

მასალათა მექანიკა

**ტემპერატურული გაფართოების კოეფიციენტის გაანგარიშების
მეთოდის დამუშავება ფაზური გარდაქმნის ტემპერატურულ
ინტერვალებში**

ოთარი ძიძავა

otar.dzidzava@atsu.edu.ge

ომარი კიკვიძე

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ქუთაისი, საქართველო

DOI: <https://doi.org/10.52340/atsu.2025.1.25.18>

ნაშრომში გაანალიზებულია დილატომეტრიული მრუდები და შემოთავაზებულია წრფივი გაფართოების კოეფიციენტის განსაზღვრის მეთოდიკა ფაზური გარდაქმნების ტემპერატურულ ინტერვალებში. შედარებითი ანალიზისათვის გამოყენებულია უცხოელი მკვლევრების მიერ ჩატარებული ექსპერიმენტები და მათ მიერ შემოთავაზებული მეთოდიკა. დილატომეტრიული მრუდის ფაზური გარდაქმნის ტემპერატურული ინტერვალი გაყოფილია ორ უბნად და მრუდების დამუშავებისათვის გამოყენებულია AutoCad-ისა და MathCad-ის პროგრამული პაკეტები. ნაპოვნია რეგრესიის კოეფიციენტების მნიშვნელობები MathCad-ის ჩაშენებული ფუნქციების საშუალებით და დადგენილია ტემპერატურული გაფართოების კოეფიციენტის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე თითოეულ უბანზე.

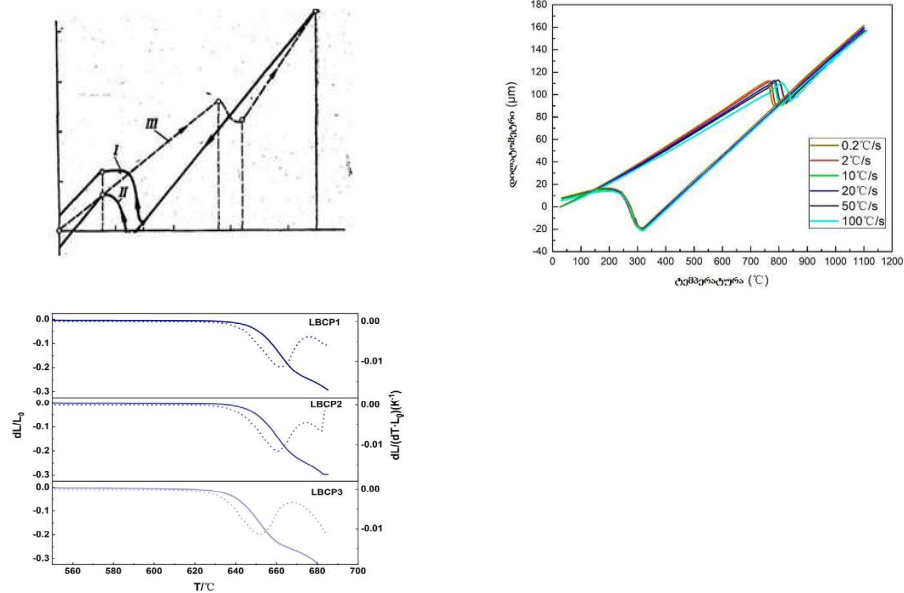
საკვანძო სიტყვები: ტემპერატურული გაფართოება, კოეფიციენტი, დილატომეტრიული მრუდი, წრფივი რეგრესია.

შედულების ძაბვების და დეფორმაციების წარმოქმნის უმთავრესი მიზეზი არის დილატომეტრიული ეფექტი. ტიპიური დილატოგრამები ნაჩვენებია 1-ელ ნახაზზე. შედულების ტექნოლოგიური პროცესისას სხეულის ტემპერატურა იცვლება ფართო დიაპაზონში, რომლის ფარგლებში ადგილი აქვს ფაზურ გარდაქმნებს. ფაზური გარდაქმნების ტემპერატურულ ინტერვალებში დეფორმაციების ცვლილებას აქვს არამონოტონური ხასიათი, რაც გავლენას ახდენს დამაბუღ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე შედულების ნაკერში. ამიტომ, შედულების ძაბვების გაანგარიშება წრფივი გაფართოების კოეფიციენტის გასაშუალებელი მნიშვნელობით არ არის გამართლებული. საჭიროა კოეფიციენტის ზუსტი აღწერა.

შედულების ტექნოლოგიური პროცესის მიმდინარეობისას შედულების ძაბვებისა და დეფორმაციების წარმომქმნა-ჩამოყალიბება

დამოკიდებულია, როგორც ტემპერატურული ველის განაწილებაზე, ასევე თერმული ციკლის ბუნებაზე. იმ შემთხვევაში, თუ გაანგარიშება ხდება მიახლოებითი მნიშვნელობებით, მაშინ სავსებით საკმარისია თერმული პროცესების თეორიის გამოყენება, რომელიც დაფუძნებული იქნება თბოგამტარობისა და სითბოტევადობის მუდმივ საშუალო მნიშვნელობებზე, განსახილველი ტემპერატურის მთელ დიაპაზონში. როგორც წესი, ყველაზე დიდი სხვაობა ექსპერიმენტულ და თეორიულ მონაცემებს შორის მიიღება მაღალი ტემპერატურის მოქმედების ზონებში. შედუღების დეფორმაციების გაანგარიშების თეორიულ წყაროებში, გამოთვლების უმეტესობა ნაწარმოებია არაუმეტეს 1150 K ტემპერატურულ დიაპაზონებში, ამიტომ შემთხვევებში როდესაც ტემპერატურული ველი აიღება პირობით $T > 1250$ K-ზე მიღებული ცვლილებები არის უმნიშვნელო. იმ შემთხვევაში, თუ გაანგარიშებები მიმდინარეობს მაღალი ტემპერატურული ველის მოქმედების ზონაში, როდესაც არსებობს ბზარების წარმოქმნის საშიშროება, დეფორმაცია უნდა განისაზღვროს ზუსტი მეთოდის გამოყენებით, მიზანშეწონილია მოხდეს, როგორც სითბოს წყაროს განაწილების, ასევე თერმულ-ფიზიკური კოეფიციენტების დამოკიდებულების გათვალისწინება ტემპერატურაზე (Vinokurov, 1984).

ცნობილია რომ, ფოლადების შედუღების პროცესის მიმდინარეობისას, შენადუდი მასალის საბოლოო სახის ჩამოყალიბებაში, სხვა მრავალ მოქმედ ფაქტორთან ერთად მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ისეთი ფიზიკური მახასიათებელი, როგორიცაა ტემპერატურული გაფართოების კოეფიციენტი. ეს სწორედ ის სიდიდეა, რომელზედაც აქტიური დაკვირვება მოგვცემს საშუალებას დეტალურად იქნეს აღწერილი შენადუდ ელემენტში მიმდინარე ფაზური გარდაქმნები, გადაადგილებები და დეფორმაციები, რომლის დახასიათება და აღწერაც წარმოადგენს ჩვენი კვლევის მთავარ მიზანს.



ნახ. 1. ტიპური დილატომეტრიული მრუდები.

ნაშრომში (Babinetz, 2019) ავტორი მიზნად ისახავს აღწეროს თხელი ლითონის ფირფიტის შედუღებისას თუ რაოდენ დიდ როლს თამაშობს ლითონის ქიმიურ-ფიზიკური სტრუქტურა, შედუღებული მასალის გაციების შემდგომ დეფორმაციების წარმოქმნაზე.

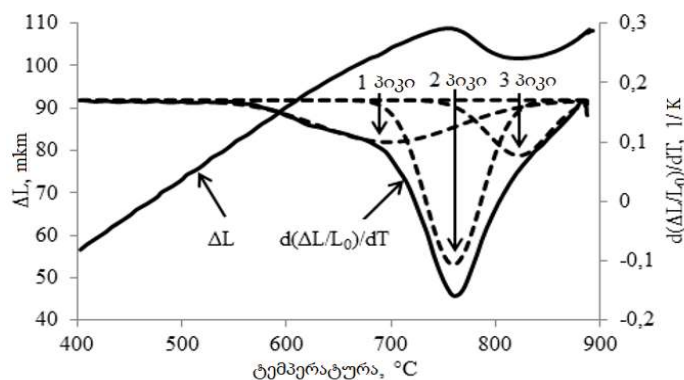
ექსპერიმენტის შედეგად მიღებული შედეგები მოცემულია პირველი ცხრილის სახით:

ფოლადის მარკა	თბური გაფართოების კოეფიციენტი α , $10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$								
	20... 100	20... 200	20... 300	20... 400	20... 500	20... 600	20... 700	20... 800	20... 900
08 კП*	12,5	13,4	14	14,5	14,9	15,1	15,3	14,7	14,7
4X5ΦMC*	12,6	13,1	13,7	14	14,3	14,6	14,7	14,6	14,1
20X23H18*	14,9	15,7	16,6	17,1	17,5	17,8	18,2	-	-

შენიშვნა: ლიტერატურაში სამწუხაროდ არ მოიპოვება ზუსტი თბური გაფართოების კოეფიციენტის მნიშვნელობები კვლევაში გამოყენებული მასალებისათვის, ამიტომაც აღებულია მაქსიმალურად მიახლოებული მნიშვნელობები.

1-ელი ცხრილიდან ჩანს, რომ ნებისმიერ ტემპერატურულ ინტერვალში, მათ შორის, საკმაოდ ფართო ინტერვალში 20-900 °C, თბური გაფართოების კოეფიციენტი მუდმივია, თუმცა იცვლება მცირე ინტერვალთან ინტერვალში გადასვლისას, რის შედეგადაც ფაზური გარდაქმნებისას მიმდინარე ცვლილებები ხდება ნაკლებად შესამჩნევი.

ნაშრომში (Panov, 2014) მოცემულია ფოლადი 10X3F3MΦ-ის დილატოგრამა (ნახ.2). მრუდის მისაღებად დილატომეტრიული კვლევები იყო ჩატარებული Linseis RITA L78 გამკვრივების დილატომეტრზე ნიმუშების ჰორიზონტალური განლაგებით უწყვეტი გათბობის დროს, შემდეგი სიჩქარეებით: 400, 90, 20 და 0.6 °C/წმ. ექსპერიმენტული მონაცემების შეგროვება და დამუშავება იქნა განხორციელებული WIN – DIL, Fityk და Linseis Data Evaluation პროგრამული პაკეტის გამოყენებით. თხელი სტრუქტურა შესწავლილ იქნა FEI Tecnai 20 G2 TWIN გადამცემი ელექტრონული მიკროსკოპის გამოყენებით (Panov, 2014).



ნახ. 2. ფოლადი 10X3F3MΦ-ის დილატომეტრიული მრუდი.

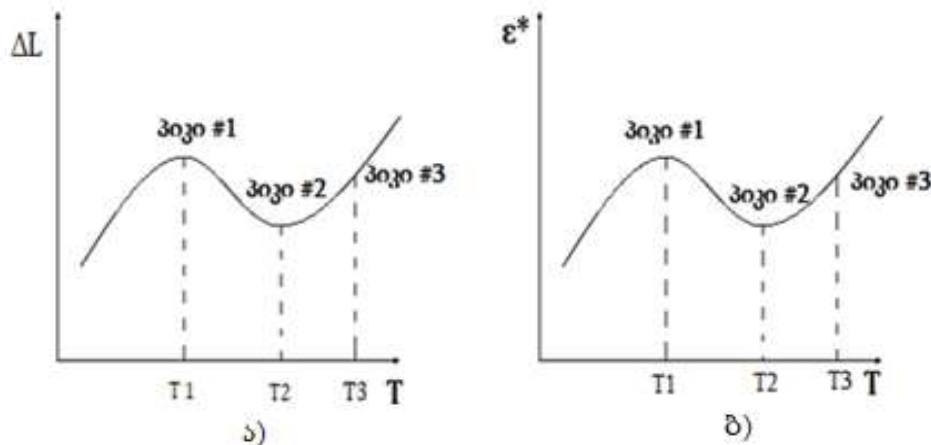
მე-2 ნახაზიდან ჩანს, რომ ფაზური გარდაქმნების ტემპერატურულ ინტერვალში [688 – 845]°C დეფორმაცია იცვლება არამონოტონურად. შესაბამისად ტემპერატურული გაფართოების კოეფიციენტი მნიშვნელოვნად იცვლება არამარტო სიდიდით არამედ ნიშნითაც. ამიტომ ფაზური გარდაქმნის ტემპერატურულ ინტერვალში ტემპერატურული გაფართოების კოეფიციენტი ვერ ჩაითვლება მუდმივად და საჭიროა მისი უფრო ზუსტი აღწერა.

დილატომეტრიული მრუდი წარმოადგენს ჩვენი კვლევის ძირითად ორიენტირს. მის საფუძველზე ვახდენთ ფაზური გარდაქმნის პიკური

ო. ძიძაგა, ო. კიკვიძე

ტემპერატურული ინტერვალების გამოყოფას, (ნახ.3) პიკურ წერტილებს შორის ინტერვალებს $[T_1, T_2]$ და $[T_2, T_3]$ ვყოფთ მაქსიმალურად მცირე ინტერვალებად და მონაცემების დამუშავებას ვახდენთ მათემატიკური რედაქტორის MathCad-ის ბაზაში.

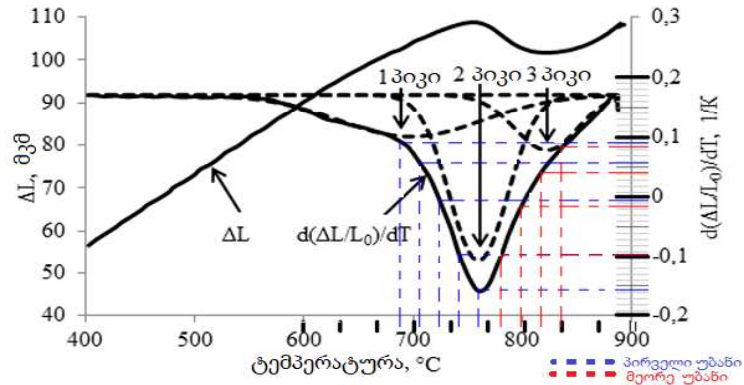
ქვემოთ ნაჩვენებია დილატომეტრიული მრუდის დამუშავების ჩიპიური დიაგრამა(ნახ.3). დეფორმაცია განისაზღვრება, როგორც $\epsilon = \Delta L / L_0$. სადაც ΔL ნიმუშის წაგრძელებაა, ხოლო L_0 – ნიმუშის საწყისი სიგრძე, შესაბამისად $\Delta L = L - L_0$. ტემპერატურული გაფართოების კოეფიციენტი $[T_1, T_2]$; $[T_2, T_3]$ ინტერვალებში განისაზღვრებიან შემდეგნაირად: $\alpha = d\epsilon/dT \approx \Delta \epsilon / \Delta T$.



ნახ. 3. დილატოგრამის დამუშავების ტიპური სქემა:

- ა) ნიმუშის წაგრძელების დამოკიდებულება ტემპერატურაზე,
- ბ) დეფორმაციის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე.

ფაზური გარდაქმნებისას მიმდინარე პროცესის მაქსიმალური სიზუსტით აღწერის მიზნით კვლევის საგნად შეირჩა ტემპერატურული ინტერვალი 688-დან 845°C-მდე, მეტი თვალსაჩინოებისათვის მონაკვეთი დაიყო 2 უბნად, თითოეულში 4 თანაბარ სეგმენტად. გრაფიკის დამუშავება მოხდა მრავალფუნქციური მხაზველობითი პროგრამა AutoCad 3D-ს (Leach, Lockhart, 2022) მეშვეობით, ხოლო მონაკვეთის შესაბამისი მონაცემები შეტანილ იქნა მათემატიკურ რედაქტორში(MathCad).

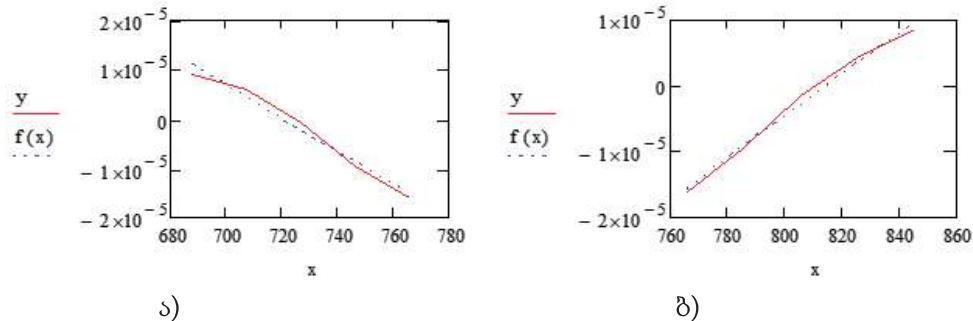


ნახ. 4. შერჩეული დილატოგრამის დამუშავება უზნებად AutoCad 3D-ს მეშვეობით.

დილატოგრამის გრაფიკის უზნებად დამუშავების შემდეგ, მიღებული რიცხვითი მონაცემები, შეტანილ იქნა შესაბამის მათემატიკურ რედაქტორ მათკადში (MathCad). გამოთვლებისათვის გამოყენებულ იქნა ჩაშენებული ფუნქცია “PWRFIT”-ი (Kiryanov, 2013). სადაც $\alpha(T)$ ფუნქცია იძებნება ხარისხობრივი ფუნქციის სახით: $\alpha(T) = C_0 T^{C_1} + C_2$.

ორი უბნისათვის $[T_1, T_2]$ და $[T_2, T_3]$ გაანგარიშებით დადგენილ იქნა C_0, C_1, C_2 მუდმივების რიცხვითი მნიშვნელობები, პირველი უბნისათვის $[T_1, T_2]$, რომელიც მოიცავდა ტემპერატურულ დიაპაზონს 688-დან 766°C-მდე, $C_0 = 0.139$; $C_1 = -1.773 \cdot 10^{-3}$; $C_2 = -0.137$. ხოლო მეორე უბანისათვის კი, რომელიც მოიცავს ტემპერატურულ დიაპაზონს 766-დან 845°C-მდე, $C_0 = 0.114$; $C_1 = 2,211 \cdot 10^{-3}$; $C_2 = -0.116$. მე-5 ნახაზზე ნაჩვენებია ექსპერიმენტული მრუდები და MathCad.

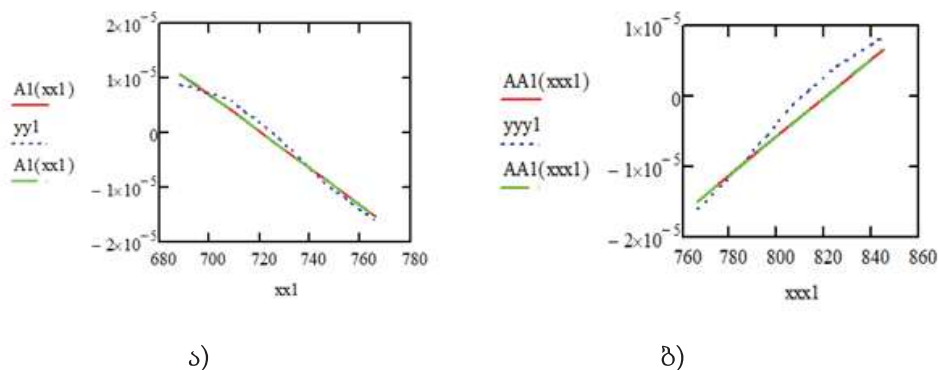
ხშირად ტემპერატურული გაფართოების კოეფიციენტის დამოკიდებულებას წარმოადგენენ წრფივი ფუნქციის სახით, რაც უფრო მოსახერხებელს ხდის ძაბვებისა და დეფორმაციების რიცხვით გაანგარიშებებს. წრფივი რეგრესიით ექსპერიმენტული მონაცემები დამუშავებულ იქნა (MathCad) სისტემაში. გამოთვლებისათვის გამოყენებულ იქნა ჩაშენებული ფუნქცია “REGRESS”-ი (Kiryanov, 2013). X, Y და K იგივე მონაცემებისათვის გაანგარიშებით მიღებული შედეგები წარმოდგენილია წრფივი ფუნქციის სახით: $Y = AX + B$. შესაბამისად $\alpha(T)$ ფუნქცია იძებნება წრფივი ფუნქციის სახით: $\alpha(T) = AT + B$.



ნახ. 5. მათემატიკურ რედაქტორში(MathCad) მიღებული შედეგები უზნებად:

- ა) ტემპერატურული დიაპაზონი 688-დან 766°C-მდე,
ბ) ტემპერატურული დიაპაზონი 766-დან 845°C-მდე.

გაანგარიშებით დადგენილი რეგრესიის კოეფიციენტების რიცხვითი მნიშვნელობები პირველი უბნისათვის რომელიც მოიცავს ტემპერატურულ დიაპაზონს 688-დან 766°C-მდე კოეფიციენტები ლეზულობენ შემდეგ რიცხვით მნიშვნელობებს: $A = -3.359 \cdot 10^{-7}$; $B = 2.42 \cdot 10^{-4}$, ხოლო მეორე უბანისათვის კი, რომელიც მოიცავს ტემპერატურულ დიაპაზონს 766-დან 845°C-მდე, შესაბამისი $A = 2.271 \cdot 10^{-7}$; $B = -2.273 \cdot 10^{-4}$. ნახ. 6-ზე ნაჩვენებია ექსპერიმენტული მრუდები და გაანგარიშებებით მათკადში (MathCad) აგებული წრფივი რეგრესიის ფუნქციები.



ნახ. 6. მათემატიკურ რედაქტორში(MathCad) მიღებული წრფივი რეგრესიის შედეგები უზნებად:

- ა) ტემპერატურული დიაპაზონი 688-დან 766°C-მდე,
ბ) ტემპერატურული დიაპაზონი 766-დან 845°C-მდე.

გაანგარიშებული კოეფიციენტების მიხედვით წრფივი ტემპერატურული გაფართოების კოეფიციენტის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე ტემპერატურულ ინტერვალში [688- 766°C] ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$\alpha(T) = -3.359 \cdot 10^{-7} \cdot T + 2.42 \cdot 10^{-4} \quad (1)$$

ხოლო ტემპერატურულ ინტერვალში [766- 845°C] გამოისახება შემდეგი ფორმულით:

$$\alpha(T) = 2.271 \cdot 10^{-7} \cdot T - 2.273 \cdot 10^{-4} \quad (2)$$

შედეგების ანალიზი. ფაზური გარდაქმნის ტემპერატურული ინტერვალები დაყოფილია ორ ნაწილად, მიღებული შედეგების საფუძველზე ცალკეულ უბნებზე ნაპოვნია და გაანალიზებულია α კოეფიციენტის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე რეგრესიის განტოლების სახით. განხილულია ხარისხობრივი რეგრესიის და წრფივი რეგრესიის განტოლებები. განსაზღვრულია რეგრესიის კოეფიციენტები რიცხობრივად Mathcad ჩაშენებული ფუნქციების გამოყენებით. (1) და (2) წრფივი განტოლებები მოსახერხებელია შედუღების დეფორმაციებისა და გადაადგილებების შემდგომი გაანგარიშებისათვის.

ლიტერატურა

- Babinetz, A.A. 2019. *Influence of the chemical composition and structure of the weld metal on the deformation of thin steel plates*. Kiev (in Russian).
- James, A. Leach., Shawna, Lockhart. 2022. *AUTOCAD 3D 2023 INSTRUCTOR*. SDC Publications. Kiryanov, Dimitry. 2006. *Self-study MathCad 13*. (in Russian).
- Panov, D.O. 2014. „Dilatometric studies of austenitization processes in the intercritical temperature range of hardened and high-tempered low-carbon steel“ // *Modern Problems of Science and Education*. No. 6. (in Russian). URL: <https://scienceeducation.ru/ru/article/view?id=16033>
- Vinokurov, V.A. 1984. *The theory of welding stress and deformations*, Moscow (in Russian).

Mechanics of Materials

Development of a method for calculating the coefficient of thermal expansion in phase transformation temperature intervals

Otari Dzidzava

otar.dzidzava@atsu.edu.ge

Omari Kikvidze

Akaki Tsereteli State University

Kutaisi, Georgia

DOI: <https://doi.org/10.52340/atsu.2025.1.25.18>

The paper analyzes dilatometric curves and proposes a method for determining the coefficient of linear expansion in the temperature intervals of phase transformations. Experiments conducted by foreign researchers and the method proposed by them are used for comparative analysis. The temperature interval of the phase transformation of the dilatometric curve is divided into two regions, and the „AutoCad“ and „MathCad“ software packages are used for the simulation. The values of the regression coefficients are found using the built-in functions of „MathCad“ and the dependence of the coefficient of thermal expansion on temperature in each region is determined.

Keywords: thermal expansion, coefficient, dilatometric curve, linear regression.

The main reason for the occurrence of welding stress and strains is the dilatometric effect. Typical dilatograms are shown in Fig. 1. During the welding process, the body temperature changes in a wide range, within which phase transformations occur. The change of deformations in the temperature intervals of phase transformations has a non-monotonic character, which affects the strain-stress state in the weld seam. Therefore, the calculation of welding stresses using the average value of the coefficient of linear expansion is not justified. An accurate description of the coefficient is required.

During the welding technological process, the formation of welding stresses and deformations depends both on the distribution of the temperature field and on the nature of the thermal cycle. If the calculation is made with approximate values, then it is quite sufficient to use the theory of thermal processes, which will be based on constant average values of thermal conductivity and heat capacity, over the entire temperature range under consideration. As a rule, the largest difference between experimental and theoretical data is obtained in the zones of high temperature action. In theoretical sources for calculating welding deformations, most of the calculations are made in temperature ranges not exceeding 1150 K, therefore, in cases where the temperature field is taken

conditionally at $T > 1250$ K, the changes obtained are insignificant. If calculations are carried out in the zone of action of a high-temperature field, when there is a danger of crack formation, the deformation should be determined using an accurate method, it is advisable to take into account both the distribution of the heat source and the dependence of the thermal-physical coefficients on temperature (Vinokurov, 1984).

It is known that during the welding process of steels, in the formation of the final appearance of the alloy material, along with many other factors, a physical characteristic such as the coefficient of thermal expansion plays an important role. This is precisely the case, whose active observation will allow us to describe in detail the phase transformations, displacements, and deformations occurring in the alloy element, the characterization and description of which is the main goal of our research.

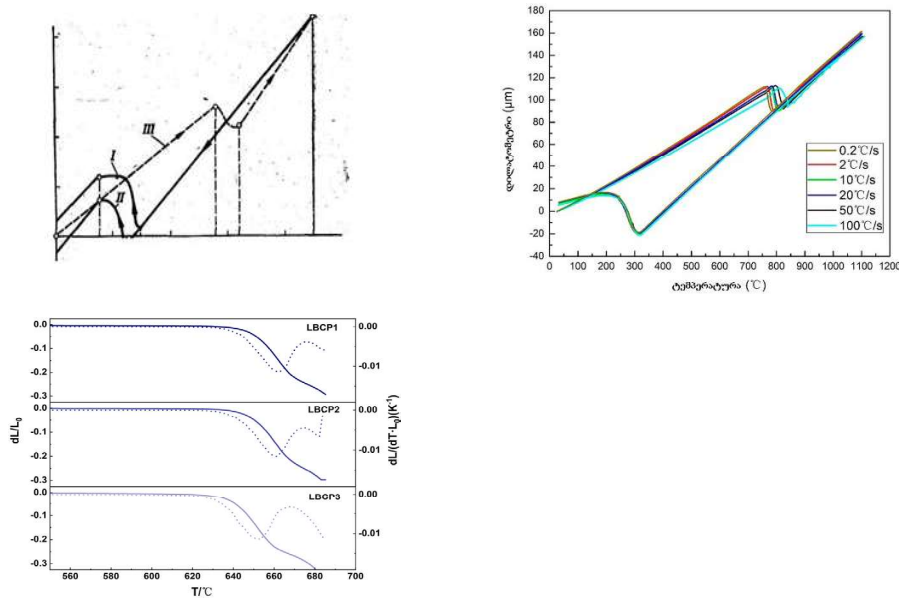


Fig. 1. Typical dilatometric curves.

In the work (Babinetz, 2019), the author aims to describe how much an important role the chemical-physical structure of the metal plays in the formation of deformations, after the cooling of the welded material, during the welding of a thin metal plate.

The results of the experiment are given in the form of Table 1.

Table 1. Thermal expansion coefficients for steel materials, in the temperature range 20...900 °C

Class of steel	Thermal expansion coefficient α , $10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$								
	20... 100	20... 200	20... 300	20... 400	20... 500	20... 600	20... 700	20... 800	20... 900
08 კП*	12,5	13,4	14	14,5	14,9	15,1	15,3	14,7	14,7
4X5ΦMC*	12,6	13,1	13,7	14	14,3	14,6	14,7	14,6	14,1
20X23H18*	14,9	15,7	16,6	17,1	17,5	17,8	18,2	-	-

Note: Unfortunately, the literature does not provide exact values for the materials used in the study, so the closest possible values have been taken.

Table 1 shows that in any temperature interval, including the rather wide interval of 20-900 °C, the coefficient of thermal expansion is constant, although it changes slightly from interval to interval, as a result of which the changes occurring during phase transformations become less noticeable.

The work (Panov, 2014) provides a dilatogram of steel „10X3Г3МΦ“ (Shown on Fig. 2). To obtain the curve, dilatometric studies were carried out on a “Linseis RITA L78” hardening dilatometer with horizontal placement of samples during continuous heating at the following rates: 400, 90, 20 and 0.6 °C/s. Experimental data collection and processing were carried out using the “WIN – DIL, Fityk and Linseis Data Evaluation” software packages. The thin structure was studied using a FEI Tecnai 20 G2 TWIN transmission electron microscope (Panov, 2014).

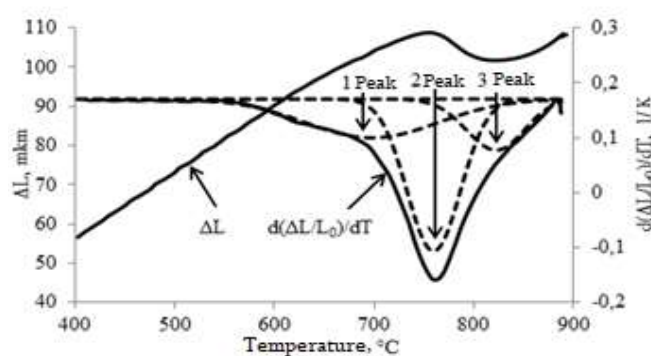


Fig. 2. Dilatometric curve of steel „10X3Г3МΦ“.

Fig. 2 shows that in the temperature interval of phase transformations $[688 - 845]^{\circ}\text{C}$ the deformation changes non-monotonically. Accordingly, the coefficient of thermal expansion changes significantly not only in range, but also in sign. Therefore, in the temperature interval of phase transformations, the coefficient of thermal expansion cannot be considered constant and its more precise description is required.

The dilatometric curve is the main reference point for our research. Based on it, we are isolating the peaks of temperature intervals of the phase transformation, (As shown on Fig. 3) We are dividing the intervals between the peak points $[T_1, T_2]$ and $[T_2, T_3]$ into the smallest possible intervals, and processing the data in the mathematical editor MathCad.

A typical diagram of the dilatometric curve processing is shown below (Fig. 3). The deformation is defined as $\epsilon = \Delta L / L_0$ Where ΔL is the elongation of the sample, and L_0 -the initial length of the sample, respectively $\Delta L = L - L_0$. The coefficient of thermal expansion in the intervals $[T_1, T_2]$; $[T_2, T_3]$ is defined as follows: $\alpha = d\epsilon/dT \approx \Delta \epsilon / \Delta T$.

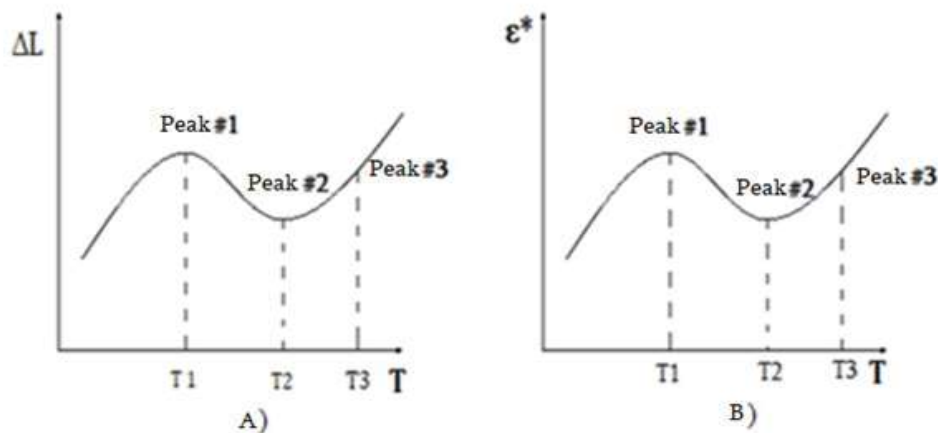


Fig. 3. Typical scheme of dilatogram processing:

- A) The dependence of the sample elongation on temperature,**
- B) The Dependence of deformation on temperature.**

In order to describe the process occurring during phase transformations with maximum accuracy, the temperature interval from 688 to 845°C was selected as the subject of the study. For greater clarity, the section was divided into 2 areas, each with 4 equal segments. The graph was processed by using the multifunctional

drawing program AutoCad 3D (Leach, Lockhart, 2022), and the corresponding data of the section were entered into the mathematical editor (MathCad).

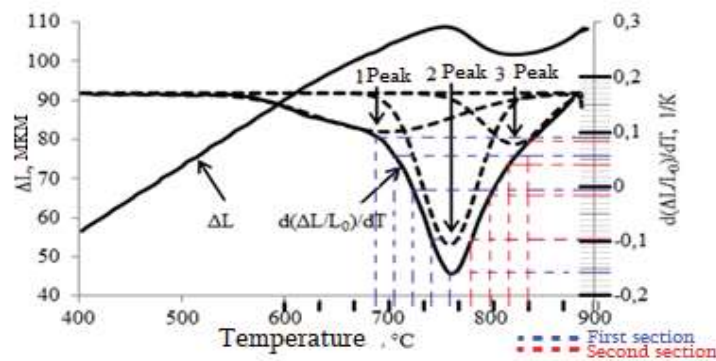


Fig. 4. Processing of selected dilatogram into areas using AutoCad 3D.

After processing the dilatogram graph into sector, the obtained numerical data were entered into the appropriate mathematical editor MathCad. For calculations, the built-in function “PWRFIT” (Kiryanov, 2013) was used, where the $\alpha(T)$ function is found as a qualitative function: $\alpha(T) = C_0 T^{C_1} + C_2$.

For two sector $[T_1, T_2]$ and $[T_2, T_3]$, numerical values of the constants C_0, C_1, C_2 were determined by calculations. For the first sector $[T_1, T_2]$, which included the temperature range from 688 to 766°C, $C_0 = 0.139$; $C_1 = -1.773 \cdot 10^{-3}$; $C_2 = -0.137$. And for the second sector, which covers the temperature range from 766 to 845°C, the corresponding $C_0 = 0.114$; $C_1 = 2,211 \cdot 10^{-3}$; $C_2 = 0.116$. Fig. 5 shows the experimental curves and the approximation functions constructed by calculations in MathCad.

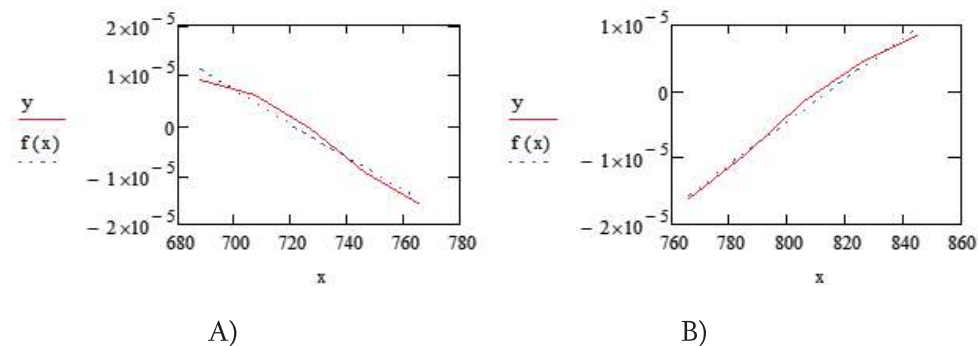


Fig. 5. Results obtained in the mathematical editor (MathCad) in sectors:

A) Temperature range from 688 to 766°C,

B) Temperature range from 766 to 845°C.

Often, the dependence of the coefficient of thermal expansion is represented as a linear function, which makes numerical calculations of stresses and deformations more convenient. The experimental data were processed by linear regression in the MathCad system. The built-in function “REGRESS” was used for calculations (Kiryanov, 2013). The results obtained by calculating for the same data X, Y, and K are presented as a linear function: $Y=AX+B$.

By calculating the regression coefficients, the numerical values for the first sector, which covers the temperature range from 688 to 766°C, the coefficients take the following numerical values: $A=-3.359 \cdot 10^{-7}$; $B=2.42 \cdot 10^{-4}$. And for the second sector, covering the temperature range from 766 to 845°C, corresponding to $A=2.271 \cdot 10^{-7}$; $B=-2.273 \cdot 10^{-4}$. Fig. 6 shows the experimental curves and linear regression functions constructed by calculations in MathCad.

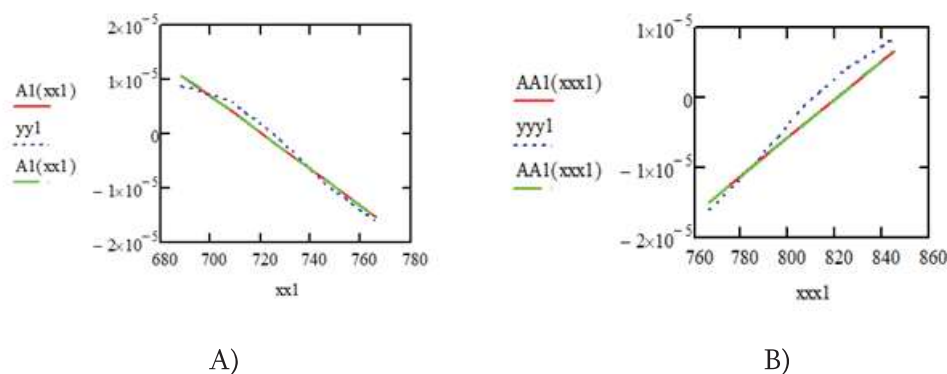


Fig. 6. Results of linear regression obtained in the mathematical editor (MathCad) into sectors:

A) Temperature range from 688 to 766°C.

B) Temperature range from 766 to 845°C.

According to the calculated coefficients, the dependence of the linear thermal expansion coefficient on temperature in the temperature interval [688- 766°C] is written as follows:

$$\alpha(T) = -3.359 \cdot 10^{-7} \cdot T + 2.42 \cdot 10^{-4} \quad (1)$$

And in the temperature range [766- 845°C] it is expressed by the following formula:

$$\alpha(T) = 2.271 \cdot 10^{-7} \cdot T - 2.273 \cdot 10^{-4} \quad (2)$$

Analysis of results. The temperature intervals of the phase transformation are divided into 2 parts. Based on the results obtained, the dependence of the α coefficient on temperature in individual areas was found and analyzed in the form of a regression equation. The equations of qualitative regression and linear regression are discussed. The regression coefficients are determined numerically using the built-in functions of Mathcad. For further calculation of deformations and displacements, linear equations (1) and (2) are convenient.