

UDC 514.18

O.M. GUMEN, I.B. SELINA
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF TEMPERATURE AND PHASE COMPOSITION OF TITANIUM ALLOY BY TIG WELDING

Titanium and its alloys have been widely used in varied industries such as aerospace, automobile, marine, chemical, medical due to their high strength, corrosion resistance and toughness. One of the factors constraining the widespread use of titanium alloys is the high cost of titanium parts, which is associated with the technology of their manufacture and the relatively high cost of the raw materials used. Reducing the cost of products involves the development of alloys using cheap raw materials and such technological processes that provide higher efficiency in the use of consumed energy and materials. The most promising in terms of reducing the price is the creation of economically alloyed alloys with improved processability, since for titanium the cost of manufacture accounts for most of the total cost of parts. In recent years, lowcost alloyed titanium alloys are becoming more common, in which expensive alloying elements are replaced by inexpensive and accessible elements, such as iron, carbon, oxygen and nitrogen, but their weldability is still under heavy investigation.

In this study a mathematical model of argon-arc welding with tungsten electrode of an economically alloyed titanium alloy Timetal LCB has been developed. To calculate the effect of welding mode parameters on the formation of a weld, a three-dimensional mathematical model of thermal processes in titanium was built for welding with a scanning heat source, which is based on the differential heat equation. Comparison of the calculation results with experimental data confirmed the adequacy of the developed mathematical model. Based on this model, the thermal fields in the welded joint are determined.

Nowadays the finite element method (FEM) is a suitable method for simulation of the welding process phenomena. It is possible the prediction of weld geometry through the optimization of the welding parameters, FEM simulation can calculate the weld pool shape, thermal distortion, residual stress and metallurgical change for various combinations of welding parameters. In FEM simulation, one of the topics is the choice of the heat source parameters, which is paramount for a satisfactory representation of welding process.

Keywords: model; thermal process; titanium alloy; methods of mathematical simulation; welding parameters.

O.M. ГУМЕН, І.Б. СЕЛІНА
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ І ФАЗОВОГО СКЛАДУ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ, ОТРИМАНИХ ТІГ ЗВАРЮВАННЯМ, МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Титан та його сплави широко використовуються в різних галузях промисловості, таких як аерокосмічна, автомобільна, морська, хімічна, медична завдяки високій міцності, корозійній стійкості та в'язкості. Одним із факторів, що стримують широке використання титанових сплавів, є висока вартість титанових деталей, що пов'язано з технологією їх виготовлення та відносно високою вартістю використаної сировини. Зниження собівартості продукції передбачає розробку сплавів з використанням дешевої сировини та таких технологічних процесів, що

забезпечують більш високу ефективність використання споживаної енергії та матеріалів. Найбільш перспективним з точки зору зниження ціни є створення економно легированих сплавів з покращеною технологічністю, оскільки вартість виготовлення титану становить більшу частину загальної вартості деталей. Останніми роками все частіше використовуються низько затратні титанові сплави, в яких дорогі легуючі елементи замінюються недорогими та доступними елементами, такими як залізо, вуглець, кисень та азот, але їх зварюваність ще залишається під значним дослідженням.

У даній роботі розроблена математична модель аргонодугового зварювання вольфрамовим електродом економно легированого титанового сплаву Timetal LCB. Для розрахунку впливу параметрів режиму зварювання на формування шва була побудована тривимірною математичною моделлю теплових процесів у титані для зварювання скануючим джерелом тепла, основана на диференціальному рівнянні теплопровідності. Порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними підтвердило адекватність розробленої математичної моделі. На основі цієї моделі визначаються теплові поля в зварному шві.

На сьогодні метод скінченних елементів (МСЕ) є підходящим методом для моделювання явищ зварювального процесу. Можливо прогнозування геометрії зварного шва за рахунок оптимізації параметрів зварювання, моделювання МСЕ дозволяє обчислити форму зварного шва, напруження, деформації та металургічні зміни для різних комбінацій параметрів зварювання. У моделюванні МСЕ одна з основних тем – це вибір параметрів джерела тепла, що є першорядним для задовільного подання зварювального процесу.

Ключові слова: модель; тепловий процес; титановий сплав; методи математичного моделювання; параметри зварювання.

Е.Н. ГУМЕН, И.Б. СЕЛИНА

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ TIG СВАРКОЙ, МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Титан и его сплавы широко используются в различных отраслях промышленности, таких как авиационная, автомобильная, морская, химическая, медицинская благодаря высокой прочности, коррозионной стойкости и вязкости. Одним из факторов, сдерживающих широкое использование титановых сплавов, является высокая стоимость титановых деталей, что связано с технологией их изготовления и относительно высокой стоимостью используемого сырья. Снижение себестоимости продукции предусматривает разработку сплавов с использованием дешевого сырья и таких технологических процессов, которые обеспечивают более высокую эффективность использования потребляемой энергии и материалов. Наиболее перспективным с точки зрения снижения цены является создание экономически легированных сплавов с улучшенной технологичностью, поскольку стоимость изготовления титана составляет большую часть общей стоимости деталей. В последние годы все чаще используются низко затратные титановые сплавы, в которых дорогие легирующие элементы заменяются недорогими и доступными элементами, такими как железо, углерод, кислород и азот, но их свариваемость еще остается под значительным исследованием.

В данной работе разработана математическая модель аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом экономно легированного титанового сплава Timetal LCB. Для расчета влияния параметров режима сварки на формирование шва была построена трехмерная математическая модель тепловых процессов в титане для сварки сканирующим источником тепла, основанная на дифференциальном уравнении теплопроводности. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными подтвердило адекватность разработанной математической модели. На основании этой модели определяются тепловые поля в сварном шве.

На сегодня метод конечных элементов (МКЭ) является подходящим методом для моделирования явлений сварочного процесса. Возможно прогнозирование геометрии сварного шва за счет оптимизации параметров сварки, моделирование МКЭ позволяет вычислить форму сварного шва, напряжение, деформации и металлургических изменений для различных комбинаций параметров сварки. В моделировании МКЭ одна из основных тем – это выбор параметров источника тепла, что является первостепенным для удовлетворительного представления сварочного процесса.

Ключевые слова: модель; тепловой процесс; титановый сплав; методы математического моделирования; параметры сварки.

Problem statement

Titanium and its alloys have been widely used in varied industries such as aerospace, automobile, marine, chemical, medical due to their high strength, corrosion resistance and toughness. One of the factors constraining the widespread use of titanium alloys is the high cost of titanium parts, which is associated with the technology of their manufacture and the relatively high cost of the raw materials used.

Reducing the cost of products involves the development of alloys using cheap raw materials and such technological processes that provide higher efficiency in the use of consumed energy and materials. The most promising in terms of reducing the price is the creation of economically alloyed alloys with improved processability, since for titanium the cost of manufacture accounts for most of the total cost of parts.

Analysis of recent reports and publications

In recent years, lowcost alloyed titanium alloys are becoming more common, in which expensive alloying elements are replaced by inexpensive and accessible elements, such as iron, carbon, oxygen and nitrogen [1], but their weldability is still under heavy investigation.

The finite element method (FEM) is a suitable method for simulation of the welding process phenomena. It is possible the prediction of weld geometry through the optimization of the welding parameters, FEM simulation can calculate the weld pool shape, thermal distortion, residual stress and metallurgical change for various combinations of welding parameters. In FEM simulation, one of the topics is the choice of the heat source parameters, which is paramount for a satisfactory representation of welding process.

For this research, an economically alloyed Timetal LCB alloy doped with cheap eutectoid-forming elements (i.e. iron in an amount of 4.5%) was chosen (Table 1).

Table 1

Chemical composition of lowcost titanium alloy Timetal LCB

<i>Ti</i>	<i>Mo</i>	<i>Fe</i>	<i>Al</i>	<i>O</i>
Base	6,8	4,5	1,5	0,15

This alloy belongs to the class of high-strength pseudo-beta titanium alloys and has the following mechanical characteristics (Table 2).

Table 2

Mechanical characteristics of the alloy

Ultimate tensile strength, MPa	Yield strength, MPa	El, %	RA, %	KCV, J/cm ²
1187	1166	13	40	3

When producing welded joints of pseudo-β-alloys by fusion welding, there are due to the high content of alloying elements in them, the crystalline structure of the β-phase of titanium and the tendency to develop chemical and physical heterogeneity in the weld metal and the HAZ. The specificity of phase and structural transformations in various parts of the welded joint caused by the thermal welding cycle, which results in a large number of metastable phases in the weld metal and HAZ, adversely affecting the mechanical properties of the welded joint, has a negative effect on the weldability of β-alloys. To reduce the formation of metastable phases, it is necessary to conduct welding with controlled cooling rates [2]. The use of preheating is one of the methods of influencing the cooling rate in a welded joint.

Purpose of the Study

Therefore, the purpose of this work is to study the effect of the thermal cycle of welding when using preheating on the shape and size of the weld metal and the HAZ, as well as on the cooling rate and phase composition of the cooling metal.

Description of Main Material of Research

The dependence of enthalpy on temperature for non-stationary thermal analysis with phase transition was determined for the pseudo-β titanium alloy Timetal LCB according to the Neumann-Kopp rule. In comparison with the technical titanium VT1-0, the heat capacity of the alloy Timetal LCB is 2 – 6% less, mainly due to the low heat capacity of *Fe* and *Mo* (Fig. 1).

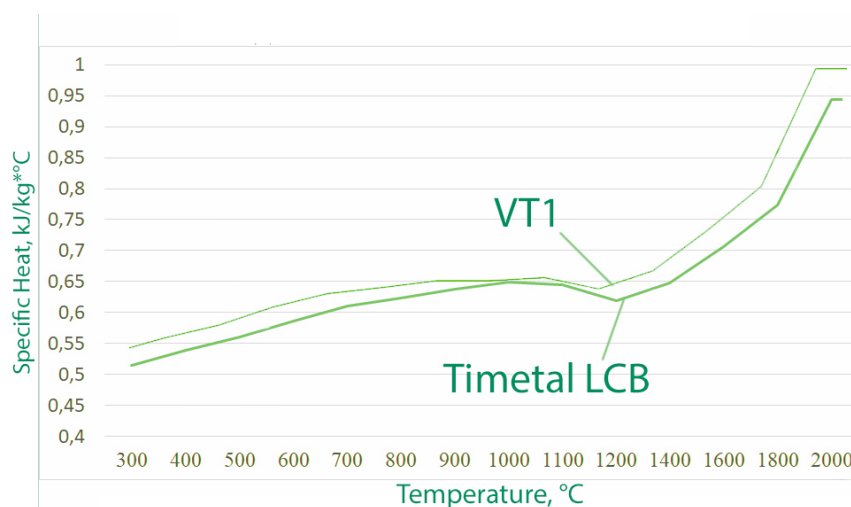


Figure 1. Comparison of the specific heat of VT1 technical titanium and Timetal LCB economically alloyed titanium alloy.

To calculate the effect of welding mode parameters on the formation of a weld, a three-dimensional mathematical model of thermal processes in titanium was built for welding with a scanning heat source, which is based on the differential heat equation:

$$\rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right).$$

The simulation was performed on a sample with dimensions 200x100x10mm, for which a finite element model was constructed. The following boundary conditions are formulated, describing the heat exchange of the product with the environment (Fig. 2).

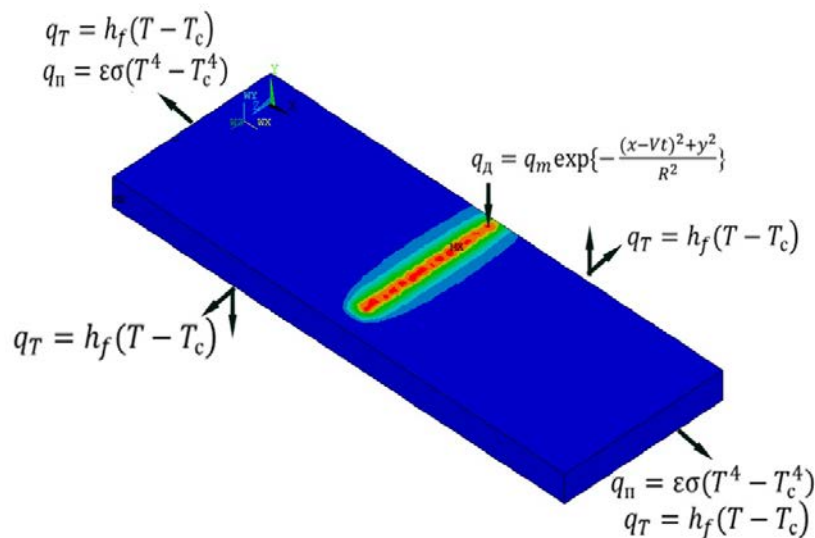


Figure 2. Boundary conditions describing the heat exchange products with the environment.

This model was used to simulate welding processes in titanium alloys VT23 and VT19 [3]. Comparison of the calculation results with experimental data confirmed the adequacy of the developed mathematical model (Fig. 3). The difference in the width of the deposited bead in the calculated and experimental sample was 3.1%, the width of the return bead was 2.4%.

Calculations of thermal fields were carried out for 4 welding modes, with lower and higher heat input, as well as with and without using preheating (Table 3).

According to the calculation results, the isotherms of maximum temperatures were constructed, with the help of which the depth and width of the weld metal and the heat-affected zone were determined (Fig. 4).

Welding modes were chosen, in which the complete penetration of the weld metal was absent. This is done to determine the effect of preheating on the form and the dimensions of the weld metal and HAZ. So, when using preheating in the mode with higher heat input (mode # 2), the penetration depth increased by 17% compared to the mode without preheating (mode # 1). For the regime with less heat input, the use of preheating increased the penetration depth by 16% (modes # 3 and # 4). At the same time, the width of the HAZ when using preheating also increased (Table 4).

The calculated cooling rates in the welded joint in different temperature ranges were constructed. In the temperature range of 1200 ... 1100° C, high cooling rates above 200° C / s are recorded. The diagram of the distribution of cooling rates (Fig. 5) shows that the cooling of the HAZ is more uniform using preheating.

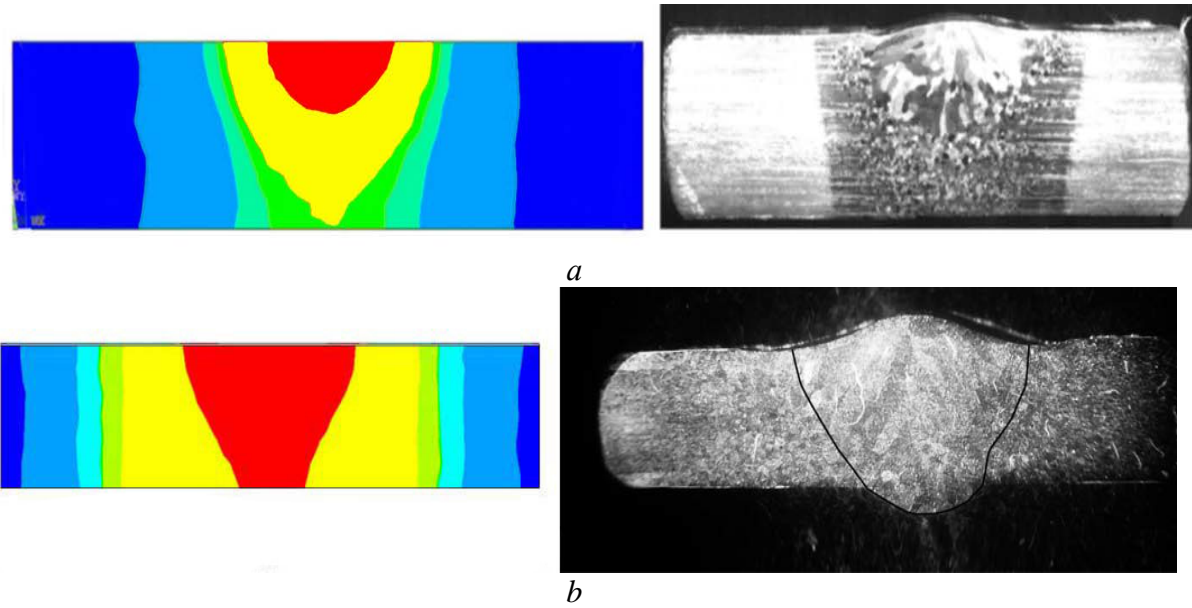


Figure 3. Adequacy of the developed mathematical model:
a – using the example of TIG welding of a two-phase high-strength titanium alloy VT23;
b – using the example of the TIG welding of a pseudo- β -titanium alloy VT19.

Table 3

Modes of argon-arc welding by tungsten electrode of lowcost titanium alloy Timetal LCB, for which modeling was performed

№	Welding current, A	Welding voltage, V	Welding speed, m/h	Heat input, kJ / cm ²
1	240	12	10	17280
2	240	12	10	17280
3	320	12	16	14440
4	320	12	16	14440

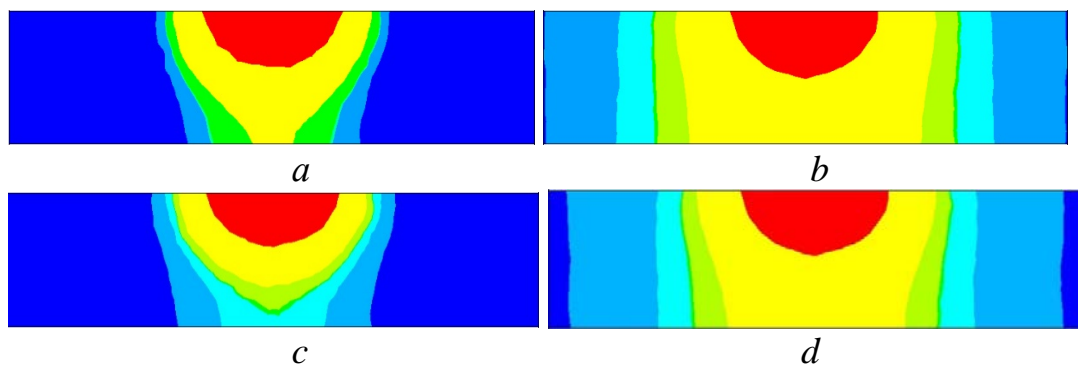


Figure 4. The depth and width of the seam metal and heat-affected zone of welded joints of lowcost titanium alloy Timetal LCB obtained in different welding modes:
a – mode № 1, *b* – mode № 2, *c* – mode № 3, *d* – mode № 4.

Table 4

Values of penetration depth of the weld metal and the width of the heat-affected zone

№	Penetration depth, mm	Width of HAZ, mm
1	4,22	10,81
2	5,11	11,18
3	4,02	9,89
4	4,80	11,08

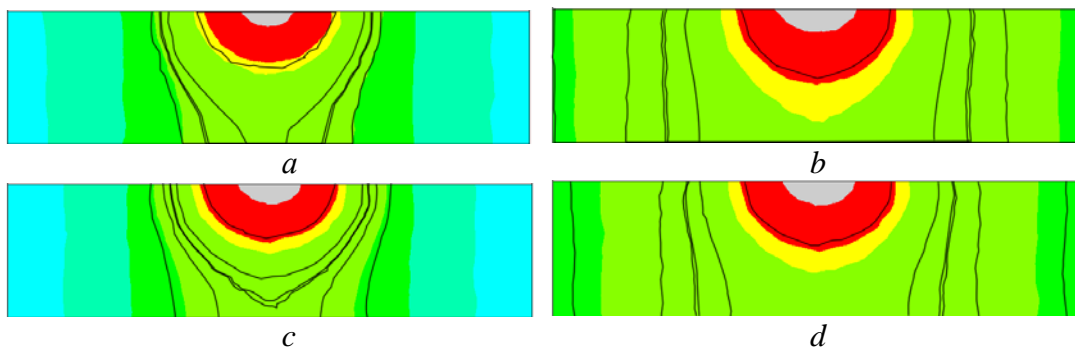


Figure 5. Cooling speeds in temperature range 1200-1000° C:
a – mode № 1, *b* – mode № 2, *c* – mode № 3, *d* – mode № 4.

The same is observed in the temperature range of 1000 ... 900° C, where cooling rates above 130° C / s are also recorded in all modes. Starting from the temperature range of 600 ... 500 C / s, the cooling rates are aligned in all modes, both with and without preheating (Fig. 6).

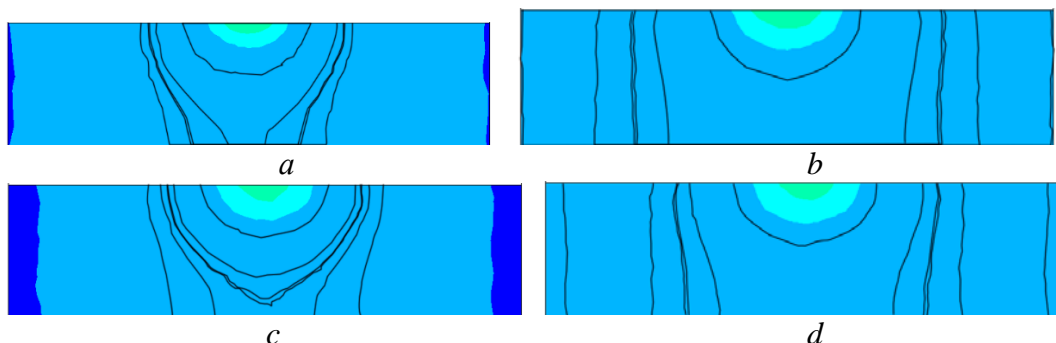


Figure 6. Cooling speeds in temperature range 600-500° C:
a – mode № 1, *b* – mode № 2, *c* – mode № 3, *d* – mode № 4.

Analyzing the obtained cooling rates, a comparative chart was drawn up (Fig. 7), from which it can be seen that the lowest values of the cooling rates are fixed at mode № 4 using preheating during welding with a lower heat input.

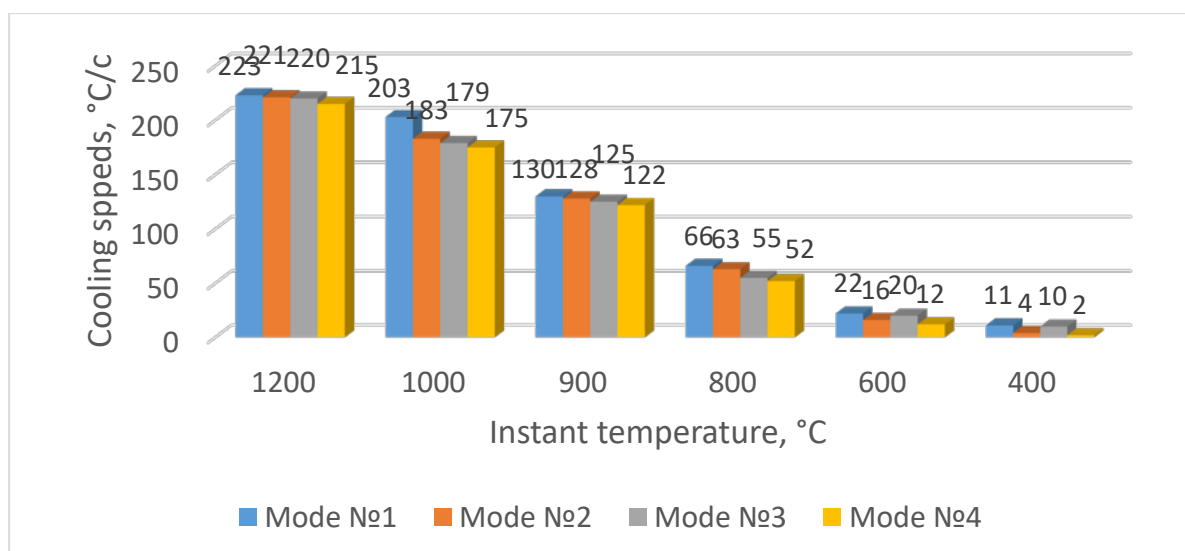


Figure 7. Values of cooling rates in different temperature ranges.

Conclusions

Taking into account the preheating of the welded joint to a temperature of 400° C, a mathematical model of argon-arc welding with tungsten electrode of an economically alloyed titanium alloy Timetal LCB has been developed. Based on this model, the thermal fields in the welded joint are determined. It is shown that the use of preheating leads to an increase in the depth of penetration by 16 ... 17%, and the width of the HAZ to 10%. The fields of cooling rates of the welded joint were constructed, which made it possible to conclude that with the use of preheating, the cooling rate is less than without using it. Based on this, assumptions were made that when using preheating and welding in a mode with lower heat input, there will be less metastable phases in the weld metal and HAZ, and accordingly, this welded joint will have better mechanical characteristics.

Список використаної літератури

1. Осипенко А. В. Разработка технологии получения сырья для сплавов титана из некондиционного титана губчатого. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. Т. 4. № 5. С. 28–32. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.47789.
2. Casalino G., Angelastro A., Perulli P., Casavola C., Moramarco V. Study on the Fiber Laser/TIG Weldability of AISI 304 and AISI 410 Dissimilar Weld. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018. Vol. 35. P. 216–225. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.005.
3. Casalino G., Hu S.J., Hou W. Deformation Prediction and Quality Evaluation of the Gas Metal Arc Welding Butt Weld. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2003. Vol. 217. Issue 11. P. 1615–1622. DOI: 10.1243/095440503771909999.

References

1. Osipenko, A. V. (2015). Razrabotka tekhnologii polucheniya syriya dlya spлавov titana iz nekonditsionnogo titana gubchatogo. *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*. 4, 5, 28–32. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.47789.
2. Casalino, G., Angelastro, A., Perulli, P., Casavola, C., & Moramarco, V. (2018). Study on the Fiber Laser/TIG Weldability of AISI 304 and AISI 410 Dissimilar Weld. *Journal of Manufacturing Processes*. 35, 216–225. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.005.

3. Casalino, G., Hu, S.J., & Hou, W. (2003). Deformation Prediction and Quality Evaluation of the Gas Metal Arc Welding Butt Weld. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. **217**, 11, 1615–1622. DOI: 10.1243/095440503771909999.

Гумен Олена Миколаївна – д.т.н., професор кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», e-mail: gumens@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3992-895X.

Селіна Ірина Борисівна – старший викладач кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», e-mail: irinaselina2016@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4010-3819.