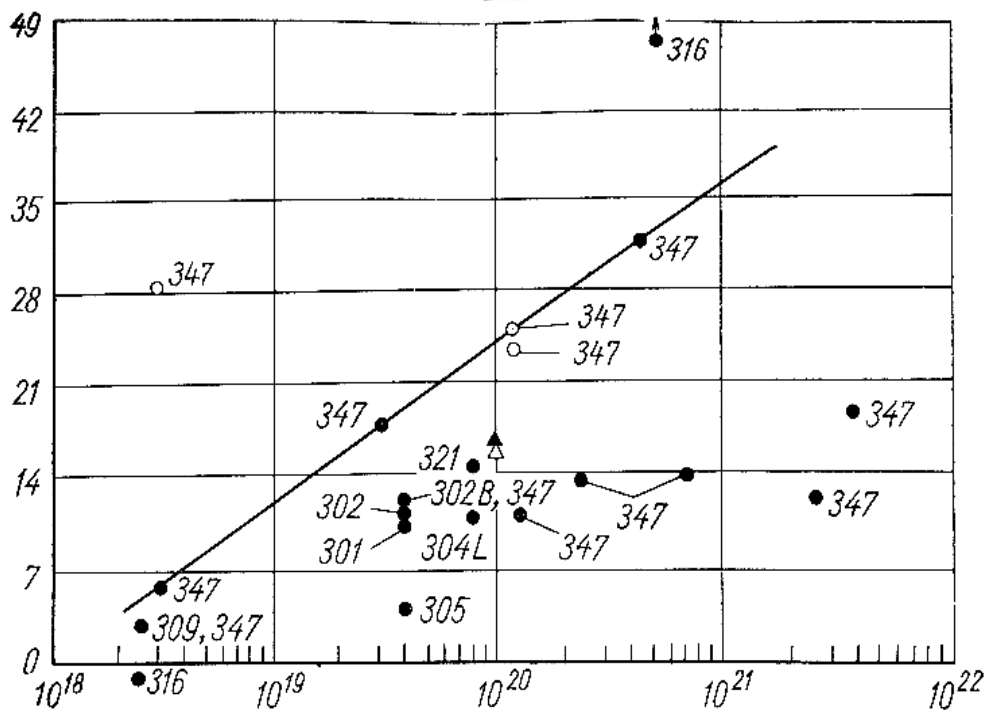
ამ შედეგებიდან ვასკვნით, რომ 347 ტიპის უჟანგავი ფოლადი შეიძლება გამოვიყენოთ რეაქტორის ტექნიკაში დროის გაცილებით დიდი პერიოდის განმავლობაში, ვიდრე ადრე იყო მოსალოდნელი.

ზოგიერთი შედეგი იმაზე მიუთითებს, რომ ადგილი აქვს დასხივებული ნიმუშების ფარდობითი დატყეითი სიბლანტის შემცირებას. არსებობს აგრეთვე მონაცემები, რომ დასხივებული უჟანგავი ფოლადი მყიფე დაშლას განიცდის თხევადი აზოტის ტემპერატურაზე. დაუსხივებელ შემთხვევაში ეს ფოლადი არ გადადის მყიფე მდგომარეობაში 104°C ტემპერატურამდე.

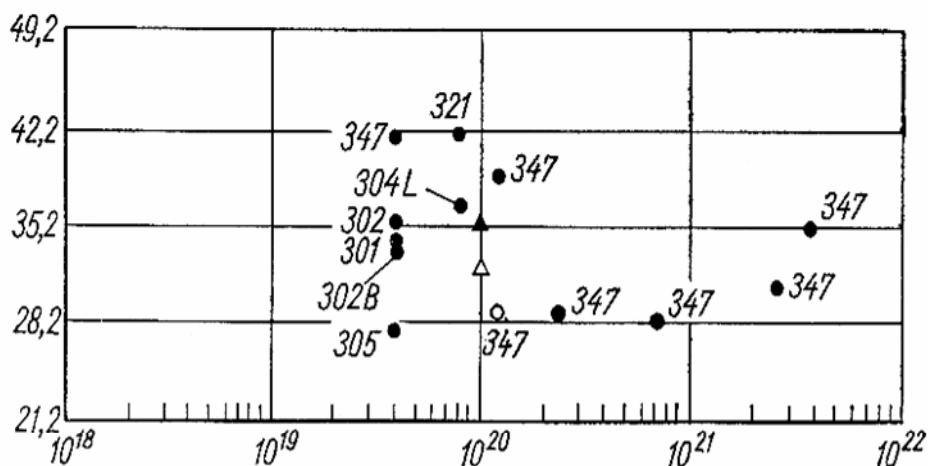
დასხივების მოქმედება 301 და 310 ტიპის უჟანგავ ფოლადზე შეისწავლა ვატსონმა [13]. გამოკვლევა ჩატარდა გლუვ ჭრილიან და შედუღებულ ნიმუშებზე, რომელთა დეფორმაციის ხარისხი შეადგენდა 60 და 75%-ს, შესაბამისად 301 და 310 ტიპის ფოლადისთვის. ნიმუშებს ასხივებს ($E > 0.33$ მეგ) $2 \cdot 10^{17}$ ნეიტრონ/სმ²-მდე სწრაფი ნეიტრონების ინტეგრალური ნაკადი 217°C ტემპერატურაზე. დასხივების შემდგომი გამოცდა ტარდებოდა იმავე ტემპერატურაზე. ყველაზე ძლიერი გარდაქმნა განიცადა გამოსაცდელი ფოლადის სიმტკიცის ზღვარმა. 301 ტიპის ფოლადისთვის სიმტკიცის ზღვარის შემცირებამ შეადგინა 27%, 310 ტიპისთვის – 10%.

ლიზური აღნიშნავს [16], რომ 347 უჟანგავი ფოლადის დასხივებამ და რადიაციის შემდგომმა გამოწვამ შეიძლება საზიანო შედეგები გამოიწვიოს. ვარაუდობენ, რომ მასტაბილიზებული ელემენტი ნიობიუმი კარბიდის ფორმისაა, რომელიც დასხივების მოქმედებით იშლება, ხოლო შემდგომი გამოწვისას ფორმირდება მარცვლების საზღვრებზე მასალური კარბიდების სახით. ამ კარბიდების არსებობამ შეიძლება ხელი შეუწეოს 347 ტიპის ფოლადის გამყიფებას. კარბიდის ასეთი წარმოქმნა მარცვლების საზღვარზე ხდება 304 ტიპის უჟანგავ ფოლადშიც, როგორც დასხივების შედეგი გრაფიტთან კონტაქტში [17].

ნეიტრონული დასხივების გავლენა აუსტენიტური ფოლადების დენადობის სიმტკიცის ზღვარზე ნაჩვენებია 7-ე და 8-ე ნახაზებზე. 8-ე ნახ-ზე მოცემულია, რომ აუსტენიტური უჟანგავი ფოლადების დენადობის ზღვარის ცვლილებას, როგორც ჩანს, აქვს გაჯერება შედარებით მცირე ინტეგრალური ნაკადით (დაახლოებით $1 \cdot 10^{19}$ ნეიტრონ/სმ²) დასხივების შემდეგ. ნაკადის გადიდებასთან ერთად ხდება სიმტკიცის ზღვარის გაცილება (იხ. ნახ. 7).



ნახ. 7 ნეიტრონული დასხივების გავლენა აუსტენიტური უჟანგავი ფოლადების გაწყვეტა წინააღმდეგობაზე [6]. რიცხვები წერტილთან აღნიშნავს ფოლადის მარკას
 ▲ – შედუღებული ნიმუში ფერიტის მაღალი შემცველობით;
 Δ – შედუღებული ნიმუში ფერიტის დაბალი შემცველობით;
 ○ – 347 ტიპის ფოლადი ცივადდეფორმირებული). სწორი ხაზი გვიჩვენებს დამოკიდებულებას მორფი და ჰენის მიხედვით [10], ჭრილიანი გამწყვეტი ნიმუშები, დასხივებული 257°C-ზე.



ნახ. 8 ნეიტრონული დასხივების გავლენა აუსტენიტური უჟანგავი ფოლადების დენადობის ზღვარზე.
 ▲ – შედუღებული ნიმუში ფერიტის მაღალი შემცველობით;
 Δ – შედუღებული ნიმუში ფერიტის დაბალი შემცველობით;
 ○ – 347 ტიპის ფოლადი ცივადდეფორმირებული). სწორი ხაზი გვიჩვენებს დამოკიდებულებას მორფი და ჰენის მიხედვით

[10], ჭრილიანი გამწვევები ნიმუშები, დასხივებული 257°C-ზე

ნეიტრონული დასხივების გავლენა ფოლადის მექანიკურ თვისებებზე

ფოლადი	ფოლადის დამუშავება *5	დასხივების პირობები		ა. ფაქტორული დამუშავება დამუშავება	დენადობის ზღვარი, კმ/მმ ²			სიმტკიცის ზღვარი, კმ/მმ ²			საერთო წაგრძელება			კეპტის შემცირება, %			სიმაგრე		
		ა. ფაქტორული დამუშავება	ბ. ფაქტორული დამუშავება		ა. ფაქტორული დამუშავება	ბ. ფაქტორული დამუშავება	გ. ფაქტორული დამუშავება	ა. ფაქტორული დამუშავება	ბ. ფაქტორული დამუშავება	გ. ფაქტორული დამუშავება	ა. ფაქტორული დამუშავება	ბ. ფაქტორული დამუშავება	გ. ფაქტორული დამუშავება	ა. ფაქტორული დამუშავება	ბ. ფაქტორული დამუშავება	გ. ფაქტორული დამუშავება	ა. ფაქტორული დამუშავება	ბ. ფაქტორული დამუშავება	გ. ფაქტორული დამუშავება
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
301	–	80	0,39	20	27,0	61,2	+34,2	69,4	79,6	+10,2	56,0	50,0	–10,7	83,0	81,0	–2,0	80R _B	94 R _B	+14
	ცივი დეფორ- მაცია გამოწე- ვა ანოდირება	–249	0,002	–253	210,1	199,8	–10,3	280	199,8	–80,2	13	8	–38,5	–	–	–	–	–	–
302	–	80	0,3	20	23,8	59,1	+35,3	67,0	78,2	+11,2	–	–	–	–	–	–	–	–	–
302B	–	80	0,3	20	23,6	56,3	+32,7	75,8	87,9	+12,1	–	–	–	–	–	–	–	–	–
304	–	49	0,2	20	50,7	88,8	+38,1	75,6	89,2	+13,6	46,0	32,0	–30,4	68,0	61,0	–7,0	97R _B	–	–
	გამოწვა	49	1,30	20	54,3	90,9	+36,6	75,6	91,4	+15,8	46,0	31,0	–32,6	68,0	66,0	–2,0	98 R _B	24 R _C	–
	„	49	5,14	20	54,3	91,1	+36,8	75,6	92,2	+16,6	46,0	32,0	–30,4	68,0	61,0	–7,0	98 R _B	24 R _C	–
	–	49	11,8	20	54,3	91,7	+37,4	75,6	91,7	+16,1	46,0	33,0	–28,2	68,0	61,0	–7,0	98 R _B	25 R _C	–
	–	49	28,7	20	54,3	90,7	+36,4	75,6	91,0	+15,4	46,0	31,0	–32,6	68,0	65,0	–3,0	97 R _B	25 R _C	–
	–	49	57,2*	20	54,3	72,4	+18,1	75,6	79,9	+4,3	46,0	50,0	+8,7	68,0	68,0	0	97 R _B	24 R _C	–
	გამოწვა	49	57,2	20	54,3	72,9	+18,6	75,6	80,3	+4,7	46,0	54,0	+17,4	68,0	68,0	0	91R _B	27 R _C	–
	338°C, 5 სთ	49	57,2	20	54,3	70,4	+16,1	75,6	78,5	+2,9	46,0	50,0	+8,7	68,0	68,0	0	91 R _B	26 R _C	–
	იგივე, 22 სთ	240	0,1*	20	30,9	32,3	+1,4	64,7	66,1	+1,4	71,0	50,0	–29,5	–	–	–	–	–	–
	–	200- 260	0,02	20	–	–	–	65,0	65,0	0	70,8	58,5	–16,8	–	–	–	–	–	–
	ანოდირებული	260- 370	2,94	20	28,8	33,2	+4,4	60,2	58,5	–1,7	73,0	61,7	–15,3	81,0	53,6	–27,4	–	–	–

ცხრილი 5-ის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
305 309	ანოდირებული	260-370	3,24	20	28,8	31,6	+2,8	60,2	60,5	+0,3	73,0	66,0	-9,6	81,0	63,0	-18,0	-	-	-
	-	80	0,39	20	22,6	50,2	+27,6	68,9	72,8	+3,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	240	0,1*	20	26,7	30,2	+3,5	66,8	69,6	+2,8	54,0	51,0	-5,5	-	-	-	-	-	-
	-	38-260	0,025	20	-	-	-	66,8	69,6	+2,8	54,0	51,0	-5,5	-	-	-	-	-	-
316	გამოწვა	49	0,12	20	47,2	71,1	+23,9	64,3	74,0	+9,7	60,0	44,0	-26,6	76	68	-8	92 R _B	59 R _A	-
	-	49	0,99	20	47,2	73,7	+26,5	64,3	76,1	+11,8	60,0	44,0	-26,6	76	68	-8	-	60 R _A	-
	-	49	0,562	20	47,2	76,6	+28,4	64,3	75,5	+11,2	60,0	42,0	-30,0	76	68	-8	-	59 R _A	-
	-	49	12,8	20	47,2	75,3	+28,1	64,3	77,6	+13,3	60,0	42,0	-30,0	76	67	-9	-	19 R _C	-
321 347	-	240	0,1	20	24,6	26,0	+1,4	63,3	62,6	-0,7	70,0	67,0	-24,2	-	-	-	-	-	-
	-	200-260	0,025	20	-	-	-	63,3	62,6	-0,7	70,0	66,5	-23,5	-	-	-	-	-	-
	-	21,27	5,1	20	-	-	-	55,9	106	+50,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	40	5,1	20	-	-	-	55,5	105	+49,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	80	7,8	20	21,9	63,7	+41,8	59,6	74,4	+14,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	80	3,9	20	26,0	67,8	+41,8	68,6	80,7	+12,1	49,0	25,0	-49,0	71,0	62,0	-9,0	81 R _B	99 R _B	+18
	-	90	1,2	20	34,3	69,5	+35,2	68,5	79,5	+11,0	53,4	34,1	-36,5	77,1	73,4	-3,7	-	-	-
	ცივი დეფორმაცია 58 %																		
	-	38	2,4	20	46,6	68,9	+22,3	71,5	76,6	+5,1	57,0	51,6	-9,5	74,5	78,5	+4,0	-	-	-
	-	38	7,2	20	46,6	68,4	+21,8	71,5	77,1	+5,6	57,0	50,6	-11,2	74,5	77,8	+3,3	-	-	-
	-	38	26	20	46,6	70,8	+24,2	71,5	74,5	+3,0	57,0	44,0	-23,0	74,5	65,0	-9,5	-	-	-
	-	38	37	20	46,6	75,2	+28,6	71,5	81,1	+9,6	57,0	32,0	-26,2	74,5	74,0	-0,5	-	-	-
	-	49	5,17	20	47,2	81,2	+34,6	67,5	82,0	+14,5	56	36	-35,8	68	64	-4	93 R _B	21 R _C	-
	-	49	7,96	20	47,2	82,0	+34,8	67,5	82,3	+14,8	56	35	-37,5	68	65	-3	93 R _B	20 R _C	-
	-	49	47,4	20	47,2	81,5	+34,3	67,5	81,8	+14,3	56	36	-35,8	68	62	-6	93 R _B	25 R _C	-
	გამოწვა 338°C 4 სთ	49	47,4	20	47,2	75,2	+28,0	67,5	82,2	+14,7	57	34	-40,4	68	63	-5	93 R _B	29 R _C	-
	-	240	0,1*	20	26,0	29,5	+3,5	69,6	72,4	+2,8	56,0	54	-3,6	-	-	-	-	-	-
	-	200-260	0,025	20	-	-	-	69,6	72,4	+2,8	56,0	52,3	-6,6	-	-	-	-	-	-
	-	257	0,03	20	-	-	-	91,2	97,0	+5,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ცხრილი 5-ის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
304 (1 წონ. % B ¹⁰ დამა- ტებით) 304 (0,5 წონ. % B ¹⁰ დამა- ტებით) 304 (0,85 წონ. % B ¹⁰ დამა- ტებით)	—	257	0,3	20	—	—	—	91,2	109,0	+17,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	257	4,3	20	—	—	—	91,2	123,0	+31,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	ცივი დეჰორ- მაცია	257	0,029	20	—	—	—	164,9	193,3	+28,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	იგივე	257	1,2	20	—	—	—	164,9	189,9	+24,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	288	2,6	20	27,2	51,7	+24,5	65,1	73,5	+8,4	64,2	45,3	-39,4	75,6	73,8	-1,8	—	—	—
	—	—	2,0	20	65,7	105,1	+39,4	85,8	107,6	+21,8	15,6	3,4	-78,3	—	—	—	—	—	—
	—	—	4,4*	20	—	—	—	85,8	96,3	+10,5	15,6	1,6	-90,0	—	—	—	—	—	—
	—	—	7,8*	20	—	—	—	85,8	41,7	-44,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	3,0*	20	—	—	—	85,8	17,1	-68,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	0,54	20	20,7	69,5	+48,8	57,3	85,4	+28,1	29,6	2,4	-92,0	—	—	—	—	—	—
	გამოწვა	—	1,6	316	16,4	58,1	+41,7	43,4	65,0	+21,5	19,8	0,5	-97,5	—	—	—	—	—	—
	დასხივების შემდეგ 399°C, 2,4 სთ	—	1,6	316	16,5	48,9	+32,4	43,7	54,1	+10,4	21,0	0,25	-99,0	—	—	—	—	—	—
	გამოწვა	—	1,9	20	23,1	78,6	+55,5	59,8	86,3	+26,5	21,1	0,3	-99,0	—	—	—	—	—	—
	“	—	1,9	316	16,7	—	—	46,2	63,9	+17,7	10,3	0,1	-99,0	—	—	—	—	—	—
	გამოწვა	—	1,6	316	19,1	—	—	48,6	62,2	+13,6	9,6	0,1	-99,0	—	—	—	—	—	—
	დასხივების შემდეგ 399°C, 2,4 სთ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
410	—	82	0,11	20	103,8	120,3	+16,5	124,4	136,5	+12,1	20,0	17,0	-15,0	66,0	64,0	-2,0	34 R _C	—	—
	—	82	1,0	20	103,8	128,5	+24,7	124,4	141,3	+16,9	20,0	15,0	-25,0	66,0	64,0	-2,0	34 R _C	—	—
	—	82	2,9	20	103,8	132,8	+29,0	124,4	143,9	+19,5	20,0	14,0	-30,0	66,0	58,0	-8,0	34 R _C	34 R _C	0
	—	82	3,3	20	103,8	133,1	+29,3	124,4	143,7	+19,3	20,0	14,0	-30,0	66,0	57,0	-8,9	34 R _C	35 R _C	+1
	ზედაპირის აზოტირება	—	0,5	20	31,6	42,9	+11,3	48,5	50,6	+2,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
431	—	260- 370	3,2	20	53,6	60,6	+7,0	62,5	72,3	+9,8	27,0	25,6	-5,2	72,8	45,3	-27,5	—	—	—
	—	88	0,49	20	40,6	81,8	+41,2	53,8	81,8	+28,0	36	14	-61,0	71,0	63,0	-8,0	—	—	—
	—	88	0,78	20	40,6	76,3	+35,7	53,8	76,3	+22,5	36	14	-61,0	71,0	60,0	-11,0	—	—	—
	—	88	4,7	20	40,6	79,3	+38,7	53,8	79,3	+25,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
440C	გამოწრობა	—	0,5	20	130,1	142,7	+12,6	144,1	158,7	+24,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—

ცხრილი 5-ის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
DB2	–	24	5,1	20	–	–	–	79,4	94,2	+14,8	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	გამოწვა	49	1,4	20	49,9	78,5	+28,6	70,7	83,0	+12,3	22,1	10,9	–50,5	–	–	–	58,7R _A	63,0R _A	+4,3
	927°C, 1 სთ	49	1,4**	20	48,9	49,9	+1,0	70,1	64,5	–5,6	22,8	5,5	–76,0	–	–	–	58,6R _A	59,2 R _A	+4,3
	იგივე	49	1,4***	20	49,6	47,6	–2,0	64,9	60,4	–4,5	23,2	1,9	–92,0	–	–	–	61,5R _A	62,9 R _A	+0,6
	“	49	2,0	20	49,9	74,0	+24,1	70,7	78,9	+8,2	22,1	17,2	–23,1	–	–	–	58,7R _A	62,1 R _A	+1,4
	“	49	2,0**	20	48,9	48,8	–0,1	70,1	59,4	–10,7	22,8	4,7	–79,0	–	–	–	58,6R _A	59,2 R _A	+3,4
	“	49	2,0***	20	49,6	55,5	+5,9	64,9	71,9	+7,0	23,2	5,5	–76,4	–	–	–	61,5R _A	63,1 R _A	+0,6
	“	49	2,8	20	49,9	67,4	+17,5	70,7	77,6	+6,9	22,1	14,1	–36,2	–	–	–	58,7R _A	62,0 R _A	+1,6
	“	49	2,8**	20	48,9	42,3	–6,6	70,1	65,7	–4,4	22,8	8,7	–62,0	–	–	–	58,6R _A	59,6 R _A	+3,3
	“	49	2,8***	20	49,6	51,0	+1,4	64,9	68,1	+3,2	23,2	5,5	–76,0	–	–	–	61,5R _A	61,9 R _A	+1,0
DB2 გაუმჟღ- ბესებუ- ლი	გამოწვა	49	1,9	20	54,0	75,9	+21,9	71,9	83,3	+11,4	15,3	16,0	+4,5	–	–	–	59,5R _A	63,1 R _A	+3,6
	982°C, 1 სთ	49	1,9*4	20	55,5	51,5	–4,0	73,3	78,2	+4,9	14,3	17,2	+20,2	–	–	–	59,8R _A	61,2 R _A	+1,4
	იგივე	49	1,9**	20	52,7	55,2	+2,5	71,2	72,6	+1,4	17,9	19,2	+7,3	–	–	–	60,4R _A	60,7 R _A	+0,3

* მითითებული მხოლოდ სითბური ნეიტრონების ნაკადი

** გამოწვა დასხივების შემდეგ, 871°C, 3 სთ

*** გამოწვა დასხივების შემდეგ, 1000°C, 3 სთ

*4 გამოწვა დასხივების შემდეგ, 427°C, 3 სთ

*5 ფოლადის დამუშავების მახასიათებლები არასრულია; ტირე აღნიშნავს, როგორც ჩანს, აუსტენიზაციის ჩვეულებრივ მდგომარეობას

ბორს უმატებენ მართვის და დაცვის სისტემაში გამოყენებულ სხვადასხვა მასალებს. დასხივების გავლენის გამოსაკვლევად აღებული იყო 304 ტიპის ფოლადი, რომელიც შეიცავდა 0,5-დან 10 წონ.%-მდე B^{10} -ს. ამ შემთხვევაში აღიღი აქვს ორმაგ ეფექტს: მატრიცის მასალის დაზიანება სწრაფი ნეიტრონებით, ლითონის და პელიუმის წარმოქმნა B^{10} რეაქციის შედეგად. ასეთი ტიპის მასალაზე დასხივების მოქმედების შესახებ წერდა შაფნუტი [18] და ფინისტონი [19]. ამ ნაშრომების თანახმად, დენადობის ზღვარი შესამჩნევად იზრდება, ხოლო წაგრძელება მკვეთრად მცირდება. 304 ტიპის ფოლადის პლასტიკურობა კლებულობს ბორის დამატებისას, დასხივების გარეშეც, მაგრამ $2 \cdot 10^{21}$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით დასხივების შემდეგ, საერთო წაგრძელება, გაჭიმვაზე გამოცდისას დაახლოებით 0,1% შეადგინა.

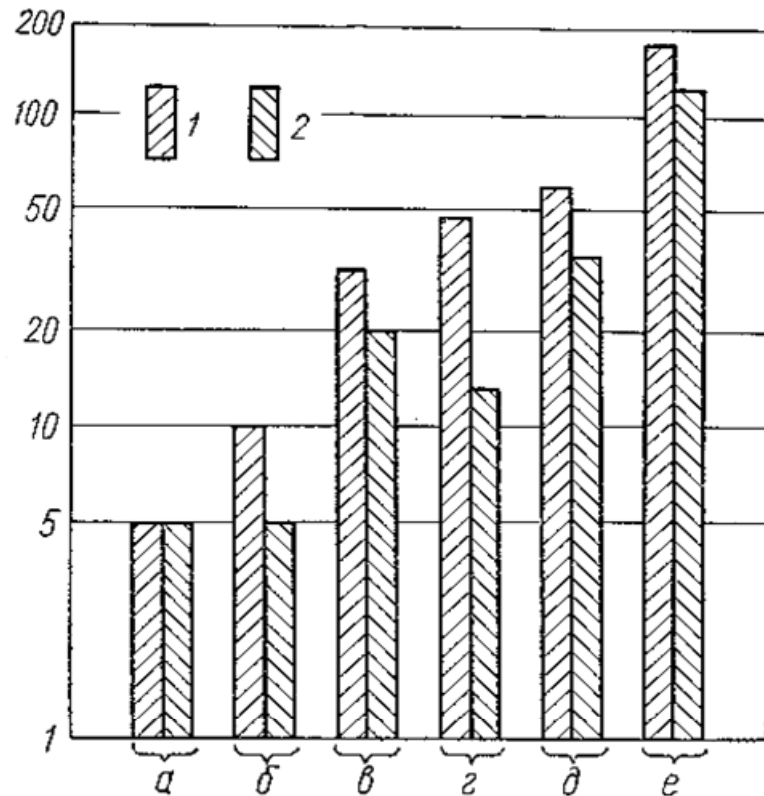
სიმპოზიუმზე იმსჯელეს, დასხივების გავლენასა და ზოგიერთი კონსტრუქციული მასალის კოროზიულ თვისებებზე, რომელიც შედგა ინგლისში.

ლა კიუ და კარლოვის მიმოხილვა [11] შეიცავს მონაცემებს 260 და 316°C-ზე დასხივების გავლენის შესახებ კოროზიის სიჩქარეზე წყალში, სამი მარკის აუსტენიტური ფოლადის, ნახშირბადიანი ფოლადის, ინკონელ X და ცირკალი-2-თვის. ამ მასალებზე მოხდა დასხივება ინტეგრალური ნაკადით, დაახლოებით $1,1 \cdot 10^{21}$ ნეიტრონი/სმ.

გამოკვლევის შედეგები მოყვანილია 9-ე ნახ-ზე.

ცდები, რომლებიც ეხება ატომების დიფუზური მოძრაობით განსაზღვრული მასალის თვისებას, არც ისე ბევრია ჩატარებული. ძირითადად მოიცავს რეკრისტალიზაციას, მარცვლების ზრდას და ფაზური გადასვლების შესწავლას. ადრეული პუბლიკაციები, რომლებიც ეხებოდა დასხივებისას მარცვლების ზრდას სპილენძში, ნიკელსა და ცირკონიუმში, გამოქვეყნებულ იქნა ს.ტ. კონობევესკის მიერ და სხვ. [20]. რკინა, რომელიც ისევე იყო დასხივებული, როგორც ეს ლითონები, არ გამოავლინა ასეთი ზრდა. ამერიკული ფოლადების 4130, 420 და 431 ეკვივალენტური ზოგიერთი ფოლადი დაასხივა ო. ვორონინმა, ვ. დიმიტრიევმა და შ. იბრაგიმოვმა, დაახლოებით 500-600°C ტემპერატურაზე [21]. მაკ-კარტენის და ტროზოს ნაშრომში [22]

გამოიკვლიეს T-1 ფოლადის მიკროსტრუქტურა (ცხრ. 1), რომელშიც აღნიშნულია მნიშვნელოვანი განსხვავება დასხივებულ და დაუსხივებელ ნიმუშებს შორის. სტრუქტურაში მყოფი კარბიდები, განიცდის დაშლის ან გახსნის პროცესს და ერთდროულად გამოიყოფა წვრილი ნაწილაკების სახით.



ნახ. 9. მასალის კოროზია (1-რეაქტორის გარეთ, 2-რეაქტორში) 316°C წყალში (pH=8.9-9.5). ინტეგრალური ნაკადი $1.1 \cdot 10^{21}$ ნეიტრონი/სმ²-მდე [73].

ა - ცირკალი-1; ბ - უჟანგავი ფოლადი 364; გ - ნიკონელ X;
 დ - უჟანგავი ფოლადი 174 pH; ე - უჟანგავი ფოლადი 410;
 ვ - ნახშირბადოვანი ფოლადი A-212

ბოლომდე რომ გავერკვეთ დასხივების მოქმედების ფაზური გარდაქმნების პროცესებს, საჭიროა ჯერ კიდევ ბევრი სამუშაოს ჩატარება. თუ დასხივება მოქმედებს მეტასტაბილურ შენადნობებზე, რომლებიც დაძველებისას უფრო მტკიცდება, მაშინ იგი ასევე ახდენს გავლენას ახალი ფაზების შექმნით გამოწვეულ განმტკიცებაზე. საბოლოო თვისებებმა შეიძლება ასახოს მატრიცის განმტკიცების გავლენა, რომელიც დამოკიდებულია დასხივების ტემპერატურაზე ან დაძველებაზე დამოუკიდებელი პირობების გავლენა. უჟანგავი ფოლადის

აუსტენიტის შესწავლა დაიწყო რეინოლდსმა და სხვებმა [23], რომლებიც ნიმუშებში ქმნიდნენ სხვადასხვა ხარისხის დეფორმაციებს, რათა მიეღოთ დეფორმაციისას წარმოქმნილი ფერიტის სხვადასხვა რაოდენობა. დასხივების შემდეგ შემჩნეული იყო ფერიტის რაოდენობის მცირედი მომატება (0.05%). შესაძლოა ეს მომატება იყო ფერიტის ფაზის უკვე არსებული მარცვლების ზრდის შედეგი.

2. შედეგები და მათი განსჯა

2.1 ფერადი ლითონები და შენადნობები

განხილულია დასხივების მოქმედების გამოკვლევის შედეგები. კერძოდ ლითონებისა და შენადნობების ის ჯგუფი, რომელიც ჩვეულებრივ ფერად ლითონებს მიეკუთვნება. აქ შედის ის შენადნობები, რომლებშიც რკინა არ არის ძირითადი შემადგენელი. უნდა აღინიშნოს, რომ ამ ნაწილში მოყვანილი შედეგები მიღებულია მხოლოდ იმ სწრაფი ნეიტრონებით დასხივებისას, რომლის ენერგია ხშირ შემთხვევაში 1 მევ-ზე მეტია. ფერადი ლითონების შენადნობების შერჩევა რეაქტორში გამოსაყენებლად დამყარებულია თვისებების საჭირო კომბინაციაზე. მაგალითად, ხშირად აუცილებელია მაღალი სიმტკიცე და კარგი კოროზიამდებობა მაღალი ტემპერატურისას. გარდა ამისა, არჩეულ მასალას უნდა ჰქონდეს ნეიტრონების შთანთქმის შედარებით დაბალი განიგვეთი. ნეიტრონების ეკონომიას დიდი მნიშვნელობა აქვს, რადგან რეაქტორის ეფექტურობა კლებულობს თუ გამოყენებული იქნება მასალები, რომლებსაც ბევრი ნეიტრონის შთანთქმა შეუძლია.

ძირითადი ყურადღება ეთმობა ნიკელს, ცირკონიუმს, სპილენძს, ბერილიუმს, ალუმინს, მაგნიუმს, მოლიბდენს, ნიობიუმს, ტანტალს და ვოლფრამს. ამ ლითონების მონაცემები და მათი შენადნობების მექანიკურ თვისებებზე დასხივების გავლენა მოყვანილია 6-ე-13-ე ცხრილებში.

ცირკონიუმს და მის შენადნობებს ასხივებენ სხვადასხვა პირობებში (იხ. ცხრ. 6) $3 \cdot 10^{18}$ -დან $4 \cdot 10^{20}$ -მდე ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით. ცდების ძირითადი ნაწილი ჩატარდა ოთახის ტემპერატურაზე ან 100°C-ზე, ზოგ შემთხვევაში – 380°C-ზე. ცხრილიდან გამომდინარეობს, რომ ნეიტრონებით დასხივება იწვევს მასალის სიმტკიცის ზღვარის, დენადობის ზღვარის და სიმაგრის მოსალოდნელ მომატებას. პლასტიკურობა ამ დროს კლებულობს. ასევე შეიძლება შევნიშნოთ, რომ წინასწარ დამოქლონებული მასალის თვისებები არ განიცდის ისეთ დიდ ცვლილებებს, როგორც გამომწვარ მდგომარეობაში დასხივებული მასალის თვისებები.

კემპერის და კელის მონაცემებით [24], ცივად დეფორმირებული არაღებურებული ცირკონიუმის სიმტკიცისა და დენადობის ზღვარი (დეფორმაციის ხარისხი 20%-ზე მეტი) $2,5 \cdot 10^{20}$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით დასხივებისას რამდენადმე გაიზარდა. ამავე ავტორებმა აღმოაჩინეს, რომ თვისებები შეიძლება აღდგეს მიახლოებით საწყის სიდიდეებამდე 250°C-ზე გამოწვით 200 სთ-ის განმავლობაში. თუმცა, უნდა აღინიშნოს, რომ თვისებების სრული აღდგენა არ ხდება.

გამოსხივების გავლენას ძლიერ დეფორმირებულ ცირკონიუმზე შეისწავლიდა მეიკინი და მინტერი [25]. დასხივება მიმდინარეობდა 100°C ტემპერატურაზე, დაახლოებით $5 \cdot 10^{19}$ ნეიტრონი/სმ² ნაკადამდე. ოთახისა და გაზრდილ ტემპერატურაზე ჩატარებული ცდებით დადგინდა სიმტკიცისა და დენადობის ზღვარის უმნიშვნელო მომატება, აგრეთვე პლასტიკურობის ძალზე მცირე ცვლილება დასხივების შემდეგ.

ამ ნაშრომებიდან შეიძლება გავაკეთოთ დასკვნა, რომ რადიაციული დაზიანებების გავლენა მასალის ცივად დეფორმაციის გავლენის თანაზომადია. ის ფაქტი, რომ დასხივების ზემოქმედებით ცივად დეფორმირებული მასალის დენადობისა და სიმტკიცის ზღვარი არ მატულობს, მიუთითებს, რომ ლითონის ან შენადნობის სტრუქტურის შემდგომი ცვლილება ტრადიციის ხარჯზე არ იწვევს ამ თვისებების ძლიერ ცვლილებას.

ნ.ვ. პრავდიუკმა და სხვებმა [26] შეისწავლეს ცირკონიუმის და ტანტალ-ცირკონიუმის შენადნობის სიმტკიცის მახასიათებლები $4 \cdot 10^{19}$ და $1 \cdot 10^{20}$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით დასხივების შემდეგ. 80 და 300°C-ზე ავტორები გვაცნობებენ, რომ რადიაციის შემდგომი გამოწვა 300°C-ზე არასაკმარისად ეფექტურია რადიაციული დაზიანებების მოსახსნელად. ცდის შედეგებიდან გამომდინარე, შეიძლება გავაკეთოთ დასკვნა დასხივება მაღალი ტემპერატურისას არ იწვევს თვისებების ისეთ სერიოზულ ცვლილებებს, როგორც დასხივება ოთახის ტემპერატურაზე.

ცხადია, ეს არის დასხივების დროს მიმდინარე გამოწვის შედეგი. ყველა გამოკვლეული შენადნობისთვის პლასტიკურობის შემცირება აღინიშნა დაახლოებით 50%-ით.

ბირთვულ რეაქტორებში ცირკონიუმის გამოყენება რამდენადმე შეზღუდულია, მაღალი ტემპერატურისას მისი დაბალი სიმტკიცის და რეაქტორის პირობებში სუსტი კოროზიამდევობის გამო, მაგრამ სითბური ნეიტრონების შთანთქმის დაბალი კვეთი მას უაღრესად სასურველ მასალად გადააქცევს. შემუშავებული იყო ცირკონიუმის ბევრი შენადნობი გაზრდილი სიმტკიცით, მაღალი ტემპერატურისას და მაღალი კოროზიამდევობით, ამავე დროს სხვა აუცილებელი თვისებების შენარჩუნებით. კერძოდ, შემუშავებულია ცირკონიუმის შენადნობების სერია, რომელიც შეიცავს მცირე რაოდენობით კალას, ნიკელს, რკინას და ქრომს – ესენია ცირკალი – 2, ცირკალი – 3 და ცირკალი – 4.

ამ სამი შენადნობიდან ყველაზე მეტი პოპულარობით სარგებლობს ცირკალი – 2. შესწავლილი იყო მისი მდგრადობა რადიაციული ზემოქმედების მიმართ. ხოუკმა და ტომსმა შეისწავლა [27] სწრაფი ნეიტრონებით დასხივების გავლენა გამომწვარ ცირკალი – 2-ზე 13.1% ცივი დეფორმაციით და დაშვებული 25.5% ცივი დეფორმაციით. შენადნობს ასხივებენ 220 და 380°C-ზე, შესაბამისად $3,6 \cdot 10^{19}$ და $2,7 \cdot 10^{20}$ ნეიტრონი/სმ² სწრაფი ნეიტრონების ინტეგრალური ნაკადით. რადიაციის შემდგომი გამოცდა ჩატარდა ოთახის ტემპერატურაზე და 280°C-ზე. აკვირდებოდნენ სიმტკიცის თვისებების დამახასიათებელ ცვლილებებს: დენადობის ზღვარის მომატებას, სიმტკიცის ზღვარის რამდენადმე ნაკლებ მომატებას, პლასტიკურობის შემცირებას. მაღალი ტემპერატურისას დასხივებული მასალისთვის თვისებები დასხივების შემდეგ უახლოვდებოდა იმავე მასალის თვისებებს, გამომწვარს დასხივების შემდეგ იგივე ტემპერატურაზე იგივე ხანგრძლივობით, რა დროის განმავლობაშიც მიმდინარეობდა მათი დასხივება. უკვე აღინიშნა, რომ სიმტკიცის თვისებების ცვლილებაზე გავლენას ახდენდა საწყისი დეფორმაცია. გამომწვარ მასალაში აღინიშნებოდა მეტი ცვლილებები, ვიდრე ცივად დეფორმირებულში.

ნებისმიერ შემთხვევაში მაღალი ტემპერატურისას დასხივება, მასალის წინასწარი მომზადების მიუხედავად, იწვევს სიმტკიცისა და დენადობის ზღვარის გაზრდას და შესაბამისად პლასტიკურობის კლებას. გამონაკლისია იგივე მასალა, დასხივებული 380°C-ზე და გამოცდილი ოთახის ტემპერატურაზე. ამ შემთხვევაში მასალებმა,

რომლებმაც დასხივების წინ მიიღო 13 და 25% ცივი დეფორმირება, დასხივების შემდეგ აჩვენა დენადობის და სიმტკიცის ზღვარის შემცირება და პლასტიკურობის ძალზე მცირე ცვლილება. ეს შედეგები იმაზე მიუთითებს, რომ წინასწარ ცივი დამუშავების გავლენა მცირდება თუ დასხივება მაღალი ტემპერატურისას მოხდება (იხ. ცხრ. 6).

გამოწვის ტემპერატურის და დროის გავლენა დასხივებულ ცირკალი – 2 -ზე შეისწავლა ხოუმ [28] (ცხრ. 8). მან აჩვენა, რომ 50°C-ზე $9 \cdot 10^{19}$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით დასხივების შემდეგ, შედეგების ნაწილობრივი ლიკვიდაციისათვის საჭირო იყო 140 წთ. ამ დროის განმავლობაში ძირიდან აღდგა ცირკალი – 2-ის პლასტიკურობა, მაგრამ ჯერ კიდევ მნიშვნელოვნად მომატებული რჩებოდა დენადობის და სიმტკიცის ზღვარის მნიშვნელობა. როგორც მე-7 ცხრილიდან ჩანს, 280°C-ზე იმავე დონემდე დასხივებული ცირკალი-2-თვის საჭირო იყო მხოლოდ 60 წთ. დენადობის და სიმტკიცის ზღვარის იმავე დონეზე აღსადგენად, რომელზეც აღდგებოდა 140 წთ-ის განმავლობაში 50°C-ზე დასხივებულ მასალაში.

ცირკალი – 2-ის ერთსაათიანი რადიაციის შემდგომი გამოწვა, რომელიც დასხივებული იყო 50°C-ზე $9 \cdot 10^{19}$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით, ჩატარდა 150-400°C ტემპერატურულ ინტერვალში (ცხრ. 8). 8-ე ცხრილიდან ჩანს, რომ ერთი საათის განმავლობაში 335°C-ზე გამოწვა საკმარისი იყო, რათა დაწყებულიყო თვისებების აღდგენა. ერთი საათი 400°C-ზე საკმარისია დასხივების გავლენის იმდენად შესამცირებლად, რომ მასალის თვისებები დასხივების და გამოწვის შემდეგ ახლოს იყოს დაუსხივებელი მასალის თვისებებთან. ხოუმმა [29] ასევე გვაცნობა, რომ ცირკალი – 2-ის 220 და 280°C-ზე დასხივებამ მნიშვნელოვანი გავლენა ვერ მოახდინა დარტყმის წინააღმდეგობაზე.

ცირკონიუმის მეორე შენადნობი, რომელმაც ფართო გამოყენება ჰპოვა, არის ცირკალი – 3. ეს შენადნობი ცირკალი – 2-ის მსგავსია, მაგრამ ნაკლებ კალას შეიცავს. გამოქვეყნებული მონაცემების მიხედვით მაქსიმალური ინტეგრალური ნაკადი, რომლის მოქმედებისას გამოიკვლიეს ეს შენადნობი, $3 \cdot 10^{20}$ ნეიტრონი/სმ²-ია. დასხივების შემდგომი სიმტკიცის თვისებები გამოიკვლია მეხანმა [30]. დასხივების შემდეგ ცირკალი – 2

ნეიტრონული დასხივების გავლენა ცირკონიუმის და მისი შენადნობების მექანიკურ თვისებებზე

მასალა	მასალის სამუშავება	დასხივების პირობები		აღრმაც გამოცდები	დენადობის ზღვარი, კმ/მმ ²			სიმტკიცის ზღვარი, კმ/მმ ²			საერთო წაგრძელება			კეეუთის შუამ- ცირება, %			სიმაგრე			სიმაგრე		
		ა. აგრძელდება	ბ. 10 x 10 სმ-ის სივრცე		იშკიერ აბსორბენტი	იშკიერ აბსორბენტი	აგზისობა	იშკიერ აბსორბენტი	იშკიერ აბსორბენტი	აგზისობა	იშკიერ აბსორბენტი	იშკიერ აბსორბენტი	აგზისობა	იშკიერ აბსორბენტი	იშკიერ აბსორბენტი	აგზისობა	იშკიერ აბსორბენტი	იშკიერ აბსორბენტი	აგზისობა	იშკიერ აბსორბენტი	იშკიერ აბსორბენტი	აგზისობა
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
ცირკონიუმი	გამოწვა	70	24	20	24,3	39,4	+15,1	45,1	50,0	+4,9	33	22	-33,3	-	-	-	-	-	-	50R _C	68 R _C	+18
	ცივი დე- ფორმაცია 20%	70	24	20	50,1	59,6	+9,5	54,8	62,2	+7,4	14	14	0	-	-	-	-	-	-	60 R _C	71 R _C	+12
	ცივი დე- ფორმაცია 50%	70	24	20	58,9	66,4	+7,5	61,0	67,3	+6,3	11	7	-36,4	-	-	-	-	-	-	65 R _C	75 R _C	+10
	ცივი დე- ფორმაცია	100	5,0	20	75,2	74,5	-0,7	86,8	87,4	+0,6	3,5	4,2	+20,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	გამოწვა	80	0,3	20	16,0	22,0	+6,0	30,0	33,0	+3,0	35,0	26,0	-31,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	“	300	0,4	20	15,0	22,0	-7,0	26,0	23,1	+2,1	34,0	25,0	-26,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	“	80	4,0	20	16,0	26,0	+10,0	26,5	32,0	+5,5	34,0	20,0	-41,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	“	80	10	20	16,0	34,1	+18,1	26,5	36,1	+9,6	34,0	15,0	-56,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	გამოწვა	50	140	20	31,0	49,2	+18,2	48,1	56,2	+8,1	23	15	-35,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ცივი დე- ფორმაცია 50%	50	14	20	56,0	73,5	+17,5	69,1	80,5	+11,4	19,5	9,2	-53,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ცირკონიუმი - 2	გამოწვა	220	3,6	20	36,0	46,1	+10,1	55,2	59,8	+4,6	23,5	19,5	-17,0	14	7	-50	-	-	-	87,7R _B	89,5R _B	+3,1

ცხრილი 6-ის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
	გამოწვა	280	27	20	36,0	55,8	+19,8	55,2	64,2	+9,0	23,5	12,7	-45,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	გამოწვა	-	0	20	34,7	-	-	53,4	-	-	19,6	-	-	12	-	-	-	-	-	-	-	-
	280°C~128																					
	დღე																					
	ცივი ღმ-	220	3,6	20	61,9	63,6	+1,7	65,3	68,0	+2,7	14,0	10,2	-25,0	3	2	-33	-	-	-	90,1R _B	93,2R _B	+3,1
	ფორმაცია																					
	13,1%																					
	იგივე	280	27	20	61,9	71,7	+9,8	65,3	73,2	+7,9	14,0	9,3	-33,5	3	4	-66	-	-	-	90,1R _B	95,4R _B	+5,3
	ცივი ღმ-																					
	ფორმაცია																					
	13,1% გამო-	-	0	20	52,4	-	-	59,3	-	-	12,3	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-
	წვა 280°C																					
	~128 დღე																					
	დაშეება																					
	425°C,15 წთ																					
	ცივი ღმ-	220	3,6	20	54,2	61,9	+7,7	65,0	69,6	+4,6	15,5	11,6	-25,0	6	3	-50	-	-	-	91,2R _B	94,2R _B	+3,0
	ფორმაცია																					
	25%																					
	იგივე	280	27	20	54,2	69,9	+15,7	65,0	74,3	+9,3	13,5	9,4	-39,0	6	3	-50	-	-	-	91,2R _B	95,3R _B	+4,1
	დაშეება																					
	425°C,15 წთ																					
	ცივი ღმ-	-	0	20	53,4	-	-	63,3	-	-	13,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ფორმაცია																					
	25% გამო-																					
	წვა 280°C																					
	~128 დღე																					
	გამოწვა	280	27	280	15,4	30,4	+15,0	30,4	32,4	+2,0	28,8	14,4	-50,0	14	2	-85	-	-	-	-	-	-
	გამოწვა	280	0	280	17,0	-	-	27,1	-	-	21,0	-	-	11	-	-	-	-	-	-	-	-
	“128 დღე																					
	ცივი ღმ-	280	27	280	33,6	42,9	+9,3	34,3	43,7	+9,4	13,0	9,0	-30,6	1	0,5	-50	-	-	-	-	-	-
	ფორმაცია																					
	13,1%																					

ცხრილი 6-ის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
ცირკა- ლოი-2	ცივი დე- ფორმაცია 13.1% გამო- წვა 280°C ~128 დღე დაშეება 425°C, 15 წთ, ცივი დე- ფორმაცია 25.5% დაშეება 425°C, 15 წთ ცივი დეფო- რმაცია 25.5%გამო- წვა 280°C ~128 დღე გამოწვა გამოწვა გამოწვა 380°C ცივი დეფო- რმაცია 13.1%, ცივი დეფო- რმაცია 13.1%, გამოწვა 280°C~128 დღე	–	0	250	31,6	–	–	32,9	–	–	13,3	–	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–
		280	27	280	33,7	43,4	+9,7	37,3	43,7	+6,4	12,5	9,0	–28,0	3	1	–66	–	–	–	–	–	–
		–	0	280	33,8	–	–	36,7	–	–	12,7	–	–	4	–	–	–	–	–	–	–	–
		50	9,1	20	36,0	50,6	+14,6	55,2	61,3	+6,1	24,0	13	–46,0	14	4	–11	–	–	–	–	–	–
		380	9,5	20	36,0	39,2	+3,2	55,2	53,7	–1,5	24,0	18	–25,0	14	9	–35	–	–	–	–	–	–
		–	0	20	35,5	–	–	51,3	–	–	19	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
		380	9,5	20	61,9	47,4	–14,5	65,2	58,1	–7,1	14	16	+14,3	3	6	+100	–	–	–	–	–	–
		380	0	20	43,9	–	–	54,6	–	–	15	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

ცხრილი 6-ის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
ცირკა- ლო - 3	დაშეება, 425°C, 15წთ ცივი დე- ფორმაცია 25.5%	380	9,5	20	54,2	47,7	6,5	65,0	59,3	-5,7	16	15	-6,2	6	5	-16,5	-	-	-	-	-	-
	დაშეება, ცივი დე- ფორმაცია 25.5%, გა- მოწვა 380°C “128 დღე	-	0	20	46,2	-	-	57,5	-	-	11	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-
	გამოწვა (გრძივი ნიმუში)	46	12	20	28,1	49,0	+20,9	43,6	51,5	+7,9	28,9	20,2	-30,0	17,2	3,6	-	41,3	50,6	+9,3	-	-	-
	გამოწვა (განივი ნიმუში)	46	12	20	34,9	55,1	+20,2	41,7	55,1	+13,4	30,6	16,5	-46,0	11,3	0	-100	42,0	52,0	10,0	-	-	-
	გამოწვა (გრძივი ნიმუში)	46	18	20	28,1	47,3	+19,2	43,6	49,9	+6,3	28,9	13,3	-54,0	17,0	4,2	-76	41,3	43,3	+2,0	-	-	-
	გამოწვა (განივი ნიმუში)	46	18	20	34,9	57,6	22,7	41,7	57,6	+15,9	30,6	6,9	-72,5	11,3	0	-100	42,0	56,6	+12,6	-	-	-
	გამოწვა (გრძივი ნიმუში)	46	33	20	28,1	49,7	+21,6	43,6	52,9	9,3	28,9	12,0	-56,5	17,2	4,2	-76	41,3	41,3	0	-	-	-
	გამოწვა (განივი ნიმუში)	46	33	20	34,9	54,8	+19,9	41,7	54,8	+13,1	30,6	7,6	-75,0	11,3	0	-100	42,0	51,3	+9,3	-	-	-
	გამოწვა (გრძივი ნიმუში)	46	34	20	28,1	48,7	+20,6	43,6	54,3	+10,7	28,9	17,5	-39,5	17,2	4,1	-76	41,3	42,0	+0,7	-	-	-

ცხრილი 6-ის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
ცირკონი- უმი 0,5 წონ.% Ta დამატე- ბით	გამოწვა (განივი ნიმუში)	46	34	20	34,9	57,3	+22,4	41,7	57,3	+15,6	30,6	6,0	-80,0	11,3	0	-100	42,0	42,0	0	-	-	-
	გამოწვა	80	3,5	20	21,1	46,1	+25,0	32,1	47,1	+15,0	34	14	+59	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	გამოწვა	80	11	20	21,1	49,2	+28,1	32,1	51,1	+19,0	34	11	-68	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	გამოწვა	300	0,4	20	28,1	44,2	+16,1	38,0	49,2	+11,2	35	18	-48	-	-	-	-	-	-	-	-	-

გამოწვის დროის გავლენა დასხივებული ცირკალი-2-ის
სიმტკიცის თვისებებზე

დასხივების პირობები		გამოწვის დრო 325°C წთ	დენადობის ზღვარი კმ/მმ²	სიმტკიცის ზღვარი კმ/მმ²	ფარდობითი წაგრძელება %	
ტემპერატურა, °C	ინტეგრალური ნაკადი $\times 10^{19}$ ნეიტრონი/სმ²				თანა- ბარი	სრული
50	9,1	0	50,6	61,3	4	13
		5	48,6	60,5	5	14
		10	47,1	59,3	6	23
		20	43,9	59,1	7	16
		40	42,2	58,6	7	22
		60	41,1	55,1	7	16
		140	39,3	57,0	12	24
		0	46,8	60,5	5	16
		5	46,1	59,8	5	15
		10	45,3	59,1	6	19
		20	44,6	60,0	8	20
		40	43,9	58,6	9	18
		60	43,2	58,0	10	24
		140	41,5	56,2	12	23
280	7,7	0	50,6	61,3	4	13
		5	48,6	60,5	5	14
		10	47,1	59,3	6	23
		20	43,9	59,1	7	16
		40	42,2	58,6	7	22
		60	41,1	55,1	7	16
		140	39,3	57,0	12	24
		0	46,8	60,5	5	16
		5	46,1	59,8	5	15
		10	45,3	59,1	6	19
		20	44,6	60,0	8	20
		40	43,9	58,6	9	18
		60	43,2	58,0	10	24
		140	41,5	56,2	12	23

გამოწვის ტემპერატურის გავლენა ცირკალი-2-ის სიმტკიცის
თვისებებზე

ერთსაათიანი გამოწვის ტემპერატურა	დენადობის ზღვარი კმ/მმ²	სიმტკიცის ზღვარი კმ/მმ²	ფარდობითი წაგრძელება %	
			თანაბარი	სრული
გამოწვისას	50,6	61,3	4	13
150	50,6	61,2	4	13
250	49,9	59,4	4	13
280	48,2	59,8	5	14
300	44,6	57,5	6	20
312	43,2	58,4	7	16
325	41,5	55,2	7	16
337	36,9	52,4	10	18
350	35,0	49,0	10	18
375	34,8	52,0	11	19
400	33,7	50,6	12	22
გამოწვისას	46,8	60,5	5	16
290	46,4	60,3	6	17
300	45,7	58,4	7	17
313	44,3	58,4	5	16
325	43,2	58,0	10	24
332	41,5	55,9	11	21
337	40,1	56,0	11	20
350	37,5	55,6	13	24
375	36,9	54,8	11	23
400	36,6	54,8	14	26

შენიშვნა: $9,1 \cdot 10^{19}$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით დასხივება 50°C ტემპერატურაზე.

და ცირკალი – 3-ის თვისებების შედარება გვიჩვენებს, რომ აღინიშნება დენადობისა და სიმტკიცის ზღვარის მსგავსი მომატება, ასევე პლასტიკურობის შემცირება. ამ სერიის უფრო ახალი შენადნობი – ცირკალი – 4, რომელსაც დასხივებულ მდგომარეობაში აქვს უკეთესი კოროზიამდებობა, გამოკვლეული არ იყო.

ბირთვულ რეაქტორებში ცირკონიუმის შენადნობების ფართო გამოყენებისას კარგად არის ცნობილი მხოლოდ მათი ხანმოკლე მექანიკური თვისებები დასხივების მოქმედებისას. შედარებით ახლახან აღინიშნა ცოცვადობის მახასიათებლებზე დასხივების მოქმედების ცოდნის მნიშვნელობა. ცირკონიუმის შენადნობების ცოცვადობაზე დასხივების გავლენის გამოკვლევის ზოგიერთი შედეგი მოყვანილი აქვს ფარისს [31]. მისი მონაცემებით მასალის (სუფთა ცირკონიუმის გარდა) ცოცვადობის სიჩქარე ნეიტრონებით დასხივებისას რამდენადმე მატულობს.

გესტიპაუზე გვატყობინებს, რომ $3 \cdot 10^{12}$ ნეიტრონი/(სმ²·ქმ) სწრაფი ნეიტრონების ნაკადით დასხივებული სუფთა ცირკონიუმის ცოცვადობის სიჩქარე ძლიერ მცირდება 280°C ტემპერატურაზე.

ჩოკიმ [29] ასეთივე გამოკვლევა ჩაატარა ცირკალი – 2-ის შენადნობისთვის და აღმოაჩინა შებრუნებული მოვლენა. ცოცვადობის სიჩქარე იმატებს 200-400°C ტემპერატურულ ინტერვალში, 10.5-14.1 კგ/მმ² დატვირთვისთვის.

ჯოზეფის [32] ცდები რელაქსაციის პროცესების შესწავლაზე მიუთითებს ცოცვადობის სიჩქარის გაზრდის შესაძლებლობაზე ცივად დეფორმირებული და გამომწვარი ცირკალი – 2-ის დასხივებას. იგი გვატყობინებს, რომ 300°C-ზე რეაქტორში რელაქსაციას განიცდის დაძაბულობის უფრო მეტი ნაწილი, ვიდრე იმავე ტემპერატურაზე რეაქტორის გარეთ მყოფ ნიმუშში.

2.1.1. ნიკელი და შენადნობები ნიკელის საფუძველზე [31]

ნიკელი და ნიკელის შენადნობები შესაძლო კონსტრუქციული მასალაა რეაქტორებისთვის. რეაქტორების ახალ კონსტრუქციებთან და მაღალ სამუშაო პარამეტრებთან დაკავშირებული მზარდი მოთხოვნები იწვევს მაღალი ტემპერატურისას საკმაოდ თბომედები და სხვადასხვა

გარემოში კოროზიამედები მასალების შექმნას. შენადნობთა ამ ჯგუფში შედის ინკონელ X, ინკონელი, ინკონელ-702, ხასტელი, ხასტელი – B. მოყვანილია მონაცემები მათი თვისებების ცვლილების შესახებ $1 \cdot 10^{19}$ - $7.5 \cdot 10^{20}$ ნეიტრონი/სმ² და ზოგ შემთხვევაში $2 \cdot 10^{21}$ ნეიტრონი/სმ²-მდე ინტეგრალური ნაკადით დასხივების მოქმედებისთვის. ეს მასალები უნდა გამოვიყენოთ მაღალი ტემპერატურის პირობებში, თუმცა, ბევრი ექსპერიმენტი ჩატარდა დასხივების შედეგად თვისებების ცვლილების განსაზღვრისთვის დაბალი ტემპერატურის პირობებში (გამოცდები ოთახის ტემპერატურაზე). არის ზოგიერთი მონაცემი მაღალი ტემპერატურისთვისაც, მაგრამ არა აუცილებლად ისეთისთვის, რომლის დროსაც, როგორც მოსალოდნელია, ეს მასალები იმუშავენ.

სუფთა ნიკელს ნაკლებად იყენებენ როგორც რეაქტორის კონსტრუქციულ მასალას, მაგრამ ფართოდ გამოიყენება რადიაციული დაზიანებების მექანიზმის გამოსაკვლევად. თვისებების რადიაციულ ცვლილებებს შეისწავლიან სხვადასხვა მეთოდების გამოყენებით: ელექტრონული მიკროსკოპიით, მექანიკური გამოცდებით, სიმტკიცის შესწავლით, ოპტიკური მიკროსკოპიით.

მეიკინი და მინტერი რადიაციული განმტკიცების გავლენას შეისწავლიდნენ [34] სუფთა ნიკელის მავთულზე. დასხივება ხდებოდა 100°C -ზე $9.5 \cdot 10^{17}$ - $1 \cdot 10^{20}$ ნეიტრონი/სმ² ფარგლების ინტეგრალური ნაკადით. რადიაციის შემდგომი გამოკვლევა ხდებოდა მექანიკური გამოკვლევებიდან, რომელშიც შეფასებული იყო სიმტკიცის ზღვარი, დენადობის ზღვარი და პლასტიკურობა (წაგრძელების მიმართ). იყო მცდელობა დაეყოთ და შეეფასებინათ მესრის დამახინჯების და დისლოკაციების ბლოკირების გავლენა განმტკიცებაზე დასხივების შედეგად. მათ აღმოაჩინეს, რომ სუფთა ნიკელის მესრის განმტკიცება ნეიტრონების სრული ინტეგრალური ნაკადის სიდიდეზე დამოკიდებული იყო შემდეგნაირად:

$$\sigma_i = A(1 - e^{-B\Phi})^{\frac{1}{2}},$$

სადაც σ_i არის მესრის დამახინჯების დაძაბულობა; A და B – კონსტანტები; Φ – ინტეგრალური ნაკადი, ნეიტრონი/სმ².

აღმოჩენილი იყო, რომ ნეიტრონების $8 \cdot 10^{17}$ რიგის მცირე ინტეგრალური ნაკადი იწვევს დენადობის ზღვარის შესაძენვე მომატებას და ფარდობითი წაგრძელების შემცირებას. მაგრამ სიმტკიცის ზღვარის ცვლილება საკმაოდ მცირე იყო. $5 \cdot 10^{19}$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით დასხივების შემდეგ აღინიშნებოდა სიმტკიცის ზღვარის გარკვეული მატება, ამავე დროს დენადობის ზღვარი 100%-ზე მეტად იმატებდა.

ნიკელის ფოლგის გამოკვლევა ჩაატარა ვილსდირეთმა [35], $1 \cdot 10^{19}$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით დასხივების შემდეგ. რადიაციული დეფექტები შესწავლილი იყო ელექტრონული მიკროსკოპის საშუალებით, ტრანსმისიული მეთოდის გამოყენებით. დასხივებული ფოლგის შესწავლამ მაღალი გადიდებისას (X20000-65000) აჩვენა, რომ დენადობის ზღვარი იმატებს არა ვაკანსიების წარმოქმნის ან მათი შეკრების შედეგად, არამედ მარყუქებსა და კვანძებზე (საფეხურებზე) დისლოკაციების დამაგრების გამო, რომლებიც ვაკანსიებზე წარმოიქმნებოდა. იგი აკვირდებოდა, რომ, როგორც კი დაცურება იწყებოდა, ზოგიერთი სიბრტყის გასწვრივ, ვაკანსიების უმრავლესობა გამოიდევნებოდა ამ სიბრტყეებს შორის შუალედებიდან და დეფორმაცია გაცილებით ადვილად ხდებოდა.

ნიკელის შენადნობებს შესანიშნავი სიმტკიცისა და ცოცხადობის თვისებები $650-980^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურულ ინტერვალში პერსპექტიულად ხდის მათ გამოყენებას. მაგრამ, იმისათვის, რომ დავამტკიცოთ მათი ვარგისიანობა რეაქტორის მასალებად გამოყენებისთვის, საჭიროა გამოვიკვლიოთ აღნიშნულ თვისებებზე სწრაფი ნეიტრონებით დასხივების გავლენა.

მაღალი ტემპერატურებისას ნიკელსა და ნიკონელ X-ზე დასხივების გავლენის გამოკვლევისას ჩატარებული იყო სამუშაოთა შეზღუდული რაოდენობა, არა იმ ტემპერატურებზე, რომელიც შეიძლება მოსალოდნელი იყოს რეაქტორის პირობებში. მაგრამ, ცდები მაინც გარკვეულ წარმოდგენას იძლევა მაღალი ტემპერატურისას დასხივების გავლენაზე.

მეხანი [36] გვაცნობებს, რომ 304°C -ზე $1 \cdot 10^{19}$ ნეიტრონი/სმ²

ინტეგრალური ნაკადით დასხივებული სტელიტის და ნიკონელ-X-ის ზამბარების თვისებები არ გაუარესდა. კაპმა [37] გამოიკვლია დასხივების გავლენა ნიკონელისა და ნიკონელ X-ის მექანიკურ თვისებებზე. მან გამოიკვლია სამ მდგომარეობაში დასხივებული ნიკონელი: მყარი ხსნარი, გამომწვარი და ცივადგამოჭიმული (დაახლოებით დეფორმაციის 35%). ამ მასალების 50, 250 და 300°C-ზე ასხივებდნენ სწრაფი ნეიტრონების ინტეგრალური ნაკადი $3,1 \cdot 10^{19}$ - $1,3 \cdot 10^{20}$ ნეიტრონი/სმ² ინტერვალში. გამოსხივების დროს დაძველების პროცესის გამოკვლევა ჩაატარეს ნიკონელ X-ზე, რომელიც დაძველებული შენადნობია. ამ დროს აღმოჩნდა, რომ დასხივების შედეგად დენადობის ზღვარის ცვლილება ისეთივეა, როგორც სხვა მასალებისთვის და 100%-ს აღწევს. მაგრამ დარწმუნებული არა ვართ, რომ ცდებისას დაძველების პროცესი ბოლომდე მიდიოდა. ნაჩვენებია, რომ ცივად დეფორმირებულ მასალას დასხივების შედეგად აქვს თვისებების ნაკლები ცვლილება, ვიდრე მთლიანად გამომწვარ მასალას. გასაბურმა და რონზიკმა [13], ბარცმა [38] და ვატანაბემ [39] ასევე აღნიშნეს ნიკონელ X-ის თვისებების ცვლილება დაძველების მდგომარეობაში. მათი შედეგები არასაკმარისად კარგად ემთხვევა დასხივების წინ მასალის განსხვავებული საწყისი დამუშავების შედეგს (ცხრ. 9).

ბერგენმა [40] გვაცნობა დასხივებული ნიკონელის მიღების ცოცხადობაზე გამოკვლევის შედეგები. დასხივებისას დატვირთვის ქვეშ მყოფი მიღების დაშლის დრო ორჯერ ნაკლებია დაუსხივებელთან შედარებით. ვარაუდობდნენ, რომ რადგან ნიკონელი შეიცავს ბორს, სიმტკიცის შემცირება განპირობებულია ბორისგან ჰელიუმის წარმოქმნით. მარცვლების საზღვრებზე დაგროვილმა ჰელიუმის აირმა შეიძლება შეამციროს ნიკონელის ცოცხადობისადმი წინაღობა. ჰელიუმი წარმოიქმნება $B^{10} Li^7$ -ად გარდაქმნისას, გროვდება კრისტალურ მესერში და დიფუნდირებს მარცვლის საზღვრისკენ, რითაც მნიშვნელოვნად ამცირებს პლასტიკურობას და ამცირებს შენადნობის დაშლამდე დროს.

ნეიტრონული დასხივების გავლენა ნიკელის და მის საფუძველზე შენადნობების
მექანიკურ თვისებებზე

მასალა	მასალის დამუშავება	დასხივების პირობები		ნაკადი ×10 ¹⁹ ნეიტრონი/სმ²	დენადობის ზღვარი, კმ/მმ²			სიმტკიცის ზღვარი, კმ/მმ²			საერთო წაგრძელება			კეეთის შემ- ცირება, %			სიმაგრე		
		ტემპერატურა °C	ინტენსივობა ნაკადი ×10 ¹⁹ ნეიტრონი/სმ²		საკონტროლო ნიმუში	დასხივებული ნიმუში	ცვლილება	საკონტროლო ნიმუში	დასხივებული ნიმუში	ცვლილება	საკონტროლო ნიმუში	დასხივებული ნიმუში	ცვლილება	საკონტროლო ნიმუში	დასხივებული ნიმუში	ცვლილება	საკონტროლო ნიმუში	დასხივებული ნიმუში	ცვლილება
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ნიკელი A	გამოჭედვა	116	1,0 (სითბური)	21	—	—	—	45,7	48,5	+2,8	45	34	-24,2	—	—	—	64BHN	137BHN	+73
სუფთა ნიკელი	გამოწვა	99	0,095	200	14,8	19,0	+4,2	38,7	38,7	0	35	27,5	21,0	—	—	—	—	—	—
	“	99	0,095	20	17,6	21,0	+3,4	42,2	42,2	0	38,0	34,0	-10,5	—	—	—	—	—	—
	“	99	0,095	-190	19,7	24,6	+4,9	67,5	65,4	-2,1	49,0	39,0	-20,4	—	—	—	—	—	—
	“	99	0,5	200	14,8	21,8	+7,0	38,7	38,7	0	35	24,0	-25,6	—	—	—	—	—	—
	“	99	0,5	20	17,6	26,0	+8,4	42,2	42,9	+0,7	38	35,0	-7,9	—	—	—	—	—	—
	“	99	0,5	-190	19,7	35,2	+15,5	67,5	68,2	+0,7	49	36,0	-26,5	—	—	—	—	—	—
	“	99	0,88	200	14,8	25,3	+10,5	38,7	39,4	+0,7	35	26,0	-25,6	—	—	—	—	—	—
	“	99	0,88	20	17,6	29,5	+11,9	42,2	42,2	0	38	28,0	-26,3	—	—	—	—	—	—
	“	99	0,88	-190	19,7	42,2	+22,5	67,5	69,6	+0,1	49	31,0	-36,7	—	—	—	—	—	—
	“	99	4,9	200	14,8	33,7	+18,9	38,7	39,4	+0,7	35	18,0	-48,5	—	—	—	—	—	—
	“	99	4,9	20	17,6	38,7	+21,1	42,2	45,7	+3,5	38	22,0	-42,0	—	—	—	—	—	—
	“	99	4,9	-190	19,7	57,0	+37,3	67,5	71,0	+3,5	49	25,0	-49,0	—	—	—	—	—	—
	“	99	6,1	200	14,8	36,6	+21,8	38,7	42,2	+3,5	35	18,0	-48,5	—	—	—	—	—	—
	“	99	6,1	20	17,6	42,9	+25,3	42,2	49,9	+7,7	38	18,0	-52,5	—	—	—	—	—	—
	“	99	6,1	-190	19,7	63,3	+43,6	66,8	77,3	+10,5	49	21,0	-57,0	—	—	—	—	—	—
	“	99	7,5	200	14,8	32,3	+17,5	38,7	41,5	+2,8	35	12,0	-64,0	—	—	—	—	—	—
	“	99	7,5	20	17,6	44,3	+26,7	42,2	49,2	+7,0	38	21	-44,6	—	—	—	—	—	—

ცხრილი 9-ის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
მონელი, ნი- მუშები ჭრილით	“	99	7,5	-190	19,7	67,5	+47,8	67,5	78,0	+10,5	49	21	-57,0	-	-	-	-	-	-
	“	99	10,7	200	14,8	41,5	+26,7	38,7	45,7	+7,0	35	10	-71,5	-	-	-	-	-	-
	“	99	10,7	20	17,6	49,2	+31,6	42,2	52,7	10,5	38	18	-52,6	-	-	-	-	-	-
	“	99	10,7	-190	19,7	73,8	+54,1	67,2	85,1	+17,6	49	19	-61,0	-	-	-	-	-	-
	“	282	4,0	21	-	-	-	90,7	93,5	+2,8	2	1	-50,0	-	-	-	-	-	-
	“	282	(სით- ბური) 4,0	21	-	-	-	60,7	64,0	+3,5	32	29	-9,4	-	-	-	157BHN	180BHN	-
	“	20- 60	5,0	21	-	-	-	59,8	67,5	+7,7	33	10	-70,0	-	-	-	-	-	-
	“	282	4,0	21	-	-	-	-	-	-	1	2	+100,0	-	-	-	-	-	-
	“	282	(სით- ბური) 4,0	21	-	-	-	-	-	-	10	19	+90,0	-	-	-	-	-	-
	“	21	(სით- ბური) 4,0	21	-	-	-	-	-	-	1	2	+100,0	-	-	-	-	-	-
მონელი K, ნიმუშები ჭრილით	“	21	(ჩქარი) “	21	-	-	-	-	-	-	11	3	-71,2	-	-	-	-	-	-
	“	49	29	-	72,5	114,7	+42,2	119,0	116,0	-3,6	-	-	-	-	-	-	27R _C	28 R _C	+1
	“	49	4,9	21	93,1	117,8	+24,7	114,9	118,6	+3,7	22	12	-45,5	46	42	-N ₆	29 R _C	20 R _C	+1
	“	77	7,6	21	93,1	117,1	24,0	114,9	117,7	+2,8	22	11	-50,0	45	43	-2	28 R _C	26 R _C	-2
	“	228	4,0	21	-	-	-	105,5	112,5	+7,0	1	2	+100,0	-	-	-	-	-	-
	“	228	(სით- ბური) 4,0	21	-	-	-	75,2	79,6	+4,0	30	29	-3,3	-	-	-	-	-	-
	“	20- 60	4,0	21	-	-	-	106,2	120,9	+14,7	2	-	-	-	-	-	-	-	-
	“	20- 60	(ჩქარი) 4,0	21	-	-	-	64,5	81,6	+7,1	31	29	-6,5	-	-	-	-	-	-
	“	20- 60	(ჩქარი) 4,0	21	-	-	-	64,5	81,6	+7,1	31	29	-6,5	-	-	-	-	-	-
	“	20- 60	(ჩქარი) 4,0	21	-	-	-	64,5	81,6	+7,1	31	29	-6,5	-	-	-	-	-	-
ნიკონელი, ნიმუშები ჭრილით	ნაჭელი	228	4,0	21	-	-	-	105,5	112,5	+7,0	1	2	+100,0	-	-	-	-	-	-
	გამომწვარი	228	(სით- ბური) 4,0	21	-	-	-	75,2	79,6	+4,0	30	29	-3,3	-	-	-	-	-	-
	“	20- 60	4,0	21	-	-	-	106,2	120,9	+14,7	2	-	-	-	-	-	-	-	-
	“	20- 60	(ჩქარი) 4,0	21	-	-	-	64,5	81,6	+7,1	31	29	-6,5	-	-	-	-	-	-
	“	20- 60	(ჩქარი) 4,0	21	-	-	-	64,5	81,6	+7,1	31	29	-6,5	-	-	-	-	-	-
	“	20- 60	(ჩქარი) 4,0	21	-	-	-	64,5	81,6	+7,1	31	29	-6,5	-	-	-	-	-	-
	“	20- 60	(ჩქარი) 4,0	21	-	-	-	64,5	81,6	+7,1	31	29	-6,5	-	-	-	-	-	-
	“	20- 60	(ჩქარი) 4,0	21	-	-	-	64,5	81,6	+7,1	31	29	-6,5	-	-	-	-	-	-
	“	20- 60	(ჩქარი) 4,0	21	-	-	-	64,5	81,6	+7,1	31	29	-6,5	-	-	-	-	-	-
	“	20- 60	(ჩქარი) 4,0	21	-	-	-	64,5	81,6	+7,1	31	29	-6,5	-	-	-	-	-	-

ცხრილი 9-ის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ინკონელ-702	“	49	13	21	97,2	119,9	+22,7	100,0	119,9	+19,9	12	9	-25,0	6	4	-2	98 R_B	—	—
	“	59	13	21	97,2	119,9	+22,1	100,0	119,9	+18,9	12	9	-25,0	6	4	-2	98 R_B	104 R_B	+6
	“	300	($E>500$) 7,5	21	25,5	38,5	+13,0	63,6	70,0	+6,4	53	59	+11,3	42	47	+5	56 R_B	76 R_B	+20
	“	300	($E>500$) 7,5	21	25,5	35,6	+10,1	63,6	69,3	+5,7	53	54	+1,9	42	45	+3	56 R_B	75 R_B	+19
	“	300	($E>500$) 7,5	21	25,5	37,8	-12,3	63,6	70,0	+6,4	53	53	0	42	43	+1	56 R_B	—	—
	“	49	($E>500$) 5,0	21	29,9	71,1	+41,2	66,7	79,5	+12,8	67	50	-19,4	68	63	-5	82 R_B	96 R_B	+14
	“	49	18	21	29,9	84,6	+54,7	66,7	85,4	+18,7	67	44	-34,2	68	64	-4	82 R_B	100 R_B	+18
	“	49	25	21	29,9	90,6	+60,7	66,7	91,4	+24,7	67	36	-46,2	68	63	-5	82 R_B	101 R_B	+19
	“	—	—	21	63,6	—	—	102,2	120,6	+18,7	44	13	-70,3	53	53	0	94 R_B	27 R_B	—
	“	—	140	21	63,6	120,6	+57,0	102,2	139,2	+19,4	44	14	-68,0	53	53	0	99 R_B	99 R_B	—
ინკონელ X, ნიმუშები ჭრილით	“	228	4,0 (სით-ბური)	21	—	—	—	122,3	139,2	+16,9	2	1	-50,0	—	—	—	—	—	—
ინკონელ X, ნიმუშები ჭრილით	“	228	4,0 (სით-ბური)	21	—	—	—	90,0	104,8	+14,8	36	35	-2,8	—	—	—	—	—	—
	გამოწვა	20-60	4,0 (ჩქარი)	21	—	—	—	122,3	142,7	+20,4	2	—	—	—	—	—	—	—	—
	“	20-60	4,0 (ჩქარი)	21	—	—	—	88,6	93,2	+4,6	37	23	-37,8	—	—	—	—	—	—
	დაძველება	49	0,8	21	84,6	108,6	+24,0	129,6	121,3	-8,3	23	18	-21,7	29	32	+3	32 R_C	34 R_C	+2
	“	49	16	21	84,6	120,1	+35,5	128,9	122,3	-6,6	23	13	-43,5	29	41	+12	32 R_C	34 R_C	+2
	“	—	17,8	21	114,8	136,8	+22,0	143,0	137,4	-5,6	22	12	-45,4	41	47	+6	37 R_C	36 R_C	-1
	“	—	58,6	21	114,8	144,5	+29,7	143,0	144,5	+1,5	22	11	-50,0	41	44	+3	37 R_C	36 R_C	-1
	“	—	220	21	114,8	141,4	+26,6	143,0	141,5	-1,5	22	11	-50,0	41	44	+3	39 R_C	34 R_C	-5
	“	—	347	21	114,8	136,9	+22,1	243,0	138,6	-4,4	22	12	-45,4	41	39	-2	37 R_C	39 R_C	-2
	ორმაგი დაძველება	49	29		84,6	120,6	+36,0	129,6	121,1	-8,5	23	12	-48,0	—	—	—	32 R_C	34 R_C	+2

ცხრილი 9-ის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ნიმუშები ჭრილით	გამოწვა 1149°C, 2 სთ	50	13	21	37,3	73,5	+36,2	77,3	85,3	+8,0	56	37	-34,0	52	31	-21	78 R _B	94,5 R _B	+16,5
	გაცივება ჰაერზე																		
	იგივე	—	13	21	37,3	75,2	+37,9	77,3	86,1	+8,8	56	34	-39,2	52	29	-23	78 R _B	91,5 R _B	+13,5
	“	—	13	21	37,3	76,3	+39,0	77,3	86,1	+8,8	56	36	-35,6	52	31	-21	78 R _B	93,0 R _B	+15
	“	—	13	21	37,3	71,7	+34,4	77,3	83,3	+6,0	56	32	-43,0	52	28	-24	78 R _B	—	—
	“	250	3,1	21	37,3	53,5	+16,2	77,3	82,2	+4,9	56	54	-3,6	52	49	-23	78 R _B	87,5 R _B	+9,5
	“	250	3,1	21	37,3	54,2	+16,9	77,3	80,4	+3,1	56	44	-21,4	52	41	-11	78 R _B	86 R _B	+8
	“	300	7,5	21	37,3	53,5	+16,2	77,3	82,8	+5,5	56	50	-10,7	52	46	-6	78 R _B	—	—
	“	300	7,5	21	37,5	50,0	+12,7	77,3	81,1	+3,8	56	47	-16,0	52	43	-9	78 R _B	86,5 R _B	+8,5
	გამოწვა 1093°C 45 წთ	10	12	21	28,3	53,0	+24,7	69,0	73,1	+4,1	63	52	-17,5	55	44	-11	70 R _B	—	—
	გაცივება ჰაერზე																		
	იგივე	10	13	21	28,3	65,7	+37,4	69,0	82,5	+13,5	63	46	-27,0	55	37	-18	70 R _B	89,5 R _B	+19,5
	“	250	13,1	21	28,3	46,5	+18,4	69,0	77,6	+8,6	67	63	-6,1	55	53	-2	70 R _B	78 R _B	+8
	“	250	3,0	21	28,3	45,5	+17,2	69,3	77,3	+8,0	63	65	+3,2	55	56	+1	70 R _B	82 R _B	+12
	“	300	7,5	21	28,3	42,0	+13,7	69,0	78,7	+9,7	63	79	+11,1	55	62	+6	70 R _B	74,5 R _B	+4,5
	“	300	7,5	21	28,3	42,0	+13,7	69,0	78,7	+9,7	63	69	+9,5	55	58	+3	70 R _B	78 R _B	+8
ნიმუშები ჭრილით	ცივი გამო- ჭიმვა 35%	50	13	21	85,7	105,0	+19,3	97,0	107,0	+10,0	33	21	-36,2	23	14	-9	98 R _B	—	—
	იგივე	50	13	21	85,7	105,9	+20,2	97,0	107,7	+10,7	33	22	-33,2	23	14	-9	98 R _B	104 R _B	+6
	“	250	3,1	21	85,7	82,2	-3,5	97,0	103,2	+6,2	33	32	-3,0	23	26	+3	90 R _B	100 R _B	+10
	“	250	3,1	21	85,7	82,9	-2,8	97,0	103,2	+6,2	33	33	0	23	25	+2	90 R _B	102 R _B	+12
ქასტელი C	ჩამოსხმა	—	4,0 (ჩქ- რი)	21	—	—	—	56,2	75,2	+19,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	გამოჭედვა	282	1,0 (სით- ბური)	21	—	—	—	97,7	99,5	+1,8	53	42	-20,8	—	—	—	—	—	—

ცხრილი 9-ის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ქასტელი X	გამოტევა	282	4,0 (სით- ბერი)	21	—	—	—	139,2	134,3	−4,9	2	1	−50,0	—	—	—	—	—	—
	“	282	4,0 (სით- ბერი)	21	—	—	—	98,4	96,3	−2,1	20	36	+80,0	—	—	—	—	—	—
	“	20- 60	4,0 (ჩქა- რი)	21	—	—	—	97,0	99,5	+2,5	20	22	+10,0	—	—	—	—	—	—
	“	20- 60	4,0 (ჩქა- რი)	21	—	—	—	139,2	154,6	+15,4	2	—	—	—	—	—	—	—	—
	გამოწვა	49	5,0	21	34,8	70,5	+35,7	79,1	90,9	+11,8	52	50	−3,8	52	62	+10	97R _B	96R _B	−1
	“	49	18	21	34,8	73,1	+38,3	79,1	91,9	+12,8	52	43	−17,3	52	64	+12	87R _B	99R _B	+12
	“	49	25	21	34,8	74,7	+39,9	79,1	92,1	+13,0	52	42	−19,2	52	59	+7	87R _B	100R _B	+13

2.1.2. სპილენძი

სპილენძს ფართოდ იყენებენ დასხივების მექანიზმის შესასწავლად, მაგრამ როგორც ტექნიკური მასალა, იგი შეზღუდულად გამოიყენება რეაქტორებში. სპილენძზე რადიაციის გავლენა დაფუძნებულია მექანიკური თვისებების, შიგა ხახუნის, ელექტროწინააღობის და მაგნიტური თვისებების ცვლილების ექსპერიმენტულ გამოკვლევაზე.

დასხივებული პოლიკრისტალური სპილენძის მექანიკური თვისებები განსაზღვრა მეიკინმა და მინტერმა [34]. მექანიკური თვისებების ტემპერატურულ დამოკიდებულებას შეისწავლიდნენ $9,5 \cdot 10^{17}$ - $1,07 \cdot 10^{20}$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით დასხივებულ ნიმუშებზე. აღნიშნულია დენადობისა და სიმტკიცის ზღვარის გადიდება, მათი მნიშვნელობა დასხივებამდე და დასხივების შემდეგ, მოყვანილია 10-ე ცხრილში. რადიაციული განმტკიცების მექანიზმი შეისწავლა გრინფილდმა და უილსფორდმა [41] $1 \cdot 10^{18}$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით დასხივებულ სპილენძის მონოკრისტალზე. ამ დროს წანაცვლების კრიტიკული დაძაბულობა 0,2-დან 1,6 კმ/სმ²-მდე გაიზარდა. ელექტრონული მიკროსკოპით გამოკვლევის შემდეგ გაკეთდა დასკვნა, რომ დასხივების შემდეგ დენადობის მაღალი ზღვარი აიხსნება დისლოკაციებზე კვანძების (საფეხურების) წარმოქმნის ინტენსივობით, ხოლო განმტკიცებისას დეფორმაციის დაბალი დონე – დაცურების თავისუფალი სიბრტყეების ბლოკირებით.

შიგა ხახუნის შესწავლა, ჩატარებული სპილენძის მონოკრისტალზე [42, 43, 44-45] ნეიტრონებით ან ელექტრონებით დასხივების შემდეგ ნათლად გვიჩვენებს, რომ დასხივება იწვევს მასალის განმტკიცებას. შიგა ხახუნის შემცირება, როგორც ვარაუდობენ, დასხივების მოქმედებით დისლოკაციების გამაგრების შედეგია. ბარნესი [46] თვლის, რომ რადგან შიგა ხახუნის შემცირება ერთნაირია ნეიტრონებით ან γ -დასხივებით დასხივებისას და აგრეთვე გამოწოტობის შემდეგაც, ამიტომ განმსაზღვრელი ფაქტორია ვაკანსიები.

ელექტრონულ-მიკროსკოპული გამოკვლევა საშუალებას გვაძლევს, რომელიც ჩაატარეს სილკოქსისნა და ხირშმა [47] გვიჩვენებს, რომ 35°C-ზე $6,7 \cdot 10^{17}$

დასხივებული და დაუსხივებელი სპილენძის მექანიკური
თვისებები

ინტეგრალური ნაკადი, ნეიტრონი/სმ ²	გამოცდის ტემპერატურა, °C	დენადობის ზღვარი, კგ/მმ ²	სიმტკიცის ზღვარი, კგ/მმ ²
0	-195	5,6	34,5
$9,5 \cdot 10^{17}$	-195	7,0	34,9
$5,0 \cdot 10^{18}$	-195	11,3	37,3
$8,8 \cdot 10^{18}$	-195	—	35,9
$4,0 \cdot 10^{19}$	-195	23,9	38,0
$6,8 \cdot 10^{19}$	-195	27,4	40,8
$7,5 \cdot 10^{19}$	-195	29,5	42,2
$1,07 \cdot 10^{20}$	-195	33,0	43,9
0	20	4,9	22,5
$9,5 \cdot 10^{17}$	20	5,6	22,5
$5,0 \cdot 10^{18}$	20	8,4	22,5
$8,8 \cdot 10^{18}$	20	12,0	22,5
$4,0 \cdot 10^{19}$	20	16,2	23,9
$6,8 \cdot 10^{19}$	20	18,3	26,0
$7,5 \cdot 10^{19}$	20	19,7	26,7
$1,07 \cdot 10^{20}$	20	21,8	27,4
0	200	4,2	15,5
$9,5 \cdot 10^{17}$	200	5,6	16,2
$5,0 \cdot 10^{18}$	200	6,3	16,2
$8,8 \cdot 10^{18}$	200	—	—
$4,0 \cdot 10^{19}$	200	12,7	19,0
$6,8 \cdot 10^{19}$	200	13,4	—
$7,5 \cdot 10^{19}$	200	14,1	—
$1,07 \cdot 10^{20}$	200	16,2	21,1

ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით დასხივებული სპილენძი შეიცავს $3 \cdot 10^{15}$ დეფექტს 1 სმ³, დაახლოებით 75 Å ზომის მცირე დეფორმირებული არეების სახით. ინტეგრალური ნაკადის გაზრდისას $5,6 \cdot 10^{18}$ და $14,0 \cdot 10^{20}$ ნეიტრონი/სმ²-მდე ამ დეფექტებიდან ბევრი ჩანს, როგორც დისლოკაციური მარყუქები.

კოლტმანმა და სხვებმა [48] გაზომა სპილენძის ნარჩენი კუთრი ელექტროწინაღობა $4 \cdot 10^{17}$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით დასხივების შემდეგ და აღმოაჩინა, რომ დაზიანების ხარისხი იყო $1 \cdot 10^{-26}$ ომ-სმ/(ნეიტრონი/სმ²), რაც არის პლატინაზე, ვერცხლსა და ბისმუტზე ნაკლები სიდიდე. ნაპოვნია, რომ 4°K ტემპერატურაზე დაზიანების

ხარისხი ცივადნაგლინი სპილენძისთვის ნაკლებია, ვიდრე გამომწვარი სპილენძისთვის.

კორბეტმა და ვოლკერმა [49] დაადგინეს, რომ თხევადი წყალბადის ტემპერატურაზე დასხივებული სპილენძის თვისებების აღდგენა ოთხ სტადიად მიმდინარეობს, იწყება 14°K -ზე და მთავრდება 350°K -ზე. ამ სტადიების არსებობა ვლინდება ელექტროწინააღობის შესწავლისას.

2.1.3. ბერილიუმი

ელზი [50] გვაცნობებს, რომ გამომწვარი ბერილიუმი, დასხივებული სწრაფი ნეიტრონების $1 \cdot 10^{21}$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით, ავლენს სიმკვრივის 0,8 და 20%-ით შემცირებას ერთი საათის განმავლობაში 600°C და 995°C -ზე გამოწვისას. ბოლო ნიმუშში აღმოჩენილია გაზის წარმოქმნა 1 სმ³ ბერილიუმზე 23 სმ³-ის ოდენობით. გაზობრივი ჰელიუმის წარმოქმნა ხდება ბერილიუმის ბირთვზე სწრაფი ნეიტრონების რეაქციის შედეგად (n , α). გაზობრივი ჰელიუმის ან სხვა გაზის ატომების ჩანერგვამ კრისტალურ მესერში შეიძლება გამოიწვიოს მასალის შეშუპება.

ლითონებში გაზის ბუშტულების ჩასახვის და ზრდის მექანიზმი ბოლომდე არ არის გამოკვლეული, თუმცა, მის ასახსნელად მრავალი თეორია იყო შემოთავაზებული. ყველაზე ხშირად შეშუპებას ხსნიან დისლოკაციებზე ბუშტულების ჩასახვით და მათი შემდგომი ზრდით, დიფუზური მექანიზმის საშუალებით. ბერილიუმიდან დამზადებული და ზოგიერთ რეაქტორში გამოყენებული ნეიტრონების ამრეკლები, კლაიბორნის თანახმად [51], მოითხოვს გამოცვლას ყოველ ექვს თვეში. შესაძლოა, რომ შეშუპება შეიძლება შეზღუდოს ბერილიუმის გამოყენებამ შემნელებლის ან სითბოს გამომყოფი ელემენტების გარსის მასალის სახით. ელიზს და ევანსს [52] ჰელიუმის მცირე რაოდენობა შეჰყავთ ბერილიუმში α ნაწილაკებით ბომბარდირების გზით და ამ ნიმუშებს 740°C ტემპერატურამდე ასხივებენ. მცირე შეშუპება იყო აღნიშნული 605°C -ზე დასხივებულ ნიმუშებში; ძლიერი – 740°C დასხივების დროს. მაგრამ შეშუპება არ ხდებოდა 600°C -ზე და უფრო დაბალ ტემპერატურაზე დასხივებისას.

რეაქტორის MTR ამრეკლების ბერილიუმის ბლოკის მდგომარეობის შესწავლა 70°C -ზე დასხივებისას სწრაფი ნეიტრონების $7,6 \cdot 10^{21}$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით [53] შემდეგზე მიუთითებს:

1) მნიშვნელოვანი გამეფება დასხივების მოქმედებით მესრის რადიაციული დაზიანების შედეგად;

2) სწრაფი ნეიტრონებით დასხივების შედეგად წარმოქმნილი ჰელიუმი ლითონში გახსნილი რჩება რადიაციის შემდგომი გამოწვევით 500°C -ზე ნაკლები ტემპერატურისას;

3) ჰელიუმი ხსნარიდან გამოსვლისკენ მიისწრაფის 500°C -ზე მაღალ ტემპერატურაზე და ქმნის ბუშტულებს, რაც იწვევს ლითონის მოცულობის მომატებას, რომელიც ზოგჯერ შეიძლება 30%-ს აჭარბებდეს;

4) მარცვლების საზღვრებზე ბუშტულების არსებობა იწვევს ბერილიუმის გამეფებას და იგი გაზების გამტარი ხდება.

აღუმიწის ფართოდ გამოიყენება წყლით გაციებად რეაქტორში გარსების მასალის და გამაციებელი აგენტის ტრაქტის მასალის სახით, ნეიტრონების შთანთქმის შედარებით მცირე კვეთის და წყალში კარგი კოროზიამდებლობითაა განპირობებული. რეაქტორის პირობებში დაბალი ტემპერატურებისას, ოთახის ტემპერატურაზე ნეიტრონების დაბალი ინტეგრალური ნაკადებით დასხივება არ იწვევს მსუბუქი ლითონებისა და შენადნობების თვისებების ცვლილებას. 11-ე ცხრილში მოყვანილია მონაცემები ალუმინისა და მაგნიუმის შენადნობების მექანიკური თვისებების ცვლილების შესახებ. შეიძლება შევნიშნოთ, რომ ეს ცვლილებები, ფოლადის ცვლილებებთან შედარებით დიდი არ არის.

2.1.4. ძნელად დნობადი ლითონები

მოლიბდენს, ნიობიუმს, ტანტალს, ვოლფრამს და მათ შენადნობებს აქვს მაღალი სიმტკიცე მაღალი ტემპერატურებისას და ეს თვისება პერსპექტიულს ხდის მათ გამოყენებას მაღალი სამუშაო ტემპერატურების მქონე რეაქტორებში. მონაცემები ამ მასალების შესახებ ძალზე გაფანტულია, მაგრამ მათზე დაყრდნობით შეიძლება შევაფასოთ განხილული მასალის თვისებების რადიაციული ცვლილებების ხარისხი.

სუფთა კომერციული მოლიბდენის მექანიკური თვისებები ოთახის ტემპერატურაზე მოყვანილია ბრუშის და სხვათა [54] შრომაში. 90°C -ზე $3 \cdot 10^{20}$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით დასხივების შემდეგ მოლიბდენის დენადობისა და სიმტკიცის ზღვარი 35.2 კგ/მმ²-ით გაიზარდა, ხოლო ფარდობითი წაგრძელება 40 -დან 0% -მდე შემცირდა. გრეიმ [55], ადამმა და მარტინმა [56] აღნიშნა, რომ მოლიბდენის კრისტალური მესრის პარამეტრი დასხივების მოქმედების შედეგად გაიზარდა. დასხივების შემდეგ გამოწვის შედეგად მესრის პარამეტრი ნაწილობრივ აღდგა.

16°C -ზე $1 \cdot 10^2$ ნეიტრონი/სმ² ინტეგრალური ნაკადით დასხივებული ნიობიუმის მექანიკური თვისებები 42.9 -დან 54.1 კგ/მმ²-მდე გაიზარდა, მაგრამ ეს მატება არც ისე დიდია, როგორც მრავალი სხვა ლითონებისთვის. რადიაციული განმტკიცების აღდგენა გამოწვისას, როგორც ჩანს, იწყება 350°C -ზე, ხოლო 600°C -ზე მთლიანად სრულდება 1 სთ-ის განმავლობაში.

მონაცემები ნიობიუმის ფარდობითი წაგრძელების შემცირების შესახებ მოცემულია 12-ე ცხრილში.

ტანტალის თვისებები დასხივების ზემოქმედებით იცვლება ატომების წანაცვლების ხარჯზე და ბირთვული რეაქციის შედეგად ვოლფრამად გადაქცევის ხარჯზე. ჩატარდა გამოცდა დასხივებული ფურცლოვანი ტანტალის გაჭიმვაზე, ღუნვასა და სიმტკიცის გაზომვაზე [57].

დასხივების დოზა დაახლოებით შეესაბამება იმ დოზას, რომელიც საჭიროა ტანტალში 1.5 - 3.0 წონ. % ვოლფრამის წარმოსაქმნელად, შესაბამისი ბირთვული რეაქციის შედეგად. ტანტალის დენადობისა და სიმტკიცის ზღვარი საგრძნობლად იზრდებოდა დასხივების შედეგად. ეს შედეგები მიუთითებს, რომ სიმტკიცის მატების ძირითადი ნაწილი შეიძლება მივაწეროთ სწრაფი ნეიტრონებით გამოწვეული დარღვევების გავლენას, ხოლო ტანტალის აღნიშნული რაოდენობის ვოლფრამად გადაქცევის წვლილი შედარებით მცირეა. 13-ე ცხრილში მოყვანილია ტანტალის სიმტკიცის მახასიათებლები დასხივებამდე და დასხივების შემდეგ.

ნეიტრონული დასხივების გავლენა ალუმინის და მაგნიუმის შენადნობების მექანიკურ თვისებებზე

შენადნობი	დასხივების პირობები		დენადობის ზღვარი კგ/მმ ²			სიმტკიცის ზღვარი კგ/მმ ²			ფარდობითი წაგრძელება %		
	ტემპერატურა °C	სწრაფი ნეიტრონების ინტეგრალური ნაკადი $\times 10^{19}$ ნეიტრონი/სმ ²	საკონტროლო ნიმუში	დასხივებული ნიმუში	ცვლილება	საკონტროლო ნიმუში	დასხივებული ნიმუში	ცვლილება	საკონტროლო ნიმუში	დასხივებული ნიმუში	ცვლილება
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ალუმინის შენადნობები											
1100	—	2,4	13,0	16,3	+3,3	14,3	19,0	+4,7	22,3	25,3	+13
1100	—	7,2	13,0	16,6	+3,6	14,3	20,5	+6,2	22,3	20,2	−9,4
1100	—	2,6	13,0	18,6	+5,6	14,3	21,4	+7,1	22,3	23,0	+3,1
356	—	2,4	16,9	29,8	+12,9	22,8	31,1	+8,3	2,7	0,4	−85,0
356	—	7,2	16,9	35,9	+19,0	22,8	38,0	+15,2	2,7	0,9	−59,0
356	—	2,6	16,9	25,3	+8,4	22,8	31,6	+8,8	2,7	1,5	−44,4
356	49	0,204	18,3	20,5	+2,2	23,3	25,8	+2,5	4	6	+50,0
356	49	1,22	18,3	23,6	+5,3	23,3	29,5	+6,2	4	6	+50,0
356	49	5,59	18,3	29,9	+11,6	23,3	31,7	+8,4	4	6	+50,0
356	49	9,84	18,3	36,6	+18,3	23,3	38,3	+15,0	4	3	−25,0
1100-0	65	1,0	4,7	12,0	+7,3	9,6	18,3	+8,5	38,2	21,2	−44,5
1100-1114	65	1,0	11,7	16,9	+5,2	12,2	18,3	+6,1	6,0	5,4	−8,3
5052-0	65	1,0	10,3	23,1	+12,8	20,5	26,3	+5,8	34,0	30,6	−10,3

ცხრილი 11-ის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5052-1134	65	1,0	20,7	25,7	+5,0	25,3	31,4	+6,1	11,2	14,0	+25,0
6061-0	65	1,0	6,7	18,0	+11,3	12,7	26,2	+13,5	28,8	22,4	-22,0
6061	49	5,17	28,1	30,7	+2,6	33,2	35,3	+2,1	21	22	+4,7
6061	49	11,7	28,1	30,1	+2,0	33,2	36,5	+3,3	21	22	+4,7
6061-T6	65	1,0	27,1	31,3	+4,2	31,6	35,6	+4,0	17,5	16,2	-7,4
5154	65	1,0	33,6	35,7	+2,1	38,5	40,6	+2,1	8,8	12,5	+42,0
მაგნიუმის შენადნობები											
2024	49	0,204	31,9	34,2	+2,3	50,3	50	-0,3	26	25	-3,8
2024	49	1,22	31,9	33,9	+2,0	50,3	52,2	+1,9	26	26	0
2024	49	5,59	31,9	39,4	+7,5	50,3	55,6	+5,3	26	25	-3,8
2024	49	9,84	31,9	46,5	+14,6	50,3	59,7	+9,4	26	24	-7,7
A12	50	1,0 (სითბური)	11,3	12,5	+1,2	15,0	15,8	+0,8	5,8	5,3	-8,6
Mg-08Al	50	1,0 (სითბური)	11,7	11,0	-0,7	15,8	15,2	-0,6	6,2	5,8	-6,5
AM-503S	50	1,0 (სითბური)	17,0	17,7	+0,7	22,1	20,3	-1,8	3,8	2,0	-47,7
AM-503ZA	50	1,0 (სითბური)	12,7	12,7	+0,4	18,4	13,7	-4,7	6,0	0,8	-96,5
ZWI	50	1,0 (სითბური)	16,9	16,3	-0,6	22,5	21,9	-0,6	17,4	17,4	+22,5

მსუბუქი ლითონები – ალუმინი და მაგნიუმი

ნეიტრონული დასხივების გავლენა ბიონიუმის სიმტკიცის
თვისებებზე, 20°C

ნიმუში	დენადობის ზღვარი, კგ/მმ ²	სიმტკიცის ზღვარი, კგ/მმ ²	ფარდობითი წაგრძელება, %
საკონტროლო	46,0	48,2	21,5
	40,5	49,0	19,8
	44,5	52,0	19,0
	43,0	50,8	21,4
	44,5	51,9	21,5
დასხივებული	54,5	59,4	8,0
	52,1	52,3	6,4
	52,3	54,1	6,5
დასხივებული და გამომ- წვარი 200°C-ზე 1 სთ-ის	60,0	65,2	6,8
განმავლობაში	60,0	65,1	7,7
	64,1	64,5	5,2

ნეიტრონული დასხივების გავლენა ტანტალის და Ta-W
შენადნობის მექანიკურ თვისებებზე [31]

ნიმუშის დახასიათება	სითბური ნეიტრონების ინტეგრალური ნაკადი, $\times 10^{20}$ ნეიტრონი/სმ ²	სიმტკიცის ზღვარი კგ/მმ ²	დენადობის ზღვარი კგ/მმ ²	ფარდობითი წაგრძელება %	სიგრძე BHN
დაუსხივებელი ტანტალი	—	29,5	21,1	40	105
დაუსხივებელი Ta-1.5 წონ.% W	—	31,6	21,8	39	151
დაუსხივებელი Ta-1.5 წონ.% W	—	36,9	27,1	35	170
დასხივებული ტანტალი	7,8	48,9	46,2	16	274
	15,7	60,7	57,2	7	309

2.1.5. ფიზიკური თვისებები

ნაშრომის წინამდებარე ნაწილში განხილულია დასხივების შედეგად ლითონებისა და შენადნობების თვისებების ცვლილების მექანიზმი. მექანიკური თვისებების მნიშვნელოვანი ცვლილებების გარდა, ადგილი ჰქონდა (მართალია ნაკლები ხარისხით) ლითონების ზოგიერთი ფიზიკური თვისების ცვლილებასაც. მოცემულ პარაგრაფში

განხილულია რადიაციის მოქმედება ელექტროწინაღობაზე, თერმული გაფართოების კოეფიციენტზე, დიფუზიის კოეფიციენტსა და სიმკვრივეზე.

2.1.5.1. კუთრი ელექტროწინაღობა

ატომების წანაცვლება სწრაფი ნეიტრონებით დასხივების შედეგად იწვევს მესრის დამახინჯებას. დამახინჯების შედეგად ადგილი აქვს მოუწესრიგებლობას, განსაკუთრებით თუ დასხივების ტემპერატურა უფრო დაბალია განხილული ლითონის დამახინჯების გამოწვევისთვის საჭირო ტემპერატურასთან შედარებით. კუთრი ელექტროგამტარობაზე დასხივების მოქმედების გამოკვლევის მიზნით, ბევრი ცდა ჩატარდა. 14-ე ცხრილში მოყვანილია ყველაზე საინტერესო მონაცემები სუფთა ლითონებისა და ზოგიერთი შენადნობისთვის.

30-დან 200°C-მდე დასხივების ტემპერატურებისას, შედარებით მცირე ნარჩენი ცვლილებები შეინიშნება ლითონების უმრავლესობაში, გარდა ძნელადნობადი ლითონებისა (მაგალითად, ვოლფრამი და მოლიბდენი). სპილენძი, ნიკელი და 347 ტიპის უჟანგავი ფოლადი კუთრი ელექტროწინაღობის წრფივ მატებას ავლენს ნეიტრონების ინტეგრალური ნაკადის მატებასთან ერთად, თანაც პროცენტული თვალსაზრისით ეს მატება უკუპროპორციულ დამოკიდებულებაშია საწყის ელექტროწინაღობასთან. მოცულობითცენტრირებული, კუბური და ჰექსაგონური, მჭიდროდ შეერთებული მესრის მქონე ლითონებისთვის ეს სიდიდეები უფრო მაღალია, ვიდრე წახნაგცენტრირებული კუბური მესრის მქონე ლითონებისთვის [1]. დასხივების შემდეგ, მაღალ ტემპერატურაზე გამოწვამ შეიძლება გამოიწვიოს კუთრი ელექტროწინაღობის ნაწილობრივი აღდგენა. რადიაციული დამახინჯების ნაწილი გამოწვის შემდეგაც რჩება, ამიტომ ელექტროწინაღობის საწყისი სიდიდის მიღწევა ვერ ხერხდება.

კუთრი ელექტროწინაღობა შეიძლება სასარგებლო მაჩვენებელი იყოს რადიაციული ცვლილებების მექანიზმის საფუძვლების შესწავლისას, სტრუქტურის ცვლილებისადმი მაღალი მგრძნობიარობისა და შედარებითი სიმარტივის გამო, რითაც შეიძლება მათი გაკონტროლება როგორც

დასხივებული, ასევე დაუსხივებელი მასალისათვის. იგი შეიძლება გაიზომოს უშუალოდ რეაქტორში, მინიმუმი რაოდენობის ხელმისაწვდომი აპარატურის გამოყენებით.

ცხრილი 14

ნეიტრონული დასხივების გავლენა ლითონების კუთრ ელექტროწინააღობაზე

მეტალი	დასხივების ტემპერატურა, °C	ინტეგრალური ნაკადი,* $\times 10^{19}$ ნეიტრონი/სმ ²	კუთრი ელექტრო-გამტარობის ცვლილება, %
ვოლფრამი	30	1 (ტ) (T)	+10
მოლიბდენი	30	1 (ტ) (T)	+7
პლატინა	30	0,5 (ტ)	+1
სპილენძი	-150	1,1 (?)	+20
ალუმინი	-150	1,1 (?)	+33
უჟანგავი ფოლადი 304,309, 316, 347	240	1 (ტ)	0
ნიკელი A	240	1 (ტ)	უმცირესი
ხასტელოი C	240	1 (ტ)	+6
უჟანგავი ფოლადი 304, 308, 347	280	4 (დ)	+5
ტანტალი	—	5 (დ)	0
„ტანტუნი“ a	—	5 (დ)	0
ვოლფრამი	—	5 (დ)	+40
გამომწვარი სპილენძი **	90	20-70 (ტ)	+8,0
გამომწვარი ნიკელი	90	20-70 (ტ)	+3,2
ტიტანი (Ti-75A) გამომწვარი	90	20-70 (ტ)	+7,2
გამომწვარი ცირკონიუმი**	90	20-70 (ტ)	+5,8
გამომწვარი რკინა**	90	20-70 (ტ)	+7,8
გამომწვარი მოლიბდენი	90	20-70 (ტ)	+21,9
ფოლადი 347 გამომწვარი	90	20-70 (ტ)	+1,9
ფოლადი 347, დეფორმაციის ხარისხი 58%	90	20-70 (ტ)	+1,5

*(დ) – სწრაფი ნეიტრონები, (T) – სითბური ნეიტრონები, (?) – ნეიტრონების ენერგია დაუდგენელია, ** – მაღალი სისუფთავის მასალა

თუ დავუშვებთ, რომ მთლიანობაში მასალის რადიაციული დამახინჯებები უმეტესად დამოკიდებულია წერტილოვანი დეფექტების დაგროვებაზე, მაშინ კუთრი ელექტროწინააღობის გაზომვამ შეიძლება უზრუნველყოს მონაცემები, რომლებიც ეხება მათ წარმოქმნას გამოსხივების ზემოქმედების ქვეშ, აგრეთვე შემდგომი გადაადგილების და უკვე არსებულ დეფექტებთან ურთიერთქმედების შესახებ.

აღმოჩენილი იყო, რომ საჭიროა დასხივების სულ უფრო და უფრო დაბალი ტემპერატურები, რათა მოძრაობის უნარი დაუკარგოთ

წარმოქმნილ დეფექტებს. იდეალურ შემთხვევაში საჭიროა განესაზღვროთ ტემპერატურა, რომლის დროსაც ყველა დეფექტი გაყინულია. შეცვლილი თვისებების ნაწილი გამოიწვევა და გაქრება მოცემულ ტემპერატურაზე დასხივების პროცესში. დასხივების ტემპერატურაზე გამოწვის გავლენის შედეგად მაღალი სისუფთავის ალუმინისა და მაგნიუმის დასხივება ოთახის ტემპერატურაზე იწვევს თვისებების ძალზე მცირე, ნარჩენ ცვლილებებს.

კოლტმანმა და სხვებმა [48] აჩვენა, რომ 4°K ტემპერატურაზე დასხივებულ სპილენძში უკვე 7°K -ზე შეინიშნება ნაწილობრივი გამოწვის მოვლენა. სხვადასხვა ლითონის კუთრი ელექტროწინააღობის ცვლილების შედარებითი შესწავლის ჩასატარებლად დასხივება უნდა მოხდეს ისეთ ტემპერატურებზე, როდესაც ადგილი არა აქვს გამოწვის მოვლენას. ოთახის ტემპერატურაზე დასხივების შედეგად ღნობის მაღალი ტემპერატურის ლითონებს აქვს ელექტროწინააღობის უფრო დიდი ცვლილება. აღნიშნულია 80°C -ზე დასხივებული მოლიბდენის, ტიტანის, ცირკონიუმის და რკინის ელექტროწინააღობის დიდი მატება [54]. დეფექტების მოძრაობა ძლიერაა დამოკიდებული ლითონის ღნობის ტემპერატურაზე. კინჩინის და ტიმსონის [58] ცდები მოლიბდენისა და ვოლფრამის სწრაფი ნეიტრონებით 78°K ტემპერატურაზე დასხივებისას, მიუთითებს მოლიბდენის და ნაწილობრივ ვოლფრამის გამოწვის მნიშვნელოვან ეფექტზე, შესაბამისად 90 და 120°K -ზე. თვლიან, რომ გამოწვის მოვლენას მოლიბდენში შეიძლება ადგილი ჰქონდეს $20\text{-}90^{\circ}\text{K}$ ტემპერატურულ ინტერვალში. როგორც ჩანს, ყველაზე ძნელად ღნობად ლითონებშიც კი ხდება დეფექტების გამოწვა ყველა ტემპერატურაზე დასხივებისას, უადრესად დაბალი ტემპერატურების გარდა.

როგორც ადრე აღინიშნა, მექანიკური და ფიზიკური თვისებების ცვლილება დაკავშირებულია მესრის რადიაციულ დაზიანებასა და დეფექტების შემდგომ გადაადგილებასთან. ქვემოთ მოკლედ არის განხილული ლითონში ატომების წანაცვლების რიცხვის ექსპერიმენტული განსაზღვრის შესაძლებლობა.

ამასთან, ლითონის ელექტროწინააღობა და დასხივების შედეგად მისი ცვლილება მნიშვნელოვან როლს ასრულებს. თუ ცდები

ჩატარდება საკმაოდ დაბალ ტემპერატურაზე, რათა თავიდან ავიცილოთ დეფექტების გამოწვა, შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ ელექტროწინააღობის მომატება ლითონში შეტანილი დეფექტების რაოდენობის პროპორციული იქნება. საჭიროა დეფექტების საერთო კონცენტრაცია შევინარჩუნოთ საკმაოდ დაბალ დონეზე, რათა თავიდან ავიცილოთ სხვადასხვა დეფექტების ურთიერთგავლენა, რასაც თვითონ შეუძლია გამოიწვიოს ელექტროწინააღობის მომატება. სპილენძის, ვერცხლისა და ოქროს [58] 10°K -ზე 12 მევ ენერგიის ნეიტრონებით დასხივებამ აჩვენა, რომ ელექტროწინააღობის ცვლილება თითქმის წრფივადაა დამოკიდებული იმ ნაწილაკების რაოდენობაზე, რომლებიც მასალას ბომბავენ. წრფივი კანონიდან გადახრა, როგორც ჩანს დაკავშირებულია გამოწვის მოვლენასთან. ასეთი ცდები ჩაატარეს ბლევიტმა და სხვებმა [60] დიდი რაოდენობის მასალაზე, რომელიც დასხივებული იყო რეაქტორში 17°K ტემპერატურაზე. ამ ორი ნაშრომის შედეგები მოყვანილია მე-15-ე ცხრილში. კუთრი ელექტროწინააღობის ცვლილების ინტერპრეტაცია მარტივი იქნებოდა, ცნობილი რომ ყოფილიყო ამ ცვლილებებისა და დეფექტების კონცენტრაციის დამაკავშირებელი პროპორციულობის კოეფიციენტი. ასეთ დეფექტებზე გამტარობის ელექტრონების გაბნევის განიგეგმვის უცნობი მნიშვნელობა ართულებს ზუსტ გამოთვლებს და სხვადასხვა დეფექტის შესაბამისი სიდიდეები საკმაოდ სადავოა.

ცხრილი 15

სხვადასხვა მასალის კუთრი ელექტროწინააღობის ფარდობითი მომატება ნეიტრონების ნაკადით დასხივების შედეგად, $7 \cdot 10^{19}$ ნეიტრონი/სმ², 10°K

სპილენძი	$3,10 \cdot 10^{-11}$	თუთია	$2,021 \cdot 10^{-10}$
ვერცხლი	$3,35 \cdot 10^{-11}$	რკინა	$2,157 \cdot 10^{-10}$
ოქრო	$3,78 \cdot 10^{-11}$	მოლიბდენი	$1,279 \cdot 10^{-9}$
ტყვია	$2,89 \cdot 10^{-10}$	ვოლფრამი	$1,184 \cdot 10^{-9}$
ალუმინი	$7,869 \cdot 10^{-11}$	ბისმუტი	$2,22 \cdot 10^{-1}$
ნიკელი	$8,35 \cdot 10^{-11}$	სტიბიუმი	$1,011 \cdot 10^{-2}$
პლატინა	$6,51 \cdot 10^{-11}$	α -თითბერი	$3,55 \cdot 10^{-11}$
ბერილიუმი	$1,106 \cdot 10^{-9}$	Cu_3Al მოწესრიგებული	$2,33 \cdot 10^{-10}$
მაგნიუმი	$2,58 \cdot 10^{-10}$	Cu_3Al მოუწესრიგებელი	$3,17 \cdot 10^{-10}$
ცირკონიუმი	$0,853 \cdot 10^{-9}$		
კობალტი	$1,69 \cdot 10^{-10}$		

ბლევიტმა [61] აჩვენა, რომ ყველა შესწავლილ ლითონს და შენადნობს ჰქონდა კუთრი ელექტროწინააღობის წრფივი მატება სწრაფი ნეიტრონების $8 \cdot 10^{17}$ ნეიტრონი/სმ²-მდე ინტეგრალური ნაკადის სიდიდის მიხედვით. სპილენძის ელექტროწინააღობის მატების ხარისხზე გაველენას არ ახდენდა მინარევების შემცველობაზე სტრუქტურა და დამზადების ტექნოლოგია. თუმცა არსებობს გარკვეული ცვლილებები, რომლებიც შეიმჩნევა დასხივების შემდეგ. ამ ცვლილებების შესაბამისი წანაცვლებული ატომების რაოდენობა მიახლოებით განისაზღვრება.

წერტილოვანი დეფექტების, ვაკანსიების და წანაცვლებული ატომების მოძრაობა გამოვლინდა თვისებების ცვლილების შედეგად, მაღალი ტემპერატურისას ჩატარებული გამოწვის შემდეგ. მოძრაობის ხასიათი დამოკიდებულია დეფექტის სახეობაზე. ხანტიგტონმა და ზეიტცმა [62] განსაზღვრეს აქტივაციის ენერგია სპილენძში ნაწანაცვლებული ატომებისა და ვაკანსიების მოძრაობისთვის, რაც ტოლი იყო შესაბამისად 0.07-0.27 და 0.9-1.0. მე-16-ე ცხრილში მოყვანილია დეფექტების წარმოქმნის და გადაადგილების აქტივაციის ენერგიის

ცხრილი 16

დეფექტების წარმოქმნისა ($E_{წარ.}$) და გადაადგილების (E_g) აქტივაციის ენერგიის მნიშვნელობები. სპილენძის, ოქროს და პლატინის თვითდიფუზიის აქტივაციის ენერგია, ევ [41, 42]

ლითონი	დეფექტები	$E_{წარ.}$	E_g	E_d
სპილენძი	წანაცვლებული ატომი	5,1-6,1	0,07-0,27	—
	ვაკანსია	1,0-1,2	0,9-1,0	—
	გაორკეცებული ვაკანსია	1,5	0,3-0,4	—
	—	—	—	2,05
ოქრო	ვაკანსია	0,6	—	—
	ვაკანსია (სავარაუდო)	1,02	0,66	—
	იგივე	0,7	0,5	—
პლატინა	—	—	—	1,71
	ვაკანსია (სავარაუდო)	1,2	1,1	—

მნიშვნელობები. მოძრავ დეფექტებს შეუძლია ერთმანეთთან და სტრუქტურის სხვა ნაკლოვანებებთან ურთიერთქმედება. ამ ურთიერთქმედებების შედეგად შეიძლება მოხდეს თვისებების შეცვლა. ურთიერთქმედების მაგალითი შეიძლება წანაცვლებული იყოს ატომების და ვაკანსიების თავმოყრასთან, თანაც წანაცვლებულ ატომებს და

ვაკანსიებს შეუძლიათ ურთიერთანიჰილირება. აგრეთვე შესაძლებელია ვაკანსიების მიერ მინარევი ატომების ჩაჭერა, წერტილოვანი დეფექტების ურთიერთქმედება დისლოკაციებთან, ამ უკანასკნელთა ჩამაგრება დეფექტების მიგრაციის მარცვლის ზედაპირისა და საზღვრებისკენ, სადაც შთაინთქმება.

2.1.5.2. თერმული გაფართოების კოეფიციენტი

ცდისეული მონაცემები რადიაციის გავლენის შესახებ თერმული გაფართოების კოეფიციენტზე საკმაოდ შეზღუდულია. ცნობილია, რომ ცივი დეფორმაცია გავლენას ახდენს თერმული გაფართოების კოეფიციენტზე, ხოლო რადიაციული ზემოქმედება ეფექტის მიხედვით ჰგავს ცივ დეფორმაციას. დასხივების შედეგად შეიძლება მოსალოდნელი იყოს თერმული გაფართოების ცვლილება.

ვესტონს [33] მოჰყავს თერმული გაფართოების გაზომვის შედეგები რეაქტორების ზოგიერთი კონსტრუქციული მასალისათვის ერთი თვის განმავლობაში, დასხივების შემდეგ. გამოიკვლიეს ალუმინი, ალუმინის შენადნობები, ნიკელი და უჟანგავი ფოლადები. ყველა მასალამ, ნიკელის და უჟანგავი ფოლადის გარდა დასხივების შედეგად გამოავლინა სიგრძის და თერმული გაფართოების მცირე ცვლილება. თუმცა, ეს შედეგები არ არის საბოლოო, ითვლება, რომ სანამ მასალას რეაქტორში გამოიყენებენ, საჭიროა გამოვიკვლიოთ ხანგრძლივი გამოსხივების მოქმედება მის თვისებებზე.

კონსტრუქციულ მასალაზე დასხივების გავლენის მონაცემების მიმოხილვის და შეფასების შემდეგ ნათელი გახდა, რომ დასხივების შედეგად ხდება მათი თვისებების ბევრი მკვეთრად გამოხატული ცვლილება. თვისებების ამ ცვლილებას კავშირი აქვს ლითონების კონსტრუქციულ მახასიათებლებთან. კონსტრუქციული ლითონების და შენადნობების თვისებების ცვლილების ხარისხზე გავლენას ახდენს ცვლადები: კრისტალური სტრუქტურა, მარცვლის სიდიდე, ქიმიური შედგენილობა, დნობის ტემპერატურა, აგრეთვე დამზადების ტექნოლოგია და თერმული დამუშავება. გარდა ამისა, კონსტრუქციული მასალის თვისებებზე გავლენას ახდენს რეაქტორში დასხივების პირობები:

ნეიტრონების ნაკადის სიმკვრივე, ინტეგრალური ნაკადის სიდიდე, დასხივების ტემპერატურა, დაძაბული მდგომარეობა და ნიმუშის მომცველი გარემო.

ბოლო 15 წლის განმავლობაში დაგროვდა მრავალი მონაცემი, რომელიც ეხება სხვადასხვა თვისებების რადიაციულ თვისებას, მაგრამ ახალი შედეგების მოთხოვნილებამ შორს ჩამოიტოვა დღეს არსებული ცოდნის დონე. მაგალითად, იყენებენ რეაქტორებში კონსტრუქციულ მასალებს, რომლებშიც ერთი კვირის განმავლობაში მოსალოდნელია დასხივების ისეთი დოზების დაგროვება, როგორიც მასალათმცოდნეობის საცდელ რეაქტორებში შეიძლება მიღებულ იქნეს სამი წლის განმავლობაში. ამ პრობლემის გადაჭრის მიზნით შემოთავაზებულია, რომ თითოეულ ასაგებ რეაქტორში გასათვალისწინებელია ნიმუშების ჩადგმის შესაძლებლობა, რადიაციის გავლენის შესწავლის მიზნით. ასეთი რეაქტორის გაშვების მომენტიდან ყოველთვის იქნება საკმარისი რაოდენობის ნიმუშები მასალებზე დასხივების გავლენის ერთდროული შესწავლის მიზნით. გარკვეული დოზით დასხივების შემდეგ, ნიმუშების ნაწილი რეაქტორიდან უნდა ამოვიღოთ და შესაბამისი გამოკვლევის შემდეგ გაკეთდება დასკვნა, უსაფრთხოა თუ არა რეაქტორის შემდგომი ექსპლუატაცია. მუშაობის ასეთმა მეთოდმა თავიდან უნდა აგვაცილოს ავარიული სიტუაციები.

2.1.6. მაღალი ენერგიების ნაწილაკების დასხივების გავლენა ნაკეთობათა სიმტკიცე-მდგრადობაზე

როგორც ცნობილია ბირთვული რეაქტორების ძირითად კონსტრუქციულ ნაწილს წარმოადგენენ ლითონის წრიული ფირფიტები და კონუსური გარსები. მათი სიმტკიცის მარაგის დადგენა რეაქტორის მუშაობის პროცესში ერთერთ აქტუალურ პრობლემადაა და მიჩნეული.

მყარი სხეულები რადიოაქტიური დასხივების შედეგად იცვლიან როგორც ფიზიკურ, ასევე მექანიკურ თვისებებს [20, 21]. აღმოჩნდა, რომ დასხივების შედეგად ზოგიერთი მასალის დენადობის ზღვარი იზრდება 10-ჯერ და მეტჯერ. რაც შეეხება მასალის დრეკად მახასიათებლებს, მათი ცვლილება უფრო უმნიშვნელოა (10%-მდე).

ის თვისება, რომ დასხივების შედეგად იზრდება დენადობის ზღვარი და რომ ეს პროცესი საკმაოდ მდგრადია, შეიძლება გამოყენებულ იქნეს მტკიცე და ამავე დროს მსუბუქი კონსტრუქციების შესაქმნელად.

წრიულ ფირფიტებს გამოყენება აქვს ასევე ტექნიკაში. ძალიან ხშირად, სხვადასხვა მოსაზრების გამო მათი გეომეტრიული მახასიათებლები და დატვირთვის სახე წინასწარ შეზღუდულია. ბუნებრივია, ასეთი ფირფიტები წინასწარ მოვათავსოთ ნეიტრონული დასხივების ქვეშ. დასხივების დოზად მიღებულია ნეიტრონების რიცხვი, რომელიც გადის სხეულის 1 სმ^2 ზედაპირში, მთელი გამოცდის პროცესში და იზომება nVt ერთეულებში, სადაც n ნეიტრონების რიცხვია 1 სმ^2 ნაკადში, V – ნაკადის საშუალო სიჩქარე, ხოლო t – დასხივების დროის ინტენსივობა ნეიტრონების ნაკადით.

ცდების შედეგად შედგენილია ცხრილები, რომლებიც დამაკავშირებელია დასხივების დოზასა და დენადობის ზღვარს შორის.

თუ გავითვალისწინებთ, რომ ნეიტრონული დასხივების შედეგად მცირედ, მაგრამ მაინც იცვლება იუნგის მოდული, მაშინ წრიული რგოლური ფირფიტა, რომელიც განიცდის ღერძსიმეტრიული $q_z = \lambda q(r)$, განაწილებული დატვირთვისა და შიდა ($z = a$) კონტურის გასწვრივ მოქმედი განივი Q_a ძალების მოქმედებას, გაანგარიშდება შემდეგი დიფერენციალური განტოლებების დახმარებით [65]:

$$\frac{d^2\varphi}{dr^2} + \left(\frac{1}{r} + \frac{d \ln E_N}{dr} \right) \frac{d\varphi}{dr} - \left(\frac{1}{r} - \frac{v}{r} \frac{d \ln E_N}{dr} \right) \varphi = \frac{12(1-v^2)}{E_N h^3} \frac{a}{r} Q_a - \frac{12(1-v^2)}{E_N h^3} \frac{\lambda}{r} \int_a^r q(r) dr. \quad (1)$$

სადაც φ ფირფიტის კვეთის მობრუნების კუთხეა.

(1) დიფერენციალური განტოლების ამოხსნის გამარტივების მიზნით შემოვიღოთ უგანზომილებო სიდიდეები შემდეგი სახით:

$$\frac{r}{a} = x, \quad \frac{E_N}{E} = y, \quad -\frac{12(1-v^2)a^2 Q_a}{E h^3} = A, \quad \frac{6(1-v^2)a^3 \lambda}{E h^3} = P \quad (2)$$

სადაც E დასხივებამდე მასალის იუნგის მოდულია, ხოლო E_N – დასხივების შედეგად მიღებული იუნგის მოდული (E_N ჩვენ შეგვიძლია ავიღოთ დასხივების დოზის წრფივი კანონის სახით).

(2)-ის გათვალისწინებით (1) მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} + \left(\frac{1}{x} + \frac{d \ln y}{dx}\right) \frac{d\varphi}{dx} - \left(\frac{1}{x^2} - \frac{\nu}{x} \frac{d \ln y}{dx}\right) \varphi = \frac{A}{xy} - \frac{2P}{xy} \int q(ax) x dx, \quad (3)$$

$$\text{დავუშვათ, რომ } q(r) = -\left[8 + \frac{45}{2}a_1\left(\frac{r}{a}\right) + 48a_2\left(\frac{r}{a}\right)^2 + \frac{175}{2}a_3\left(\frac{r}{a}\right)^3\right],$$

$$\text{მაშინ } q(ar) = -\left[8 + \frac{45}{2}a_1x + 48a_2x^1 + \frac{175}{2}a_3x^3\right] \quad \text{და} \quad \text{მაშასადამე}$$

განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} + \left(\frac{1}{x} + \frac{d \ln y}{dx}\right) \frac{d\varphi}{dx} - \left(\frac{1}{x^2} - \frac{\nu}{x} \frac{d \ln y}{dx}\right) \varphi = \frac{A}{xy} + \frac{1}{y} (8x + 15a_1x^2 + 24a_2x^3 + 35a_3x^4)P \quad (4)$$

საკითხის შესწავლა დავიწყოთ მოდიანი ფირფიტის შესწავლით. თავდაპირველად უგულებელვყოთ დრეკადობის მოდულის ცვლილება. ამ შემთხვევაში განტოლება (4) მიიღებს შემდეგ სახეს ($A=0, y=I$):

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{d\varphi}{dx} - \frac{1}{x^2} \varphi = (8x + 15a_1x^2 + 24a_2x^3 + 35a_3x^4)P. \quad (5)$$

განტოლება (5)-ის ამოხსნას აქვს შემდეგი სახე:

$$\varphi(x) = c_1x + (x^3 + x^4 + a_2x^5 + a_3x^6)P \quad (6)$$

წარმოებულისათვის კი გვექნება:

$$\varphi(x) = c_1 + (3x^2 + 4a_1x^3 + 5a_2x^4 + 6a_3x^5)P. \quad (7)$$

რაც შეეხება მომენტებს რომლებიც გამოითვლებიან ფორმულებით

$$M_r = -D \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} - \frac{\nu}{r} \varphi \right),$$

$$M_\theta = -D \left(\nu \frac{\partial \varphi}{\partial r} - \frac{1}{r} \varphi \right)$$

მათთვის მივიღებთ:

$$M_r = \frac{a^2\lambda}{2} [(1+\nu)c_1 + (3+\nu)x^2 + a_1(4+\nu)x^2 + a_2(5+\nu)x^4 + a_3(6+\nu)x^5],$$

$$M_\theta = \frac{a^2\lambda}{2} [(1+\nu)c_1 + (3\nu+1)x^2 + a_1(4\nu+1)x^3 + a_2(5\nu+1)x^4 + a_3(6\nu+1)x^5].$$

სადაც c_1 საინტეგრო მუდმივია და განისაზღვრება სათანადო სასაზღვრო პირობიდან.

იმ შემთხვევაში, როცა ფირფიტა თავისუფლადაა დაყრდნობილი გვექნება:

$$(1+\nu)c_1 = -[(3+\nu) + a_1(4+\nu) + a_2(5+\nu) + a_3(6+\nu)]$$

მაშასადამე

$$M_r = \frac{a^2 \lambda}{2} [(3 + \nu)(x^2 - 1) + a_1(4 + \nu)(x^3 - 1) + a_2(5 + \nu)(x^4 - 1) + a_3(6 + \nu)(x^5 - 1)],$$

$$M_\theta = \frac{a^2 \lambda}{2} [(3\nu + 1)x^2 + a_1(4\nu + 1)x^3 + a_2(5\nu + 1)x^4 + a_3(6\nu + 1)x^5 - (3 + \nu) - a_1(4 + \nu) - a_2(5 + \nu) - a_3(6 + \nu)]. \quad (8)$$

$$\text{შეკადგინოთ პლასტიკურობის პირობა } M_r^2 - M_r M_\theta + M_\theta^2 = \left(\frac{\sigma_s h^2}{6} \right)^2 :$$

x	$-M_r / \frac{a^2 \lambda}{2}$	$-M_\theta / \frac{a^2 \lambda}{2}$
0	$3,3 + 4,3a_1 + 5,3a_2 + 6,3a_3$	$3,3 + 4,3a_1 + 5,3a_2 + 6,3a_3$
0,2	$3,168 + 4,2656a_1 + 5,29152a_2 + 6,29798a_3$	$3,224 + 4,2824a_1 + 5,296a_2 + 6,2991a_3$
0,4	$2,772 + 4,0248a_1 + 5,16432a_2 + 6,23549a_3$	$2,996 + 4,1592a_1 + 5,236a_2 + 6,27133a_3$
0,6	$2,112 + 3,3712a_1 + 4,61312a_2 + 5,81011a_3$	$2,616 + 3,8248a_1 + 4,976a_2 + 6,08227a_3$
0,8	$1,188 + 2,0984a_1 + 3,12912a_2 + 4,23562a_3$	$2,084 + 3,1736a_1 + 4,276a_2 + 5,3825a_3$
1,0	0	$1,4 + 2,1a_1 + 2,8a_2 + 3,5a_3$

$$\text{როცა } x = 0, \quad (3,3 + 4,3a_1 + 5,3a_2 + 6,3a_3) \frac{a^2 \lambda}{2} = \frac{\sigma_s h^2}{6},$$

$$\text{როცა } x = 1, \quad (1,4 + 2,1a_1 + 2,8a_2 + 3,5a_3) \frac{a^2 \lambda}{2} = \frac{\sigma_s h^2}{6},$$

$$\begin{cases} 9,9 + 12,9a_1 + 15,9a_2 + 18,9a_3 = \frac{\sigma_2 h^2}{a^2 \lambda} \\ 4,2 + 6,3a_1 + 8,4a_2 + 10,5a_3 = \frac{\sigma_2 h^2}{a^2 \lambda} \end{cases}$$

განტოლება (3)-ის ამოხსნის მიზნით შემოვიღოთ ახალი ცვლადი:

$$\varphi = Z \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \int \left(\frac{1}{x} + \frac{d \ln y}{dx} \right) dx \right\} = \frac{1}{\sqrt{xy}} Z,$$

მაშინ მივიღებთ:

$$Z'' - F_1(x)Z = AF_2(x) + PF_3 \quad (9)$$

სადაც:

$$F_1(x) = \frac{0,75}{x^2} + \frac{0,5 - \nu}{xy} \frac{dy}{dx} + \frac{0,5}{y} \frac{d^2 y}{dx^2} - \frac{0,25}{y^2} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2,$$

$$F_2(x) = \frac{1}{\sqrt{xy}}, \quad F_3(x) = -\frac{2}{\sqrt{xy}} \int^x q(ax) x dx. \quad (10)$$

დავიყვანოთ (9) განტოლება შესაბამის ინტეგრალურ განტოლებაზე:

$$Z''(x) = AF_2(x) + PF_3(x) + F_2(x) \left[Z_1(1) + (x-1)Z''(1) + \int_1^x (x-t)Z''(t)dt \right],$$

$$Z'(x) = Z_1(x)A + Z_2(x)P + Z_3(x)Z(1) + Z_4(x)Z(1),$$

სადაც:

$$\begin{aligned} Z_1(x) &= F_2(x) + F_1(x) \int_1^x (x-t)Z_1(t)dt, \\ Z_2(x) &= F_3(x) + F_1(x) \int_1^x (x-t)Z_2(t)dt, \\ Z_3(x) &= F_1(x) + F_1(x) \int_1^x (x-t)Z_3(t)dt, \\ Z_4(x) &= (x-1)F_1(x) + F_1(x) \int_1^x (x-t)Z_3(t)dt. \end{aligned} \quad (11)$$

ვიგულისხმოთ, რომ $y = \frac{E_N}{E} = e^{\alpha N}$, მაშინ გვექნება ($v = 0,3$):

$$\begin{aligned} F_1(x) &= \frac{0,75}{x^2} + \frac{0,2\alpha}{x} \frac{dN}{dx} + 0,25\alpha^2 \left(\frac{dN}{dx} \right)^2 + 0,5\alpha \left(\frac{d^2N}{dx^2} \right), \\ F_2(x) &= \frac{1}{\sqrt{x}} e^{-\frac{\alpha}{2}N}, \quad F_3(x) = -\frac{x^2-1}{\sqrt{x}} e^{-\frac{\alpha}{2}N}. \end{aligned}$$

თავდაპირველად ვიგულისხმოთ, რომ $E_N = E$, რაც იმის ტოლფასია, რომ $y = 1$ და $N = 0$, მაშინ გვექნება:

$$F_1(x) = \frac{0,75}{x^2}, \quad F_2(x) = \frac{1}{\sqrt{x}}, \quad F_3(x) = -\frac{x^2-1}{\sqrt{x}},$$

განტოლებები (11) მიიღებს შესაბამის სახეს:

$$\begin{aligned} Z_1(x) &= \sqrt{x} \left[\frac{8}{dx} \ln x + \frac{13}{16x} + \frac{3}{16x^3} \right]; \\ Z_2(x) &= -\frac{x^2-1}{\sqrt{x}} + \frac{0,75}{x^2} \int_1^x (x-t)Z_2(t)dt; \\ Z_2(x) &= -\sqrt{x} \left[\frac{35x}{32} - \frac{8}{3x} \ln x - \frac{1}{x} - \frac{3}{32x^3} \right]; \\ Z_3(x) &= -\frac{0,75}{x^2} + \frac{0,75}{x^2} \int_1^x (x-t)Z_3(t)dt; \end{aligned}$$

$$Z_3(x) = \sqrt{x \left(\frac{3}{16x} + \frac{9}{16x^3} \right)};$$

$$Z_4(x) = -\frac{3(x-1)}{4x^2} + \frac{0,75}{x^2} \int_1^x (x-t)Z_4(t)dt;$$

$$Z_4(x) = \sqrt{x \left(\frac{3}{8x} - \frac{3}{8x^3} \right)}.$$

მაშასადამე ამოხსნას ექნება:

$$Z''(x) = \sqrt{x} \left[\left(\frac{3}{16x} + \frac{9}{16x^3} \right) Z(1) + \left(\frac{3}{8x} + \frac{3}{8x^3} \right) Z'(1) + \left(\frac{3}{8x} \ln x + \frac{13}{16x} + \frac{3}{16x^3} \right) A - \right. \\ \left. - \left(\frac{35x}{32} - \frac{3}{8x} \ln x - \frac{1}{x} - \frac{3}{32x^3} \right) P; \right]$$

$Z'(x)$ და $Z(x)$ -სთვის შესაბამისად გვექნება:

$$Z'(x) = \sqrt{x} \left[\left(\frac{3}{8} - \frac{3}{8x^2} \right) Z(1) + \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{4x^2} \right) Z'(1) + \left(\frac{3}{4} \ln x + \frac{1}{8} - \frac{1}{8x^2} \right) A - \right. \\ \left. - \left(\frac{17x^2}{16} - \frac{3}{4} \ln x + \frac{1}{16x^2} - \frac{1}{2} \right) P; \right];$$

$$Z(x) = \sqrt{x} \left[\left(\frac{x}{4} + \frac{3}{4x} \right) Z(1) + \left(\frac{x}{2} - \frac{1}{2x} \right) Z'(1) + \left(\frac{x}{2} \ln x - \frac{x}{4} + \frac{1}{4x} \right) A - \right. \\ \left. - \left(\frac{x^3}{8} - \frac{x}{2} \ln x - \frac{1}{8x} \right) P \right].$$

შევადგინოთ მომენტების გამოსახულებები:

$$M_r = \frac{a^2 \lambda}{2P} \frac{y}{\sqrt{xy}} \left[\frac{dZ}{dx} - \left(\frac{0,5 - \nu}{x} + \frac{0,5}{y} \frac{dy}{dx} \right) Z \right],$$

$$M_\theta = \frac{a^2 \lambda \nu}{2P} \frac{y}{\sqrt{xy}} \left[\frac{dZ}{dx} + \left(\frac{1/\nu - 0,5}{x} - \frac{0,5}{y} \frac{dy}{dx} \right) Z \right], \quad 1/\nu - 0,5 = 2,83333.$$

ვინაიდან ჩვენს შემთხვევაში $y = 1$, ამიტომ გვექნება:

$$M_r = \frac{a^2 \lambda}{2P} \frac{1}{\sqrt{x}} \left[\frac{dZ}{dx} - \frac{0,2}{x} Z \right],$$

$$M_\theta = \frac{a^2 \lambda \nu}{2P} \frac{1}{\sqrt{x}} \left[\frac{dZ}{dx} - \frac{2,8333}{x} Z \right].$$

გაშლილი სახით მივიღებთ:

$$M_r = \left\{ \left(\frac{1+\nu}{4} - \frac{3(1-\nu)}{4x^2} \right) Z(1) + \left(\frac{1+\nu}{2} + \frac{1-\nu}{2x^2} \right) Z'(1) + \left[\frac{1+\nu}{2} \ln x + \frac{1-\nu}{4} \left(1 - \frac{1}{x^2} \right) \right] A - \left[\frac{3+\nu}{8} x^2 - \frac{1+\nu}{2} \ln x + \frac{1-\nu}{8x^2} - \frac{1}{2} \right] P \right\} \frac{a^2 \lambda}{2P},$$

$$M_\theta = \left\{ \left(\frac{1+\nu}{4} - \frac{3(1-\nu)}{4x^2} \right) Z(1) + \left(\frac{1+\nu}{2} + \frac{1-\nu}{2x^2} \right) Z'(1) + \left[\frac{1+\nu}{2} \ln x - \frac{1-\nu}{4} \left(1 - \frac{1}{x^2} \right) \right] A - \left[\frac{3\nu+1}{8} x^2 - \frac{1+\nu}{2} \ln x - \frac{1-\nu}{8x^2} - \frac{\nu}{2} \right] P \right\} \frac{a^2 \lambda}{2P},$$

$$W = -a \left\{ \left(\frac{x^2}{8} - \frac{3}{4x^2} \right) Z(1) + \left(\frac{x^2}{4} + \frac{1}{2x^2} \right) Z'(1) + \left[\frac{x^2}{4} (\ln x - 1) - \frac{1}{4x^2} \right] A - \left[\frac{x^4}{32} - \frac{x^2}{8} (2 \ln x - 1) + \frac{1}{8x^2} \right] P \right\} + C,$$

$$\varphi(x) = \left(\frac{x}{4} + \frac{3}{4x} \right) Z(1) + \left(\frac{x}{2} - \frac{1}{2x} \right) Z'(1) + \left(\frac{x}{2} \ln x - \frac{x}{4} + \frac{1}{4x} \right) A - \left(\frac{x^3}{8} - \frac{x}{2} \ln x - \frac{1}{8x} \right) P,$$

$$Q_r = \frac{1}{x} Q_a + \frac{a\lambda}{2} \frac{x^2 - 1}{x} = -\frac{1}{x} \frac{a\lambda}{2P} A + \frac{x^2 - 1}{x} \frac{a\lambda}{2},$$

$$M_\theta(1,0) = [0,850Z(1) + 0,300Z'(1) - 0,135P] \frac{a^2 \lambda}{2P},$$

$$M_\theta(1,5) = [0,558Z(1) + 0,495Z'(1) + 0,166A - 0,217P] \frac{a^2 \lambda}{2P},$$

$$M_\theta(2,0) = [0,456Z(1) + 0,563Z'(1) + 0,319A - 0,537P] \frac{a^2 \lambda}{2P},$$

$$M_\theta(2,5) = [0,409Z(1) + 0,594Z'(1) + 0,449A - 0,859P] \frac{a^2 \lambda}{2P},$$

$$M_\theta(3,0) = [0,383Z(1) + 0,611Z'(1) + 0,558A - 1,399P] \frac{a^2 \lambda}{2P},$$

$$M_\theta(3,5) = [0,368Z(1) + 0,621Z'(1) + 0,653A - 2,073P] \frac{a^2 \lambda}{2P},$$

$$M_\theta(4,0) = [0,357Z(1) + 0,628Z'(1) + 0,737A - 2,878P] \frac{a^2 \lambda}{2P},$$

$$M_{\theta}(4,5)=[0,351Z(1)+0,633Z'(1)+0,811A-3,812P]\frac{a^2\lambda}{2P},$$

$$M_{\theta}(5,0)=[0,346Z(1)+0,636Z'(1)+0,878A-4,873P]\frac{a^2\lambda}{2P},$$

$$M_r(1,0)=[-0,200Z(1)+Z'(1)]\frac{a^2\lambda}{2P},$$

$$M_r(1,5)=[0,092Z(1)+0,805Z'(1)+0,360A-0,204P]\frac{a^2\lambda}{2P},$$

$$M_r(2,0)=[0,194Z(1)+0,737Z'(1)+0,581A-0,722P]\frac{a^2\lambda}{2P},$$

$$M_r(2,5)=[0,241Z(1)+0,706Z'(1)+0,743A-1,496P]\frac{a^2\lambda}{2P},$$

$$M_r(3,0)=[0,272Z(1)+0,689Z'(1)+0,870A-2,506P]\frac{a^2\lambda}{2P},$$

$$M_r(3,5)=[0,282Z(1)+0,679Z'(1)+0,975A-3,746P]\frac{a^2\lambda}{2P},$$

$$M_r(4,0)=[0,293Z(1)+0,672Z'(1)+1,065A-5,204P]\frac{a^2\lambda}{2P},$$

$$M_r(4,5)=[0,299Z(1)+0,667Z'(1)+1,145A-6,879P]\frac{a^2\lambda}{2P},$$

$$M_r(5,0)=[0,304Z(1)+0,664Z'(1)+1,214A-8,769P]\frac{a^2\lambda}{2P},$$

$$W(1,0)=6,25Z(1)-7,5Z'(1)+5A+2,8125P+C,$$

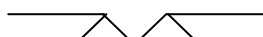
$$W(5,0)=-30,95Z(1)-62,3Z'(1)-37,9875A+49,7563P+C,$$

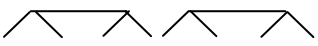
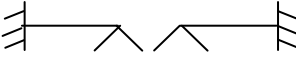
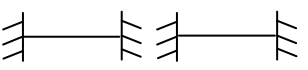
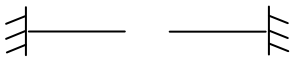
$$\varphi(1,0)=Z(1),$$

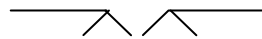
$$\varphi(5,0)=1,4Z(1)+2,4Z'(1)+2,8253A-11,5765P,$$

$$Q_r(1,0)=-\frac{a\lambda}{2P}A, \quad Q_r(5,0)=\lambda\left(24-\frac{A}{P}\right).$$

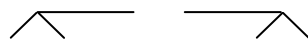
ჩამატების სახე	პირობა შიგა კონტურზე	პირობა შიგა კონტურზე	პარამეტრების მნიშვნელობები
	W=0	Q _r =0	C = -94,0175P



	$M_r=0$	$M_r=0$	$Z(1) = 46,6277P$ $Z'(1) = -9,3255P$ $A = 24P$
	$W=0$ $\varphi=0$	$Q_r=0$ $M_r=0$	$C = -353,514P$ $Z'(1) = -30,762P$
	$W=0$ $M_r=0$	$W=0$ $M_r=0$	$Z(1) = 8,0618P$ $A = 10,1239P$ $Z'(1) = -1,6124P$
	$W=0$ $M_r=0$	$W=0$ $\varphi=0$	$Z'(1) = 2,1038P$ $Z(1) = 7,0192P$ $A = 8,9557P$
	$W=0$ $\varphi=0$	$W=0$ $\varphi=0$	$Z(1) = 0$ $Z'(1) = -7,0812P$ $A = 10,1196P$
	$W=0$ $\varphi=0$	$W=0$ $M_r=0$	$Z(1)=0$ $Z'(1) = -8,4231P$ $A = 11,8303P$
	$Q_r=0$ $M_r=0$	$W=0$ $M_r=0$	$Z(1)=20,0755P$ $Z'(1)=4,0151P$ $A=0$
	$Q_r=0$ $M_r=0$	$W=0$ $\varphi=0$	$Z(1)=6,1577P$ $Z'(1)=1,2315P$ $A=0$



x	$M_r / \frac{a^2 \lambda}{4}$	$M_\theta / \frac{a^2 \lambda}{4}$	$\left(M_r / \frac{a^2 \lambda}{4} \right)^2$	$-(M_r M_\theta) / \frac{a^4 \lambda^2}{4}$	$(M_\theta / a^2 \lambda)^2$	$\left(\frac{\sigma_s a^2 h^2 \lambda}{24} \right)^2$	σ_2 $\partial/\partial \theta^2$	N/ 10^{17}
1,0	0	-21,283	0	0	$(21,283)^2$	$(21,283)^2$	42,566	
1,5	-1,680	-13,433	2,822	-22,567	180,445	160,700	25,354	
2,0	-1,348	-9,696	1,817	-13,070	94,012	82,759	18,197	678
2,5	-0,742	-7,346	0,551	-5,451	53,964	49,064	14,008	204
3,0	-0,367	-5,781	0,135	-2,122	33,420	31,433	11,214	80
3,5	-0,123	-4,675	0,015	-0,575	21,856	21,296	9,270	62
4,0	-0,097	-3,846	0,009	-0,373	14,792	14,428	7,596	48
4,5	-0,036	-3,308	0,001	-0,119	10,943	10,825	6,850	35
5,0	0	-2,932	0	0	$(2,932)^2$	$(2,932)^2$	5,864	16



x	$M_r/a^2\lambda$	$M_\theta/a^2\lambda$	$(M_r/a^2\lambda)^2$	$-(M_r, M_\theta)1/a^4\lambda^2$	$(M_\theta/a^2\lambda)^2$	$\left(\frac{\sigma_s a^2 h^2 \lambda}{24}\right)$	σ_2 კმ/მმ ²	N/ 10 ¹⁷
1,0	0	9,066	0	0	(9,066) ²	(9,066) ²	18,132	678
1,5	2,437	6,486	5,939	-15,806	42,068	32,201	11,350	81
2,0	3,066	5,438	9,400	-16,673	29,572	22,299	9,444	64
2,5	3,088	4,868	9,536	-15,032	23,697	18,201	8,532	46
3,0	2,860	4,371	8,179	-12,501	19,106	14,784	7,690	44
3,5	2,320	3,904	5,382	-9,057	15,241	11,566	6,802	38
4,0	1,688	3,405	2,489	-5,748	11,594	8,695	5,898	18
4,5	0,901	2,887	0,812	-2,601	8,335	6,546	5,118	4
5,0	0	2,313	0	0	(2,313) ²	(2,313) ²	4,626	0

შევადგინოთ დენადობის გამოსახულება:

$$M_r^2 - M_r M_\theta + M_\theta^2 = \left(\frac{\sigma_s h^2}{6}\right)^2, \left(\frac{\sigma_s a^2 h^2 \lambda}{6}\right) \text{კმ/ნმ}^2 = \frac{\sigma_s h^2 \lambda}{6} \text{კმ/ნმ}^2.$$

ვიგულისხმობთ, რომ $\frac{h^2 \lambda}{12} = 1$.

დავუშვათ, რომ იუნგის მოდული დასხივების შედეგად იცვლება დაახლოებით 10%-ით, ე.ი. ადგილი აქვს ტოლობას:

$$E_N = 1,1E, \text{ რაც იგივეა: } e^{aN} = 1,1.$$

შევარჩიოთ α დასხივება მაქსიმალური დოზის მიხედვით:

$$\alpha N = \ln 1,1, \alpha = \frac{\ln 1,1}{N} = \frac{0,0956}{0,678 \cdot 10^{20}} = 0,14 \cdot 10^{-20}.$$

შევადგინოთ $F_1(x)$, $F_2(x)$ და $F_3(x)$ კოეფიციენტების მნიშვნელობათა ცხრილი. ამ მიზნით წარმოვადგინოთ N , როგორც x -ის ფუნქცია შემდეგი სახით:

$$N = K_0 + K_1 x + K_2 x^2 + K_3 x^3 + K_4 x^4,$$

სადაც K_0, K_1, K_2, K_3, K_4 განისაზღვრება შემდეგი პირობებიდან:

$$\text{როცა } x = 1, \text{ მაშინ } N = 678 \cdot 10^{17};$$

$$x = 2, \text{ მაშინ } N = 64 \cdot 10^{17};$$

$$x = 3, \text{ მაშინ } N = 44 \cdot 10^{17};$$

$$x = 4, \text{ მაშინ } N = 18 \cdot 10^{17};$$

$$x = 5, \text{ მაშინ } N = 0.$$

$$\begin{cases} K_0 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 = 678 \cdot 10^{17} \\ K_0 + 2K_1 + 4K_2 + 8K_3 + 16K_4 = 64 \cdot 10^{17} \\ K_0 + 3K_1 + 9K_2 + 27K_3 + 81K_4 = 44 \cdot 10^{17} \\ K_0 + 4K_1 + 16K_2 + 64K_3 + 256K_4 = 18 \cdot 10^{17} \\ K_0 + 5K_1 + 25K_2 + 125K_3 + 625K_4 = 0. \end{cases}$$

ამოხსნის შედეგად მივიღებთ შემდეგ მნიშვნელობებს:

$$K_0 = 3,10010 \cdot 10^{20}, K_1 = -3,88434 \cdot 10^{20}, K_2 = 1,79251 \cdot 10^{20}, K_3 = -0,35585 \cdot 10^{20},$$

$$K_4 = 0,02558 \cdot 10^{20}.$$

$$N/10^{20} = (3,10010 - 3,88434 \cdot x + 1,79251 \cdot x^2 - 0,35585 \cdot x^3 + 0,02558 \cdot x^4),$$

$$N = (3,10010 - 3,88434 \cdot x + 1,79251 \cdot x^2 - 0,35585 \cdot x^3 + 0,02558 \cdot x^4) \cdot 10^{20},$$

$$\frac{dN}{dx} = (-3,88434 + 3,58502 \cdot x - 1,06755 \cdot x^2 + 0,10232 \cdot x^3 + 0,02558 \cdot x^4) \cdot 10^{20},$$

$$\frac{d^2N}{dx^2} = (3,58502 - 2,13510 \cdot x + 0,30696 \cdot x^2) \cdot 10^{20}.$$

x	N	Δ	Δ^2	Δ^3	Δ^4	Δ^5	Δ^6	Δ^7
1,0	678	-597						
1,5	81	-17	580	-581				
2,0	64	-18	-1	17	598	-635		
2,5	46	-2	16	-20	-37	-47	588	
3,0	44	-6	-4	-10	10	20	67	-521
3,5	38	-20	-14	20	30	-46	-66	-133
4,0	18	-14	6	4	-16			
4,5	4	-4	10					
5,0	0							

$$y'_0 = \frac{1}{h} \left[\Delta_0 - \frac{1}{2} \Delta_0^2 + \frac{1}{3} \Delta_0^3 - \frac{1}{4} \Delta_0^4 + \frac{1}{5} \Delta_0^5 - \frac{1}{6} \Delta_0^6 + \dots \right],$$

$$y''_0 = \frac{1}{h^2} \left[\Delta_0^2 - \Delta_0^3 + \frac{11}{12} \Delta_0^4 - \frac{5}{6} \Delta_0^5 + \frac{137}{180} \Delta_0^6 - \dots \right].$$

შევადგინოთ $F_1(x)$, $F_2(x)$ და $F_3(x)$ ფუნქციების მნიშვნელობათა ცხრილი დანაყოფის თითოეული წერტილისათვის:

$$F_1(x) = \frac{0,75}{x^2} + \frac{0,2}{x} \left(\alpha \frac{dN}{dx} \right) + 0,25 \left(\alpha \frac{dN}{dx} \right)^2 + 0,25 \left(\alpha \frac{d^2N}{dx^2} \right),$$

$$F_2(x) = \frac{1}{\sqrt{x}} e^{-\frac{\alpha}{2}N}, \quad F_3(x) = -\frac{x^2-1}{\sqrt{x}} e^{-\frac{\alpha}{2}N}.$$

x	1-x ²	1-x ³	1-x ⁴	1-x ⁵
0	1	1	1	1
0,2	0,96	0,992	0,9984	0,99968
0,4	0,84	0,936	0,9744	0,98976
0,6	0,64	0,784	0,8704	0,92224
0,8	0,36	0,488	0,5904	0,67232
1,0	0	0	0	0

x	1,9x ²	2,2a ₁ x ³	2,5a ₂ x ⁴	2,8a ₃ x ⁵
0	0	0	0	0
0,2	0,076	0,0176	0,00400	0,00090
0,4	0,304	0,1408	0,06400	0,02867
0,6	0,684	0,4752	0,32400	0,21773
0,8	1,216	1,1264	1,02400	0,9175
1,0	1,9	2,2a ₁	2,5a ₂	2,8a ₃
	3,3	4,3a ₁	5,3a ₂	6,3a ₃
x	x ²	x ³	x ⁴	x ⁵
0	0,00	0	0	0
0,2	0,04	0,008	0,0016	0,00032
0,4	0,16	0,064	0,0256	0,01024
0,6	0,36	0,216	0,1296	0,07776
0,8	0,64	0,512	0,4096	0,32768
1	1	1	1	1

$$M_r = \frac{2H^2Eh_0}{(1-\nu^2)b} \left[-\frac{Px^2}{8}(3+\nu) - \frac{C_1}{2}(1+\nu) + \frac{C_2}{x^2}(1-\nu) \right],$$

$$M_{\theta} = \frac{2H^2 E h_0}{(1-\nu^2)b} \left[-\frac{Px^2}{8}(3\nu+1) - \frac{C_1}{2}(1+\nu) - \frac{C_2}{x^2}(1-\nu) \right],$$

$$\nu = 0,3, C_1 = -0,79327P, C_2 = -0,14732P,$$

$$M_r = \frac{2,19780H^2 E h_0 P}{b} \left[-0,41250x^2 + 0,51563 - \frac{0,10312}{x^2} \right],$$

$$M_{\theta} = \frac{2,19780H^2 E h_0 P}{b} \left[-0,23750x^2 + 0,51563 - \frac{0,10312}{x^2} \right].$$

x	x ²	1/x ²	0,41250x ²	0,23750x ²	0,10312/x ²	M _r /K	M _θ /K
0,5	0,25	4,0	0,10312	0,05937	0,41248	0	0,86874
0,6	0,36	2,77778	0,14850	0,08550	0,28644	0,08069	0,71657
0,7	0,49	2,04082	0,20212	0,11637	0,21045	0,10306	0,60971
0,8	0,64	1,56250	0,26400	0,15200	0,16112	0,10051	0,52475
0,9	0,81	1,23457	0,33412	0,19237	0,12731	0,05420	0,45057
1,0	1,0	1,0	0,41250	0,23700	0,10312	0	0,38175

$$(3,3+4,3a_1+5,3a_2+6,3a_3) \frac{a^2 \lambda}{2P} = \frac{\sigma_s h^2}{6},$$

$$(1,4+2,1a_1+2,8a_2+3,5a_3) \frac{a^2 \lambda}{2P} = \frac{\sigma_s h^2}{6},$$

$$1,9+2,2a_1+2,5a_2+2,8a_3=0, 2P = \frac{12(1-\nu^2)a^3 \lambda}{Eh^3},$$

$$\sigma_r = \frac{6M}{h^2}, \frac{a^2 \lambda}{\frac{12(1-\nu^2)a^3 \lambda}{Eh^3}} = \frac{\sigma_s h^2}{6}, \frac{Eh}{12(1-\nu^2)a} = \sigma_s,$$

$$(3,3+4,3a_1+5,3a_2+6,3a_3)a_2 \lambda = \frac{\sigma_s h^2}{3},$$

$$(9,9+12,9a_1+15,9a_2+18,9a_3) \frac{a_2}{h^2} \lambda = \sigma_s,$$

$$(4,2+6,3a_1+8,4a_2+10,5a_3) \frac{a_2}{h^2} \lambda = \sigma_s,$$

$$\begin{cases} 12,9a_1 + 15,9a_2 = a - 9,9 \\ 6,3a_1 + 8,4a_2 = a - 4,2 \end{cases} \quad \begin{cases} a_1 + 1,232a_2 = 0,077a - 0,767 \\ a_1 + 1,333a_2 = 0,159a - 0,667 \end{cases},$$

$$0,1a_2 = 0,082a + 0,1,$$

$$a_1=-0,93a-2, a_2=0,82a+1.$$

$$y=8-65,9x+87,4x^2,$$

$$y=8-66x+87x^2.$$

$$a^4(1+\nu)^2-a^2r^2(2-2\nu-4\nu^2)+r^4(9+7\nu^2-4\nu)=\left(\frac{32\sqrt{3}\sigma_s}{qh^2}\right)^2,$$

$$\partial\mathfrak{s}\mathfrak{d}\mathfrak{o}\mathfrak{b}:$$

$$a^4(1+\nu)=\frac{32\sqrt{3}\sigma_s}{qh^2}, \quad \sigma_s=\frac{a^2(1+\nu)qh^2}{32\sqrt{3}}.$$

$$\mathfrak{C}\mathfrak{C}\mathfrak{G}\mathfrak{S} \quad r=a$$

$$a^4(1+2\nu+\nu^2-2+2\nu+4\nu^2+9+7\nu^2-4\nu)=\left(\frac{32\sqrt{3}\sigma_s}{qh^2}\right)^2,$$

$$a^4(8+12\nu^2)=\frac{32\sqrt{3}\sigma_s}{qh^2},$$

$$2a^2\sqrt{2+3\nu^2}\frac{32\sqrt{3}\sigma_s}{qh^2}, \quad \sigma_s=\frac{a^2qh^2}{32\sqrt{3}}2\sqrt{2+3\nu^2}.$$

$$\mathfrak{C}\mathfrak{C}\mathfrak{G}\mathfrak{S} \quad r=1/2a$$

$$a^4\left(1+2\nu+\nu^2-0,5+0,5\nu+\nu^2+\frac{9}{16}+\frac{7}{16}\nu^2-\frac{1}{4}\nu\right)=\left(\frac{32\sqrt{3}\sigma_s}{qh^2}\right)^2,$$

$$x^2\varphi''(x)+x\varphi'(x)-\varphi(x)=(x^3+a_1x^4+a_2x^5+a_3x^6)P,$$

$$\varphi(x)=C_1x+\frac{3}{8}x^2+\frac{a_1}{15}x^4+\frac{a_2}{24}x^5+\frac{a_3}{35}x^6,$$

$$\varphi'(x)=C_1+\frac{3}{8}x^2+\frac{4a_1}{15}x^3+\frac{5a_2}{24}x^4+\frac{6a_3}{35}x^5,$$

$$M_r=\frac{Eh_0^3}{12(1-\nu^2)}\left[\frac{d\varphi}{dx}+\frac{\nu}{x}\varphi\right]=\frac{a^2\lambda}{2P}\left[\frac{d\varphi}{dx}+\frac{\nu}{x}\varphi\right],$$

$$M_r=\frac{a^2\lambda}{2P}\left[(1+\nu)C_1+\frac{1}{8}(3+\nu)x^2+\frac{a_1}{15}(4+\nu)x^3+\frac{a_2}{24}(5+\nu)x^4+\frac{a_3}{35}(6+\nu)x^5\right],$$

$$M_\theta=\frac{a^2\lambda}{2P}\left[(1+\nu)C_1+\frac{1}{8}(3\nu+1)x^2+\frac{a_1}{15}(4\nu+1)x^3+\frac{a_2}{24}(5\nu+1)x^4+\frac{a_3}{35}(6\nu+1)x^5\right].$$

2.1.7. დამრეცი კონუსური გარსის გაანგარიშება რადიოაქტიური დასხივების გზით

ვიგულისხმობთ, რომ რადიოაქტიური დასხივების შედეგად

დრეკადობის მოდული იცვლება ფორმულით: $E_N = Ee^{\alpha \frac{e}{e_0} + \beta}$.

წონასწორობის განტოლებას აქვს შემდეგი სახე [31]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{de^2}(eN_e) + \left(\frac{1}{e} - \frac{d \ln E_N}{de}\right) \frac{d}{de}(eN_e) - \left(\frac{1}{e^2} - \frac{\nu}{e} \frac{d \ln E_N}{de}\right)(eN_e) = \\ = -\frac{E_N h c t g \alpha}{e} \varphi - \left[\frac{2+\nu}{e} + \frac{d \ln E_N}{de}\right] q_e e - e \frac{dq_e}{de}, \\ \frac{d^2 \varphi}{de^2} + \left(\frac{1}{e} + \frac{d \ln E_N}{de}\right) \frac{d\varphi}{de} - \left(\frac{1}{e^2} - \frac{\nu}{e} \frac{d \ln E_N}{de}\right) \varphi = \\ = \frac{12(1-\nu^2) c t g \alpha}{E_N h^3 e} (eN_e) + \frac{12(1-\nu^2)}{E_N h^3 e} \left[\int (q_e c t g \alpha - q_z) e de + c \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

(12) დიფერენციალური განტოლების ინტეგრირების გამარტივების მიზნით ვიგულისხმობთ, რომ გარსზე მოქმედებს q_0 , q_e და $q_z = q_0$ ინტენსივობის აეროდინამიკური დატვირთვა. გარდა ამისა, შემოვიღოთ შემდეგი აღნიშვნები:

$$\frac{e}{e_0} = x, \quad \frac{E_N}{E} = y, \quad \frac{eN_\theta}{E h e_0 c t g \alpha} = \Psi, \quad \frac{6(1-\nu^2)e_0^3 q_0}{E h^3} e^{-\beta} = \rho, \quad \frac{12(1-\nu^2)e_0^2}{h_0^2 t g^2 \alpha} e^{-\beta} = A,$$

შესაბამისად გვექნება:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \Psi}{dx^2} + \left(\frac{1}{x} - \frac{d \ln y}{dx}\right) \frac{d\Psi}{dx} - \left(\frac{1}{x^2} - \frac{\nu}{x} \frac{d \ln y}{dx}\right) \Psi = -\frac{y}{x} \varphi, \\ \frac{d^2 \varphi}{dx^2} + \left(\frac{1}{x} - \frac{d \ln y}{dx}\right) \frac{d\varphi}{dx} - \left(\frac{1}{x^2} - \frac{\nu}{x} \frac{d \ln y}{dx}\right) \varphi = \frac{A}{e^{-\beta}} \frac{1}{xy} \Psi - \frac{P}{e^{-\beta}} \left(x^2 - \frac{2c}{q_z e_0^2}\right). \end{aligned} \quad (13)$$

მთლიანი გარსის შემთხვევაში, თუ გავითვალისწინებთ, რომ $y = e^{\alpha x + \beta}$ მივიღებთ:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \Psi}{dx^2} + \left(\frac{1}{x} - \alpha\right) \frac{d\Psi}{dx} - \left(\frac{1}{x^2} - \frac{\nu}{x} \alpha\right) \Psi = -\frac{1}{x} e^{7\alpha x} \varphi, \\ \frac{d^2 \varphi}{dx^2} + \left(\frac{1}{x} + \alpha\right) \frac{d\varphi}{dx} - \left(\frac{1}{x^2} - \frac{\nu}{x} \alpha\right) \varphi = \frac{A}{x} e^{-\alpha x} \Psi - x e^{-\alpha x} P. \end{aligned} \quad (14)$$

რაც იგივეა:

$$x^2 \Psi'''(x) + (x - \alpha x^2) \Psi'(x) - (1 - \alpha \nu x) \Psi(x) = -x e^{\alpha x} \varphi,$$

$$x^2 \varphi''(x) + (x + \alpha x^2) \varphi'(x) - (1 - \alpha \nu x) \varphi(x) = A x e^{-\alpha x} \Psi - x^3 e^{-\alpha x} P.$$

ამოგვხსნათ განტოლებათა სისტემა (14) მიმდევრობითი მიახლოების მეთოდით. პირველ მიახლოებაში დავუშვათ, რომ $\Psi=0$, მაშინ გვექნება:

$$x^2 \varphi''(x) + (x + \alpha x^2) \varphi'(x) - (1 - \alpha \nu x) \varphi(x) = -x^3 e^{-\alpha x} P,$$

რომლის ამოხსნას აქვს შემდეგი სახე:

$$\varphi = a_0 \left[x + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\alpha^n (n + \nu)!}{n! (n + 2)!} x^{n+1} \right] + \left[x^2 + \frac{3x}{\alpha(2 - \nu)} \right] \frac{P e^{-\alpha x}}{\alpha(3 - \nu)}.$$

უკანასკნელის გათვალისწინებით (14)-ის პირველი განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$x^2 \Psi'''(x) + (x - \alpha x^2) \Psi'(x) - (1 - \alpha \nu x) \Psi(x) =$$

$$= a_0 \left[x^2 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\alpha^n (n + \nu)!}{n! (n + 2)!} x^{n+2} \right] e^{\alpha x} - \left[x^3 + \frac{3x^2}{\alpha(2 - \nu)} \right] \frac{P}{\alpha(3 - \nu)},$$

ანუ

$$x^2 \Psi'''(x) + (x - \alpha x^2) \Psi'(x) - (1 - \alpha \nu x) \Psi(x) =$$

$$= -a_0 \left[\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\alpha^n (n + \nu)!}{n! (n + 2)!} x^{n+2} \right] e^{\alpha x} - \left[x^3 + \frac{3x^2}{\alpha(2 - \nu)} \right] \frac{P}{\alpha(3 - \nu)}. \quad (15)$$

ამ განტოლების შესაბამისი ერთგვაროვანი განტოლების ზოგადი ამოხსნა იქნება: $\Psi_1 = b_0 \left[x + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha^n (n - \nu)!}{n! (n + 2)!} x^{n+1} \right]$. რაც შეეხება არაერთგვაროვანი განტოლების კერძო ამოხსნის მომენტის საკითხს, ზოგადად ის ასეთნაირად განისაზღვრება:

ვთქვათ მოცემულია განტოლება:

$$x^2 Z''(x) + (x \pm \gamma x^2) Z'(x) - (1 - \gamma \nu x) Z(x) = \left(\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+m} \right) e^{\beta x},$$

ვუძებთ ამოხსნას შემდეგი სახით:

$$Z_1(x) = \left(\sum_{n=0}^{\infty} C_n x^{n+\rho} \right) e^{\beta x},$$

ჩასმის შედეგად მივიღებთ:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \{[(\rho + n)^2 - 1] c_n + [(2\beta \pm \gamma)(\rho + n - 1) + (\beta + \gamma \nu)] c_{n-1} +$$

$$(\beta^2 \pm \gamma\beta)C_{n-2}\}x^{n+\rho} = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+m}.$$

იმისათვის, რომ ეს ტოლობა დაკმაყოფილდეს, საჭიროა, რომ $\rho=m$.

ჩვენ შემთხვევაში $m=\rho=2$, $\beta=\gamma=\alpha$ და, მაშასადამე, გვქვია:

$$\psi_2(x) = \left(\sum_{n=0}^{\infty} C_n x^{n+2} \right) e^{\alpha x},$$

სადაც C_n კოეფიციენტები განისაზღვრება შემდეგი ტოლობიდან:

$$\sum_{n=0}^{\infty} [(n+1)(n+3)C_n + \alpha(n+2+\nu)C_{n-1}] = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\alpha^n (n+\nu)!}{n!(n+2)!} a_0,$$

$$n=0 \quad 1 \cdot 3 \cdot C_0 = -1, \quad C_0 = -\frac{1}{3} a_0,$$

$$n=1 \quad 2 \cdot 4 \cdot C_1 + \alpha(3+\nu) C_0 = \frac{\alpha(1+\nu)}{1 \cdot 3}, \quad C_1 = \frac{\alpha(2+\nu)}{3 \cdot 4},$$

$$n=2 \quad 3 \cdot 5 \cdot C_2 + \alpha(4+\nu) C_1 = -\frac{\alpha^2(1+\nu)(2+\nu)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4}, \quad C_2 = -\frac{\alpha^2(2+\nu)(3+\nu)}{3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 2},$$

$$n=3 \quad 4 \cdot 6 \cdot C_3 + \alpha(5+\nu) C_2 = +\frac{\alpha^3(1+\nu)(2+\nu)(3+\nu)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5}, \quad C_3 = -\frac{\alpha^2(2+\nu)(3+\nu)(4+\nu)}{3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 3},$$

$$n=4 \quad 5 \cdot 7 \cdot C_4 + \alpha(6+\nu) C_3 = -\frac{\alpha^4(1+\nu)(2+\nu)(3+\nu)(4+\nu)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6},$$

$$C_4 = -\frac{\alpha^4(2+\nu)(3+\nu)(4+\nu)(5+\nu)}{3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 7 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4},$$

$$C_n = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\alpha^n (n+2+\nu)!}{(n-1)!(n+3)!}.$$

მაშასადამე:

$$\Psi_2(x) = \left(\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\alpha^n (n+2+\nu)!}{(n-1)!(n+3)!} x^{n+2} \right) e^{\alpha x}.$$

მოგძებნოთ (15) განტოლების მეორე, კერძო ამონახსნი, რომელიც

$$\left[x^3 + \frac{3x^2}{\alpha(2-\nu)} \right] \frac{P}{\alpha(3-\nu)} \quad \text{წევრით არის გამოწვეული.}$$

$$\Psi_3(x) = K_0 + K_1 x + K_2 x^2 + K_3 x^3,$$

$$\Psi'_3(x) = K_1 + 2K_2 x + 3K_3 x^2, \quad \Psi'''_3(x) = 2K_2 + 6K_3 x,$$

$$2K_2 x^2 + 6K_3 x^3 + K_1 x + 2K_2 x^2 + 3K_3 x^3 - \alpha K_1 x^2 - 2\alpha K_2 x^3 - 2\alpha K_3 x^4 -$$

$$\begin{aligned}
& -K_0 - K_1 x - K_2 x^2 - K_3 x^3 - \alpha \nu K_0 x + \alpha \nu K_1 x^2 + \alpha \nu K_2 x^3 + \alpha \nu K_3 x^4 = \\
& = -K_0 + \alpha \nu K_0 x + (3K_2 - \alpha K_1 + \alpha \nu K_1) x^2 + (6K_3 - 2\alpha K_2 - K_3 + \alpha \nu K_2) x^3 - (2\alpha K_3 - \alpha \nu K_3) x^4,
\end{aligned}$$

$$K_0 = 0, K_3 = 0$$

$$[3K_2 - \alpha(\nu - 1)K_1]x^2 - \alpha(2 - \nu)K_2 x^3,$$

$$\alpha(1 - \nu)K_1 - 3K_2 = \frac{3P}{\alpha^2(2 - \nu)(3 - \nu)},$$

$$\alpha(2 - \nu)K_2 = \frac{3P}{\alpha(3 - \nu)}, \quad K_2 = \frac{P}{\alpha^2(2 - \nu)(3 - \nu)},$$

$$\alpha(1 - \nu)K_1 = \frac{6P}{\alpha^2(2 - \nu)(3 - \nu)},$$

$$K_1 = \frac{6P}{\alpha^3(1 - \nu)(2 - \nu)(3 - \nu)},$$

$$\Psi_3 = \frac{6Px}{\alpha^3(1 - \nu)(2 - \nu)(3 - \nu)} + \frac{Px^2}{\alpha^2(2 - \nu)(3 - \nu)} = \left[x^2 + \frac{6x}{\alpha(1 - \nu)} \right] \frac{P}{\alpha^2(2 - \nu)(3 - \nu)}.$$

მაშასადამე, საბოლოო (15) განტოლების ამოხსნას ექნება

შემდეგი სახე:

$$\begin{aligned}
\Psi(x) = & b_0 \left[x + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha^n (n - \nu)!}{n!(n + 2)!} x^{n+1} \right] + a_0 \left[x + \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\alpha^n (n + 2 + \nu)!}{(n - 1)!(n + 3)!} x^{n+2} \right] e^{\alpha x} + \\
& + \left[x^2 + \frac{6x}{\alpha(1 - \nu)} \right] \frac{P}{\alpha^2(2 - \nu)(3 - \nu)}.
\end{aligned} \tag{16}$$

შევიტანოთ (16) გამოსახულება (14)-ის მეორეში:

$$\begin{aligned}
& x^2 \varphi''(x) + (x + \alpha x^2) \varphi'(x) - (1 - \alpha \nu x) \varphi(x) = \\
& = Ab_0 \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n (n - \nu)!}{n!(n + 2)!} x^{n+2} \right) e^{-\alpha x} + Aa_0 \left[x + \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\alpha^n (n + 2 + \nu)!}{(n - 1)!(n + 3)!} x^{n+3} \right] + \\
& + \left[x^3 + \frac{6x^2}{\alpha(1 - \nu)} \right] \frac{PAe^{-\alpha x}}{\alpha^2(2 - \nu)(3 - \nu)} - x^3 e^{-\alpha x} P.
\end{aligned} \tag{17}$$

მოვძებნოთ (17) განტოლების ამოხსნა შემდეგი სახით:

$$\varphi = \varphi_{\text{გოტ}} + Ab_0 \varphi_1 + Aa_0 \varphi_2 + \varphi_3,$$

სადაც φ_1, φ_2 და φ_3 შემდეგი განტოლებების კერძო ამონახსნებია.

$$x^2 \varphi_1''(x) + (x + \alpha x^2) \varphi_1'(x) - (1 - \alpha \nu x) \varphi_1(x) = \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n (n - \nu)!}{n!(n + 2)!} x^{n+2} \right) e^{-\alpha x} \tag{18}$$

$$x^2 \phi_2''(x) + (x + \alpha x^2) \phi_2'(x) - (1 - \alpha \nu x) \phi_2(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\alpha^n (n+2+\nu)!}{(n-1)!(n+3)!} x^{n+3} \quad (19)$$

$$x^2 \phi_3''(x) + (x + \alpha x^2) \phi_3'(x) - (1 - \alpha \nu x) \phi_3(x) = \left[x^3 + \frac{6x^2}{\alpha(1-\nu)} \right] \frac{PAe^{-\alpha x}}{\alpha^2(2-\nu)(3-\nu)} \quad (20)$$

განვიხილოთ (18)-ის კერძო შემთხვევა $\alpha \neq 0$:

$$\sum_{n=0}^{\infty} [(n+1)(n+3)C_n - \alpha(2+n-\nu)C_{n-1}] = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n (n-\nu)!}{n!(n+2)!},$$

$$n=0 \quad 1 \cdot 3 \cdot C_0 = 1, \quad C_0 = \frac{1}{3},$$

$$n=1 \quad 2 \cdot 4 \cdot C_1 - \alpha(3-\nu)C_0 = \frac{\alpha(1-\nu)}{1 \cdot 3} \quad C_1 = \frac{\alpha(2-\nu)}{3 \cdot 4}$$

$$n=2 \quad 3 \cdot 5 \cdot C_2 - \alpha(4-\nu)C_1 = \frac{\alpha^2(1-\nu)(2-\nu)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} \quad C_2 = \frac{\alpha^2(2-\nu)(3-\nu)}{3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 2},$$

$$C_n = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n (n+2-\nu)!}{(n-1)!(n+2)!}.$$

$$\text{მაშასადამე } \varphi_1 = Ab_0 \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n (n+2-\nu)!}{(n-1)!(n+2)!} x^{n+2} \right) e^{-\alpha x}.$$

ვიპოვოთ $\varphi_2(x)$ კერძო შემთხვევა:

$$x^2 \varphi_2''(x) + (x + \alpha x^2) \varphi_2'(x) - (1 - \alpha \nu x) \varphi_2(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\alpha^n (n+2+\nu)!}{(n-1)!(n+3)!} x^{n+3}.$$

$$1 \cdot 3 \cdot a_1 = -b_0, \quad a_1 = -\frac{1}{1 \cdot 3} b_0;$$

$$1 \cdot 3 \cdot b_1 = A a_0, \quad b_1 = \frac{A}{1 \cdot 3} a_0;$$

$$2 \cdot 4 \cdot a_2 = -b_1, \quad a_2 = -\frac{A}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} a_0;$$

$$b_2 = -\frac{A}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} b_0;$$

$$2 \cdot 4 \cdot b_2 = A a_1,$$

$$2 \cdot 4 \cdot b_2 = -\frac{A}{1 \cdot 3} b_0, \quad a_3 = \frac{A}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5} b_0;$$

$$3 \cdot 5 \cdot a_3 = -b_2, \quad b_3 = -\frac{A^2}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5} a_0;$$

$$3 \cdot 5 \cdot b_3 = A a_2,$$

$$\begin{aligned}
4 \cdot 6 \cdot a_4 &= -b_3, & a_4 &= -\frac{A^2}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6} a_0; \\
4 \cdot 6 \cdot b_4 &= A a_3, & b_4 &= -\frac{A^2}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6} b_0; \\
5 \cdot 7 \cdot a_5 &= -b_4, & a_5 &= -\frac{A^2}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 7} b_0; \\
5 \cdot 7 \cdot b_5 &= A a_4, & b_5 &= -\frac{A^2}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 7} a_0; \\
& & a_6 &= -\frac{A^3}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 7 \cdot 8} a_0; \\
& & b_6 &= -\frac{A^3}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 7 \cdot 8} b_0.
\end{aligned}$$

ნულოვან მიახლოებად დავუშვათ, რომ $E_N=E$: მაშინ განტოლებათა სისტემა (14) მოგვცემს:

$$\begin{aligned}
x^2 U''(x) + x U'(x) - U(x) &= -x V(x) \\
x^2 V''(x) + x V'(x) - V(x) &= A x U(x) - x^3 P,
\end{aligned} \tag{21}$$

რომლის ამოხსნა შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით:

$$U(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+1} + x^2 \frac{P}{A}, \quad V(x) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n x^{n+1} - 3x \frac{P}{A},$$

სადაც:

$$\begin{aligned}
a_1 &= -\frac{1}{1 \cdot 3} b_0, \quad b_1 = \frac{A}{1 \cdot 3} a_0, \\
a_2 &= -\frac{A}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} a_0, \quad b_2 = -\frac{A}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} b_0, \\
a_3 &= \frac{A}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5} b_0, \quad b_3 = -\frac{A^2}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5} a_0, \\
a_4 &= \frac{A^2}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6} a_0, \quad b_4 = \frac{A^2}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6} b_0, \\
a_5 &= -\frac{A^2}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 7} b_0, \quad b_5 = \frac{A^3}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 7} a_0, \\
a_6 &= -\frac{A^3}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 7 \cdot 8} a_0, \quad b_6 = -\frac{A^3}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 7 \cdot 8} b_0, \\
a_7 &= \frac{A^3}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 7 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 7 \cdot 8 \cdot 9} b_0,
\end{aligned}$$

$$a_8 = \frac{A^4}{8!(8+2)!} a_0.$$

$$\begin{aligned} \Psi(x) = & b_0 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n (n-\nu)!}{n!(n+2)!} x^{n+1} - \frac{a_0}{3} \left(\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\alpha^n (n+2+\nu)!}{(n-1)!(n+3)!} x^{n+3} \right) e^{\alpha x} + \\ & + \left[x^3 + \frac{3x^2}{\alpha(1-\nu)} \right] \frac{P}{\alpha^2(2-\nu)(3-\nu)}. \end{aligned} \quad (22)$$

(22)-ის გათვალისწინებით განტოლება (19) მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\begin{aligned} x^2 \phi''(x) + (x + \alpha x^2) \phi'(x) - (1 - \alpha \nu x) \phi(x) = \\ = A b_0 \left(\sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \frac{(n-\nu)!}{n!(n+2)!} x^{n+2} \right) e^{-\alpha x} - A \frac{a_0}{3} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{\alpha^n (n+1+\nu)!}{n!(n+3)!} x^{n+3} + \\ + \left[x^3 + \frac{3x^2}{\alpha(1-\nu)} \right] \frac{P e^{-\alpha x}}{\alpha^2(2-\nu)(3-\nu)} - x^3 e^{-\alpha x} P. \end{aligned} \quad (23)$$

ვეძებთ (23)-ის ამოხსნა შემდეგი ჯამის სახით:

$$\phi = \phi_{\text{ფორ}} + \phi_1(x) + \phi_2(x) + \phi_3(x),$$

სადაც თითოეული შესაკრები შემდეგი განტოლებების კერძო ამონახსნია:

$$x^2 \phi_1''(x) + (x + \alpha x^2) \phi_1'(x) - (1 - \alpha \nu x) \phi_1(x) = A b_0 \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n (n-\nu)!}{n!(n+2)!} x^{n+2} \right) e^{-\alpha x},$$

$$\phi_1(x) = A \frac{b_0}{3} \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n (n+1-\nu)!}{n!(n+3)!} x^{n+2} \right) e^{-\alpha x},$$

$$x^2 \phi_2''(x) + (x + \alpha x^2) \phi_2'(x) - (1 - \alpha \nu x) \phi_2(x) = -A \frac{a_0}{3} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{\alpha^n (n+1+\nu)!}{n!(n+3)!} x^{n+3},$$

$$\phi_2(x) = -\frac{A a_0}{3} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n C_n x^{n+3},$$

სადაც C_n გარკვეული კოეფიციენტებია (მათი ცუდი გამოსახულების გამო არ ვწერთ).

$$x^2 \phi_3''(x) + (x + \alpha x^2) \phi_3'(x) - (1 - \alpha \nu x) \phi_3(x) = \left[x^3 + \frac{3x^2}{\alpha(1-\nu)} \right] \frac{P e^{-\alpha x}}{\alpha^2(2-\nu)(3-\nu)},$$

$$\phi_3(x) = - \left[x^2 + \frac{6x}{\alpha(1-\nu)} \right] \frac{P e^{-\alpha x}}{\alpha^2(2-\nu)(3-\nu)^2}.$$

მაშასადამე, (23) განტოლების ამოხსნას ექნება შემდეგი სახე.

$$\varphi(x) = A \frac{b_0}{3} \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n (n+1-\nu)!}{n!(n+3)!} x^{n+2} \right) e^{-\alpha x} + \frac{A a_0}{3} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n C_n x^{n+3} +$$

$$+ \left[x^2 + \frac{6x}{\alpha(1-\nu)} \right] \frac{P e^{-\alpha x}}{\alpha^2 (2-\nu)(3-\nu)^2}.$$

მობრუნების კუთხის მიხედვით ჩვენ შეგვიძლიან ადვილად განვსაზღვროთ როგორც ძალოვანი ფაქტორები, ასევე გადაადგილებები.

2.1.8. მთლიანი წრიული ფირფიტა

წონასწორობის განტოლება:

$$\frac{d^2 \varphi}{dr^2} + \left(\frac{1}{r} + \frac{d \ln D}{dr} \right) \frac{d \varphi}{dr} - \left(\frac{1}{r^2} - \frac{\nu}{r} \frac{d \ln D}{dr} \right) \varphi = -\frac{1}{D} \frac{\lambda}{r} \int_0^r q(r) r dr,$$

$$q(r) = \lambda q(r) = \text{const.} \quad (q(r) \equiv 1),$$

$$D = \frac{E_N h^3}{12(1-\nu^2)}, \quad E_N = E e^{\alpha \frac{r}{a} + \beta},$$

$$D = \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)} e^{\alpha \frac{r}{a} + \beta} = D_0 e^{\alpha \frac{r}{a} + \beta} = D_0 y,$$

$$\frac{d^2 \varphi}{dr^2} + \left(\frac{1}{r} + \frac{d \ln D}{dr} \right) \frac{d \varphi}{dr} - \left(\frac{1}{r^2} - \frac{\nu}{r} \frac{d \ln D}{dr} \right) \varphi = \frac{\lambda r}{2D}.$$

შემოვიღოთ აღნიშვნები:

$$\frac{r}{a} = x, \quad \frac{E_N}{E} = y + \frac{6(1-\nu^2)a^3 \lambda}{E h^3} e^{-\beta} = P,$$

$$\frac{d^2 \varphi}{dr^2} + \left(\frac{1}{x} + \frac{d \ln y}{dx} \right) \frac{d \varphi}{dx} - \left(\frac{1}{x^2} - \frac{\nu}{x} \frac{d \ln y}{dx} \right) \varphi = -x e^{-\alpha x} P.$$

ვინაიდან $y = e^{\alpha x + \beta}$ ($\ln y = \alpha x + \beta$), ამიტომ გვქვია:

$$\frac{d^2 \varphi}{dr^2} + \left(\frac{1}{x} + \alpha \right) \frac{d \varphi}{dx} - \left(\frac{1}{x^2} - \frac{\alpha \nu}{x} \right) \varphi = -x e^{-\alpha x} P.$$

ამოხსნას აქვს შემდეგი სახე:

$$\varphi(x) = a_0 \left[x + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\alpha^n (n+\nu)!}{n!(n+2)!} x^{n+1} \right] + \left[x^2 + \frac{3x}{\alpha(2-\nu)} \right] \frac{P}{\alpha(3-\nu)} e^{-\alpha x},$$

$$\begin{aligned}\phi(x) &= a_0 \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\alpha^n (n+\nu)!}{n!(n+2)!} (n+1)x^n \right] + \left[2x + \frac{3}{\alpha(2-\nu)} - \alpha^2 - \frac{3x}{(2-\nu)} \right] \frac{P}{\alpha(3-\nu)} e^{-\alpha x} = \\ &= a_0 \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\alpha^n (n+\nu)!}{n!(n+2)!} (n+1)x^n \right] + \left[-\alpha^2 + \frac{1-2\nu}{2-\nu} x + \frac{3}{\alpha(2-\nu)} \right] \frac{P}{\alpha(3-\nu)} e^{-\alpha x}.\end{aligned}$$

მომეწიგებისათვის გვექნება:

$$M_r = \frac{a^2 \lambda}{2P} e^{\alpha x} \left[\frac{d\phi}{dx} + \frac{\nu}{x} \phi \right];$$

$$M_\theta = \frac{a^2 \lambda}{2P} e^{\alpha x} \left[\nu \frac{d\phi}{dx} + \frac{1}{x} \phi \right];$$

$$\begin{aligned}M_r &= \frac{a^2 \lambda}{2P} \left\{ \left[(1+\nu)a_0 + a_0 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\alpha^n (n+\nu)!}{n!(n+2)!} (n+1)x^n \right] e^{\alpha x} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{P}{3-\nu} x^2 + \frac{(1-\nu^2)P}{\alpha(2-\nu)(3-\nu)} \right\};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_\theta &= \frac{a^2 \lambda}{2P} \left\{ \left[(1+\nu)a_0 + a_0 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\alpha^n (n+\nu)!}{n!(n+2)!} (n\nu + \nu + 1)x^n \right] e^{\alpha x} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\nu P}{3-\nu} x^2 + \frac{2(1-\nu^2)P}{\alpha(2-\nu)(3-\nu)} x + \frac{3(1+\nu)P}{\alpha^2(2-\nu)(3-\nu)} \right\},\end{aligned}$$

ანდა გაშლილი სახით:

$$M_r = \frac{a^2 \lambda}{2P} \left[(A_0 + A_1 x + A_2 x^2 + A_3 x^3 + A_4 x^4 + A_5 x^5 + \dots) e^{\alpha x} - (\beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2) P \right];$$

$$M_\theta = \frac{a^2 \lambda}{2P} \left[(C_0 + C_1 x + C_2 x^2 + C_3 x^3 + C_4 x^4 + C_5 x^5 + \dots) e^{\alpha x} - (D_0 + D_1 x + D_2 x^2) P \right];$$

სადღგ

$$A_0 = (1+\nu)a_0 = 1,3a_0,$$

$$A_1 = -\frac{\alpha(1+\nu)(2+\nu)}{1 \cdot 3} a_0 = 0,09568a_0,$$

$$A_2 = -\frac{\alpha(1+\nu)(2+\nu)(3+\nu)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} a_0 = 0,0037889a_0,$$

$$A_3 = -\frac{\alpha(1+\nu)(2+\nu)(3+\nu)(4+\nu)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5} a_0 = 0,000104a_0,$$

$$A_3 = 0,000022a_0,$$

$$a_k = -\frac{\alpha(k+\nu)}{k(k+2)} a_{k-1},$$

$$B_0 = -\frac{3(1+\nu)}{\alpha^2(2-\nu)(3-\nu)} = -92,19544,$$

$$B_1 = -\frac{1-\nu^2}{\alpha(2-\nu)(3-\nu)} = +2,06518,$$

$$B_2 = -\frac{1}{3-\nu} = 0,37037,$$

$$C_0 = (1+\nu)a_0 = 1,3a_0,$$

$$C_1 = -\frac{\alpha(1+\nu)(2\nu+1)}{1 \cdot 3} = 0,06656a_0,$$

$$C_2 = -\frac{\alpha^2(1+\nu)(2+\nu)(3\nu+1)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} = 0,001517568a_0,$$

$$C_3 = -\frac{\alpha^3(1+\nu)(2+\nu)(3+\nu)(4\nu+1)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5} = 0,0000214a_0,$$

$$C_4 = 0,000000214a_0,$$

$$D_0 = -\frac{3(1+\nu)}{\alpha^2(2-\nu)(3-\nu)} = -92,19544,$$

$$D_1 = -\frac{2(1-\nu^2)}{\alpha(2-\nu)(3-\nu)} = +4,13036,$$

$$D_2 = -\frac{\nu}{3-\nu} = 0,11111,$$

$$M_r = \frac{a^2 \lambda}{2P} [(1,3+0,09568x+0,00379x^2+0,000104x^3+0,00002x^4)a_0 e^{\alpha x} +$$

$$+(92,19544-2,06518x-0,37037x^2)P];$$

$$M_\theta = \frac{a^2 \lambda}{2P} [(1,3+0,06656x+0,00152x^2+0,00002x^3+0,000002x^4)a_0 e^{\alpha x} +$$

$$+(92,19544-4,13036x-0,11111x^2)P].$$

განგებულა a_0 .

როცა $x=1, M_r=0$

$$\text{გვექნება: } 1,27083a_0 = -89,75989P,$$

$$a_0 = -70,63092P.$$

მაშასადამე:

$$M_r = \frac{a^2 \lambda}{2} [92,19544-2,06518x-0,37037x^2] - (91,82020+6,75797x+0,26769x^2+$$

$$+0,00734x^3)e^{\alpha x}];$$

$$M_{\theta} = \frac{a^2 \lambda}{2} [92,19544 - 3,13036x - 0,11111x^2) - (91,82020 + 4,70119x + 0,10736x^2 + 0,00141x^3)e^{\alpha x}].$$

x	x^2	αx	$e^{\alpha x}$	$6,75797x$	$0,26769x^2$	$(\sum)$
0	0	0	1	0	0	-91,8200
0,1	0,01	-0,0096	0,99106	0,65797	0,00267	-92,48084
0,2	0,04	-0,0192	0,9802	1,35159	0,01071	-93,18250
0,3	0,09	-0,0288	0,97103	2,02739	0,02409	-93,87168
0,4	0,16	-0,0384	0,9625	2,70319	0,04283	-94,56622
0,5	0,25	-0,0480	0,95313	3,37898	0,06692	-95,26610
0,6	0,36	-0,0576	0,9439	4,05478	0,09637	-95,97135
0,7	0,49	-0,0672	0,9352	4,73058	0,13117	-96,68195
0,8	0,64	-0,0768	0,9263	5,40638	0,17132	-97,39790
0,9	0,81	-0,0864	0,91823	6,08217	0,21682	-98,11910

x	$-2,06518x$	$-0,37037x^2$	I $(\sum)$	II $(\sum e^{\alpha x})$	$M_r, \frac{a^2 \lambda}{2}$	$M_r, \text{მუდგმ.}$
0	-0	-0	92,19544	-91,8200	0,37544	0,4125
0,1	-0,20652	-0,00370	91,98522	-91,65370	0,33152	0,4084
0,2	-0,41304	-0,01481	91,76759	-91,33748	0,32011	0,3960
0,3	-0,61955	-0,03333	91,54256	-91,15222	0,30034	0,3754
0,4	-0,82607	-0,05926	91,31011	-91,01997	0,29014	0,3465
0,5	-1,03259	-0,09259	91,07026	-90,80098	0,26928	0,3094
0,6	-1,23911	-0,13333	90,82300	-90,58928	0,23372	0,2640
0,7	-1,44563	-0,18148	90,56833	-90,41793	0,15040	0,2104
0,8	-1,65214	-0,23704	90,30626	-90,22065	0,08561	0,1485
0,9	-1,85866	-0,29999	90,09598	-90,07342	0,02256	0,0784
1,0	-2,06518	-0,37037	89,75989	-89,7598	0	0

x	-4,13036x	-0,11111x ²	$\sum I$	4,70119x	0,10736x ²	$\sum IIe^{\alpha x}$	M ₀	M ₀ მუდმ.
0	-0	0	92,19544	0	0	91,82020	0,37524	0,4125
0,2	-0,82607	-0,00444	91,36493	0,94024	0,00429	90,92801	0,33692	0,40300
0,4	-1,65214	-0,01778	90,52552	1,88048	0,01718	90,20344	0,32208	0,3745
0,6	-2,47822	-0,0400	89,67722	2,82071	0,03865	89,36804	0,30918	0,3270
0,8	-3,30429	-0,07111	88,82004	3,76095	0,08696	88,61737	0,20267	0,2605
1,0	-4,13036	-0,11111	87,95397	4,70119	0,10736	87,78335	0,17062	0,1750

x	M _r ²	-M _r M ₀	M ₀ ²	$\left(\frac{\sigma_s a^2 \lambda h^2}{12}\right)^2$	$\sigma_s \frac{a^2 \lambda h^2}{12}$	$\sigma_s, \frac{\partial \partial}{\partial \partial^2}$	N/10 ¹⁷
0	0,14095	-0,14095	0,14095	0,14095	0,37544	20,782	270
0,2	0,18499	-0,18792	0,19090	0,18797	0,33356	9,45	91
0,4	0,08418	-0,09345	0,10373	0,09446	0,30734	8,83	55
0,6	0,05462	-0,07226	0,09559	0,07795	0,27919	8,02	48
0,8	0,00733	-0,01735	0,04107	0,03105	0,17651	5,06	8
1,0	0	-0	(0,17062) ²	(0,17062) ²	0,17062	4,9	0

$$0,17062 \frac{a^2 \lambda h^2}{12} = 4,9,$$

$$4,2655 \frac{h^2 \lambda}{12} = 4,9,$$

$$\frac{h^2 \lambda}{12} = 1,14875.$$

$$\begin{aligned} \varphi'' = & -2 \cdot 1 \frac{1+\nu}{1 \cdot 3} + 3 \cdot 2 \frac{(1+\nu)(2+\nu)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} x - 4 \cdot 3 \frac{(1+\nu)(2+\nu)(3+\nu)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5} x^2 + \dots \\ & + \frac{1}{x} - 2 \cdot 1 \frac{1+\nu}{1 \cdot 3} + 3 \frac{(1+\nu)(2+\nu)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} x - 4 \cdot 3 \frac{(1+\nu)(2+\nu)(3+\nu)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5} x^2 + \dots \\ & + \alpha - 2\alpha \frac{1+\nu}{1 \cdot 3} + 3\alpha \frac{(1+\nu)(2+\nu)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} x^2 - 4\alpha \frac{(1+\nu)(2+\nu)(3+\nu)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5} x^3 \dots \\ & - \frac{1}{x} + \frac{1+\nu}{1 \cdot 3} - \frac{(1+\nu)(2+\nu)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} x^2 + \frac{(1+\nu)(2+\nu)(3+\nu)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5} x^2 - \frac{(1+\nu)(2+\nu)(3+\nu)(4+\nu)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6} x^3 + \\ & + \alpha \nu - \frac{1+\nu}{1 \cdot 3} x + \frac{(1+\nu)(2+\nu)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} x^2 - \frac{(1+\nu)(2+\nu)(3+\nu)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5} x^3. \end{aligned}$$

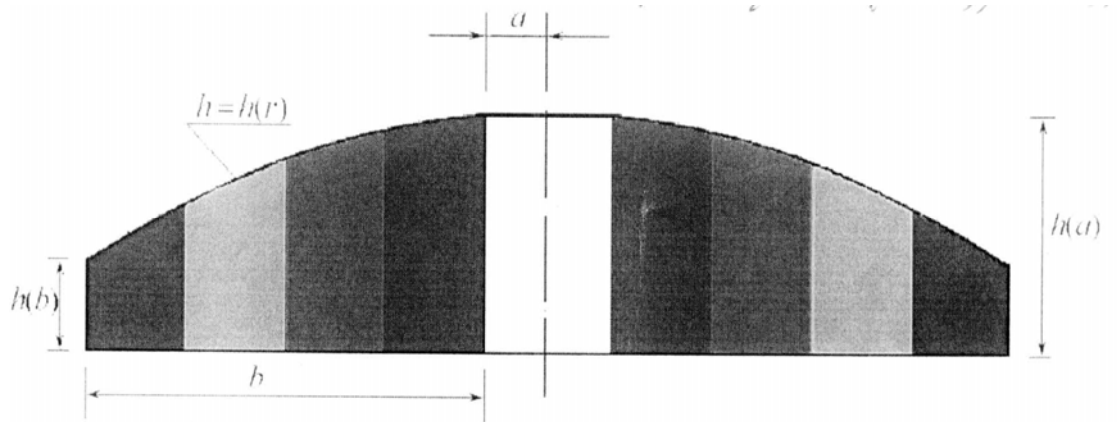
$$\begin{aligned}
& -\frac{4\alpha(1+\nu)}{3} + \alpha + \frac{\alpha + \nu\alpha}{3} + \alpha\nu = \frac{-4\alpha - 4\alpha\nu + 3\alpha + \alpha + \alpha\nu + 3\alpha\nu}{3} = 0. \\
& \frac{\alpha^2(1+\nu)(2+\nu)}{3} - \frac{2\alpha^2 + 2\alpha^2\nu}{3} - \frac{\alpha^2(1+\nu)(2+\nu)}{24} - \frac{\alpha^2\nu + \alpha^2\nu^2}{3}, \\
& \alpha^2 + 3\alpha^2\nu + 3\alpha^2\nu^2 - 2\alpha^2 - 2\alpha^2\nu - \alpha^2\nu - \alpha^2\nu^2, \\
& \varphi(x) = x - \frac{\alpha(1+\nu)!}{1 \cdot 3} x^2 + \frac{\alpha^2(2+\nu)!}{2!(2+1)!} x^3 - \frac{\alpha(3+\nu)!}{3!(3+1)!} x^4, \\
& \varphi'(x) = 1 - \frac{2\alpha(1+\nu)x}{3} + \frac{3\alpha^2(1+\nu)(2+\nu)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} x^2 - \frac{4\alpha^3(3+\nu)!}{3!(3+1)!} x^3, \\
& \varphi''(x) = -\frac{2\alpha(1+\nu)}{3} + \frac{6\alpha^2(1+\nu)(2+\nu)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} x - \frac{12\alpha^3(3+\nu)!}{3!(3+1)!} x^2 - \frac{20(4+\nu)!}{4!(4+1)!} x^3. \\
& E_N = Ee^{ax+\beta}, \\
& \text{როცა } x=0, E_N=1, 1E, 1, 1E=Ee^\beta, \\
& 1, 1=e^\beta, \beta=0,096, \beta=\ln 1, 1=0,096. \\
& \text{როცა } x=1, E_N=E, \\
& 1=e^{a+\beta}, a+\beta=0, a=-\beta=-0,096, \\
& E_N=Ee^{ax+\beta}. \\
& \text{როცა } x=0, E_N=0,9E, \\
& 0,9=e^\beta, \beta=-0,105. \\
& \text{როცა } x=1, E_N=E, \\
& 1=e^{a+\beta}, a+\beta=0, a=-\beta=0,105 \\
& \beta=\ln 1, 1=\ln 11 - \ln 10.
\end{aligned}$$

2.2. ლითონის ფირიფიტებისა და გარსების ოპტიმალური დაპროექტება უწყვეტი არაერთგვაროვანი მასალის გამოყენებით

ტექნიკის მრავალ დარგში და განსაკუთრებით რეაქტორების მშენებლობაში გვხვდება ისეთი შემთხვევები, როდესაც ზოგიერთი კონსტრუქციული მოსაზრების გამო შეზღუდულია კონსტრუქციის გეომეტრიული მახასიათებლები და დატვირთვის სახეობები.

ასეთ შემთხვევებში შესაძლებელია გამოყენებული იქნეს ისეთი მასალებისგან შედგენილი კონსტრუქცია, რომელსაც გააჩნია უწყვეტად

ცვლადი დრეკადობის მახასიათებელი. ჩვენ შემთხვევაში ეს შესაძლებელი იქნება მაშინ, თუ ნავთობს მოვათავსებთ ნეიტრონებით დასხივების ქვეშ.



ნახ. 10. დამრეცი გარსი ცვლადი სიხისტით (არასიმეტრიული დისკო)

განხილულია ცვლადი სიხისტის არასიმეტრიული დისკო (ნახ. 10), რომელიც შემოსაზღვრულია ზევიდან ზედაპირით $h_n = h(r)$, ქვევიდან სიბრტყით $h = 0$, ხოლო გვერდებიდან ცილინდრული ზედაპირით $r = a$ და $r = b$ ($a < b$).

მოცემული გარსების გაანგარიშებები საჭიროებს შემდეგი განტოლებათა სისტემის ინტეგრირებას [63, 64]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r} + \frac{d \ln h^3}{dr} \right) \frac{d\varphi}{dr} - \left(\frac{1}{r^2} + \frac{\nu_n}{2} \frac{d \ln h^3}{dr} \right) \varphi &= -\frac{Q_r}{D_n} + \frac{1}{r D_n} \cdot \frac{d\xi}{dr} (r T_r); \\ \frac{\partial^2 r T_r}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r} + \frac{d \ln h}{dr} \right) \frac{d(r T_r)}{dr} - \left(\frac{1}{r^2} + \frac{\nu_n}{2} \frac{d \ln h}{dr} \right) (r T_r) &= -\frac{E_n h}{r} \frac{d\xi}{dr} \varphi, \end{aligned} \quad (24)$$

$$\text{სადაც } Q_r = \frac{a}{r} Q_a + \frac{\lambda}{r} \int_a^r q(r) dr; \quad D_n = \frac{E_n h^3}{12(1-\nu_n^2)}$$

φ – ფილის ცილინდრული კვეთის მობრუნების კუთხეა; E_n და ν_n – იუნგის მოდულის და პუასონის კოეფიციენტების მნიშვნელობებია; T_r – რადიალური ძაბვა, Q_r – განივი ძალა, D_n – დასხივების შედეგად მიღებული ცვლადის სიხისტე, Q_a – წარმოადგენს გადამჭრელი ძალის სიდიდეს, რომელიც მოქმედებს შიგა კონტურის გასწვრივ, რომელიც ასევე შეიძლება იყოს უცნობი რეაქციის ძალა, ხოლო რაც შეეხება $q(r)$, იგი წარმოადგენს „ერთეულოვან“ დატვირთვას, რომლის გაზრდა λ -ჯერ იწვევს პლასტიკურ დეფორმაციას, ξ – შუა ზედაპირის აპლიკატა.

ამოცანის ამოხსნის გამარტივებისათვის შემოვიღოთ ახალი ცვლადები

$$\begin{aligned}\varphi &= \frac{1}{x\sqrt{xy}}V; & \frac{rT_r}{ah_0E} &= \frac{1}{x\sqrt{xy}}U; \\ x &= \frac{r}{a}; & y &= \frac{D_n}{D_0}.\end{aligned}\quad (25)$$

(25)-ის გათვალისწინებით (24) მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\begin{cases} \frac{d^2V}{dx^2} - F_1(x)V = A_nF_2(x) + P_nF_3(x) + F_4(x)U; \\ \frac{d^2U}{dx^2} - F_5(x)U = F_6(x)V. \end{cases}\quad (26)$$

(26) დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემას შევცვლით ექვივალენტური ვოლტერის ტიპის ინტეგრალური განტოლებით. ამ მიზნით ვისარგებლებთ შ. მიქელადის მიერ განზოგადებული ტეილორის ფორმულით [3].

$$\begin{aligned}V(x) &= V(1) + (x-1)V'(1) + \\ &+ \sum_m \eta_m^{(V)} + \sum_n (x-l_n^{(V)})R_n^{(V)} + \int_1^x (x-t)V''(t)dt; \\ U(x) &= U(1) + (x-1)U'(1) + \\ &+ \sum_m \eta_m^{(U)} + \sum_n (x-l_n^{(U)})R_n^{(U)} + \int_1^x (x-t)U''(t)dt.\end{aligned}$$

(26)-ის შეტანის შედეგად მივიღებთ:

$$\begin{aligned}V''(x) &= A_nF_2(x) + P_nF_3(x) + F_1(x) \times \\ &\times \left[V(1) + (x-1)V'(1) + \sum_m \eta_m^{(V)} + \sum_n (x-l_n^{(V)})R_n^{(V)} + \int_1^x (x-t)V''(t)dt \right] + \\ &+ F_4(x) \left[U(1) + (x-1)U'(1) + \sum_m \eta_m^{(U)} + \sum_n (x-l_n^{(U)})R_n^{(U)} + \int_1^x (x-t)U''(t)dt \right];\end{aligned}\quad (27)$$

$$\begin{aligned}U''(x) &= F_6(x) \times \\ &\times \left[V(1) + (x-1)V'(1) + \sum_m \eta_m^{(V)} + \sum_n (x-l_n^{(V)})R_n^{(V)} + \int_1^x (x-t)V''(t)dt \right] + \\ &+ F_5(x) \left[U(1) + (x-1)U'(1) + \sum_m \eta_m^{(U)} + \sum_n (x-l_n^{(U)})R_n^{(U)} + \int_1^x (x-t)U''(t)dt \right],\end{aligned}\quad (28)$$

სადაც შემოღებულია შემდეგი აღნიშვნები:

$$A_n = \frac{12(1-\nu^2)a^2Q_a}{E_n h_0^3}; \quad P_n = \frac{6(1-\nu^2)a^3\lambda}{E_n h_0^3};$$

$$F_1(x) = \frac{0,75}{x^2} + \frac{1,5-3\nu}{xy} \frac{dy}{dx} + \frac{1,5}{y} \frac{d^2y}{dx^2} + \frac{0,75}{y^2} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2;$$

$$F_2(x) = \frac{1}{y\sqrt{xy}}; \quad F_3(x) = \frac{2}{y\sqrt{xy}} \int_0^1 q(ax)xdx;$$

$$F_4(x) = \frac{6(1-\nu^2)}{h_0} \frac{1}{xy} \frac{dy}{dx}; \quad F_6(x) = \frac{h_0}{2a} \frac{1}{xy} \frac{dy}{dx};$$

$$F_5(x) = \frac{0,75}{x^2} + \frac{0,5-\nu_n}{xy} \frac{dy}{dx} + \frac{0,5}{y} \frac{d^2y}{dx^2} - \frac{0,75}{y^2} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2.$$

$\eta_m^{(V)}, \eta_m^{(U)}, R_n^{(V)}, R_n^{(U)}$ -ით აღნიშნულია $V(x)$, $U(x)$, $V'(x)$ და $U'(x)$ -ის ნახტომები წვეგების სათანადო წერტილებში ($x=l_m$, $x=l_n$), ხოლო $V(1)$, $V'(1)$, $U(1)$ და $U'(1)$ უცნობი სიდიდეებია, რომლებიც განისაზღვრება სასაზღვრო პირობებით.

რადიალური და წრიული მომენტები და ნორმალური ძალები ახალი ცვლადების დახმარებით წარმოგვიდგება შემდეგი სახით:

$$M_r = \frac{y^2}{\sqrt{xy}} \left[\frac{dV}{dx} - \left(\frac{0,5-\nu_n}{x} + \frac{1,5}{y} \frac{dy}{dx} \right) V \right] \frac{a^2\lambda}{2P_n};$$

$$M_\theta = \frac{y^2}{\sqrt{xy}} \left[\frac{dV}{dx} + \left(\frac{1/\nu_n-0,5}{x} - \frac{1,5}{y} \frac{dy}{dx} \right) V \right] \frac{\nu_n a^2\lambda}{2P_n}; \quad (29)$$

$$T_r = \frac{y}{x\sqrt{xy}} E_n h_0 U;$$

$$T_\theta = \frac{y}{\sqrt{xy}} \left[\frac{dU}{dx} - \left(\frac{0,5}{x} - \frac{0,5}{y} \frac{dy}{dx} \right) U \right] E_n h_0.$$

რაც შეეხება ჩაღუნვას, ის განისაზღვრება ფორმულით:

$$W = -a \int \frac{1}{y\sqrt{xy}} V(x) dx + C,$$

სადაც C საინტეგრო მუდმივაა, რომელიც განისაზღვრება სასაზღვრო პირობების დახმარებით.

ინტეგრალურ განტოლებათა სისტემის ამოხსნა წარმოებს რიცხვითი მეთოდით, მ. მიქელაძის მიერ დამუშავებული რეკურენტული ფორმულის დახმარებით [66].

ნახტომთა სიდიდეები განისაზღვრებიან სრულიად განსაზღვრული ფაქტორთა სიდიდეების უწყვეტობის პირობებიდან.

ჩვენ განხილული გვაქვს ის კერძო შემთხვევა, როცა სიხისტე D_n იცვლება უწყვეტად წრფივი $D_n = D_0 \left[-\frac{5}{8}(z-9) \right]$ კანონის სახით, ასეთ შემთხვევაში ნახტომთა სიდიდეები $\eta_m^{(V)}, \eta_n^{(U)}, R_m^{(V)}, R_n^{(U)}$ ნულის ტოლი არიან, ხოლო D_0 კი წარმოადგენს გარკვეულ ფიქსირებულ სიდიდეს, რომელიც განისაზღვრება პლასტიკურობის პირობიდან.

ვიხილავთ წრიულ (რგოლურ) ფირფიტას, რომელიც განიცდის თანაბრად განაწილებული $q_r = \lambda q(ax)$ დატვირთვისა და შიგა კონტურის გასწვრივ მოქმედ გადამჭრელი ძალების ქმედებას. ვიგულისხმობთ, რომ ფირფიტის შემადგენელი მასალის სიხისტე D_n უწყვეტად იცვლება მთელ საინტეგრირებელ $1 \leq x \leq 5$ შუალედში კანონით

$$D = D_0(-5/8(x-9)) \quad (y = -5/8(x-9))$$

დავუშვათ $a = 10$ სმ, $b = 50$ სმ, $\nu = 0,3$, $h = 5$ სმ, $\alpha = -0,15$, $q(ax) = 1$. რაც შეეხება λ და D_0 პარამეტრებს, ისინი ჯერჯერობით ჩავთვალოთ უცნობებად.

იმის გამო, რომ ფირფიტის სიხისტე უწყვეტად იცვლება, ნახტომის სიდიდეები η_m და R_n ნულის ტოლია. ამოხსნაში შევა მხოლოდ პირველი ოთხი შესაკრები. რიცხვითი რეალიზაციის მიზნით დავყოთ $1 \leq x \leq 5$ შუალედი 9 ტოლ ნაწილად ისე, რომ $\delta = 0,5$ ბიჯი და შევადგინოთ დაყოფის თითოეული x_k -ური წერტილისათვის ამოხსნაში მონაწილე ფუნქციების მნიშვნელობები

x_k	x_k	$F_1(x_k)$	$F_2(x_k)$	$F_3(x_k)$
0	1,0	0,686719	1,0	0
1	1,5	0,293333	0,899492	-1,124366
2	2,0	0,159949	0,863919	-2,591757
3	2,5	0,100829	0,863565	-4,533718
4	3,0	0,070832	0,888883	-7,111111
5	3,5	0,054849	0,937685	-10,548959
6	4,0	0,046875	1,011929	-15,178929
7	4,5	0,044444	1,117403	-21,510014
8	5,0	0,047875	1,264912	-30,357881

თუ გამოვიყენებთ მ. მიქელადის რეკურენტულ ფორმულებს, მივიღებთ:

$$Z_1(x_k) = F_2(x_k) + \delta^2 F_1(x_k) \left[\frac{k}{2} Z_1(x_0) + (k-1)Z_1(x_1) + (k-2)Z_1(x_2) + \dots + Z_1(x_{k-1}) \right]$$

$$Z_2(x_k) = F_3(x_k) + \delta^2 F_1(x_k) \left[\frac{k}{2} Z_2(x_0) + (k-1)Z_2(x_1) + (k-2)Z_2(x_2) + \dots + Z_2(x_{k-1}) \right]$$

$$Z_3(x_k) = F_1(x_k) + \delta^2 F_1(x_k) \left[\frac{k}{2} Z_3(x_0) + (k-1)Z_3(x_1) + (k-2)Z_3(x_2) + \dots + Z_3(x_{k-1}) \right]$$

$$Z_4(x_k) = (x-1)F_1(x_k) + \delta^2 F_1(x_k) \left[\frac{k}{2} Z_4(x_0) + (k-1)Z_4(x_1) + (k-2)Z_4(x_2) + \dots + Z_4(x_{k-1}) \right]$$

$$Z_5(x_k) = (x-1)F_1(x_k) + \delta^2 F_1(x_k) \left[\frac{k}{2} Z_5(x_0) + (k-1)Z_5(x_1) + (k-2)Z_5(x_2) + \dots + Z_5(x_{k-1}) \right]$$

$$Z_6(x_k) = (x-\ln)F_1(x_k) + \delta^2 F_1(x_k) \left[\frac{k}{2} Z_6(x_0) + (k-1)Z_6(x_1) + (k-2)Z_6(x_2) + \dots + Z_6(x_{k-1}) \right]$$

საბოლოოდ რადიალური და რგოლური მომენტებისათვის მივიღებთ:

$$M_r(1,0) = (0,499 + 12V'(1) - 0,006246V(1))a^2 \lambda / P$$

$$M_r(1,5) = (0,181006A + 0,104106P + 0,119535V(1) + 0,396292V'(1))a^2 \lambda / P$$

$$M_r(2,0) = (0,291639A - 0,364210P + 0,150146V(1) + 0,356518V'(1))a^2 \lambda / P$$

$$M_r(2,5) = (0,368844A - 0,747329P + 0,153365V(1) + 0,332728V'(1))a^2 \lambda / P$$

$$M_r(3,0) = (0,427064A - 1,246873P + 0,153989V(1) + 0,314415V'(1))a^2 \lambda / P$$

$$M_r(3,5) = (0,472406A - 1,854459P + 0,147693V(1) + 0,29827V'(1))a^2 \lambda / P$$

$$M_r(4,0) = (0,50818A - 2,565375P + 0,139675V(1) + 0,283069V'(1))a^2 \lambda / P$$

$$M_r(4,5) = (0,53643A - 3,375499P + 0,130706V(1) + 2,268264V'(1))a^2 \lambda / P$$

$$M_r(5,0) = (0,558493A - 4,281828P + 0,121215V(1) + 0,253600V'(1))a^2 \lambda / P$$

$$M_\theta(1,0) = (0,150016V(1) + 0,453173V'(1))a^2 \lambda / P$$

$$M_\theta(1,5) = (0,082445A - 0,031253P + 0,280028V(1) + 0,231139V'(1))a^2 \lambda / P$$

$$M_\theta(2,0) = (0,151309A - 0,145846P + 0,209724V(1) + 0,243538V'(1))a^2 \lambda / P$$

$$M_\theta(2,5) = (0,201639A - 0,327326P + 0,170212V(1) + 0,235985V'(1))a^2 \lambda / P$$

$$M_{\theta}(3,0)=(0,237133A-0,563480P+0,143209V(1)+0,221275V'(1))a^2\lambda/P$$

$$M_{\theta}(3,5)=(0,26091A-0,844541P+0,122407V(1)+0,203755V'(1))a^2\lambda/P$$

$$M_{\theta}(4,0)=(0,275365A-1,161892P+0,105185V(1)+0,185263V'(1))a^2\lambda/P$$

$$M_{\theta}(4,5)=(0,282305A-1,50703P+0,090306V(1)+0,16684V'(1))a^2\lambda/P$$

$$M_{\theta}(5,0)=(0,283149A-1,872508P+0,077146V(1)+0,148516V'(1))a^2\lambda/P$$

როცა ფილის გარე კონტური თავისუფალია და შიგა კონტური კი თავისუფლადაა დაყრდნობილი სასაზღვრო პირობებს, ექნება სახე:

$$x=1, M_r=0, Q_{\theta}=0$$

$$x=5, M_r=0, W=0$$

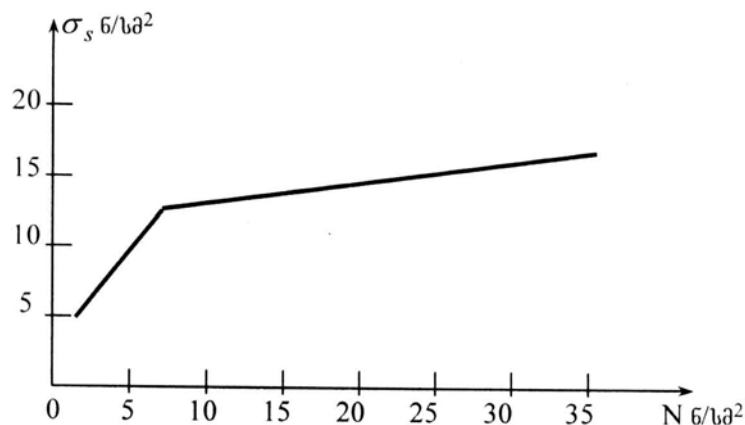
შესაბამის ალგებრულ განტოლებათა სისტემის ამოხსნით მივიღებთ:

$$A=0, V(1)=1,59526+P, V'(1)=0,01993525P$$

$$c=5796,2532P \quad P=6(1-\nu^2)a^3\lambda/Eh_0^3$$

მაშასადამე, მომენტების გამოსახულება შეიცავს უცნობ პარამეტრს λ და D_0 , რომლებიც განისაზღვრებიან პლასტიკურობის პირობებიდან:

$$M_r^2 - M_r M_{\theta} + M_{\theta}^2 = M_s^2 \quad (30)$$



ნახ. 11. დასხივების ფუნქციის გრაფიკი

განხილულია წრიული რგოლური ფირფიტა, რომელიც განიცდის ნეიტრონული (რადიაქტიური) დასხივების ქმედებას. ამ შემთხვევაში (22) განტოლება მიიღებს სახეს

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r} + \frac{d \ln E_x}{dr} \right) \frac{d\varphi}{dr} - \left(\frac{1}{r} - \frac{\nu}{r} \frac{d \ln E_x}{dr} \right) \varphi = \\ = - \frac{12(1-\nu^2)aQ_a}{E_n h^3 r} - \frac{12(1-\nu^2)a}{E_n h^3 r} \int_a^r a(r) r dr. \end{aligned} \quad (31)$$

მომენტებისათვის გვექნება:

$$\begin{aligned} M_r &= \frac{a^2 \lambda}{2P} \frac{1}{\sqrt{x}} \left[\frac{dV}{dx} - \frac{0,2}{x} V \right]; \\ M_\theta &= \frac{\nu a^2 \lambda}{2P} \frac{1}{\sqrt{x}} \left[\frac{dV}{dx} + \frac{2,8333}{x} V \right] \end{aligned} \quad (32)$$

ანუ გაშლილი სახით

$$\begin{aligned} M_r &= \left\{ \left(\frac{1+\nu}{4} - \frac{3}{4} \frac{1-\nu}{x^2} \right) V(1) + \left(\frac{1+\nu}{2} - \frac{1-\nu}{2x^2} \right) V'(1) + \left[\frac{1+\nu}{2} \ln x + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1-\nu}{4} \left(1 - \frac{1}{x^2} \right) \right] A - \left(\frac{3+\nu}{8} x^2 - \frac{1+\nu}{2} \ln x + \frac{1-\nu}{8x^2} - \frac{1}{2} \right) P \right\} \frac{a^2 \lambda}{2P}; \\ M_\theta &= \left\{ \left(\frac{1+\nu}{4} - \frac{3}{4} \frac{1-\nu}{x^2} \right) V(1) + \left(\frac{1+\nu}{2} - \frac{1-\nu}{2x^2} \right) V'(1) + \left[\frac{1+\nu}{2} \ln x + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1-\nu}{4} \left(1 - \frac{1}{x^2} \right) \right] A - \left(\frac{3+\nu}{8} x^2 - \frac{1+\nu}{2} \ln x + \frac{1-\nu}{8x^2} - \frac{1}{2} \right) P \right\} \frac{a^2 \lambda}{2P}; \end{aligned}$$

განვიხილოთ ის კერძო შემთხვევა, როცა

$$a=1 \text{ სმ, } b=50 \text{ სმ, } \nu=0,3, \quad q(ax)=const=1.$$

თუ ვიგულისხმებთ, რომ ფირფიტა გარე კონტურით სახსრულადაა დაყრდნობილი, შიგა კონტურით კი თავისუფალი. სასაზღვრო პირობებს ამ შემთხვევაში აქვთ სახე:

$$\text{როცა } x=1, M_r=0, Q_r=0,$$

როცა $x=b/a=5$, $M_r=0$, $W=0$. ამ პირობების გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$\begin{aligned} M_r &= - \left\{ 0,4125x^2 - 0,65 \ln x + \frac{9,2228}{x^2} - 9,6353 \right\} \frac{a^2 \lambda}{2}; \\ M_\theta &= - \left\{ 0,2375x^2 - 0,65 \ln x - \frac{9,2228}{x^2} - 9,2853 \right\} \frac{a^2 \lambda}{2}; \end{aligned}$$

დავყოთ ფილის სიგრძე რამდენიმე ტოლ ნაწილად და გამოვთვალოთ დანაყოფის თითოეული წერტილისთვის მომენტების

$$\text{მნიშვნელობანი და შევადგინოთ აგრეთვე } M_r^2 - M_r M_\theta + M_\theta^2 = \left(\frac{\sigma_s h^2}{6} \right)^2$$

გამოსახულების მნიშვნელობათა ცხრილი.

ცხრილი 17

ფილის სიგრძის დანაყოფის წერტილის მომენტების მნიშვნელობები

x	$M_\theta / \frac{a^2 \lambda}{2}$	$M_r / \frac{a^2 \lambda}{2}$	$\left[\frac{\sigma_s a^2 h^2 \lambda}{12} \right]^2$	σ_s კმ/მმ ²	$N/10^{17}$
1,0	18,2706	0	$(18,2706)^2$	13,2706	67,8
1,5	12,974	4,874	$(11,350)^2$	11,350	8,1
2,0	11,0915	6,1031	$(9,444)^2$	9,444	6,4
2,5	9,746	6,176	$(8,532)^2$	8,532	4,6
3,0	8,8866	5,6122	$(7,690)^2$	7,630	4,4
3,5	7,814	4,638	$(6,802)^2$	6,802	3,8
4,0	6,96279	3,3599	$(5,898)^2$	5,898	1,8
4,5	5,765	1,805	$(5,118)^2$	5,118	0,4
5,0	4,7628	0	$(4,7628)^2$	4,7628	0

შევარჩიოთ დატვირთვის ინტენსივობა a ან ფირფიტის სისქე h ისეთნაირად, რომ მინიმალურად დაძაბულ $x=5$ წერტილში წარმოიშვას პლასტიკური დეფორმაცია. ამ შემთხვევაში ძაბვის ინტენსივობა $\sigma_s=4,76$ კმ/მმ², ამის გამო ვგულისხმობთ, რომ ფირფიტის სისქე h და ფირფიტაზე მოსული დატვირთვა ისეთნაირად უნდა იყოს შერჩეული, რომ ადგილი ჰქონდეს ტოლობას $\frac{h^2 \lambda}{12}=1$. ცხრილში 17 მოცემული σ_s მნიშვნელობების მიხედვით და ნახ. 11-ის დახმარებით ადვილად განესაზღვრავთ დასხივების N დოზას. დასხივების დოზის მნიშვნელობები მოყვანილი ცხრილის ბოლო სვეტში.

2.3. ფოლადის მიღებისგან დამზადებული ბრტყელი ღეროვანი კონსტრუქციების ექსპერიმენტული გამოკვლევა

2.3.1. ფოლადის მილოვანი ელემენტების კვანძური შეერთებების ექსპერიმენტული გამოკვლევის მეთოდика

თხელკედლიანი მიღებისგან დამზადებული ფოლადის გადახურვების მზიდი კონსტრუქციების სხვადასხვა ტიპის კვანძებში მოქმედი მუშაობის თავისებურებების გამოვლენის მიზნით, ფრიად არსებით მნიშვნელობას იძენს გამოკვლევის ექსპერიმენტული მიმართულება, რომელიც საშუალებას იძლევა შევაფასოთ გამოთვლის მიახლოებითი მეთოდის სიზუსტის ხარისხი, გამოვავლინოთ კვანძებში დაძაბულობისა და დეფორმაციის განაწილების ჭეშმარიტი ხასიათი. მაგრამ, ღეროს კვანძები ერთმანეთთან უშუალო მიერთებით საკმაოდ კარგად არის გამოკვლეული გეომეტრიული და სხვა მახასიათებლების სხვადასხვა თანაფარდობებისთვის, მიღის ტიპის ფოლადის კვანძების შემუშავებასა და გამოკვლევას დღემდე არ ეთმობოდა საჭირო ყურადღება. ამიტომ კვანძის შემოთავაზებული კონსტრუქციის ეფექტურობის განსაზღვრისთვის საჭიროა ჩავატაროთ მისი კონსტრუქციული თავისებურებების ყოველმხრივი ანალიზი არა მარტო თეორიული, არამედ ექსპერიმენტული გამოკვლევების საფუძველზეც, რაც საშუალებას მოგვცემს გავაშუქოთ შემდეგი საკითხები:

1. სარტყელის მიღის დაძაბული მდგომარეობის გამოკვლევა დასხივების პროცესში მასზე დატვირთული ბმული ელემენტების მოქმედებისას, შეერთების კვანძების ფაქტობრივი სიმტკიცის და დეფორმატიულობის დადგენის მიზნით.

2. კვანძის დაძაბულ მდგომარეობაზე ბმულ ელემენტებში გაჭიმვისა და კუმშვის გრძივი ძალების სხვადასხვა სიდიდის და თანაფარდობის გავლენის გამოკვლევა დასხივების დროს.

აღნიშნული ამოცანების გადასაწყვეტად გამოყენებული იყო T და K -სებრი ფოლადისგან დამზადებული კვანძები.

კვანძების ნიმუშები დამზადებული იყო ლაბორატორიულ პირობებში ნატურული ზომებით და წარმოადგენდა სარტყელის

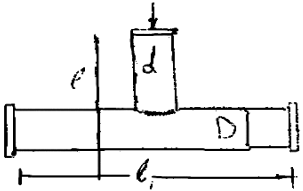
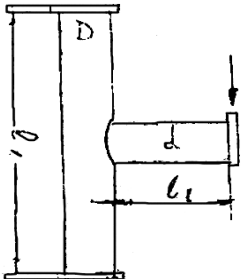
მიღებისა და შემომავალი ელემენტების შეერთების ფრაგმენტებს. მიღების დაჭრა ხელით ხდებოდა მექანიკურად წინასწარი მონიშვნის მიხედვით, რაც გამორიცხავდა საწყისი დაძაბულობების გაჩენას. ირიბანასა და სარტყელის შეერთების ადგილები დაჭრის შემდეგ მუშავდებოდა ზუმფარის ქარგოლით, შეერთების ადგილებში ელემენტების უფრო ზუსტი მორგებისთვის. ამის შედეგად, ღრეჩოების სიდიდე შეერთების ადგილებში არ აღემატებოდა 2-3 მმ-ს. შეერთება ხდებოდა T11-ГBC9 მარკის მაღალი სიმტკიცის მინაქსოვილის დახვევით, ეპოქსიდის წებოთი შემდგომი გამონოლითებით შეერთების ადგილებში შეერთების ხაზის მიმართულებით და 45°-იანი კუთხით ორი მიმართულებით. კვანძების სქემები, მათი ზომები, კვეთა და მასალა მოყვანილია მე-18 ცხრილში. კვანძების სიგრძე ისეთნაირადაა შერჩეული, რომ გამოირიცხოს გრძივი ღუნვა. გამოცდებმა აჩვენა, რომ T და K -სებრი კვანძები (სარტყელი საყრდენით) ყველაზე დეფორმაციურია, მთელი წამწეების კვანძებს შორის ისინი იმყოფებიან მუშაობის ყველაზე წამგებიან პირობებში, ამიტომ ასეთი ტიპის კვანძების მუშაობის გამოკვლევა ძალზე საინტერესოა მთლიანად კონსტრუქციის სიმტკიცის შეფასების თვალსაზრისით. K -სებრი კვანძების (სარტყელი ირიბანათი) მქონე ნიმუშების სერია არის წამწეების ძირითადი კვანძების ფრაგმენტები. შედეგების ადვილად შედარებისთვის ყველა კვანძი აგებულია ერთნაირი პრინციპით – უწყვეტი სარტყელი და მასთან 45°-ით მიერთებული ირიბანა.

ნიმუშების გამოცდა ტარდებოდა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის № 122-ე კათედრის მექანიკურ ლაბორატორიაში უნივერსალური მოქმედების ჰიდრავლიკურ წნეხებზე „K“ სერიის კვანძები გამოიცადა სპეციალურ მოწყობილობაში, რომელიც საშუალებას იძლეოდა შეგვექმნა კვანძის სიბრტყეში ღერძული დატვირთვა და მომენტი სარტყელის მიღში. მაგალითად, „T“ სერიის კვანძები გამოიცადა საყრდენზე ვერტიკალური დატვირთვის მოქმედებისას (ნახ. 12). ამ დატვირთვისას განისაზღვრა ადგილობრივი დეფორმაციისა და დაძაბულობის განაწილების ზონა კვანძის სარტყელში თავმოყრილი იმ ნორმალური ძალების მოქმედების ქვეშ, რომლებიც გადაეცემოდა ირიბანიდან სარტყელზე; იგივე სქემა იყო გამოყენებული მოქმედი

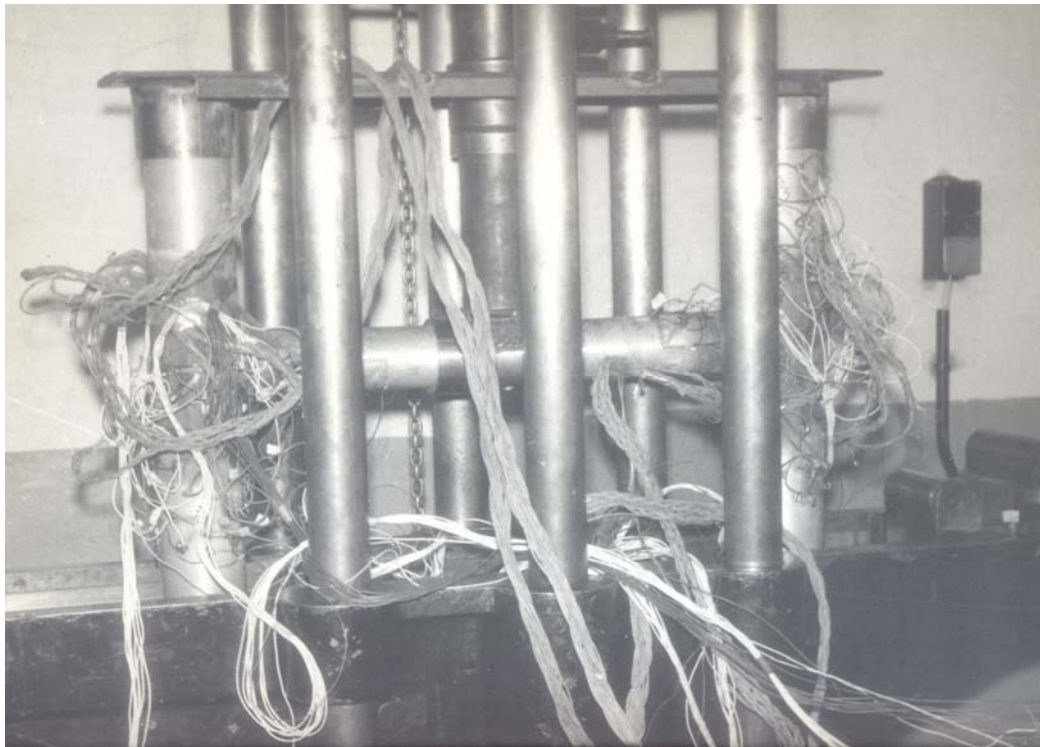


ნახ. 12. „T“ სერიის კვანძის გამოცდა
 ა – ნიმუში T-3, ბ – ნიმუში T - 1

T, P და K -სებრი კვანძების გეომეტრიული მახასიათებლები და მათი დაშლის
მახასიათებლები

ნიმუშის დასახე- ლება	კვანძის სქემა	სარტყელის მილი		საყრდენი მილები		$d_{საშ}$	L	მზიდუნა- რიანობა $P_{გახლ.}$	დაშლის ხასიათი
		$D, მმ$	$H, მმ$	$q, მმ$	$H, მმ$	$D, მმ$	$H, მმ$		
T – 1		60	7,0	60	5,5	1	0,76	200	საყრდენის შეჭყლეთა სარტყელის ამობურცვის მსახველის გასწვრივ. მაქსიმალური დაძაბულობის წერტილები გვერდებსა და ქუსლს შორის.
T – 2		75	5,5	60	5,5	0,8	1	380	
T – 3		60	5,5	37	5,0	0,62	0,9	136	
P – 1		75	6,0	60	5,5	0,8	0,92	129	საყრდენის შეჭყლეთამ სარტყელის ცალმხრივი ამობურცვით გვერდითი მსახველის გასწვრივ (ქუსლის რგოლზე) გამოიწვია სარტყელის მილის კედლის ადგილობრივი მდგრადობის დაკარგვა, ადგილობრივი დატვირთვის მოდების ზონაში.
P – 2		75	5,5	60	5,5	0,8	1	131	
P – 3		75	7,0	60	5,5	0,8	0,78	120	
K – 1		75	9,0	60	6,5	0,8	0,72	480	შეკუმშული ირიბანას შეჭყლეთა მინაქსოვილის თითქმის ერთდროული განშრევებით, დაჭიმული ირიბანას წვერში
K – 2		75	9,0	60	5,5	0,8	0,61	435	

დატვირთვის ჭეშმარიტი სიდიდის შესამოწმებლად და ყველა ხელსაწყოს ტარირებისთვის. „P“ სერიის კვანძები გამოიცადა დატვირთვის მოქმედებისას ჰორიზონტალური მიმართულებით საყრდების ტორსის გასწვრივ (ნახ. 13); ასეთი სახის დატვირთვის ადგილი აქვს არაირიბულ წამწეებში, სადაც კვანძზე მოქმედებს გაერთიანებული მხები ძალები და მომენტები. „T“ და „P“-სებრი კვანძების დეფორმაციული მდგომარეობის ექსპერიმენტული გამოკვლევა შესრულდა შვიდ ნიმუშზე. „K“-სებრი კვანძების გამოცდა ჩატარდა ბრტყელ ჩაკეტილ რომბისებრ ნიმუშებზე, რომლებშიც ერთდროულად ტარდებოდა ორი ერთნაირი კვანძის გამოცდა (ნახ. 14); ამასთან, ადგილობრივი დატვირთვა გადაეცემოდა კვანძზე გამნაწილებელი შველერის საშუალებით. სულ გამოიცადა ოთხი ნიმუში.



ნახ. 13. «P» სერიის კვანძის გამოცდა

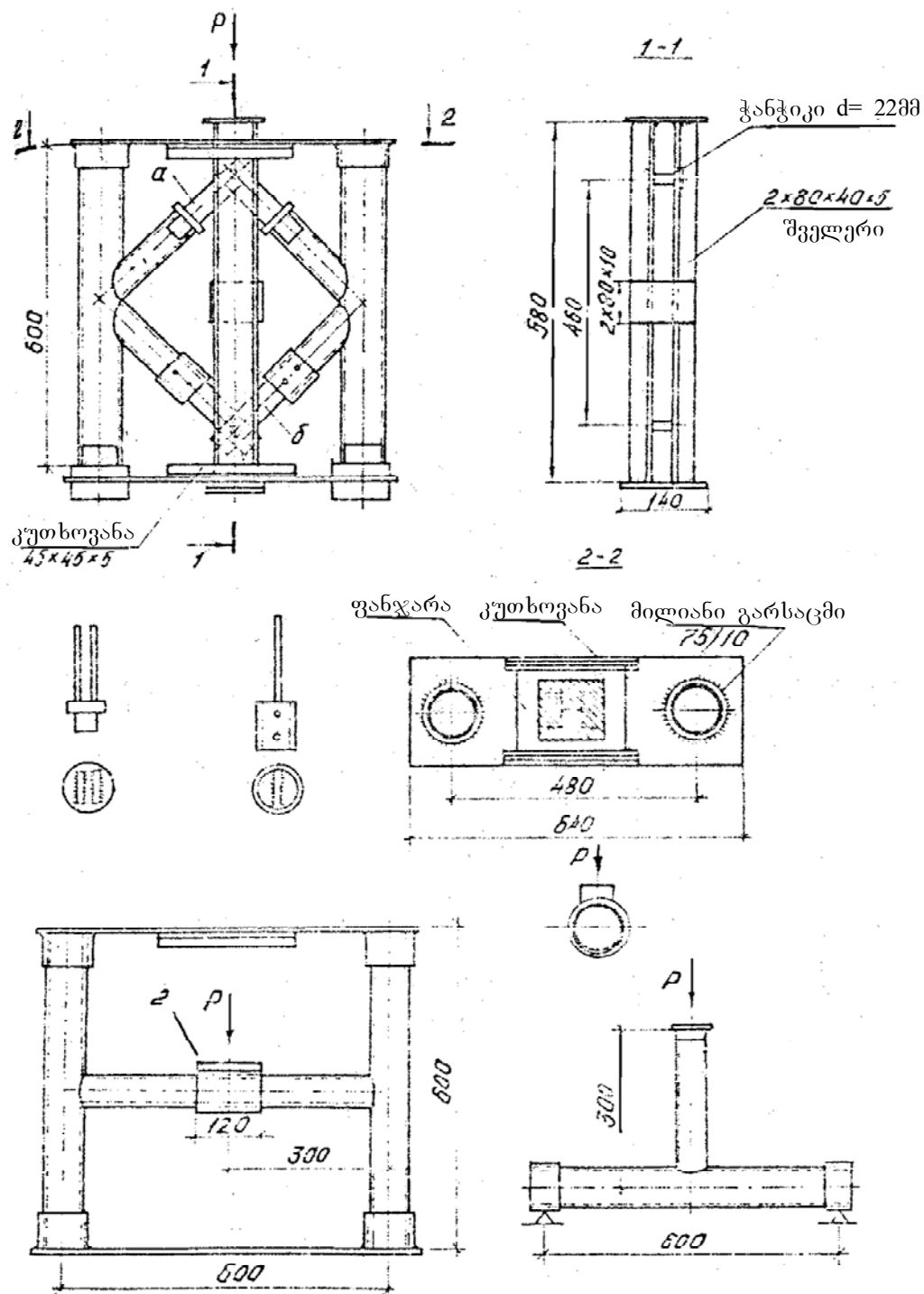
სტენდის, აღჭურვილობის, ხელსაწყოების და მოწყობილობების განლაგების სქემები ნაჩვენებია მე-15 და მე-16 ნახაზებზე.

კვანძის მახასიათებელ წერტილებში ფიბრიდული დეფორმაციების განსაზღვრისთვის გამოიყენებოდა ტენზორეზისტორი 2HKБ-20-200. ტენზორეზისტორების (გადამწოდის) დაწებება კვანძის ზედაპირზე ხდებოდა БФ-2. გადამწოდები თითოეულ კვანძზე „როზეტებად“



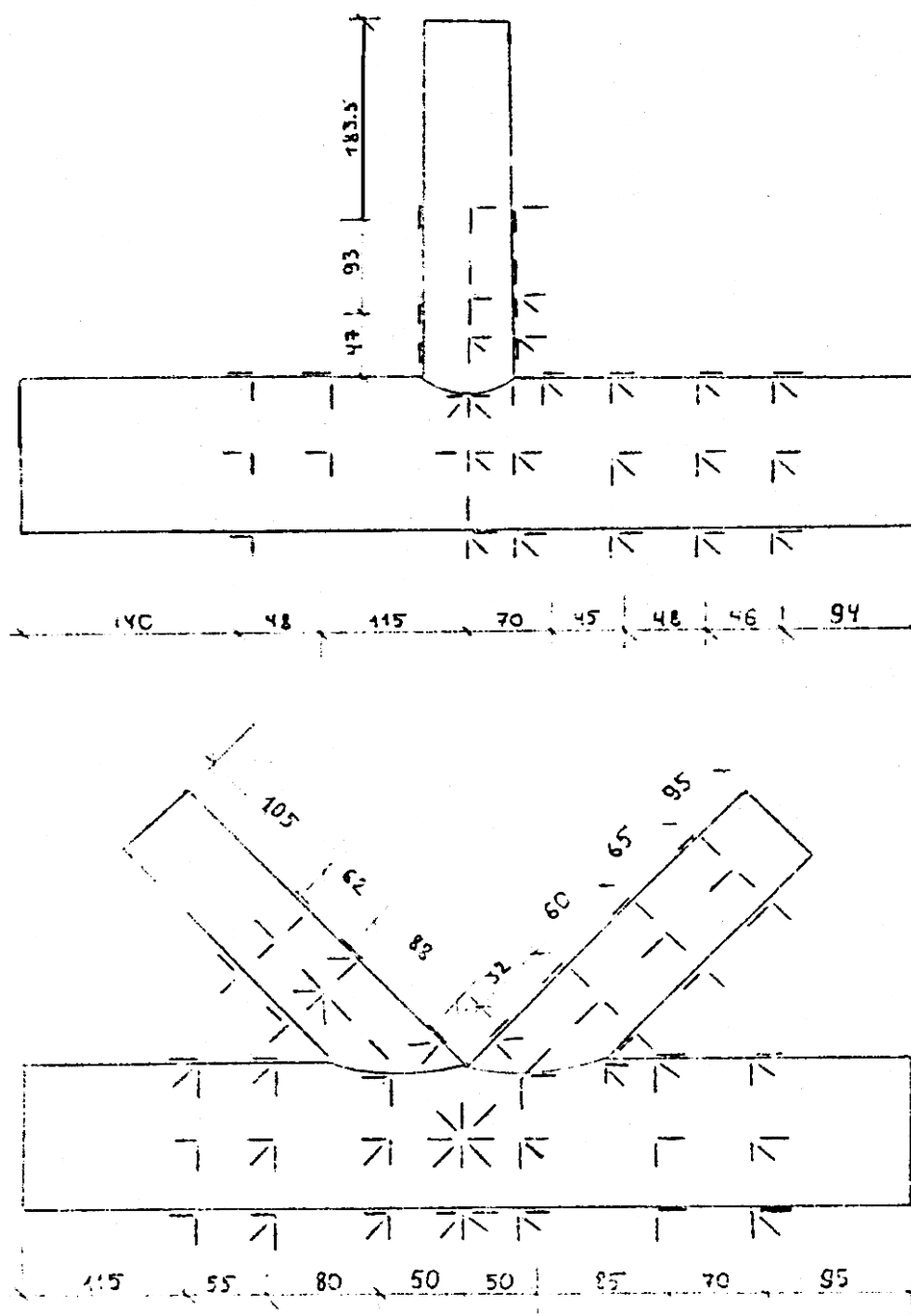
ნახ. 14. «K» სერიის კვანძის გამოცდა

ეწებებოდა 2-3 ცალად. გადამწოდები ორიენტირებული იყო კვანძის მსახველის პარალელურად (x ღერძი) და მის პერპენდიკულარულად (y ღერძი). სერიის ცალკეულ კვანძებზე გადამწოდების განლაგების სქემები უმნიშვნელოდ განსხვავდებოდა ერთმანეთისგან. ღერძული ძალებისა და მომენტების განსაზღვრისთვის კვანძის ზონის გარეთ ღეროს ორ კვეთში გადამწოდებით იზომებოდა დეფორმაციები კიდურა ფიბრებში. კვანძის სიმეტრიის გათვალისწინებით, გადამწოდები განლაგებული იყო მხოლოდ მის ნახევარზე; საწინააღმდეგო მხარეს განლაგებული იყო მხოლოდ საკონტროლო გადამწოდები, რომელთა ჩვენებები საკმაოდ კარგად ემთხვეოდა სამუშაო გადამწოდების მაჩვენებლებს. სულ, თითოეულ კვანძზე გამოიყენებოდა 60-95 გადამწოდი 30-40 წერტილში. გარდა ამისა, ყოველ კვანძზე დამაგრებული იყო 1-5 დამატებითი გადამწოდი გამოცდის პერიოდში ხელსაწყოების მუშაობის გასაკონტროლებლად. ანათვლების აღება ხდებოდა ავტომატური ტენზომეტრული ხიდის ЦТМ-3 და ЦТМ-5 საშუალებით. გამოცდები ტარდებოდა შემდეგი თანმიმდევრობით: დატვირთვა იზრდებოდა ეტაპობრივად 100 კგ-ით („Т“ და „Р“-სებრი კვანძებისთვის)



ნახ. 15. T, P და K სერიის კვანძების გამოსაცდელი სტენდის, აღჭურვილობისა და ხელსაწყოების სქემა

და 200 კგ-ით („K“-სებრ კვანძებისთვის) და იმ სიდიდემდე, რომლის დროსაც დამოკიდებულება დატვირთვისა და დეფორმაციას შორის კარგავდა წრფივ ხასიათს, შემდეგ კი ხდებოდა ეტაპობრივი განტვირთვა. თითოეულ ეტაპზე ხდებოდა ანათვლების აღება ყველა საკონტროლო-გამზომი გადამწოდდან. შემდეგ, დატვირთვა მეორედბოდა. ანათვლების



ნახ. 16. ტენზოგადამწოდების განლაგების სქემა T, P და K სერიის კვანძებზე

აღება ხდებოდა დატვირთვის მოდებიდან 7-10 წუთის შემდეგ, ანუ მაშინ როდესაც დეფორმაციის მატება დროთა განმავლობაში პრაქტიკულად ჩერდებოდა. თითოეული კვანძი დაიტვირთება და განიტვირთება სამ-სამჯერ განმეორებით და მაშასადამე, საიმედო შედეგების მისაღებად. შედეგად, თითოეული სქემისათვის მიიღებოდა 15-25 აღებული ანათვალი ყველა გადამწოდიდან. აქვე საჭიროა აღინიშნოს, რომ კვანძების

გამოცდისას დრეკად სტადიაში ღერძული ნორმალური ძალვა დატვირთვის ყველა სქემისთვის ვერ აღემატებოდა $0,4-0,5-P_{\text{ჯერ}}$, რამაც საშუალება მოგვცა დაგვეტოვებინა მარაგი მასალის დრეკადი მუშაობისთვის იმ მონაკვეთებზე, სადაც გაჩნდა დამატებითი დაძაბულობა ღეროს გადაღუნვის და გარსში კიდული ეფექტის შედეგად. დასხივების შედეგად დრეკად სტადიაში გამოცდის შემდეგ, კვანძები დაშლამდე იყო მიყვანილი.

T , P და K სერიის კვანძების გამოცდისას (ნახ. 12), (ნახ. 13) და (ნახ. 14) მიღებული სრულად განსაზღვრულიყო სხვადასხვა ფაქტორის გავლენა დეფორმაციისა და დაძაბულობის განაწილებაში ფოლადის მიღებისგან დამზადებულ კვანძებში.

2.3.2. წამწებზე სტატიკური დატვირთვის მოქმედების ექსპერიმენტული გამოკვლევის მეთოდика

ექსპერიმენტული გამოკვლევის მიზანია ბრტყელი ღეროვანი კონსტრუქციის საანგარიშო სქემის დაზუსტება, ფოლადის მიღების გამოყენებით, რადიაციული დასხივების დროს კვანძების შემოთავაზებული კონსტრუქციული დამუშავებით.

ამისთვის საჭიროა:

- განისაზღვროს დაძაბულობის განაწილების ხასიათი წამწის ღეროებში;
- განისაზღვროს კვანძების სიმტკიცის გავლენა ფოლადის მიღებისგან დამზადებული ღეროების დაძაბულ-დეფორმაციულ მდგომარეობაზე;
- გამოვიკვლიოთ შემოთავაზებული კვანძების მუშაობა საცდელ კონსტრუქციებში რადიაციული დასხივების დროს;
- განისაზღვროს წამწების საცდელი კონსტრუქციების სიმტკიცე და დეფორმაციულობა.

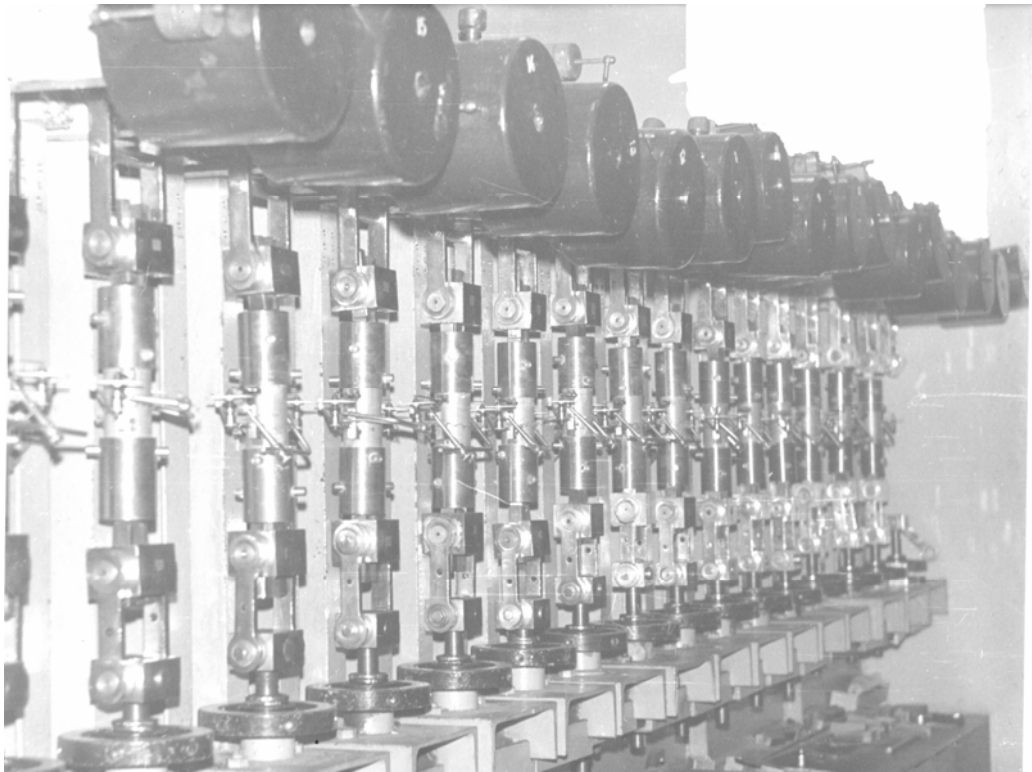
გამოსაცდელ ობიექტებად აღებული იყო ორი სამკუთხა წამწე სამკუთხა გისოსებით (6 მ სიგრძით), ზედა სარტყელის პანელებით 1.1 მ და ზედა სარტყელის დახრით 1:3, რაც შეესაბამება სამრეწველო ნაგებობათა გადახურვებში ფართოდ გამოყენებულ ტიპობრივ წამწებს. ორივე წამწე დამზადებულია თხელკედლიანი ფოლადის მიღებისგან 37 მმ დიამეტრით და კედლის სისქით 5-7 მმ. მილის მასალაა – მინაბოჭკო

ТУ 53-7-36/-3 მარკის, ПИ-609-21М ფოლადის მარკის ეპოქსიდური წებოს საფუძველზე. მიღები დამზადებულია დახვევის მეთოდით სპეციალურ მოწყობილობაზე. მონაცემები გამოყენებული მიღების მექანიკური თვისებების შესახებ მიღებულია სტანდარტული ნიმუშების გამოცდით კუმშვასა და დაჭიმვაზე. ГОСТ-ის მიხედვით ($E_c = 1.37 \cdot 10^4$ მპა; $E_p = 1.29 \cdot 10^4$ მპა; $\sigma_\pi^c = 78$ მპა; $\sigma_\pi^p = 73$ მპა) (ნახ. 17), (ნახ. 18) წამწებში აწყობილი იყო პორიზონტალურ მდგომარეობაში სპეციალურად დამზადებული სტელაჟზე. წამწის ყველაზე დამახასიათებელი კვანძები ნაჩვენებია 19-ე ნახაზზე. კვანძები მონოლითურია, გისოსის ღეროების უშუალო მიერთებით უწყვეტ სარტყელთან, შემავალი შიგა მილაკებით, რომლებსაც წამწის ყველა კვანძში ერთნაირი ზომები აქვს: დიამეტრი 60 მმ, კედლის სისქე 8 მმ, ღრწო მილაკსა და ძირითად მილს შორის შეესებულია ეპოქსიდური წებოთი, გამამყარებლით. წამწე გათვლილი იყო პირობით დატვირთვაზე 17.5 H. შესასწავლად შერჩეული წამწის ვარიანტებში შეერთებული ღეროების დიამეტრების, დიამეტრებისა და კედლის სისქის შეფარდება ტოლია $d/D = 1$, $D/\delta = 9.4$.

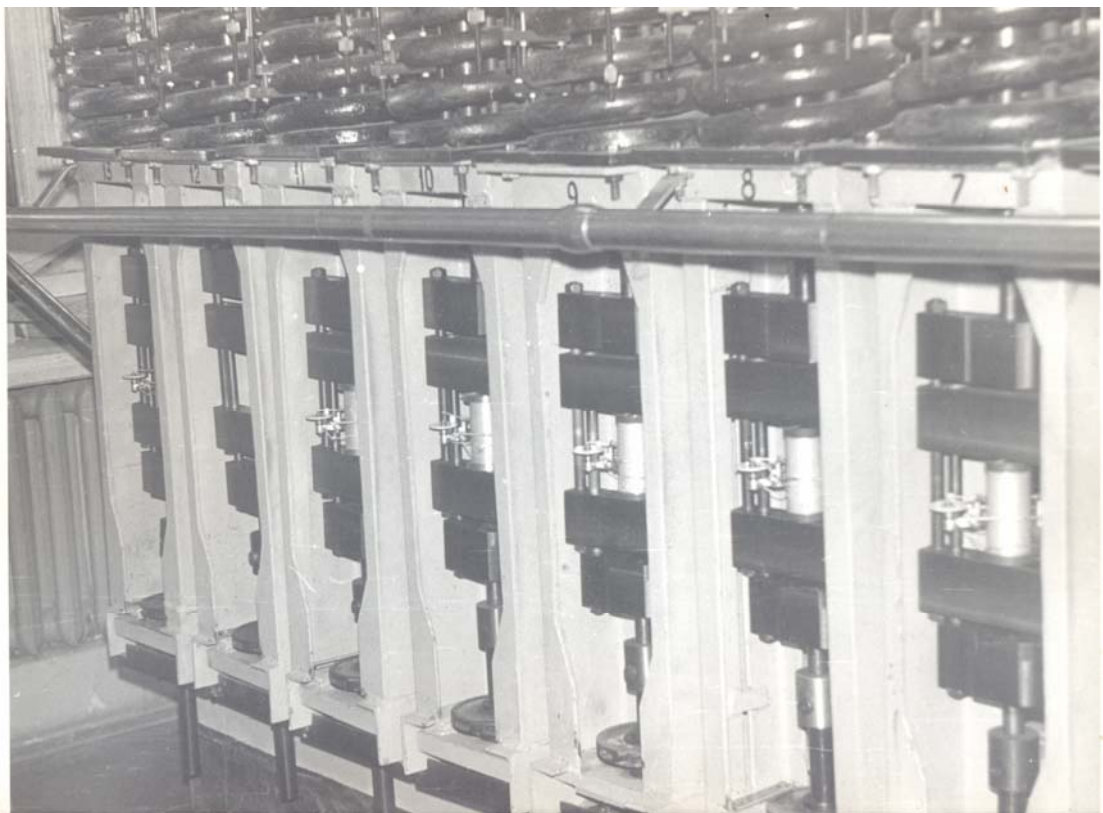
წამწების დაპროექტების მსვლელობისას ჩატარდა თეორიული გამოკვლევები, რაც მიზნად ისახავდა სხვადასხვა საანგარიშო სქემების გავლენის დადგენას ღერძული წამწების დატვირთვაზე და განისაზღვროს გისოსების რაციონალური სქემა. დაძაბულობა განისაზღვრებოდა სახსროვან-ღერძული სისტემის ვარაუდით და კვანძების სიხისტის გათვალისწინებით რადიაქტიული დასხივების პროცესში.

წამწების შემდგომმა სტატისტიკურმა გამოცდებმა საშუალება მოგვცა დაგვედგინა შესაბამისობა ღერძების დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობასა და მთელი კონსტრუქციის დეფორმირებულ მდგომარეობას შორის თეორიული გამოთვლების საშუალებით. გარდა ამისა, მან საშუალება მოგვცა შეგვეფასებინა კვანძური შეერთებების მუშაობა კონსტრუქციის შემადგენლობაში.

კონსტრუქციის მუშაობის ექსპერიმენტული გამოკვლევა დაკავშირებულია ფიზრული დეფორმაციების გაზომვასთან და მათი მიხედვით, კონსტრუქციის ღეროებთან.



ნახ. 17. გამოყენებული მასალის (მიღების) მექანიკური მახასიათებლების გამოკვლევის სტენდი გაჭიმვაზე

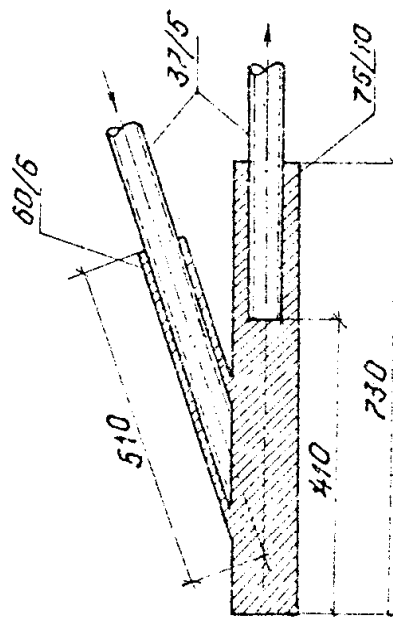
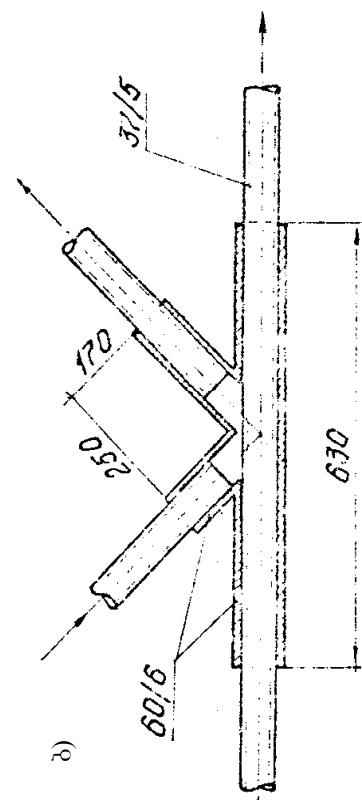
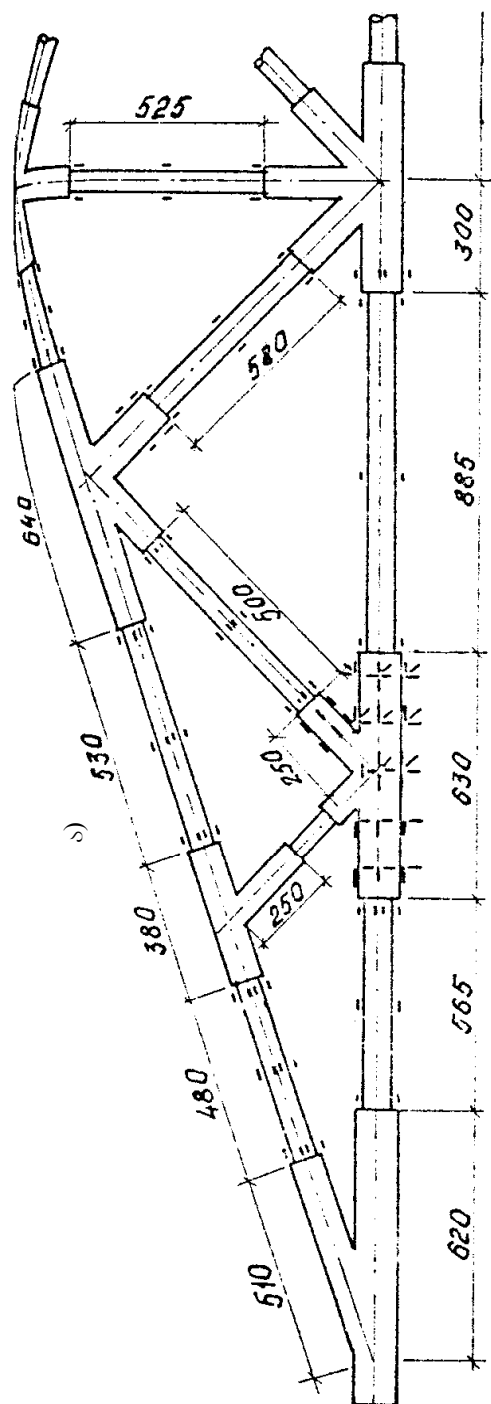


ნახ. 18. გამოყენებული მასალის (მიღების) მექანიკური მახასიათებლების გამოკვლევის სტენდი გაჭიმვაზე

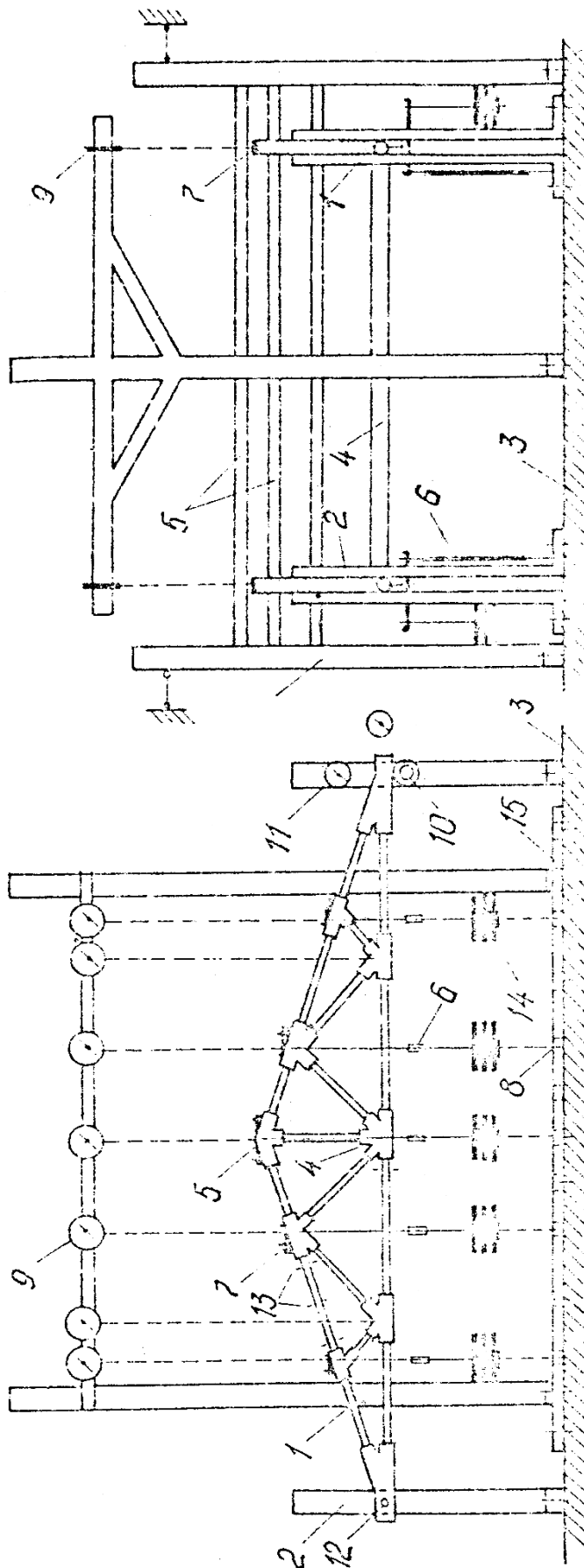
ფიბრული დეფორმაციები ტერზორგადამწოდებით 20 მმ ბაზით განისაზღვრება; ტენზორეზისტორების ჩვენებების კონტროლისთვის ზოგიერთ წერტილში გამოყენებული იყო აისტოვის ტენზომეტრები TA-3. ყველა გამოყენებული ტენზორგადამწოდი წინასწარ ტარირებული იყო. დეფორმაციები გადამწოდის დამაგრების ადგილებში დამატებით იყო განსაზღვრული აისტოვის ტენზომეტრების საშუალებით. გადამწოდები დამაგრებული იყო კვანძის ზონაში და საკვანძო ზონის გარეთ, დეროს დიამეტრის 3-3,5 სიდიდის მანძილზე. მომენტების და დერძული ძალების განსაზღვრისთვის თითოეულ კვეთზე დაწებებული იყო ოთხი გადამწოდი. ტენზორგადამწოდების ძირითადი რაოდენობა დაწებებული იყო სიმეტრიის გათვალისწინებით წამწის ერთ-ერთი ნახევრის კვანძებში (ნახ. 19, ა). ამრიგად, გადამწოდების რაოდენობა შემცირდა 200-მდე, რომელთა ჩვენებები რეგისტრირდებოდა ავტომატური ციფრული ტენზომეტრული ხიდის ЦТМ-3 და ЦТМ-5 საშუალებით. წამწის გამოცდა ჩატარდა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ხისა და პლასტმასის კონსტრუქციების კათედრის ლაბორატორიაში, ვერტიკალურ მდგომარეობაში წყვილებად. გამოსაცდელი დანადგარის სქემა ნაჩვენებია 20-ე ნახაზზე.

წამწის 1 მდგრადობა ვერტიკალურ სიბრტყეში უზრუნველყოფილი იყო მიმმართველი ლითონის საყრდენების საშუალებით 2, რომლებიც ხისტად იყო დამაგრებული ძალურ ზოლზე 3. წამწის საერთო მდგრადობა უზრუნველყოფილი იყო ჰორიზონტალური მიღების კავშირების საშუალებით 4, რომლებიც შედგებოდა ზედა 5 და ქვედა 4 სარტყელის კვანძებში განლაგებული გამბჯენით (დიაგონალური ელემენტებისგან) და უზრუნველყოფდა პროექტით გათვალისწინებულ განრთვას ზედა შეკუმშული სარტყელისთვის კონსტრუქციის ღრუდან, კვანძების ვერტიკალური გადაადგილების თავისუფლების შენარჩუნებით.

დატვირთვა გადაეცემოდა იმ ბერკეტების 6 საშუალებით, რომლებიც გადასცემენ დატვირთვას წამწის შესაბამის კვანძებზე მკაცრად სარტყელის ღერძის გასწვრივ გამათანაბრებული სოლისებრი სადებების საშუალებით (ზეწრით) 7, რომელზეც დამაგრებული იყო ბერკეტები, რომლებიც თავის მხრივ ჩამაგრებული იყო ძალურ იატაკში ანკერული საყრდენებით 8.



ნახ. 19. ა) გამოსაცდელ წამებში ტენზორგადამწოდის განლაგების სქემა;
ბ) წამის ყველაზე დამახასიათებელი კვანძები



ნახ. 20. წამწის გამოცდის სქემა

1 - წამწი; 2 - მიმართული ლითონის საყრდენები; 3 - ძალური იატაკი; 4 - განივი კავშირები - განზღავნი (სარტყელში); 5 - განივი კავშირები განზღავნი (ქ. სარტყელში); 6 - ბერკეტების სისტემა; 7 - ბერკეტი; 8 - ანკერული საყრდენები; 9 - ჩაღუნვის მზომები; 10 - სახსრულად-მოძრავი საყრდენები; 11 - საათის ტიპის ინდიკატორი; 12 - უძრავი კვანძი; 13 - ტენზომეტრების დაყენების სქემა; 14 - თუჯის საწონები; 15 - ლითონის კუთხოვანები საკიდის დასამაგრებლად

წამწის კვანძების ვერტიკალური გადაადგილების გასაზომად დაყენებულია ჩაღუნვის გამზომები 9, წამწის სახსრულად – მოძრავი საყრდენის 10, ვერტიკალური და ჰორიზონტალური გადაადგილება განისაზღვრებოდა საათის ტიპის ინდიკატორებით 11. გამოცდის მიზნების შესაბამისად, შესრულდა რიგი დატვირთვები: მოგორვა, დატვირთვა ნორმატიული დატვირთვა და განტვირთვა, საანგარიშო დატვირთვა და განტვირთვა, სპეციალური დატვირთვა საანგარიშო დაძაბულობის შესაქმნელად გისოსის ზოგიერთ ელემენტში და საანგარიშო დატვირთვად განტვირთვა ხდებოდა საფეხურებრივად (ეტაპობრივად) 17,5H-ით. გამოცდა ჩატარდა შვიდ საფეხურზე; დატვირთვის ყოველი საფეხურის მოდების შემდეგ, გამზომი ხელსაწყოების მაჩვენებლები აითვლებოდა სტაბილიზაციისას, რომელიც დამყარდებოდა 5-7 წთ. შემდეგ დატვირთვის დაბალი დონეებისთვის და 8-10 წთ-ის შემდეგ, მაღალი დონეებისთვის. პირველ ოთხ ეტაპზე წამწები იტვირთებოდა ნორმალურ დატვირთვანდე 65,5H და განიტვირთებოდა პირობით ნულამდე. მეშვიდე ეტაპზე წამწე დაშლამდე მიჰყავდათ. ოთხჯერადმა დატვირთვამ ნორმატიულ დატვირთვამდე შემდგომი განტვირთვით, საშუალება მოგვცა მიგველო უფრო სრული და ზუსტი მონაცემები წამწის მუშაობის შესახებ დრეკად სტადიაში. საცდელი დანადგარის შემადგენლობაში შევიდა: მოძრავი და უძრავი საყრდენები; წამწის პირობითი დატვირთვის სისტემა, წამწის ჰორიზონტალურ მდგომარეობაში ჩასამაგრებელი კონსტრუქციები. დატვირთვის სისტემა შედგებოდა 10 ბერკეტისგან, რომლებიც გადასცემენ დატვირთვას წამწის თითოეულ კვანძზე. დატვირთვა ხორციელდებოდა წამწის ყველა კვანძზე თანაბრად.

გამოცდები ჩატარდა $t = 20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურაზე და ჰაერის ფარდობით ტენიანობაზე $55 \pm 5\%$.

2.3.3. მაღალი ენერგიების ნაწილაკებით დასხივების გავლენა წამწის მთელი კონსტრუქციის სიმტკიცესა და დეფორმირებაზე

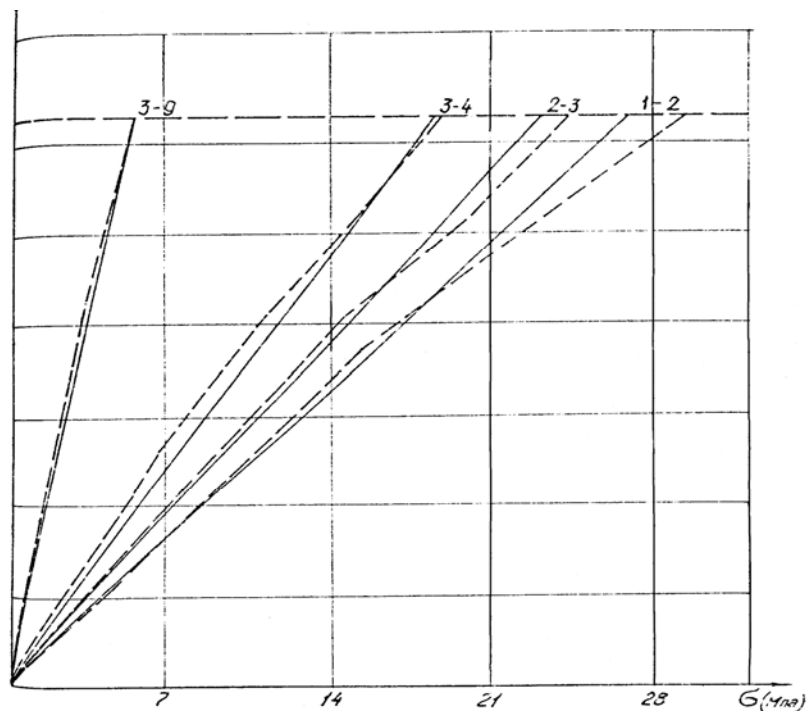
გამოცდის მიღებული მეთოდის შესაბამისად გადამწოდის მაჩვენებლების მიხედვით განისაზღვრა დატვირთვა და დაძაბულობა ღეროებსა და მათი შეერთების ადგილებში წამწის ხანმოკლე

დატვირთვებისას. ამ მონაცემების ანალიზმა და აგრეთვე წამწის დეფორმაციის მონაცემებმა (ჩაზნექა, მიღებული ჩაზნექიზომების საშუალებით) გვიჩვენა შემდეგი:

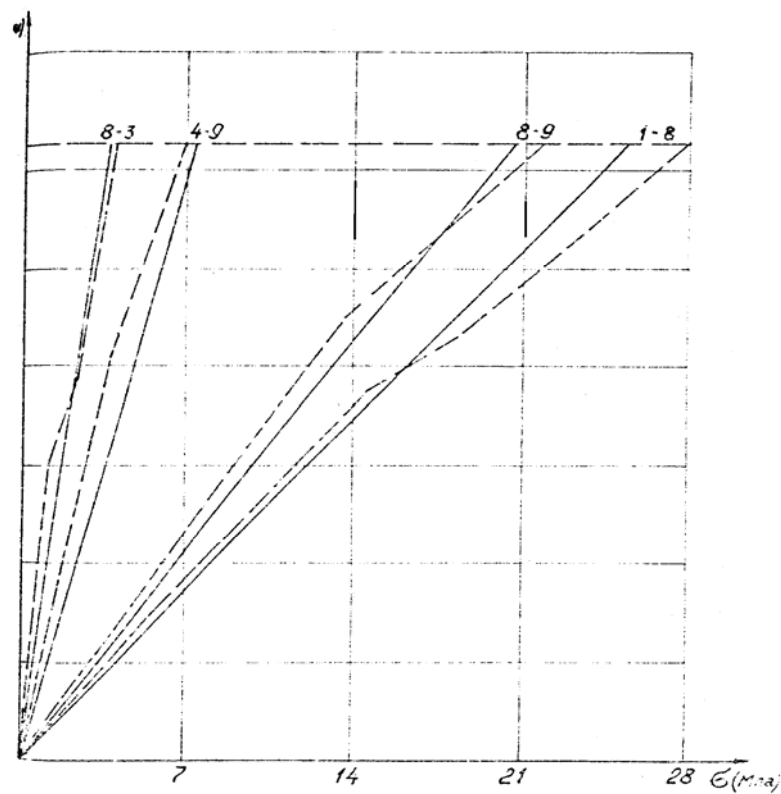
– 21-ე ნახ-ზე ნაჩვენებია წამწის ღეროებში დაძაბულობის კვანძის დატვირთვაზე დამოკიდებულების გრაფიკი. გრაფიკებზე უწყვეტი ხაზით აღნიშნულია თეორიული დაძაბულობა, შტრიხით კი ექსპერიმენტული მნიშვნელობები. გრაფიკებიდან ჩანს, რომ ექსპერიმენტული მნიშვნელობები წამწის კონტურის ღეროებში საკმაოდ კარგად ემთხვევა თეორიულ შედეგებს. წამწის ირიბანა (ღეროები 2-8; 8-3 და 9-8) აღმოჩნდა მნიშვნელოვნად დაუტვირთავი (40-45%). დაძაბულობა (1-2; 2-3 და 1-8) ღეროებში საანგარიშო დატვირთვამდე კარგად შეესაბამებოდა თეორიულს, დატვირთვის მატებისას ექსპერიმენტულმა დაძაბულობამ თეორიულს გადააჭარბა 35%-ით.

– 22-ე ნახაზზე ნაჩვენებია დაძაბულობის განაწილება წამწის ღეროს სიგრძეზე. ექსპერიმენტული მნიშვნელობები მთლიანობაში კარგად ემთხვევა თეორიულს, ყველაზე ზუსტად დაძაბულობები დაემთხვა წამწის სარტყელებში. დაძაბულობების ყველაზე დიდი განსხვავება აღინიშნა დაჭიმულ ირიბანაში. კვანძთან შეერთების ზონაში. „9“ კვანძი (ნახ. 22, ა) დაპროექტებული იყო მინაბოჭკოების დაარმატურებით და მიკალსა და შემომავალ ელემენტს შორის ღრეჩოებში ეპოქსიდური წებოთი ჩასხმით, რამაც მნიშვნელოვნად გაზარდა კვანძის სიხისტე და ღეროების მომენტები. თეორიული და ექსპერიმენტული დაძაბულობების ყველაზე უკეთეს დამთხვევას ადგილი ჰქონდა (2-3 და 1-8) სარტყელებისთვის, განსხვავება 12%-ს გრაფიკებიდან ჩანს, რომ (ნახ. 22, ბ) დაძაბულობის ხასიათი ღეროების კვეთებში არათანაბარია. საკვანძო დაძაბულობების სიდიდეების შესადარებლად არჩეულია ადგილები კვანძებში ღეროების გეომეტრიული ღერძების მახლობლად, მილაკის დიამეტრის 2.5-3 ტოლ მანძილზე. როგორც თეორიულმა და ექსპერიმენტულმა გამოკვლევებმა აჩვენა ამ კვეთებში მოქმედებს მაქსიმალური მღუნავი მომენტები, რაც შესაბამისად იწვევს ყველაზე მაღალ კვანძურ დაძაბულობას.

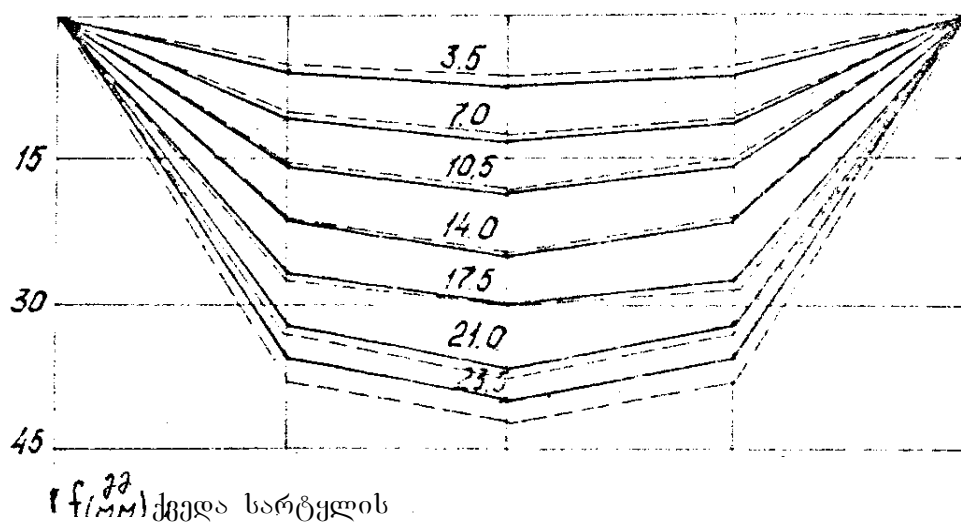
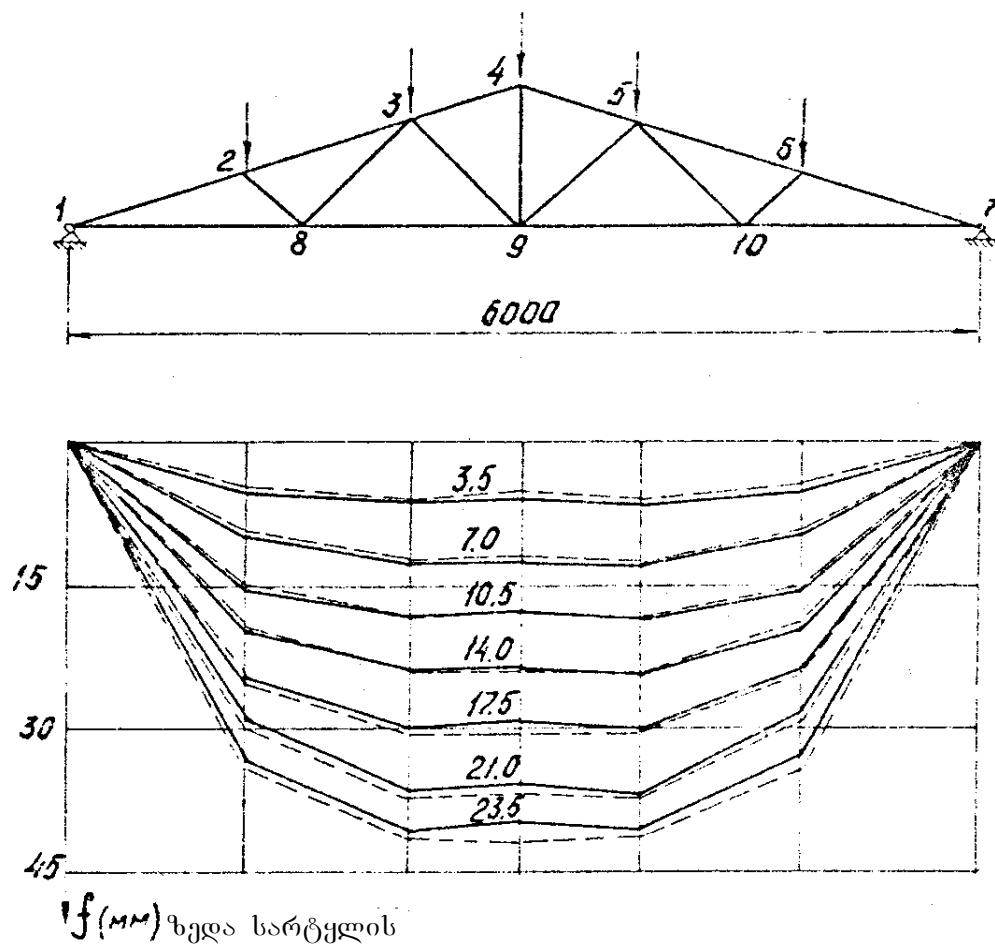
წამწის გამოცდისას გაიზომა კვანძების გადაადგილების სიდიდეები. 23-ე ნახაზზე მოყვანილია წამწის ზედა და ქვედა



ნახ. 21 ა. წამწის შეკუმშული ღეროების დაძაბულობის კვანძის
დატვირთვაზე დამოკიდებულების გრაფიკი
— თეორიული დაძაბულობა
- - ექსპერიმენტული დაძაბულობა



ნახ. 21 ბ. წამწის დაჭიმული ღეროების დაძაბულობის კვანძის
დატვირთვაზე დამოკიდებულების გრაფიკი
— თეორიული დაძაბულობა
- - ექსპერიმენტული დაძაბულობა

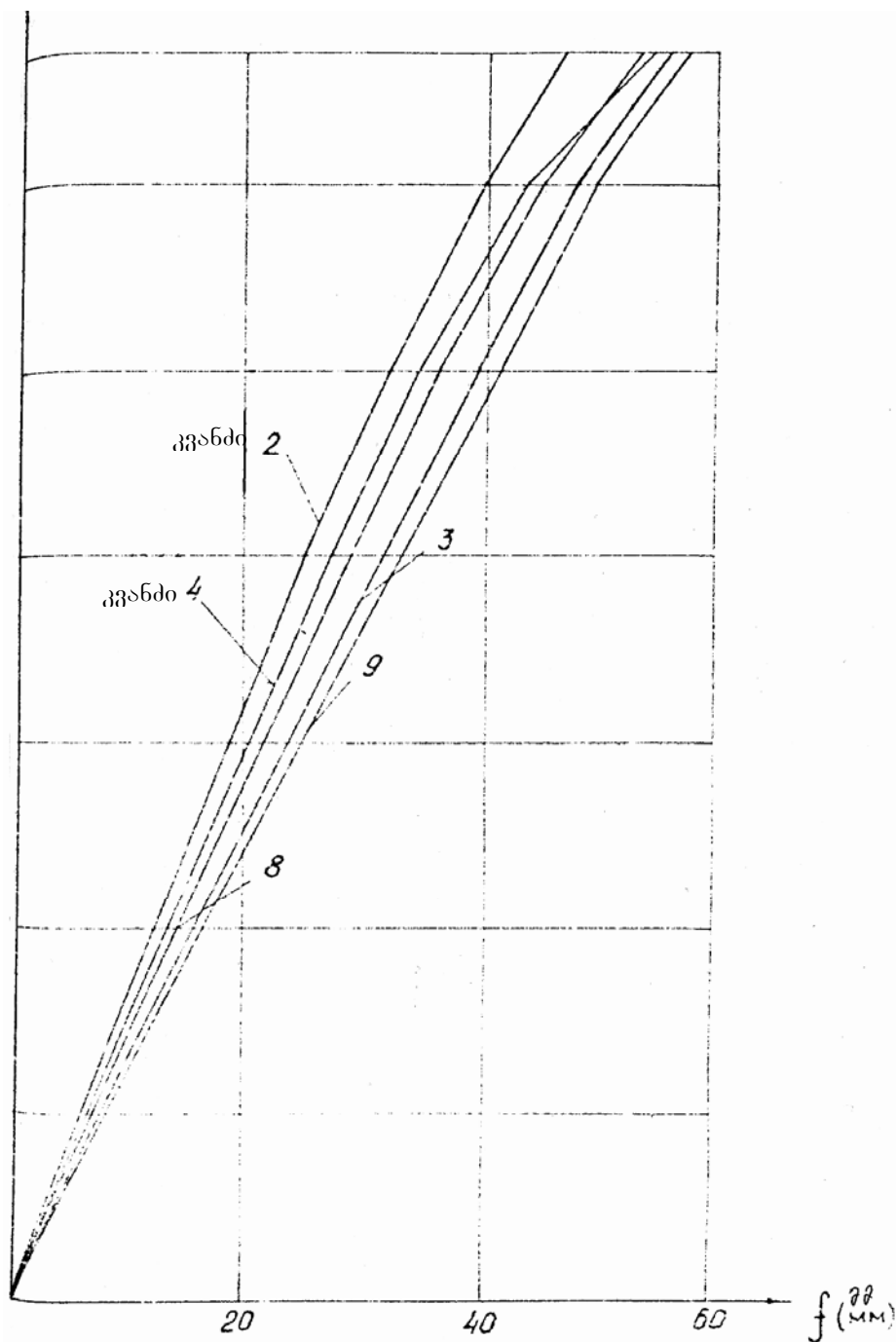


ნახ. 23. წამწის დატვირთვის და ჩაზნექის სქემა
 — ექსპერიმენტული მნიშვნელობები
 - - თეორიული მნიშვნელობები

სარტყელების ვერტიკალური ჩაზნექილობის სიდიდის ცვლილების დიაგრამა, მიღებული საყრდენის დაწვეის გათვალისწინებით. დიაგრამიდან ჩანს, რომ დატვირთვის დამოკიდებულება ჩაზნექაზე წრფივია ნორმალური დატვირთვის გაორმაგებამდე (ნახ. 24), შემდეგ ჩაზნექის მნიშვნელობების ზრდა უფრო ინტენსიური ხდება. ჩაზნექის ექსპერიმენტული სიდიდეები საანგარიშო დატვირთვებამდე (85H) თეორიულზე ნაკლებია 6-8%-ით, საანგარიშო დატვირთვის შემდეგ, ექსპერიმენტული ჩაზნექა თეორიულზე რამდენადმე მეტად აღმოჩნდა – 3-5%-ით. უნდა აღინიშნოს ჩაზნექის ეპიურების გადატეხა (ნახ. 23), რაც მოწმობს კონსტრუქციის არაზუსტ დამზადებას, რომლის დროსაც ზედა სარტყელის კიდურ კვანძებში უნდა წარმოიქმნას მნიშვნელოვანი მომენტები მათი სიხისტის გამო; რის შედეგადაც გამოცდის დროს აღნიშნული იყო წამწის ზედა სარტყელის გამრუდება კვანძებს შორის. დეფორმაციის ასეთი სურათი შეიძლება ავსხნათ იმით, რომ სანამ გამოსაცდელი კონსტრუქცია მუშაობს დრეკად სტადიაში, კვანძების სიხისტის გამო წამწე წარმოადგენს ჩარჩოსებრ სისტემას იდეალურ წამწეზე ნაკლები ჩაზნექით; პლასტიკურ სტადიაში გადასვლის შემდეგ, უფრო მკაფიოდ ვლინდება კვანძების სახსრულობის ეფექტი.

გამოცდების პროცესში გაზომილი ჩაზნექების სიდიდისა და ხასიათის ანალიზისას შეიძლება დავასკვნათ, რომ დატვირთვის საანგარიშო სიდიდემდე ზრდისას კვანძების ჩაზნექა დატვირთვის პროპორციულია. ნარჩენი დეფორმაციები დატვირთვის მოხსნის შემდეგ პრაქტიკულად არ არის. ეს მოწმობს კონსტრუქციის დრეკად მუშაობას საანგარიშო დატვირთვების ინტერვალში. დეფორმაციის ზრდის დინამიკას შეიძლება დავაკვირდეთ წამწის ქვედა სარტყელის კვანძების ჩაზნექის დიაგრამების საშუალებით (ნახ. 23); იქვე არის მოყვანილი საანგარიშო დატვირთვისგან ქვედა სარტყელის ჩაზნექის ხაზი, იმ თეორიულ ხაზთან შედარებით, რომელიც მიღებული იყო სქემის სიხისტის გამოთვლისას.

– წამწის ღეროებში ღერძული დაძაბულობის ექსპერიმენტულ სიდიდეებს, თეორიულთან შედარებით, აქვს გადახრები სარტყელებში 16%-მდე, გისოსების ღეროებში კი – 35%-მდე. ცხრილებში მოყვანილია წამწის გამოთვლის შედეგები ხისტი სქემის მიხედვით (ცხრ. 20) და



ნახ. 24. გამოსაცდელი წამწეების კვანძების ვერტიკალურ გადაადგილების დამოკიდებულება დატვირთვაზე

სახსრული სქემის მიხედვით (ცხრ. 19). შედეგების ანალიზისას [59]-ის მიხედვით ჩატარდა შემდეგი სიდიდეების შედარება: მომენტები საკვანძო ზონებში, ღერძული დატვირთვები, დაძაბულობა ღერძული დატვირთვისა და გადანუხვისგან, კვანძის სიხისტის კოეფიციენტი λ .

$$\nu = \frac{\sigma_{\max}}{a}. \quad (33)$$

აქ $\sigma_{\max}$ მაქსიმალური დაძაბულობა ღეროში;

σ – დაძაბულობა იმავე ღეროში, განსაზღვრული სახსრული სქემით.

ჩატარდა დაძაბულობების შედარება საკვანძო ზონებში მდებარე კვეთებისთვის (ს_კ) (ცხრ. 20). ცხრილებში შედარებულია გამოთვლების თეორიული მნიშვნელობები ექსპერიმენტული გამოკვლევის შედეგებთან. პირველ ვარიანტში ითვლებოდა, რომ წამწის ღეროები ერთმანეთთან შეერთებულია იდეალური სახსრების საშუალებით. ამ დროს მაქსიმალური საკვანძო დაძაბულობების განსხვავებები შემდეგ მნიშვნელობების აღწევს: შეკუმშულ სარტყელში 10%-მდე, დაჭიმულში – 7%-მდე, ხოლო გისოსების ელემენტებში 8%-მდე, საყრდენებში – 31%-მდე. მეორე ვარიანტში, იმ ვარაუდით, რომ ღეროებს ბოლოებში აქვს ხისტი ჩამაგრება, განსხვავება ზედა სარტყელის ღეროებში აღწევს 6%-ს, ქვედა სარტყელის ღეროებისთვის შეადგენს 7%-ს, გისოსების ღეროებისთვის – 3%-ს, საყრდენებში კი 24%-მდეა. ექსპერიმენტული დაძაბულობები კვანძების ზონის კვეთებში კარგად შეესაბამება გამოთვლების ხისტი სქემის მიხედვით.

დაძაბულობის განაწილება გისოსების ღეროების სიგრძეზე და პერიმეტრზე აჩვენებს, რომ დაძაბულობის გადაცემა ირიბანიდან სარტყელზე ხორციელდება კვეთის ნაწილით შეერთების ხაზის 0.45-0.63 სიგრძეზე; ამრიგად, დამატებითი დაძაბულობა კვანძების სიხისტის გამო ატარებს ადგილობრივ ხასიათს. სარტყელის მილის დიამეტრის 0,9-1,6 მანძილზე იგი კლებულობს თავისი მნიშვნელობის 8-11%-მდე, ხოლო გათვალისწინებულზე მეტი დატვირთვისას შეიმჩნევა დამატებითი დაძაბულობის შემცირების ტენდენცია, რომლის დროსაც დაძაბული მდგომარეობა თითქმის შეესაბამება წამწის ელემენტებში დაძაბულობის თანაბარ განაწილებას, განსაკუთრებით ირიბანებში.

ექსპერიმენტული და საანგარიშო დაძაბულობების შედარება, რაც ითვალისწინებს ნორმალურ დატვირთვას და გადაღუნვის მომენტებს ზედა სარტყელის ელემენტების საშუალო კვეთისთვის აჩვენებს, რომ სხვაობა ამ დაძაბულობებს შორის აღწევს 24%-ს და მერყეობს 3-დან 24%-მდე. ექსპერიმენტული და გამოთვლითი მონაცემების ასეთი კარგი თანხვედრა წამწის ყველაზე დატვირთული და ყველაზე პასუხსაგები ელემენტებისთვის მოწმობს იმას, რომ გამოთვლები კვანძების სიხისტის

დერძული ძალვა და დაძაბულობა წამწის ღეროებში დატვირთვის ეტაპების
მიხედვით კვანძების სიხისტის გაუთვალისწინებლად (თეორიული ფაქტობრივ კვეთებში)

ღეროების ნომრები			დატვირთვა H კვანძზე							
			3,5	7,0	10,5	14	17,5	21,0	24,5	28,0
საშუალო მნიშვნელობა	1–2	N	26,1	52,0	78,1	106	132,1	157	163	213
		σ	4,01	8,03	12,04	16,06	20,07	24,1	28,11	32,4
	2–3	N	24,0	48,0	72,0	97,0	121,0	146,0	170	1,95
		σ	3,64	7,27	10,91	14,7	18,2	22,1	25,5	29,6
	3–4	N	18	36	54	72	90	108	126	144
		σ	2,75	5,5	8,25	10,9	13,8	16,4	19,3	21,8
საშუალო მნიშვნელობა	1–8	N	25	50	75	100	125	250	175	201
		σ	3,8	7,6	11,4	15,2	19,0	22,7	26,6	30,5
	8–9	N	21	42	63	84	105	126	147	168
		σ	3,2	6,4	9,6	12,7	16,0	19,1	22,3	25,4
საშუალო მნიშვნელობა	2–8	N	2,5	5,0	7,5	11	13,5	17	19,5	22
		σ	0,4	0,8	1,2	1,7	2,0	2,6	3,0	3,3
	8–3	N	3,0	6,0	9,0	12,0	15,0	18,0	21,0	24,0
		σ	0,45	0,9	1,35	1,82	2,25	2,73	3,15	3,64
	3–3	N	5,5	11,0	16,5	22,0	27,5	33,0	38,5	44,0
		σ	0,85	1,7	2,55	3,4	4,25	5,0	5,95	6,7
საშუალო მნიშვნელობა	4–9	N	7,5	15,0	22,5	31,0	38,5	47,0	54,5	63,0
		σ	1,14	2,27	3,41	4,7	5,7	7,1	7,95	0,8

თეორიული და ექსპერიმენტული დატვირთვა და დაძაბულობა წამწის ღეროებში

ღეროების ნომრები		სახსრული სქემა		ხისტი სქემა				ექსპერიმენტი				სიხისტის კოეფიციენტი				
		$N_{[H]}$	$\sigma_{[MIIa]}$	σ_{cp}'''	σ_{max}'''	σ_g'''	N	σ_{cp}'''	σ_{max}'''	σ_g'''	N	$\frac{\sigma_{cp}^{3K}}{\sigma}$	$\frac{\sigma_{max}^{3K}}{\sigma}$	$\frac{\sigma_{max}^{3K}}{\sigma_{cp}'''}$	$\frac{\sigma_{max}'''}{\sigma}$	$\frac{\sigma_{max}^{3K}}{\sigma_{max}'''}$
ზღვრული საბრტყე	1-2	-106	16,1	24,8	18,1	3,3	-93	13,9	19,2	2,1	-91,5	0,86	1,19	0,94	1,124	1,06
	2-1															
	2-3	-97	14,7	14,1	15,58	1,2	-91	13,2	17,4	2,7	-87	0,89	1,18	0,94	1,06	1,12
ბრტყე	3-2															
	3-4	-72	10,9	10,6	11,3	0,7	-69	9,5	12,15	1,25	-63	0,87	1,11	0,89	1,04	1,075
	4-3															
ბრტყე- ფაღი	1-8	100	15,2	13,7	16,13	0,9	87	14,6	16,9	1,7	85	1,09	1,11	1,06	1,01	1,02
	8-1															
	8-9	84	12,7	12,4	13,1	0,7	82	11,4	13,92	1,22	75,1	0,9	1,096	0,92	1,03	1,063
ფაღი	9-8															
	8-3	12	1,82	1,95	2,16	0,45	19,5	1,98	2,15	0,33	9,0	1,09	1,18	1,01	1,15	0,99
	3-8															
ფაღი	3-9	-22	3,34	2,9	3,5	0,6	-19	3,14	3,88	0,34	-19,3	0,94	1,1	0,93	1,05	1,05
	9-3															
	4-9	31	4,71	4,3	4,56	0,26	28	3,26	3,3	1,41	0,22	0,69	0,7	0,76	0,97	0,72
ფაღი	9-4															

გათვალისწინებით საკმაოდ ზუსტად ასახავს მოცემული კონსტრუქციის რეალურ დაძაბულ მდგომარეობას.

წამწის მზიდუნარიანობის ამოწურვა გამოვლინდა იმაში, რომ მისი გამოცდისას ახლო დატვირთვაზე ჯერ ძლიერად ამოიზნიქება ზედა სარტყელის კედელი (დეროები 1-2 და 2-3) საყრდენ კვანძთან, კვანძიდან 3-4 დიამეტრით დაშორებულ კვეთებში. როგორც ჩანს, ეს მოხდა შეერთებული ელემენტების ცუდი ცენტრირების გამო საყრდენ კვანძთან და არათანაბარი ღრეჩოების გაჩენის გამო სარტყელის მილის გარეთ კედელის და მილაკის შიგა დაბოლოებას შორის. ზედა სარტყელის საყრდენი ღეროს დატვირთვის და დაძაბვის შემდეგ (ღერო 1-2) წამწები გამოსცადეს მზიდუნარიანობის ამოწურვამდე მდებარეობის ადგილობრივი დაკარგვის შედეგად, დაკარგვას ადგილი ჰქონდა ზედა სარტყელში გამოთვლილზე 1.34-ჯერ მეტ დატვირთვაზე. ამასთან შეინიშნებოდა ჩაზნექების მატება, სარტყელის მილის შესამჩნევი განივი დეფორმაციები ზედა სარტყელის თითქმის ყველა ღეროში ზედა სარტყელის კედლის მდგრადობის ადგილობრივი კარგვის გამო.

მაშასადამე, შეიძლება ვამტკიცოთ, რომ ზედა სარტყელისთვის ზღვრული დატვირთვა (ნორმალური ძალა და მომენტი) 1.2-ჯერ მეტია გამოთვლილთან შედარებით. სხვა ელემენტებისთვის, როგორც ამას აჩვენებს გამოსაკვლევი კონსტრუქციის დაძაბული მდგომარეობის ანალიზი, ზღვრული დატვირთვა 1.46-ჯერ აღემატება გამოთვლილს.

2.3.4. ნეიტრონებით დასხივებული კვანძების სიმტკიცისა და დეფორმირების ექსპერიმენტული გამოკვლევის შედეგების ანალიზი

მილისებრი კვანძების ნიმუშების ექსპერიმენტული გამოკვლევის მიღებული მეთოდის შესაბამისად მუშაობის დრეკად სტადიაში, სადაც ძირითადი ყურადღება ეთმობოდა სარტყელის ფოლადის მილებში დაძაბულობის ღუნვად ხასიათს, აგრეთვე გამოკვლეული იყო დაძაბულობის ხასიათი მიმდებარე ელემენტებშიც ღერძული მჭიმავი და მკუმშავი დატვირთვის გამო.

ტენზორეზისტორების ჩვენებების მიხედვით, გამოთვლილი იყო დაძაბულობა, რომლის დროსაც დატვირთვა კვანძზე შეადგენდა (0.5-

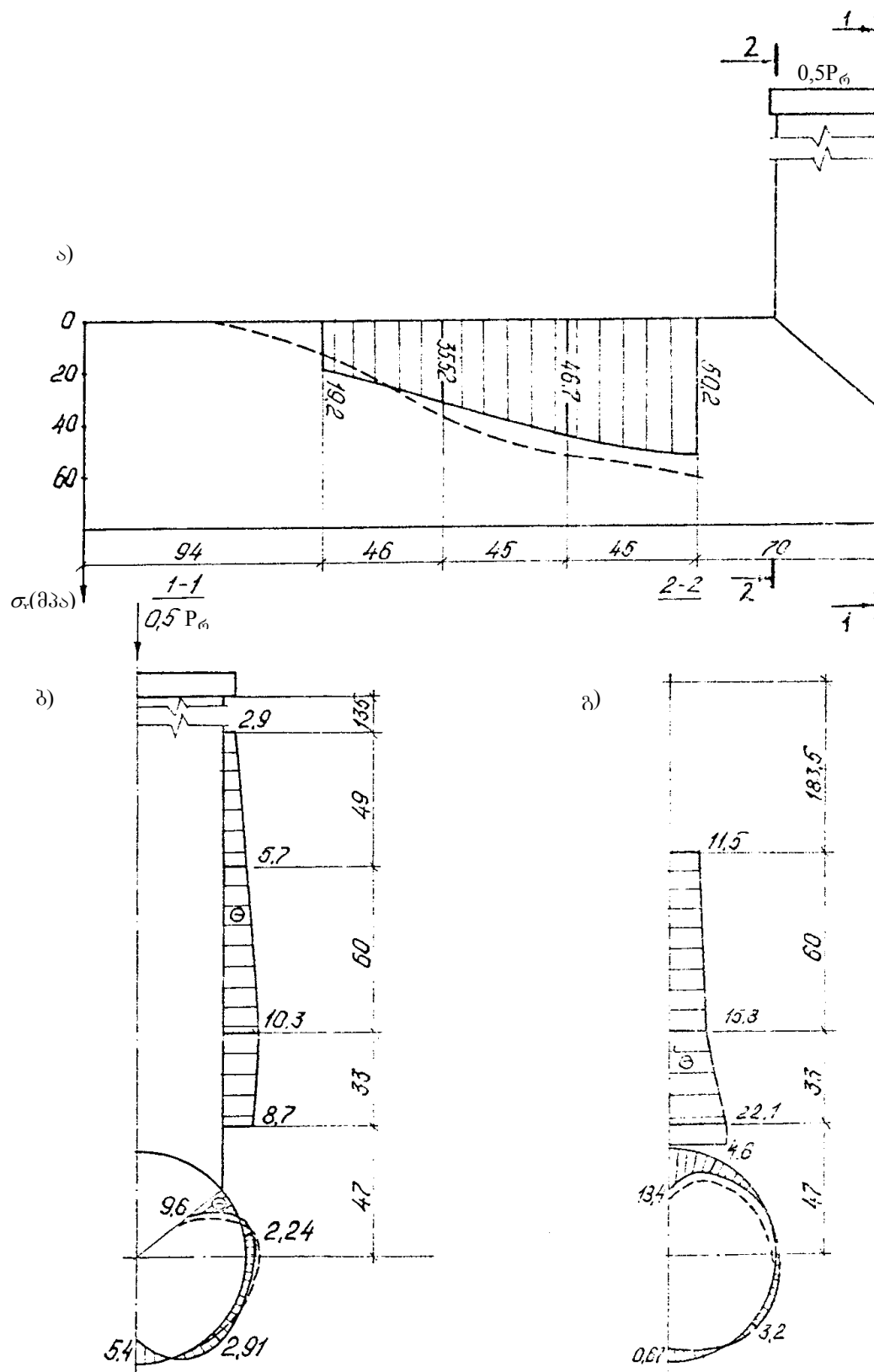
0.8) P_{ϕ} . როზეტის შემადგენლობაში შემავალი გადამწოდების მაჩვენებლების დამუშავება ხდებოდა სპეციალური პროგრამით, რომელიც შედგენილი იყო ენაზე – პასკალი კასიოს ტიპის მიკროკალკულატორზე. ნიმუშების ყველაზე დამახასიათებელი კვეთებისთვის გამოთვლილი იყო მილის ზედაპირზე დაფიქსირებული დაძაბულობები. 25-31 ნახაზებზე მოყვანილია გამოცდის შედეგები T , P და K სერიის კვანძების ყველა ნიშნულისთვის. თითოეულ ნახაზზე მოცემულია ეპიურები:

- ა) დაძაბულობის განაწილება სარტყელის მსახველის გასწვრივ ვერტიკალურ სიბრტყეში σ_x ;
- ბ) დაძაბულობის განაწილება კვეთაში ძირითადი რგოლის სიბრტყეში σ_y^{t-i} ;
- გ) დაძაბულობის განაწილება საყრდენის შუალედური მსახველის გასწვრივ σ_z .

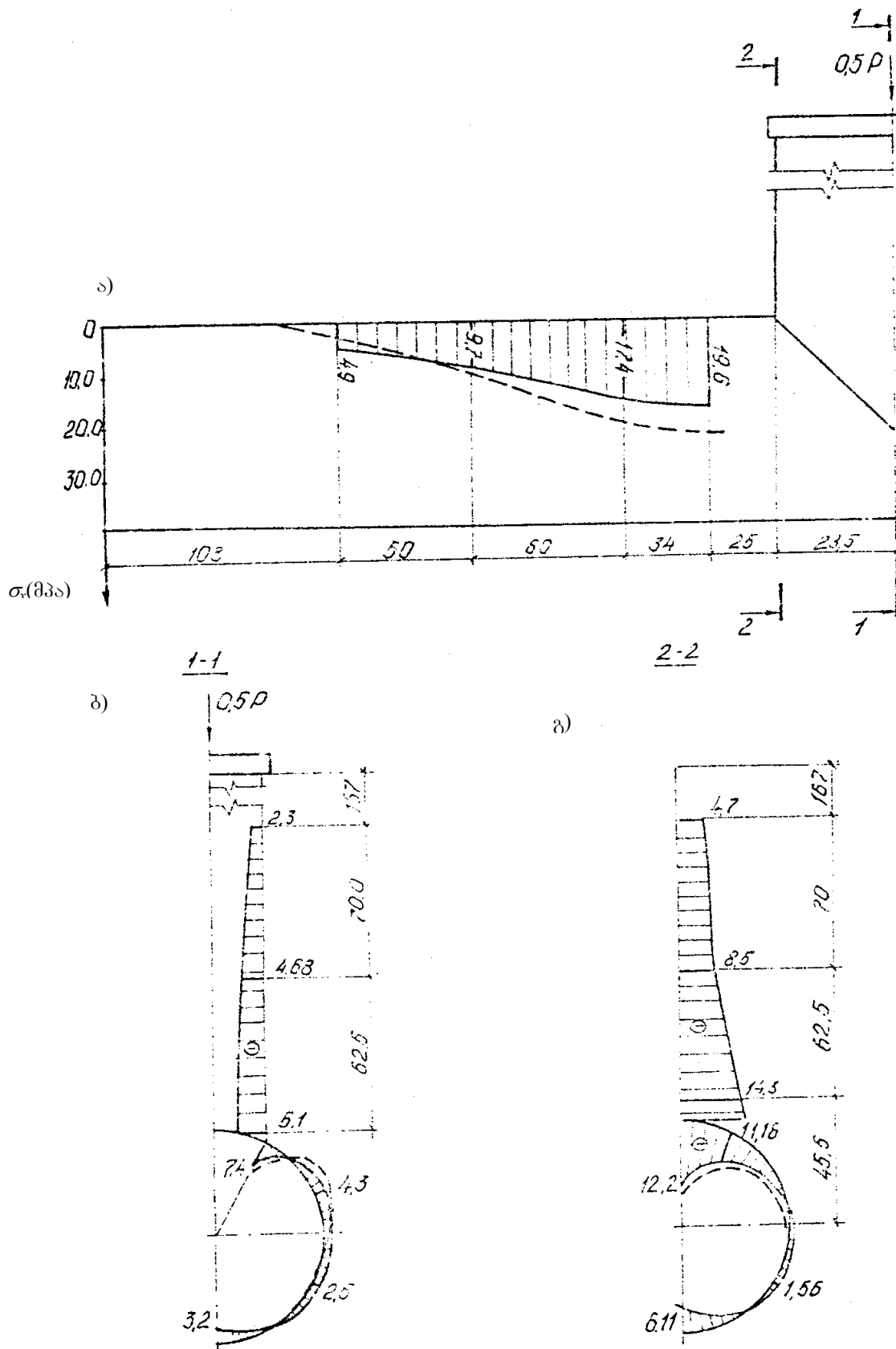
დაძაბულობის მოყვანილი ეპიურები გვიჩვენებს დაძაბულობის განაწილების მნიშვნელოვან არათანაბრობას არა მარტო კვანძის მსახველის გასწვრივ (σ_x), არამედ წრიული მიმართულებითაც (σ_y). დაძაბულობის ყველაზე მაღალი მნიშვნელობები აღინიშნებოდა პირველ და მესამე სეგმენტებში, სადაც იგი აღწევდა მნიშვნელოვან სიდიდეებს 27.6-50.2 მპა-მდე ($0,5 P_{\phi}$).

დაძაბულობის ყველაზე მაღალი კონცენტრაცია აღინიშნა „T“ სერიის ნიმუშების გამოცდისას (ცხრ. 18) მცირე თანაფარდობებით და აღვილი ჰქონდა სარტყელის მილზე შეერთების ხაზის გასწვრივ, რომელიც ლოკალიზდებოდა პირველ რიგში ბორტის წერტილებში და აგრეთვე ქუსლის წერტილებში და შემადგენელი მინაქსოვილის გადაკვეთაზე ირიბანას შუალედურ მსახველზე. 25-ე და 26-ე ნახაზებზე მოყვანილია T სერიის ნიმუშების გამოცდის შედეგები. მხოლოდ „P“ სერიის ნიმუშში აღინიშნა მნიშვნელოვანი კონცენტრაცია სარტყელის გვერდითა მსახველზე (ნახ. 27). ამასთან, ბორტებში სჭარბობს რგოლური დაძაბულობები $\sigma_{\max}$, ქუსლებში კი – განივი.

სარტყელის მილის დაძაბული მდგომარეობა ხანმოკლე დატვირთვისას უპირატესად ატარებს ღუნვად ხასიათს, რომელიც შენარჩუნებულია (1.5-2) მანძილზე ძირითადი რგოლიდან (D). მომენტური



ნახ. 25. T-2 კვანძის გამოკვლევის შედეგები
 — ექსპერიმენტული გამოკვლევა; — — თეორიული გამოკვლევა



ნახ. 26. T-3 კანის გამოკვლევის შედეგები

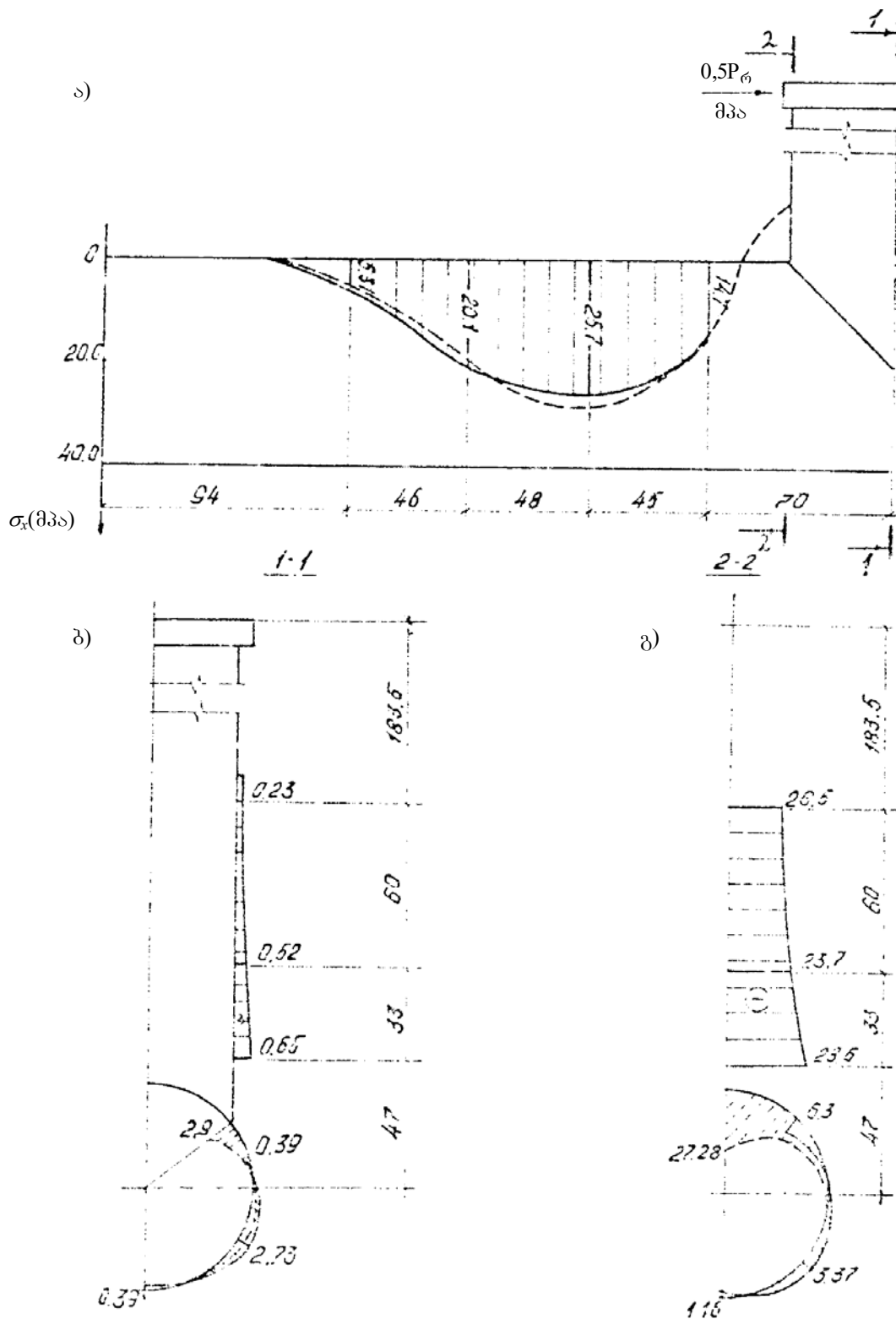
დაძაბულობების წილი ჯამურიდან შეადგენს 70%-ზე მეტს ბორტის ზონაში, 80%-ზე მეტს გვერდითი მსახველის ძირითადი რგოლის გადაკვეთაზე მცირე d/D -თვის და 60%-ზე მეტს – დიდი d/D -თვის; განივი დაძაბულობებისთვის – შესაბამისად, 5%-ს ქუსლის ზონაში. დაძაბულობის ყველაზე მაღალი გრადიენტი იყო ბორტის ზონაში, აქვე პქონდა ადგილი ყველაზე დიდ მომენტებს (რგოლურს). განივი დაძაბულობა ქუსლში შეადგენს ბორტის დაძაბულობის 15-25%-ს.

მსგავსი სურათი გვაქვს „P“ სერიის კვანძების გამოკვლევისას (ნახ. 27-29). ამ ნახაზებზე ნაჩვენებია დაძაბულობის ეპიურები კვანძის სარტყელსა და მიმდებარე ღეროში მღუნავი მომენტის მოქმედების წინააღმდეგობის ზონაში. ეპიურებიდან ჩანს, რომ ორი ცილინდრული ზედაპირის შეერთების ზონაში დაძაბულობა არათანაბრად არის განაწილებული და მატულობს საყრდენების მიერთების ზონაში. მომენტის დაძაბულობის განაწილების ზონა ვრცელდება სარტყელის მილის დიამეტრის 2.0-2.5 სიდიდის მანძილზე. დაძაბულობის არათანაბარ განაწილებას ადგილი აქვს აგრეთვე წრიული მიმართულებითაც, სადაც მაქსიმალური დაძაბულობების ზონა ვრცელდება დიამეტრის ნახევარზე.

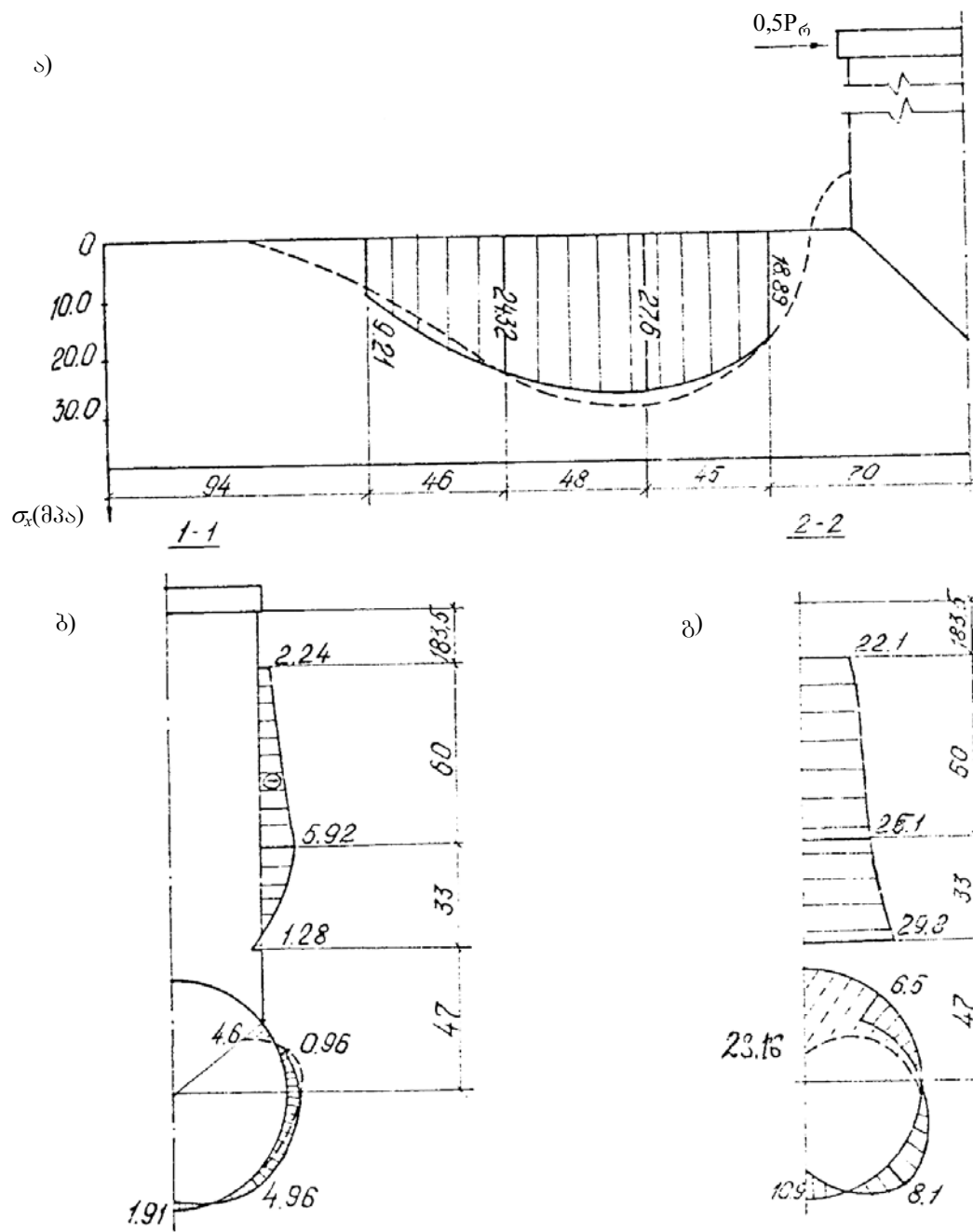
მაგრამ დაძაბულობების განხილვისას სარტყელის დამახასიათებელ კვეთებში და ამ კვეთებისადმი პერპენდიკულარული მიმართულებებით აღმოჩნდა, რომ ბორტის ზონებში, სადაც ყველაზე დიდი დაძაბულობაა, განივი დაძაბულობა შეიძლება ცალკეულ შემთხვევებში შეადგენდეს რგოლური დაძაბულობის 25-50%, აგრეთვე ქუსლის ზონაში რგოლური დაძაბულობები შეიძლება აღემატებოდეს კიდევ განივს.

„K“ სერიის კვანძების გამოცდის შედეგები მოყვანილია 39-ე-31-ე ნახაზებზე, სადაც ამ ნიმუშებზე ძირითადად შეისწავლებოდა სარტყელის დატვირთვის გავლენა საკვანძო ზონის დაძაბულ მდგომარეობაზე. დატვირთვის მიღებული სქემის პირობებში (ნახ. 15) დაძაბულობის მატება აღინიშნებოდა ადგილობრივი დატვირთვის მოდების ზონაში და დაჭიმული ირიბანას მიერთების ზონაში.

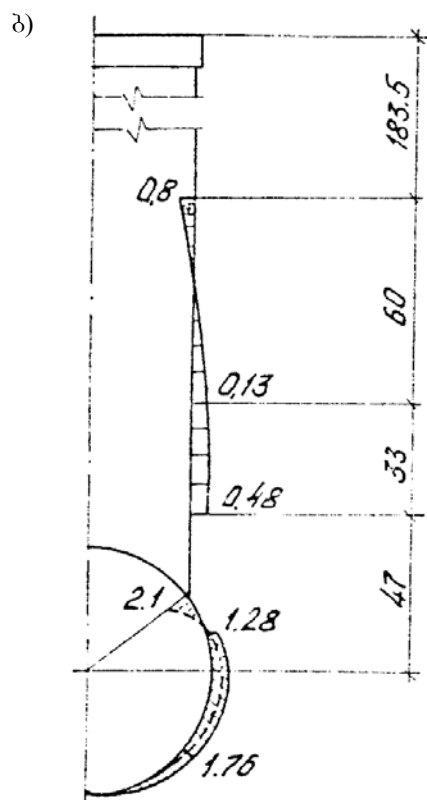
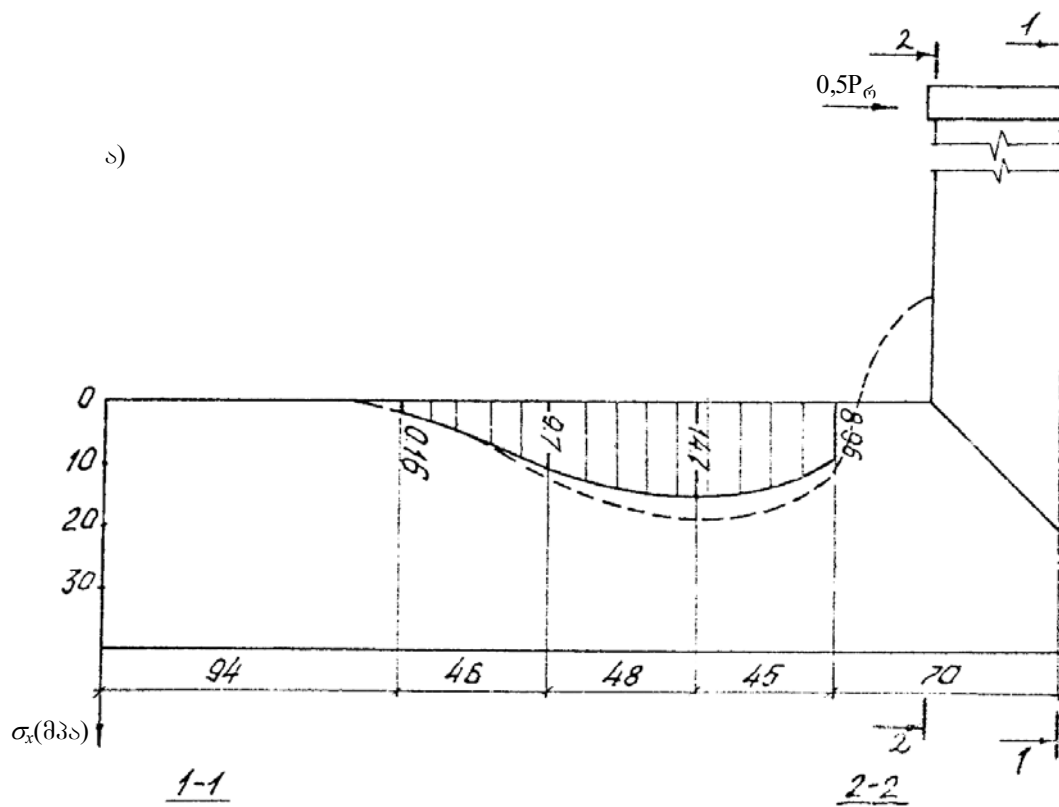
სარტყელის დაძაბული მდგომარეობა ძირითადად ღუნვადია, თუმცა K -სებრ კვანძებში განივი შემდგენების დაძაბულობა შესამჩნევად უფრო დიდ როლს ასრულებს, T -სებრ კვანძებში. ყველაზე შესამჩნევი ხდება განივი დაძაბულობები ხერხემლის მსახველის გასწვრივ, რაც



ნახ. 27. P-1 სერიის კვანძის გამოკვლევის შედეგები
— ექსპერიმენტული გამოკვლევა; - - - თეორიული გამოკვლევა



ნახ. 28. P-2 სერიის კვანძის გამოკვლევის შედეგები
 — ექსპერიმენტული გამოკვლევა; - - - თეორიული გამოკვლევა



ნახ. 29. P-3 სერიის გამოკვლევის შედეგები

აღმატება რგოლურს (ბიორტებში) 30-50%-ით. კვანძის ვერტიკალურ სიბრტყეში დაძაბულობის მატებასთან ერთად, ასევე აღინიშნებოდა დაძაბულობის მომატება კვანძის ცენტრისაკენ და ჰორიზონტალურ სიბრტყეში (ნახ. 31), მაგრამ მემბრანული ფაქტორის როლი ბუნებრივია, იზრდებოდა. დამატებითი დაძაბულობების დონის მერყეობა ნომინალური დამატების მიმართ, როგორც ჩანს, დაკავშირებულია კონსტრუქციის საერთო სტატიკურ განუზღვრელობასთან, იმ კვანძის სიხისტის მომენტების არსებობასთან, რომლის სიდიდე, თავის მხრივ, დაკავშირებულია სარტყელის განივ დეფორმაციებთან. აღვნიშნავთ, რომ დამატებითი განივი დატვირთვის არსებობამ სარტყელში, გავლენა არ მოახდინა მის დაძაბულობაზე.

დადგენილია, რომ K -სებრი კვანძის დატვირთვისას მიღებული სქემის მიხედვით, ანუ სარტყელის განივი შეკუმშვით და კუთხოვანას დახრის საშუალო კუთხეებისას (45°), აგრეთვე d/D პარამეტრის საშუალო მნიშვნელობებისას კვანძის რღვევა, როგორც წესი, ხდება შეკუმშული კუთხოვანას თანდათანობით შეჭყლეტის გამო სარტყელში და სარტყელის კედლის დეფორმირების გამო. ამან შეიძლება გამოიწვიოს სარტყელის კედლის ადგილობრივი მდგრადობის დაკარგვა დიდი დეფორმაციების არსებობისას (გაჭიმვა) დაჭიმული ირიბანას ქვემოთ, როგორც ეს მოხდა $K-2$ ნიმუშების შემთხვევაში (ცხრ. 18).

აღვნიშნოთ, რომ ყველა ნიმუშის გამოცდისას დატვირთვის მეოთხე და მეხუთე ეტაპების შესაბამისი დაძაბულობისას, ადგილი ჰქონდა დაძაბულობის მატების არაწრფივ ხასიათს საკვანძო ზონის ფიბრებში და ადგილობრივი (საკვანძო) დატვირთვის მოდების ზონაში. ეს არაწრფივი ხასიათი ვლინდება ან საკვანძო დაძაბულობის მოდების ან საყრდენთან მიერთების ზონაში.

ამავე დატვირთვებისას ტენზოგადამწოდების საშუალებით ანათვალის განმეორებითი აღებისას შემჩნეული იყო „დენადობა“ ანუ დეფორმაციის მატება დატვირთვის მატების გარეშე. ზღვრული მდგომარეობის მომენტისთვის ადგილი ჰქონდა ანათვლებს შორის სხვაობის მნიშვნელოვან მატებას დაახლოებით ორჯერ დატვირთვის იმავე საფეხურისთვის, წინა საფეხურთან შედარებით; ამასთან დატვირთვა შეადგენდა დამშლელის 70-80%-ს ყველა ნიმუშისათვის.

მილისებრი კვანძის გარსი – სარტყელის დაძაბული მდგომარეობის მონაცემების (რომლებიც მიღებულია თეორიული ამოცანის ამოხსნით) ცდისეულ მონაცემებთან შედარებისას შეიძლება შემოვიფარგლოთ მილის ზედაპირზე დაძაბულობის ექსპერიმენტულად დაფიქსირებული მონაცემების შედარებით თეორიული მეთოდით გამოთვლილ სიდიდესთან.

გამოთვლილი მონაცემების შედარება ცდის შედეგებთან, კვანძის ნატურული გამოცდის მონაცემების მიხედვით (ნახ. 25-31) საშუალებას გვაძლევს ვილაპარაკოთ საკმაოდ კარგ დამთხვევაზე შესადარებელ ეპიურებს შორის. განსხვავება ნაწილობრივ დამოკიდებულია ნიმუშების ფორმის საწყის ნაკლოვანებებზე (კედლის არათანაბარი სისქე, ირიბანას არაზუსტი ცენტრირება, კიდული ეფექტების არსებობა კონტაქტის ხაზზე, გადამწოდების დამაგრების ადგილების გაწმენდის დაბალი ხარისხი) გარკვეულ გავლენას ახდენს ექსპერიმენტის მეთოდური ნაკლოვანებები. ძირითადი მიზეზია გარსზე მოქმედი დატვირთვის განაწილების კანონის არასრული შესაბამისობა თეორიულ მონაცემებთან და გარსის უსასრულო სიგრძის შეუსაბამობა ჩვენს საანგარიშო სქემაში მიღებულ შეზღუდულ სიგრძესთან.

სწორედ, ასეთი სახის არაზუსტობის შედეგად იქმნება განსხვავება თეორიული და ექსპერიმენტული მონაცემების მიხედვით აგებულ ეპიურებს შორის T და P სერიის კვანძებისათვის; რგოლური ნორმალური დაძაბულობების თეორიული მნიშვნელობები 15-27%-ით მეტია ექსპერიმენტულთან შედარებით.

ყველაზე მაღალი ექსტრემუმის წერტილებში სამივე ექსპერიმენტული შედეგების მონაცემები გვიჩვენებს, რომ თეორიული შედეგები ძირითადად რამდენადმე უფრო მაღალია, ვიდრე ექსპერიმენტული.

2.3.5. დასხივების დროს ბრტყელი დეროვანი კონსტრუქციების შემადგენლობაში კვანძის მუშაობის თავისებურებები

შემუშავებული წამწების და კვანძების ზემოთ მოყვანილი თეორიული და ექსპერიმენტული გამოკვლევის შედეგები ატარებდა კომპლექსურ ხასიათს და მოიცავდა წამწის დაძაბული და

დეფორმირებული მდგომარეობის გამოკვლევას დატვირთვის ქვეშ. ამით საშუალება მოგვცა შეგვეფასებინა შემოთავაზებული კონსტრუქციის კვანძის მუშაობა და აღგენიშნა ის თავისებურებები, რაც განასხვავებს კვანძის ქცევას კონსტრუქციის შემადგენლობაში. ექსპერიმენტული გამოკვლევების ამ ეტაპის მთავარი შედეგების რიცხვს მიეკუთვნება შემდეგი:

- ნატურული კონსტრუქციის დატვირთვისას ვლინდება დამატებითი დაძაბულობები, განპირობებული კვანძების სიხისტის არსებობით. მომენტები ხისტ კვანძებში დამოკიდებულია კვანძში შემავალი ღეროების გრძივი დრეკადობების თანაფარდობაზე. როგორც წესი, იგი მატულობს d/D თანაფარდობის მატებისას. ამ დაძაბულობების დონე კვანძის ზონაში შეიძლება შეადგენდეს ნომინალურის 20%-ს.
- სარტყელური ძალები, გაზომილი ნატურული კონსტრუქციის გამოცდისას, იცვლება კვანძის დატვირთვის პროპორციულად. ამ ფაქტორის როლის გამოყოფა მთლიანი მიღებიანი კონსტრუქციის გამოცდისას შეიძლება მხოლოდ მთელი წამწის შემადგენლობაში კვანძის შესაძლო რღვევის თვისებრივი ანალიზისას. ამიტომ სარტყელში განივი დაძაბულობის გავლენის შესწავლა კვანძის დაძაბულ მდგომარეობაზე განხორციელდა ცალკეულ კვანძებზე, როგორც ეს გაკეთდა მოცემულ ნაშრომში K -სერიის კვანძების გამოცდისას.
- ფასონურით და ჭანჭიკებით აწყობილი კვანძებიანი მილების კონსტრუქციის რღვევა იწყება მისი ერთ-ერთი კვანძის მზიდუნარიანობის ამოწურვით, მაგრამ ჩვენ მიერ განხილულ შემთხვევაში წამწის მზიდუნარიანობის ამოწურვა მოხდა ზედა სარტყელის კედლის ადგილობრივი მდგრადობის დაკარგვის შედეგად, ამავე დროს კვანძების უმრავლესობამ შეინარჩუნა საჭირო სიმტკიცე. მაგრამ, მიღებიანი წამწის მზიდუნარიანობა პირველ როგში განისაზღვრება კვანძური შეერთების სიმტკიცით. ამასთან, როგორც გვიჩვენა შემუშავებული წამწეების კონსტრუქციის ექსპერიმენტულმა გამოკვლევებმა, დაშლის მომენტში კვანძების მზიდუნარიანობა 30-40%-ით ნაკლებია გამოთვლილთან შედარებით.

3. დასკვნა

1. გაანალიზებულია ბირთვული რეაქტორების კონსტრუირებისათვის საჭირო ლითონების სტრუქტურაზე დასხივების გავლენის თავისებურებები;
2. შესწავლილია მაღალი ენერგიების ნაწილაკების დასხივების გავლენა ნაკეთობათა სიმტკიცეზე და მდგრადობაზე;
3. გამოვლენილია ნეიტრონული დასხივების მოქმედების შედეგად დადლილობასა და ცოცვადობის თვისებების ცვლილებებს შორის კავშირი;
4. შედგენილია ფოლადის შენადნობებისათვის გრაფიკები, რომლებიც ახასიათებენ დენადობის ზღვარსა და დასხივების დოზას შორის კავშირს;
5. დამუშავებულია დასხივების შედეგად კონსტრუქციების ოპტიმალურად დაგეგმარების გაანგარიშებების მეთოდი;
6. მიღებულია დიფერენციალური განტოლებების შედგენის ზოგადი მეთოდები, მისი გამარტივების ხერხები კერძო შემთხვევებში. არაწრფივი დეფორმაციის პირობებში წყვეტილპარამეტრებიანი გარსებისა და ფირფიტების გაანგარიშებისათვის დასხივების დროს.
7. ჩატარებული ექსპერიმენტის საფუძველზე რადიაქტიური დასხივების დროს გამოკვლეულია კვანძების დაძაბულ მდგომარეობაზე ბმულ ელემენტებში გაჭიმვასა და კუმშვის გრძივი ძალების სხვადასხვა სიდიდის და თანაფარდობის გავლენა;
8. მიღებულია წამწის მთელი კონსტრუქციის მაღალი ენერგიების ნაწილაკების დასხივების გავლენა სიმტკიცისა და დეფორმირების ექსპერიმენტური გამოკვლევისას.
9. მიღებული ანალიზური და ექსპერიმენტული შედეგები მნიშვნელოვანია რეაქტორების კონსტრუქციებისა და მისი შემადგენელი კვანძების დამუშავების პრობლემისთვის.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Adamson G.M. Effects of Radiation on Structural Metals and Alloys,. ORNL-2054. Oct., 31, 1958. p. 192
2. Динс Дж., Винйфрд Дж. Радиационные эффекты в твердых телах. Пер. с англ. Под ред. Г.С. Жданова. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
3. Alger J.V., Skupien L.M. Neutron Radiation Emhrittlement at 500 F and 650 F of Reactor Pressure Vessel Steels. USAEC Conference on the Status of Radiation Effects Research on Structural Materials and the Implications to Reactor Desing, Chicago, Illinois, Oct. 15-16, 1959, TID-7588, Oct. 1960.
4. Balai N. et al. Reactor pressure Vessel Design For Nuclear Reactions. Symposium on Radiation Effects on Materials. Vol. 3. Am. Soc. Testing Materials, ASTM STP No. 233 1958.
5. ბიბილური მ. მასალათა ფიზიკო-მექანიკური თვისებების გამოყენება ნაკეთობათა საიმედოების გაზრდის მიზნით. ჟურნალი „ენერგია“ № 3 (46). 2008. გვ. 136-138.
6. Porter L.F. Radiation Effects in Steel. Materials in Nuclear Applications, ASTM STP No. 276.
7. Wilson J.C., Berggren R.G. HRP Radiation Metallurgy. ORNL-2614, Aug. 31, 1958, p. 98..
8. Oak Ridge National Laboratory. Quarterly Progress Report, ORNL-2432. Jan. 1958.
9. Leeser D.O. Mater. Methods, Manual 107. Aug. 1954.
10. Hawthorne J.R., Steele L.E. The Effect of Neutron Irradiation on the Charpy V and Drop Weight Test Transition Temperatures of Various Steels and Weld Metals. USAEC Conference on the Status of Radiation Effects Research on Structural Materials and the Implications to Reactor Design. Chicago, Illinois, Oct. 15-16, 1959, TID-7588, Oct. 1960.
11. Harries D.R. Studies at Harwell on Neutron Irradiation Effects in Steels. USAEC Conference on the Status of Radiation Effects Research on Structural Materials and the Implications to Reactor Design. Chicago, Illinois, Oct. 15-16, 1959, TID-7588, Oct. 1960.
12. Leeser D.O. HRP Radiation Metallurgy. ORNL-2614, Aug. 31, 1958, p. 98.
13. Watson J.F. Convair Astronautics. Частное сообщение. 1957.
14. Rich J.B. et al. The Effect of Heating Neutron Irradiated Beryllium. United Kingdom Atomic Energy Authority, AERE-M/R-2685, Sept. 1958.

15. Rartz M.H. Performance of Metals During Six Year Service in the Materials Testing Reactor. Proceedings of the Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of atomic Energy, Geneva, 5, P/1878, 1958.
16. Leeser D.O. Nucleonics, **18**, 1960.
17. Shober F.R. Battelle Memorial Institute. Неопубликованное сообщение. 1959.
18. Schaffnut W.O. Radiation Damage Studies of Boron Stainless Steel. Phillips Petroleum Co., IDO-16502, Jan. 1959.
19. Finniston H.M., Howe J.P. Metallurgy and Fuels. New York, Pergamon Press, Inc., 1959.
20. Конобеевский С.Т. и др. Влияние облучения на структуру и свойства делящихся материалов. В кн. «Материалы Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1955». Т.7. М., Госхимиздат, 1958.
21. Воронин И.М. и др. «Атомная энергия», 8, вып. 6 (1960).
22. McCartney R.F., Trozzo P.S. Electron Metallography of Neutron Irradiated Steels. Symposium of Electron Metallography, p. 63, ASTM, 1960; issued as report ASTM STP No. 262.
23. Reynolds M.B. et al. J. Metals, **7**, 555 (July 1955).
24. Kemper R.S., Jr., Kelly W.S. Am. Soc. Testing Mater., Proc, **56** (1950).
25. Makin M.J., Minter F.J. J. Inst. Metals, **85** (1957).
26. Правдюк Н.Ф. и др. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1958». Доклады советских ученых. Т. 3. М., Атомиздат, 1959.
27. Howe L.M. The Annealing of Irradiation Damage in Zircaloy-2 and the Effect of High-Temperature Irradiation on the Tensile Properties of Zircaloy-2. Chalk River, CRMet-922. Apr. 1960.
28. Howe L.M., Thomas W.R. The Effect of Neutron Irradiation on the Tensile Properties of Zircaloy-2. CRMet-827, AECL No. 809, March 1959.
29. Chockie L.J. In-Reactor Creep Measurements of Zircaloy. 2HW-64814, Apr. 1960.
30. Mehan R.L. Effects of Neutron Irradiation on the Room Temperature Tensile Properties of Zircaloy-3. GEKAPL, KAPL-M-RLM-17, July 1958.
31. ბიბილური მ. დასხივების შედეგად ნიკელისა და მისი შენადნობების მექანიკური და ფიზიკური ცვლილებები. პერიოდული სამეცნიერო ჟურნალი „ინტელექტი“, № 2 (31), 2008. გვ. 41-42.
32. Joseph W., Jr. Частное сообщение. E.I. du Pont de Nemours and Co., Savannah River Laboratory. Augusta, Georgia.

33. Kahle V.E. «Burst Testing of Irradiated Zircaloy-2 Tubing». GE-HAPO, HW-64168, March 1960.
34. Makin M.J., Minter F.J. *Acta Met.*, **8** (Oct. 1960).
35. Weston T.B. The Effect of Irradiation on the Thermal Expansion and Linear Dimensions of Certain Pile Construction Materials. The National Research Council, Department of Mine and Technical Surveys, Canada, CERMet 471, AD-229306.
36. Mehan R.L. Baldwin E.E. Effect on Neutron Irradiation on Notched Bend and Tensile properties of ASTM-201A Carbon Steel, KAPL-1874, Nov.9, 1957.
37. Cupp C.R. The Effect of Neutron Irradiation on the Mechanical Properties of Inconel-'X' and Inconel Nickel-Chromium Alloy. Chalk River. CRMet-870, Sept. 1959.
38. Bartz M.H. Radiation Damage Observations at MTR. TID-7515. Pt. 19-48 (1956).
39. Watanabe H.T. Radiation Damage Studies Program. ETR Loop Materials Progress Report III, IDO-16475, Sept. 1958.
40. Berggren R.G. et al. Tensile and Stress-Rupture Properties of Irradiated Stainless Steels and Inconel. USAEC Conference on the Status of Radiation Effects Research on Structural Materials and the Implications to Reactor Design, Chicago, Illinois, October 15-16, 1959, TID-7588, Oct. 1960.
41. Greenfield, Wilsdorf. *Naturw.* (1960).
42. Barnes R.S., Kancock N.H. The Effect of Neutron Irradiation Upon the Internal Friction of Copper Single Crystals at Liquid Nitrogen Temperatures. Atomic Energy Research Establishment, AERE-M/R-2436A, Nov. 1957.
43. Steele R.V., Wallace W.P. The Effect of Neutron Flux on the Mechanical Properties of Aluminum Alloys. LRL 145, May 1954. Declassified Sept. 20, 1954.
44. Thompson D.O. et al. *J. Appl. Phys.*, **21** (June 1957).
45. Gas-Cooled Reactor Project Quarterly Progress Report for Period Ending March 31, 1960. Oak Ridge National Laboratory, ORNL-2929, June 21, 1960.
46. Barnes R.S., Maxey D.J. The Nature of Radiation Induced Point Defect Clusters. Atomic Energy Research Establishment, Metallurgy Division, AERE-R-3348, June 1960
47. Silcox J., Hirsch P.B. *Phil. Mag.*, **4** (Dec. 1959).
48. Coltman R.R. et al. Gas-Cooled Reactor Project Quarterly Progress Report for Period Ending Bull. Phys. Soc., **4**. Ser. 2 (March 1959).
49. Corbett J.W., Walker R.M. The Effect of Neutron Irradiation Upon the Internal Friction of Copper Single Crystals at Liquid Nitrogen Temperatures. *Phys. Rev.*, **115**, 67 (July 1959).

50. Ells C.E. The Swelling of Beryllium From Neutron-Induced Gases. Chalk River. CRMet-809, AECL-719, Nov. 1958.
51. Claiborne H.C. Effects of Fast Neutron Reaction in the Beryllium Reflector of the HTR. Oak Ridge National Laboratory, ORNL-60-3-10, March 1960.
52. Ells G.E., Evans W. The Effect of Temperature During the Irradiation on the Behavior of Helium in Beryllium. Chalk River, Canada. CRMet-864, Oct. 1959.
53. Rich J.B. et al. The Effect of Heating Neutron Irradiated Beryllium. United Kingdom Atomic Energy Authority, AERE-M/R-2685, Sept. 1958.
54. Bruch C.A. et al. J. Metals, **8**, 1362, Oct. 1956.
55. Gray D.L. Radiation Damage Observations. Acta. Met., **7** (July 1959).
56. Adam J., Martin D.G. Measurements of Unit Cell and Physical Dimensions Changes of Molybdenum after Neutron Irradiation. Harwell, England, AERE-M/M-197, July 1958.
57. Franklin C.K. et al. Effects of Irradiation on the Mechanical Properties of Tantalum. BM1-1476, Nov. 18, 1960.
58. Kinchin G.H., Thompson M.W. J. Steels for Reactor Pressure Circuits. Iron Steel Inst. Spec. Nucl. Energy, **6**. 273 (1958).
59. Cooper H.G. et al. Steels for Reactor Pressure Circuits. Phys. Rev., **97**, 599 (1955).
60. Huntington H.B. Steels for Reactor Pressure Circuits. Iron Steel Inst. Spec. Report., **69** (1961).
61. Graber M.J., Ronsick J.H. ETR Radiation Damage Surveillance Programs Progress Report I. IDO-16628, Jan. 27, 1961.
62. Hawthorne J.R., Steele L.E. The Effect of Neutron Irradiation on the Charpy V and Drop Weight Test Transition Temperatures of Various Steels and Weld Metals. USAEC Conference on the Status of Radiation Effects Research on Structural Materials and the Implications to Reactor Design. Chicago, Illinois, Oct. 15-16, 1959, TID-7588, Oct. 1960.
63. რ. ცხვედაძე. რადიაქტიური დასხივების გზით წრიული ფირფიტებისა და დამრეცი კონუსური გარსების ოპტიმალური დაგეგმარება. „ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომები“. თბილისი, № 9(266). 1983, გვ. 91-94.
64. გ. ყალაბეგაშვილი. წრიული ცილინდრული გარსების ოპტიმალური დაგეგმარება რადიაქტიური დასხივების გზით. საქ. მეცნიერებათა აკადემიის „მოამბე“, 88, № 2, 1977.
65. Коваленко А.Д. Пластины и оболочки в роторах турбомашин. Изд-во АН УССР, Киев, 1955.

66. Микеладзе М.Ш. Введение в техническую теорию идеально-пластичных тонких оболочек. Изд-во «Мецниереба», Тбилиси, 1969.
67. Пригородский Н.И. Методы и средства определения полей деформации и напряжений. М.: Машиностроение, 1983.
68. Сухаров И.П. Экспериментальные методы исследования деформаций и прочности. М.: Машиностроение, 1987.
69. Дайчик М.Л., Пригоровский Н.И., Худшудов Г.Х. Методы и средства натурной тензометрии. М.: Машиностроение, 1989.
70. Экспериментальная механика: В 2-х томах. I том, Пер. с англ. / Под редакцией Крбаяси А. Н.: Мир, 1990. 616 с.
71. Экспериментальная механика: В 2-х томах. II том, Пер. с англ. / Под редакцией Крбаяси А. Н.: Мир, 1990. 552 с.
72. McMasret R.C. (Ed), Nondestructive Testing Handbook. Vol. 1, Rinald Press, New York, 1959.
73. Raymondo Philip. Static-Strain Measurement on Gas-Turbine Combustor Liners. Exp. Tech. 8, no 2 (1984). p. 46-49.
74. Archer R. and Razdan D. Stress Analysis of Railway Coach Body Panels by Means of the SPATE Technique, Proc. SEM Spring Conf. Exp. Mech. June 1985. pp. 723-850.
75. ფაილოძე ნ., ყიფიანი გ., ცხვედაძე რ. სწორხაზოვანი ხერცების მქონე გეგმაში დამრეცი სფერული გარსის დაძაბულ მდგომარეობაზე პლასტიკური დეფორმაციის ზემოქმედების გავლენა. ჰიდროინჟინერია, № 3(3) „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, თბილისი, 2007. გვ. 78-82.
76. ცხვედაძე რ., ყიფიანი გ., წიქარიშვილი. სწორკუთხედის ფორმის განივკვეთიანი პრიზმული ღეროს გრესის სივრცითი ამოცანის მარტივი გადაწყვეტა. მოხსენებათა კრებული საერთაშორისო კონფერენციის „მექანიკის არაკლასიკური ამოცანები“. ტომი I, ქუთაისი, 2007, გვ. 156-163.
77. Цхведадзе Р.М., Кипиани Т.О. и др. Оптимальное проектирование металлических пластинок и оболочек с применением непрерывных неоднородных материалов. Проблемы механики № 3 (20/1), Тбилиси, 2005. с. 70-75.
78. Цхведадзе Р.М., Мачаидзе Э.П., Кипиани Г.О. Расчет тонкостенных конструкций типа оболочек при помощи модели жестко-пластического тела. Известия высших учебных заведений. Машиностроение, № 3, Москва, 2005. с. 6-10.