

Komputerowa symulacja naprężeń powstających w wyniku zastosowanej obróbki cieplnej

Computer simulation of stresses occurring as a result of applied heat treatment

Robert Żuczek¹, Andrzej Gwiżdż², Damian Wróblewski³

¹*Instytut Odlewnictwa, Centrum Projektowania i Prototypowania, Pracownia Projektowania Komputerowego
Procesów Odlewniczych, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

²*Instytut Odlewnictwa, Zakład Stopów Żelaza, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

³*Krakowskie Zakłady Odlewnicze ZREMB S.A., ul. Mogilska 43, 31-543 Kraków*

¹*Foundry Research Institute, Design and Prototyping Center, Bureau for Computer Assisted Design of Casting Processes,
ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

²*Foundry Research Institute, Department of Ferrous Alloys, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

³*Krakowskie Zakłady Odlewnicze ZREMB S.A., ul. Mogilska 43, 31-543 Kraków*

E-mail: robert.zuczek@iod.krakow.pl

Streszczenie

Na podstawie przyjętych krzywych obróbki, określono rozkład pól temperatury w wybranych odlewach modelowych otrzymanych w trakcie analizy cieplnej, a następnie przyjmując te wartości jako warunki brzegowe przeprowadzono zintegrowaną analizę wytrzymałościową w celu określenia maksymalnych wartości opisujących wyężenie konstrukcji pod wpływem działających obciążeń cieplnych. Przeprowadzona statyczna analiza rozkładu naprężeń i przemieszczeń w odlewach umieszczonych w piecu zakładała usytuowanie jednego elementu, bez możliwości oddziaływania cieplnego z innymi konstrukcjami, przy założeniu dwóch schematów prowadzonej obróbki cieplnej.

Słowa kluczowe: komputerowa symulacja naprężeń w odlewach, żeliwo sferoidalne ferrytyczne, obróbka cieplna, odlewy dla kolejnictwa

Abstract

On the basis of assumed curves of treatment the distribution of temperature fields was determined in selected model castings achieved during heat analysis, then assuming these values as boundary conditions an integrated strength analysis was carried out with the aim of determining maximum values which describe the effort of the construction under the impact of operating heat stresses. The conducted static analysis of stresses and displacements in a casting placed in a furnace assumed placing a single element without the possibility of heat interaction with other elements, with the assumption of two schemes of conducted heat treatment.

Key words: computer simulation of stresses in castings, ferritic spheroidal graphite cast iron, heat treatment, castings for the rail industry ablation casting, aluminum alloys, microstructure

1. Wstęp

Symulowanie rzeczywistych warunków nagrzewania i chłodzenia według modelowych schematów cyklu obróbki cieplnej pozwala na zoptymalizowanie

1. Introduction

Simulating real heating and cooling conditions according to model schemes of the heat treatment cycle allows optimisation and selection of parameters for

i dobranie parametrów całego procesu, tak aby wyeliminować możliwość pęknięcia odlewów lub występowania deformacji spowodowanej prowadzoną obróbką cieplną.

Na podstawie krzywych cykli temperaturowych procesu ferrytyzacji według założonych cykli wyżarzania, przeprowadzono symulację rozkładu naprężeń cieplnych występujących w analizowanych odlewach w trakcie procesu nagrzewania i chłodzenia. Analizy numeryczne zakładały określenie rozkładu temperatur w trakcie symulowanych cykli nagrzewania, a następnie przeprowadzenie zintegrowanych analiz termiczno-wytrzymałościowych wykorzystujących otrzymane pola temperatur, jako warunki brzegowe do analiz wytrzymałościowych rozkładu naprężeń w odlewach podczas obróbki cieplnej.

2. Obróbka cieplna odlewów

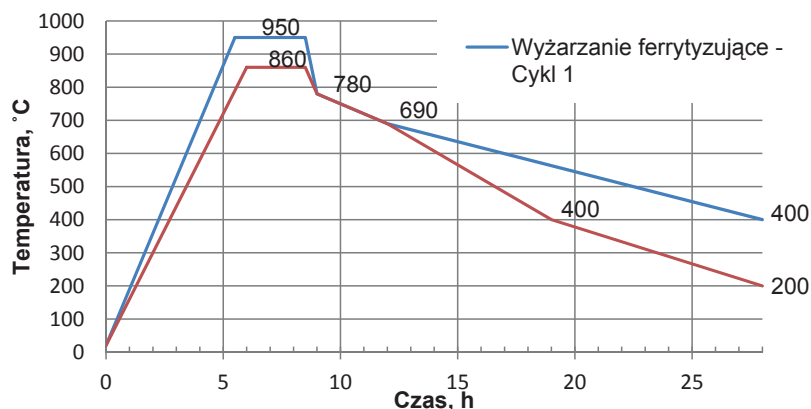
W celu przeprowadzenia analiz numerycznych przyjęto dwa cykle nagrzewania i chłodzenia [1].

the whole process in order to eliminate the possibility of cracks occurring in castings or the occurrence of a deformation caused by heat treatment.

On the basis of curves of temperature cycles of the ferritisation process according to assumed annealing cycles, a simulation of the distribution of heat stresses which occur in analysed castings during the process of heating and cooling was made. Numerical analyses assumed the determination of temperature distribution during simulated heating cycles, and then conducting integrated thermal-strength analyses which utilise the achieved temperature fields as boundary conditions for strength analyses of the distribution of stresses in castings during heat treatment.

2. Heat treatment of castings

In order to conduct numerical analyses two heating and cooling cycles were assumed [1].



Rys. 1. Modelowe cykle wyżarzania przyjęte w analizach numerycznych

Fig. 1. Model annealing cycles assumed in numerical analyses

Cykl pierwszy zakładał nagrzewanie odlewu w piecu do temperatury 950°C przez okres 5,5 godziny, wytrzymanie w tej temperaturze przez 3 godziny, a następnie studzenie do temperatury 400°C z dwoma przystankami, aż do osiągnięcia końca czasu obróbki wynoszącego 28 godzin. Cykl drugi zakładał nagrzewanie przez 6 godzin do temperatury 860°C, wytrzymanie w tej temperaturze przez 2,5 godziny, a następnie studzenie do temperatury 200°C, przy założeniu trzech punktów przystankowych. Ze względu na specyfikę prowadzonych analiz sprzężonych, uwzględniających zagadnienia cieplne i eksploatacyjne wybranego żeliwa EN-GJS-400-15, zaimplementowano z bazy danych programu ANSYS tworzywo odpowiadające wybranemu gatunkowi żeliwa, przy uwzględnieniu modyfikacji wykorzystywanych danych o parametry wytrzymałościowe i termiczne uzyskane na podstawie badań doświadczalnych prowadzonych w Instytucie Odlewnictwa. Zmodyfikowane żeliwo EN-GJS-400-15 wprowadzono do

The first cycle assumed heating the casting in the furnace to 950°C for approx. 5.5 hours, maintaining this temperature for 3 hours, and then cooling to 400°C with two breaks to reach the end of treatment time which was 28 hours. The second cycle assumed heating for 6 hours to 860°C, maintaining this temperature for 2.5 hours, and then cooling to 200°C, with the assumption of three breaks. Due to the specificity of conducted coupled analyses, which take into account heat and performance issues of the selected EN-GJS-400-15 cast iron, from the database created by ANSYS software material was implemented which corresponded to the type of selected cast iron, taking into account modifications of the utilised data with strength and thermal parameters obtained on the basis of the conducted experimental research in the Foundry Research Institute. Modified EN-GJS-400-15 cast iron was fed into the database of the simulation software, and the basic thermal and strength parameters are presented in Table 1. The data

bazy danych programu symulacyjnego, a podstawowe parametry termiczne i wytrzymałościowe przedstawiono w tabeli 1. Dane te zakładają temperaturę odniesienia wynoszącą 20°C, jednak w celu dokładnego opisanie zjawisk zachodzących w trakcie nagrzewania i chłodzenia, uwzględniono zmienne w funkcji temperatury.

assume a reference temperature which equals 20°C, however in order to describe the phenomena which occur during heating, in detail, variables in the function of temperature were accounted for.

Tabela 1. Podstawowe właściwości termiczno-wytrzymałościowe modelowego żeliwa EN-GJS-400-15 dla temperatury 20°C

Table 1. Basic thermal-strength properties of the model EN-GJS-400-15 cast iron for 20°C

Parametr/Parameter	
Gęstość/Density	7,850 g/cm ³
Moduł Younga / Young's modulus	200 GPa
Współczynnik Poissona / Poisson's ratio	0,3
Granica plastyczności / Yield strenght ($R_{0,2}$, R_e)	min. 250 MPa
Wytrzymałość na rozciąganie / Tensile strength	min. 400 MPa
Przewodność cieplna / Thermal conductivity	60,5 W/mK
Ciepło właściwe / Specific heat	434 J/kgK
Współczynnik rozszerzalności cieplnej / Coefficient of thermal expansion	1,21 $\mu\text{m/m}\cdot\text{K}$

3. Analiza numeryczna [2–6]

Do analiz numerycznych wybrano trzy odlewy z żeliwa sferoidalnego EN-GJS-400-15, oznaczone jako: Bolec BJA1a, Bolec BJA1 oraz Łożysko LOa1. Przeprowadzone analizy numeryczne zakładały brak interakcji z innymi odlewami w trakcie prowadzonego cyklu nagrzewania i chłodzenia oraz występowanie w piecu jednorodnego, ustabilizowanego pola temperatur o zakładanych wartościach według cykli przejętych na podstawie wykresu zaprezentowanego na rysunku 1. Do analiz numerycznych zamodelowano bryłowe modele wybranych odlewów przygotowane w programie CAD i zaprezentowane na rysunku 2.

Sprężona analiza termiczno-wytrzymałościowa dla odlewu Bolca BJA1a zakładała równomierne nagrzewanie odlewu na całej powierzchni. W trakcie procesu nagrzewania ważne jest równomierne przejmowanie dostarczanego ciepła w całej objętości analizowanego detalu. Otrzymany w trakcie symulacji rozkład temperatury wskazuje jednak miejsca w środku odlewu, dla których gradient temperatury w stosunku do zewnętrznej powierzchni odlewu wynosi kilka stopni. Rozkład temperatury uzyskany dla poszczególnych cykli nagrzewania i chłodzenia w wybranych punktach czasu zaprezentowano na rysunku 3.

Różnice wartości maksymalnych i minimalnych temperatury w całym cyklu zaprezentowano na rysunkach 4 i 5.

W obydwu przypadkach widać, że w środku odlewu temperatura różni się o ponad 2°C, w stosunku do zewnętrznej powierzchni dla pierwszego cyklu obróbki

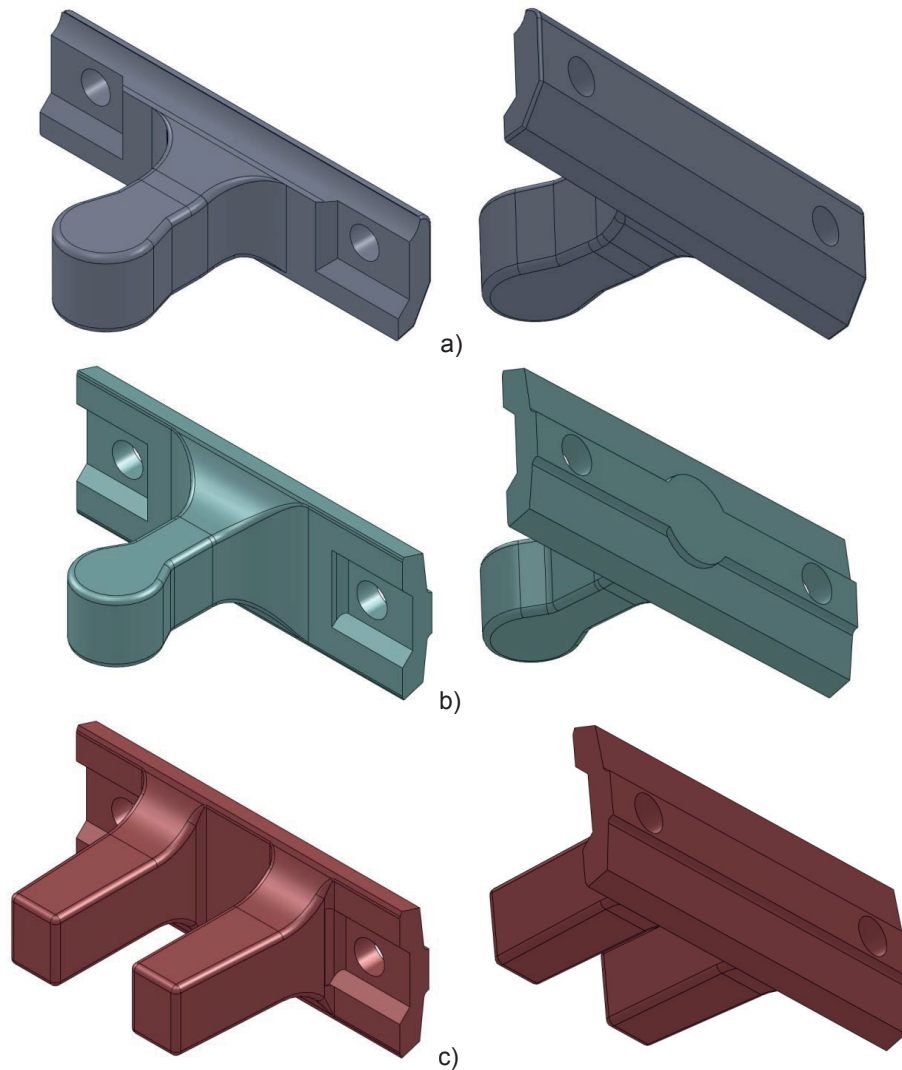
3. The numerical analysis [2–6]

Three castings made of EN-GJS-400-15 spheroidal graphite cast iron were selected for numerical analysis; these were marked as follows: Bolt BJA1a, Bolt BJA1 and Bearing LOa1. The conducted numerical analyses assumed no interaction with other elements during the conducted heating and cooling cycle and a homogenous, stabilised temperature field with set values according to assumed cycles on the basis of the diagram presented in Figure 1. For numerical analyses solid models were created for selected castings with the use of CAD software and presented in Figure 2.

The coupled thermal-strength analysis for the casting of Bolt BJA1a assumed uniform heating of the casting on its entire surface. During the process of heating it is important to transfer the heat in a uniform manner to the volume of the analysed element. However, the temperature distribution achieved during the simulation indicates areas in the middle of the casting, for which the temperature gradient in relation to the external surface of the casting is several degrees. The temperature distribution achieved for particular heating and cooling cycles in selected points of time is presented in Figure 3.

The differences of maximum and minimum temperature values in the whole cycle are presented in Figures 4 and 5.

In both cases it can be seen that in the centre of the casting the temperature difference is 2°C in relation to the external surface for the first treatment cycle and almost 1.5°C for the second cycle. The differences of minimum and maximum temperature in the casting are



Rys. 2. Modele brytowe elementów odlewanych przyjęte w prowadzonych analizach numerycznych: a) odlew Bolec BJA1a, b) odlew Bolec BJA1, c) odlew Łożysko LOa1

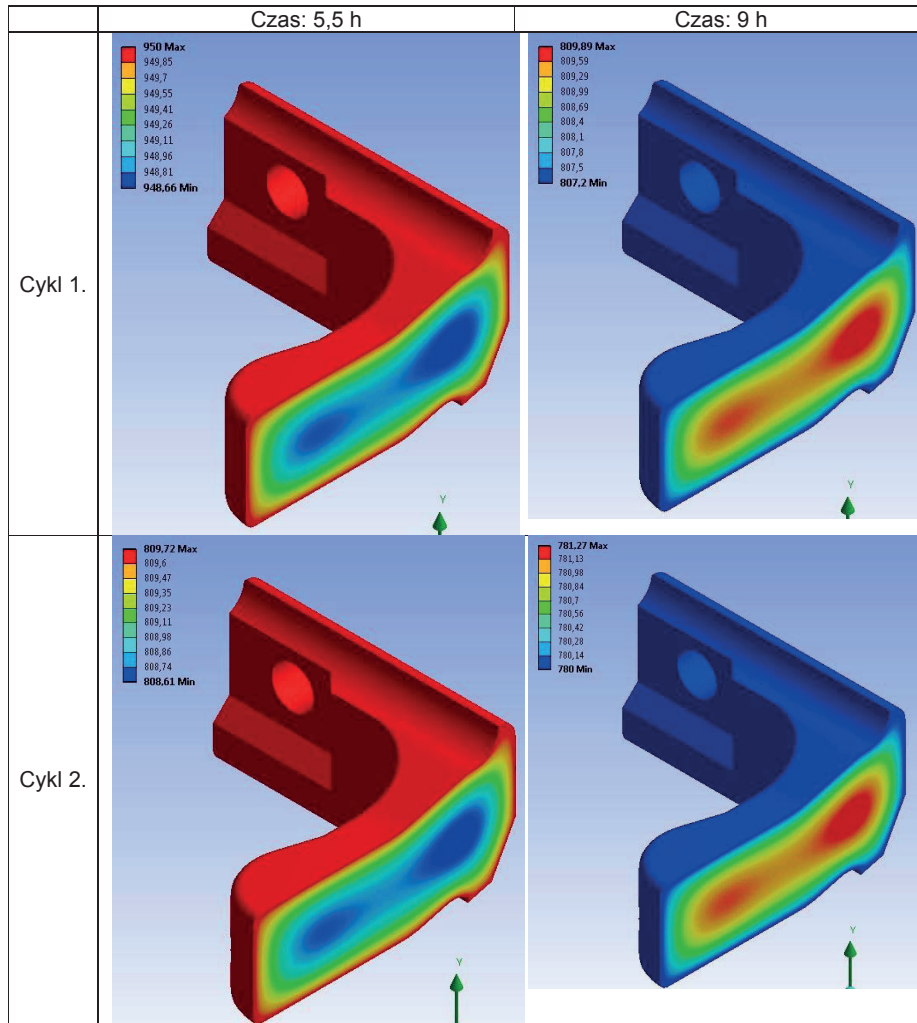
Fig. 2. Solid models of cast elements assumed in conducted numerical analyses: a) casting Bolt BJA1a, b) casting Bolt BJA1, c) casting Bearing LOa1

i prawie o $1,5^{\circ}\text{C}$ dla cyklu drugiego. Różnice temperatury minimalnej i maksymalnej w odlewie są znacznie mniejsze dla drugiego cyklu wyżarzania ferrytyzującego.

Na podstawie otrzymanych analiz rozkładu temperatury przeprowadzono symulacje rozwoju naprężeń w odlewach w trakcie całego cyklu nagrzewania i chłodzenia. W przeprowadzonej symulacji założono, że analizowany odlew ustawiono w piecu na stopie. Wyniki symulacji stanu naprężeń dla symulacji porównawczej, przy poziomym usytuowaniu odlewu w piecu nie odbiegają od wielkości uzyskanych dla takiego stanu usytuowania. Rozkład wartości cieplnych naprężeń uogólnionych w przekroju poprzecznym odlewu, otrzymanych dla pierwszego cyklu wyżarzania ferrytyzującego przedstawiono na rysunku 6, dla wybranego kroku czasowego, natomiast wartości naprężeń uzyskane dla innych kroków czasowych przedstawiono w tabeli 2.

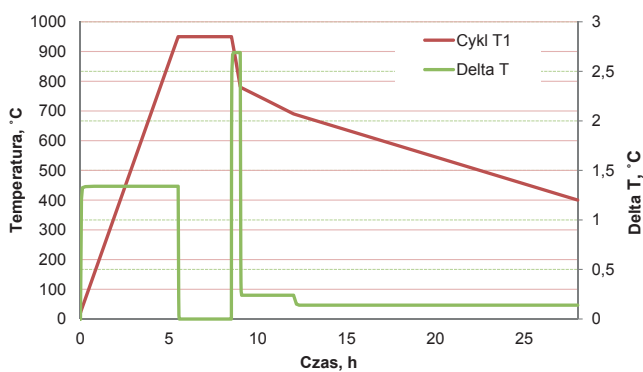
considerably lower for the second cycle of ferritising annealing.

On the basis of the achieved analyses of temperature distribution simulations of stress development in castings were carried out during the whole heating and cooling cycle. In the conducted simulation it was assumed that the analysed casting was placed in the furnace on its foot. The results of the simulation of the state of stresses for comparative simulation, with horizontal positioning of the casting in the furnace, do not diverge from the values achieved for this state of positioning. The distribution of heat values of generalised stresses in the cross-section of the casting achieved for the first cycle of ferritising annealing is presented in Figure 6, for the selected time step, whereas values of stresses achieved for other time steps are presented in Table 2.



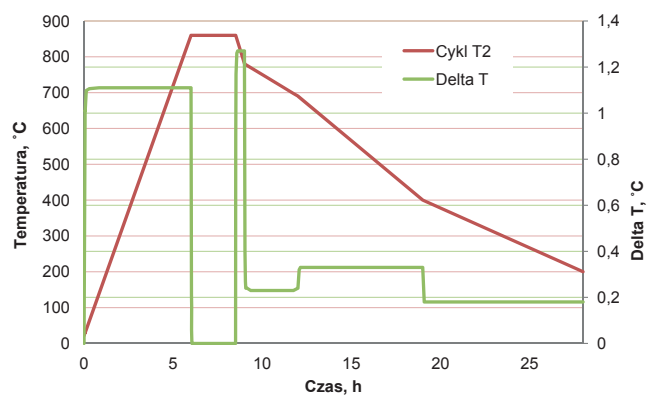
Rys. 3. Rozkład temperatury w odlewie Bolca BJA1a dla obydwu cykli wyżarzania ferrytyzującego w wybranych krokach czasowych

Fig. 3. The distribution of temperature in the casting of Bolt BJA1a for both cycles of ferritising annealing in selected time steps



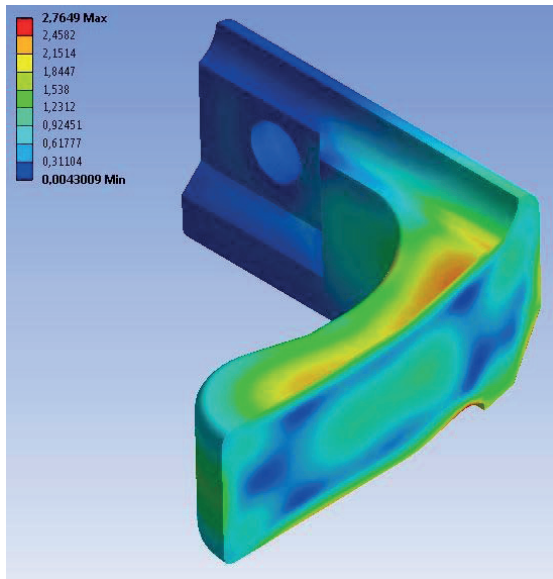
Rys. 4. Gradient temperatury w odlewie dla pierwszego cyklu wyżarzania

Fig. 4. The temperature gradient in the casting for the first cycle of annealing



Rys. 5. Gradient temperatury w odlewie dla drugiego cyklu wyżarzania

Fig. 5. The temperature gradient in the casting for the second cycle of annealing



Rys. 6. Rozkład naprężeń uogólnionych [MPa] występujących w odlewie po czasie wynoszącym około 10 godzin, dla pierwszego cyklu wyżarzania ferrytyzującego

Fig. 6. The distribution of generalised stresses [MPa] which occur after time which equals approx. 10 hours, for the first cycle of ferritising annealing

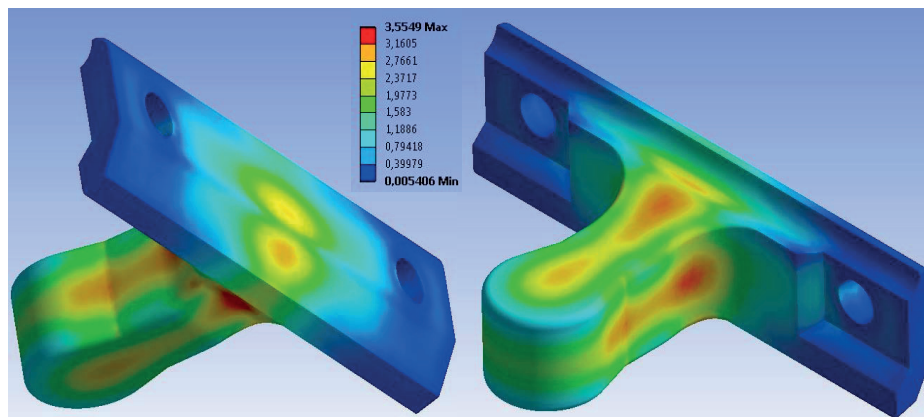
Tabela 2. Maksymalne wartości naprężeń uogólnionych w pierwszym cyklu wyżarzania dla odlewu Bolca BJA1a

Table 2. Maximum values of generalised stresses in the first cycle of annealing for the casting of Bolt BJA1a

Krok czasowy cyklu / Cycle's time step, h	Temperatura/ Temperature, °C	Maksymalne naprężenie / Maximum stress, MPa
5,5	950	1,7655
8,5	950	0,0048
9	780	3,5549
12	690	0,3135
28	400	0,1935

Dla analizowanego cyklu wyżarzania wzrost maksymalnych wartości naprężeń następuje w dwóch cyklach czasowych: przy osiągnięciu maksymalnej wartości temperatury procesu wyżarzania oraz w trakcie chłodzenia odlewu od 950°C do 780°C. Rozkład pól maksymalnych wartości naprężeń cieplnych na powierzchni odlewu, w trakcie pierwszego etapu ochładzania, przedstawiono na rysunku 7.

For the analysed annealing cycle the increase of maximum values of stresses occurs during two time cycles: when it achieves the maximum values of temperature of the annealing process and during cooling from 950°C to 780°C. The distribution of fields of maximum values of heat stresses on the surface of the casting during the first stage of cooling is presented in Figure 7.



Rys. 7. Rozkład naprężeń cieplnych w końcowej fazie chłodzenia odlewu Bolca BJA1a od 950°C do 780°C

Fig. 7. The distribution of heat stresses in the final stage of cooling of the casting of Bolt BJA1a from 950°C to 780°C

W trakcie całego cyklu wyżarzania ferrytyzującego występuje silne odkształcanie odlewu, a największa deformacja konstrukcji w porównaniu z kształtem pierwotnym występuje w stopie analizowanego elementu. W tabeli 3 przedstawiono maksymalne wartości przemieszczeń uogólnionych występujących w odlewie w trakcie pierwszego cyklu przeprowadzanej obróbki.

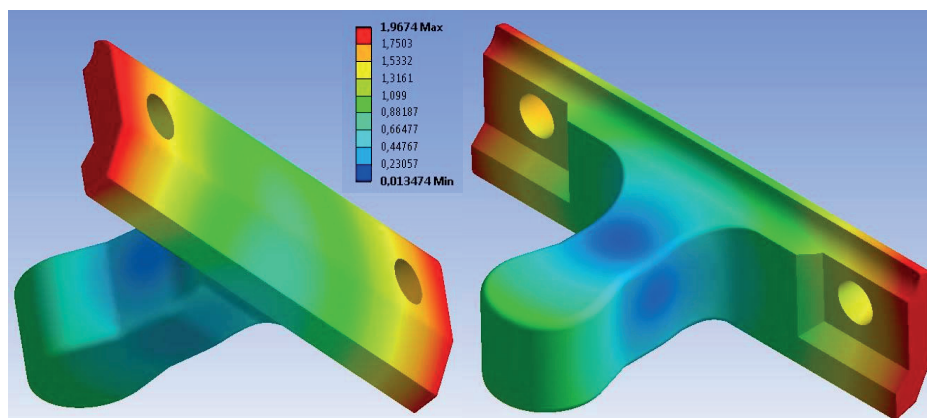
Z przedstawionych danych wynika, że maksymalne odkształcenie odlewu następuje w momencie osiągnięcia temperatury 950°C, a w miarę chłodzenia elementu wartości te maleją. Rozkład przemieszczeń uogólnionych w odlewie Bolca BJA1a przedstawiono na rysunku 8, dla punktu czasowego $t = 8,5$ godziny, w którym występują maksymalne wartości przemieszczeń.

During the whole cycle of ferritising annealing there occurs a strong deformation, and the biggest deformation of the construction as compared to the initial shape occurs in the foot of the analysed element. In Table 3 are presented maximum values of generalised displacements which occur in the casting during the first cycle of the conducted treatment.

From the presented data it results that the maximum deformation of the casting occurs when the temperature reaches 950°C, and together with cooling the element these values decrease. The distribution of generalised displacements in the casting of Bolt BJA1a is presented in Figure 8, for the point of time $t = 8.5$ h, at which maximum values of displacements occur.

Tabela 3. Maksymalne wartości przemieszczeń uogólnionych w pierwszym cyklu wyżarzania dla odlewu Bolca BJA1a
Table 3. Maximum values of generalised displacements during the first cycle of annealing for the casting of Bolt BJA1a

Krok czasowy cyklu / Cycle's time step, h	Temperatura/ Temperature, °C	Maksymalne naprężenie / Maximum stress, MPa
5,5	950	0,6148
8,5	950	1,9674
9	780	1,8485
12	690	1,5523
28	400	1,4098



Rys. 8. Rozkład przemieszczeń uogólnionych w odlewie Bolca BJA1a
Fig. 8. The distribution of generalised displacements in the casting of Bolt BJA1a

Charakter dokładnych odkształceń odlewu Bolca BJA1a zaprezentowano na rozkładzie przemieszczeń wzdłuż osi normalnych globalnego układu współrzędnych, przedstawionych na rysunku 9.

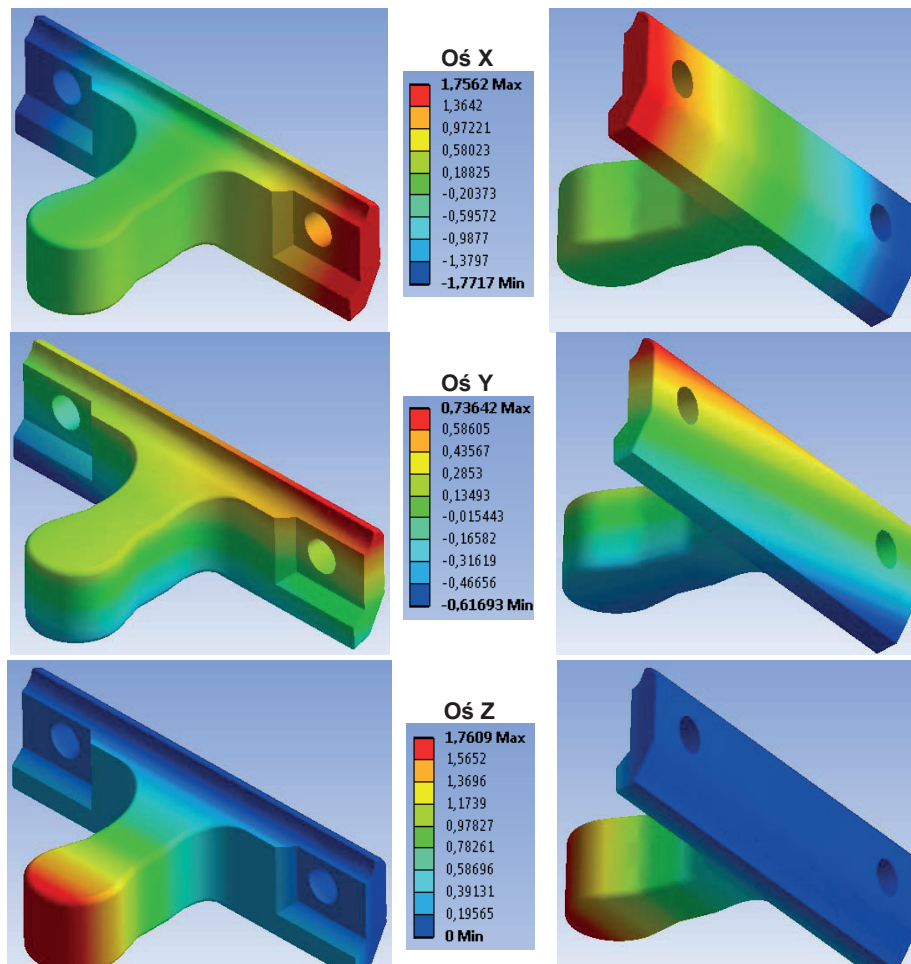
Podobnie jak dla poprzednio przeprowadzonych analiz numerycznych rozkładu naprężeń cieplnych uzyskanych w procesie wyżarzania ferrytyzującego, tak samo dla drugiego cyklu nagrzewania, przy osiągnięciu maksymalnej temperatury 860°C, przeprowadzono podobny schemat analiz w celu określenia wpływu zmiany

The character of exact deformations of the casting of Bolt BJA1a is presented in the distribution of displacements along the axes of the coordinate system showed in Figure 9.

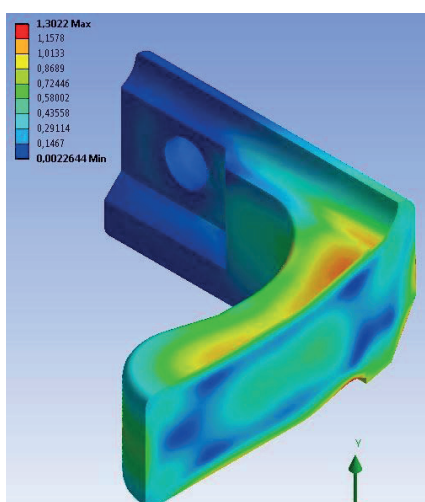
Similarly to previously conducted numerical analyses of the distribution of heat stresses achieved in the process of ferritising annealing, for the second cycle of heating, when the maximum temperature 860°C was achieved a similar scheme of analysis was carried out in order to determine the impact of the change of

temperatury maksymalnej na wartości maksymalnych naprężeń i przemieszczeń cieplnych. Rozkład wartości cieplnych naprężeń uogólnionych w przekroju poprzecznym odlewu Bolca BJA1a, otrzymanych dla drugiego cyklu wyżarzania ferrytyzującego, przedstawiono na rysunku 10, dla wybranego kroku czasowego, natomiast wartości naprężeń uzyskane dla innych kroków czasowych przedstawiono w tabeli 2.

the maximum temperature on maximum values of heat stresses and displacements. The distribution of heat values of generalised stresses in the cross-section of the casting of Bolt BJA1a, obtained for the second cycle of ferritising annealing is presented in Figure 10, for the selected time step, whereas values of stresses achieved for other time steps are presented in Table 2.



Rys. 9. Rozkład przemieszczeń wzdłuż osi układu współrzędnych w odlewie Bolca BJA1a
 Fig. 9. The distribution of displacements along the coordinate system in the casting of Bolt BJA1a



Rys. 10. Rozkład naprężeń uogólnionych występujących w odlewie po czasie około 10 godzin, dla drugiego cyklu wyżarzania ferrytyzującego

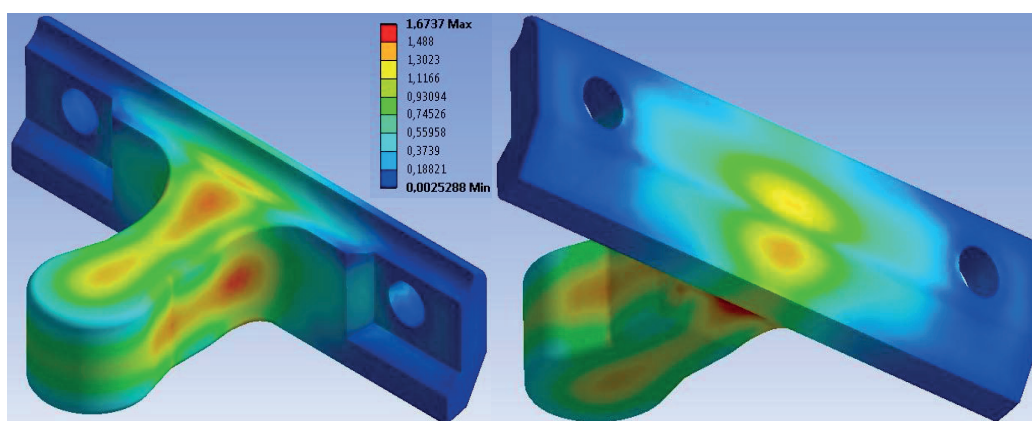
Fig. 10. The distribution of generalised stresses which occur in the casting after approx. 10 hours in the second cycle of ferritising annealing

Dla analizowanego cyklu wyżarzania wzrost maksymalnych wartości naprężeń następuje w dwóch cyklach czasowych: w momencie osiągnięcia maksymalnej wartości temperatury procesu wyżarzania oraz w trakcie chłodzenia odlewu od 860°C do 780°C. Rozkład pól maksymalnych wartości naprężeń cieplnych na powierzchni odlewu, w trakcie ochładzania odlewu do temperatury 780°C, przedstawiono na rysunku 11.

For the analysed annealing cycle the increase of maximum values of stresses occurs during two time cycles: when it achieves the maximum values of temperature of the annealing process and during cooling the casting from 860°C to 780°C. The distribution of fields of maximum values of heat stresses on the surface of the casting during cooling the casting to 780°C is presented in Figure 11.

Tabela 4. Maksymalne wartości naprężeń uogólnionych w drugim cyklu wyżarzania dla odlewu Bolca BJA1a
 Table 4. Maximum values of generalised stresses in the second cycle of ferritising annealing for the casting of Bolt BJA1a

Krok czasowy cyklu / Cycle's time step, h	Temperatura/ Temperature, °C	Maksymalne naprężenie / Maximum stress, MPa
6	860	1,4614
8,5	860	0,0043
9	780	1,6737
12	690	0,3139
19	400	0,4324
28	200	0,2325



Rys. 11. Rozkład naprężeń cieplnych w końcowej fazie chłodzenia odlewu Bolca BJA1a od 860°C do 780°C
 Fig. 11. The distribution of heat stresses in the final stage of cooling of the casting of Bolt BJA1a from 860°C to 780°C

Określone w trakcie symulacji, największe odkształcenia występują w stopie odlewu, podobnie jak dla pierwszego cyklu wyżarzania. W tabeli 5 przedstawiono maksymalne wartości przemieszczeń uogólnionych występujących w odlewie w trakcie drugiego cyklu obróbki.

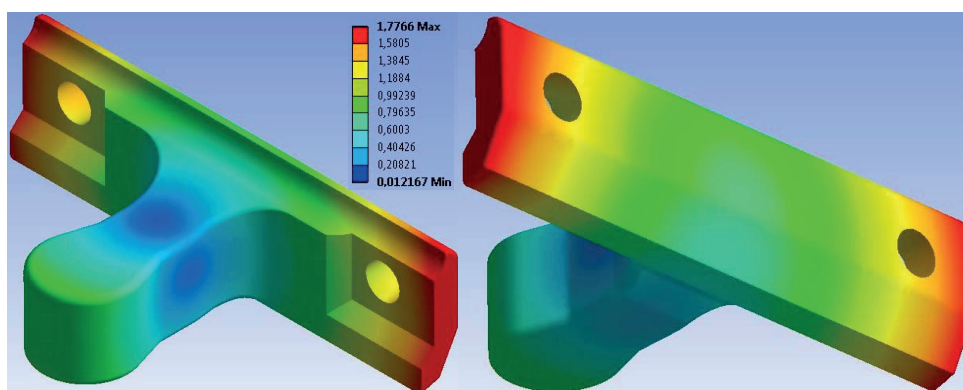
Z przedstawionych danych wynika, że maksymalne odkształcenie odlewu następuje w momencie podgrzewania odlewu i osiągnięcia temperatury 860°C, a w miarę chłodzenia elementu wartości te maleją. Rozkład przemieszczeń uogólnionych w odlewie Bolca BJA1a przedstawiono na rysunku 12, dla punktu czasowego t = 8,5 godziny, w którym występują maksymalne wartości przemieszczeń.

The biggest deformation occurs in the foot of the casting, which was determined during the simulation similarly to the first cycle of annealing. In Table 5 presented are maximum values of generalised displacements which occur in the casting during the second cycle of heating.

From the presented data it results that the maximum deformation of the casting occurs at the moment of heating the casting and achieving 860°C, together with cooling the element these values decrease. The distribution of generalised displacements in the casting of Bolt BJA1a is presented in Figure 12, for the point of time t = 8.5 hours, at which maximum values of displacements occur.

Tabela 5. Maksymalne wartości przemieszczeń uogólnionych w drugim cyklu wyżarzania dla odlewu Bolca BJA1a
 Table 5. Maximum values of generalised displacements in the second cycle of ferritising annealing for the casting of Bolt BJA1a

Krok czasowy cyklu / Cycle's time step, h	Temperatura/ Temperature, °C	Maksymalne naprężenie / Maximum stress, MPa
6	860	1,7761
8,5	860	1,7766
9	780	1,6076
12	690	1,4163
19	400	0,8015
28	200	0,3774



Rys. 12. Rozkład przemieszczeń uogólnionych w odlewie Bolca BJA1a
 Fig. 12. The distribution of generalised displacements in the casting of Bolt BJA1a

Przeprowadzona analiza rozkładu naprężeń i przemieszczeń cieplnych w trakcie prowadzonego procesu wyżarzania ferrytyzującego według założonych cykli nagrzewania i chłodzenia wykazuje, że w przypadku obróbki cieplnej odlewu Bolca BJA1a, znacznie mniejsze wartości maksymalnych naprężeń cieplnych i przemieszczeń występują w trakcie obróbki według drugiego cyklu wyżarzania ferrytyzującego. Wartości maksymalnych naprężeń cieplnych w przypadku drugiego cyklu, przy ochładzaniu odlewu do temperatury 780°C, są ponad dwukrotnie mniejsze w porównaniu do obróbki według pierwszego cyklu.

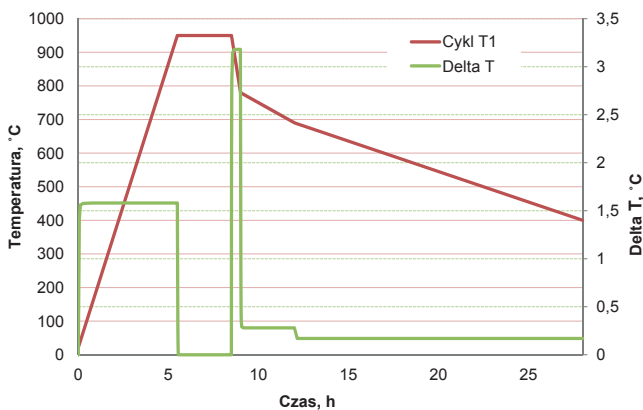
W przypadku analizy maksymalnych wartości przemieszczeń uogólnionych stwierdzić można, że maksymalne wartości przemieszczeń w przypadku nagrzewania według drugiego cyklu pojawiają się w odlewie już w momencie uzyskania w całej objętości odlewu maksymalnej temperatury cyklu. Zjawiska takiego nie obserwujemy w przypadku nagrzewania odlewu według pierwszego cyklu, a maksymalne przemieszczenie w odlewie uzyskujemy pod koniec etapu wytrzymania w temperaturze 950°C. W obydwu przypadkach chłodzenie odlewu z piecem powoduje redukcję maksymalnych wartości przemieszczeń uogólnionych, jednak dla drugiego cyklu chłodzenia wartości obniżają się znacznie szybciej.

The conducted analysis of the distribution of stresses and heat displacements during the conducted process of ferritising annealing according to heating and cooling cycles shows that in case of heat treatment of the casting of Bolt BJA1a considerably lower values of maximum heat stresses and displacements occur during treatment according to the second cycle of ferritising annealing. The values of maximum heat stresses in case of the second cycle, when the casting is cooled to 780°C, are twice as low as those compared to treatment according to the first cycle.

In the case of the analysis of maximum values of generalised displacements it can be stated that maximum values of displacements in case of heating according to the second cycle occur in the casting when the maximum temperature of the cycle is achieved in the whole volume of the casting. Such a phenomenon is not observed in the case of heating the casting according to the first cycle and the maximum displacement in the casting is achieved at the end of the stage of maintaining the casting at 950°C. In both cases cooling the casting together with the furnace causes a reduction of the maximum values of generalised displacements, however for the second cycle of cooling the values decrease much faster.

Kopiując schemat obliczeń numerycznych rozkładu naprężeń cieplnych w trakcie procesu wyżarzania ferrytyzującego według założonych cykli nagrzewania i chłodzenia, przeprowadzono analizy termiczno-wytrzymałościowe dla drugiego wybranego odlewu Bolca BJA1. Analiza nagrzewania i chłodzenia wskazuje na równomierny rozkład temperatury w całej objętości odlewu w trakcie procesu nagrzewania, a pojawiający się gradient temperatury wynika jedynie z różnej grubości ścianek analizowanego elementu.

Gradyenty temperatury w obydwu cyklach przeprowadzonej symulacji wyżarzania ferrytyzującego przedstawiono na rysunkach 13 i 14.

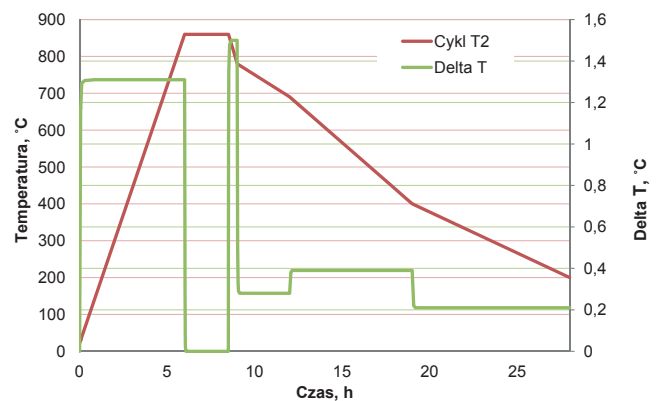


Rys. 13. Gradient temperatury w odlewie Bolca BJA1 dla pierwszego cyklu wyżarzania

Fig. 13. Temperature gradients in the casting of Bolt BJA1 for the first cycle of annealing

After copying the scheme of numerical calculations of the distribution of heat stresses during the process of ferritising annealing according to assumed cycles of heating and cooling thermal-strength analyses were carried out for the second selected casting of Bolt BJA1. The analysis of heating and cooling indicates a uniform distribution of temperature in the entire volume of the casting during the process of heating and the occurring temperature gradient results from different wall thickness of the analysed element.

Temperature gradients in both cycles of the conducted simulation of ferritising annealing are presented in Figures 13 and 14.



Rys. 14. Gradient temperatury w odlewie Bolca BJA1 dla drugiego cyklu wyżarzania

Fig. 14. Temperature gradients in the casting of Bolt BJA1 for the second cycle of annealing

Rozkład temperatury w przekroju poprzecznym odlewu Bolca BJA1, dla wybranego kroku czasowego według schematu pierwszego i drugiego cyklu przedstawiono na rysunku 15.

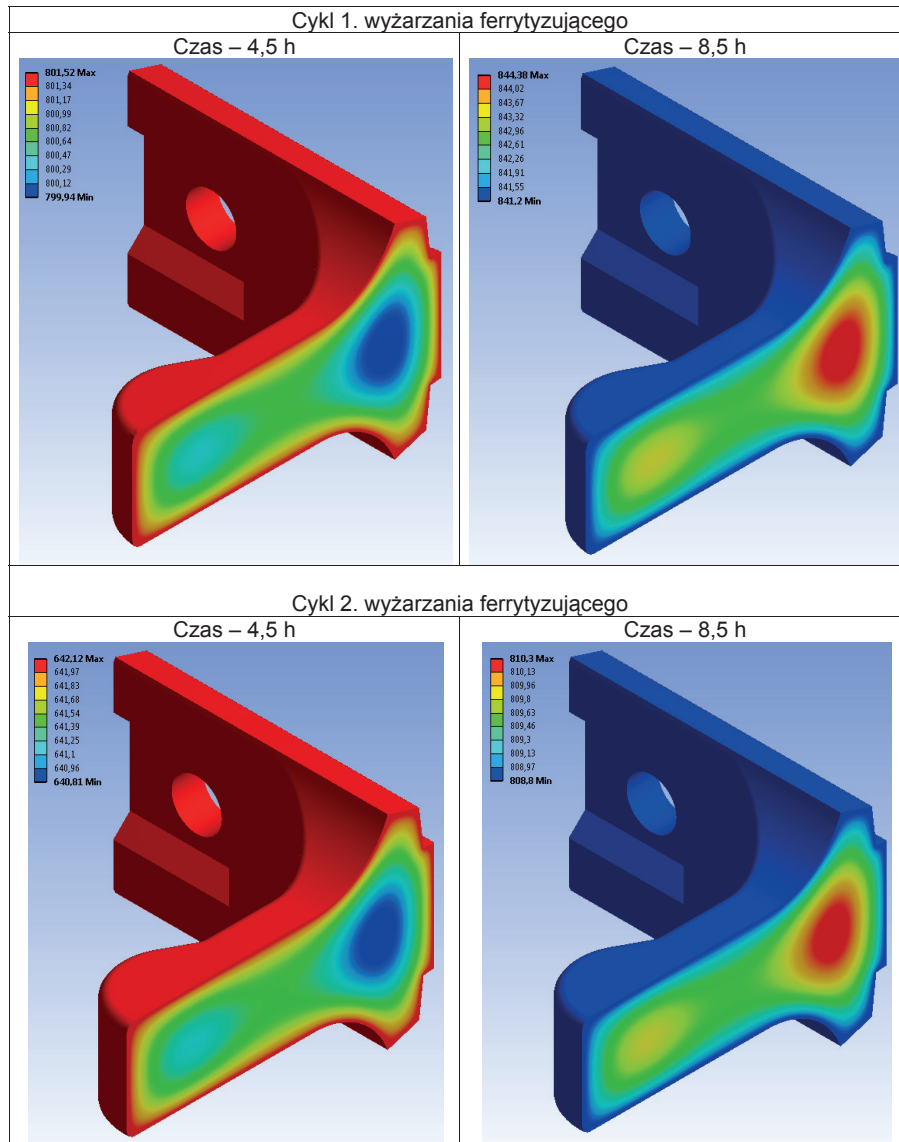
W przypadku obydwu cykli prowadzonej obróbki cieplnej, charakter gradientów temperatury dla odlewu Bolca BJA1 jest taki sam jak dla odlewu Bolca BJA1a, jednak maksymalne gradienty temperatury wynoszą ponad 3°C dla pierwszego schematu nagrzewania odlewów. Rozkład pól maksymalnych wartości naprężeń cieplnych i maksymalnych wartości przemieszczeń uogólnionych, uzyskanych dla symulacji numerycznej według pierwszego schematu cyklu prowadzonego wyżarzania, przedstawiono na rysunkach 16 i 17. Maksymalne wielkości naprężeń uogólnionych oraz przemieszczeń występujących w odlewie dla kolejnych etapów nagrzewania i chłodzenia w symulacji obróbki według pierwszego cyklu przedstawiono w tabeli 6, a według drugiego cyklu w tabeli 7.

Przeprowadzone symulacje rozkładu naprężeń i przemieszczeń dla drugiego cyklu wyżarzania ferrytyzującego, jak należało się spodziewać, wykazują znacznie niższe maksymalne wartości naprężeń cieplnych. Maksymalne wartości przemieszczeń uogólnionych

The distribution of temperature in the cross-section of the casting of Bolt BJA1, for the selected time step according to the scheme of the first and second cycle is presented in Figure 15.

In case of both cycles of the conducted heat treatment the character of temperature gradients for the casting of Bolt BJA1 is the same as for the casting of Bolt BJA1a, however maximum temperature gradients are over 3°C higher for the first scheme of heating castings. The distribution of fields of maximum values of heat stresses and maximum values of generalised displacements achieved for the numerical simulation according to the first scheme of the cycle of the conducted annealing is presented in Figures 16 and 17. In Table 6 presented are maximum values of generalised stresses and displacements which occur in the casting during the consecutive stages of heating and cooling in the simulation of treatment according to the first cycle and according to the second cycle in Table 7.

The conducted simulations of the distribution of stresses and displacements for the second cycle of ferritising annealing, as it was expected, prove considerably lower maximum values of heat stresses. Maximum values of generalised displacements achieved during the



Rys. 15. Rozkład temperatury w odlewie Bolca BJA1 określony dla dwóch kroków czasowych, przy obydwu cyklach wyżarzania ferrytyzującego

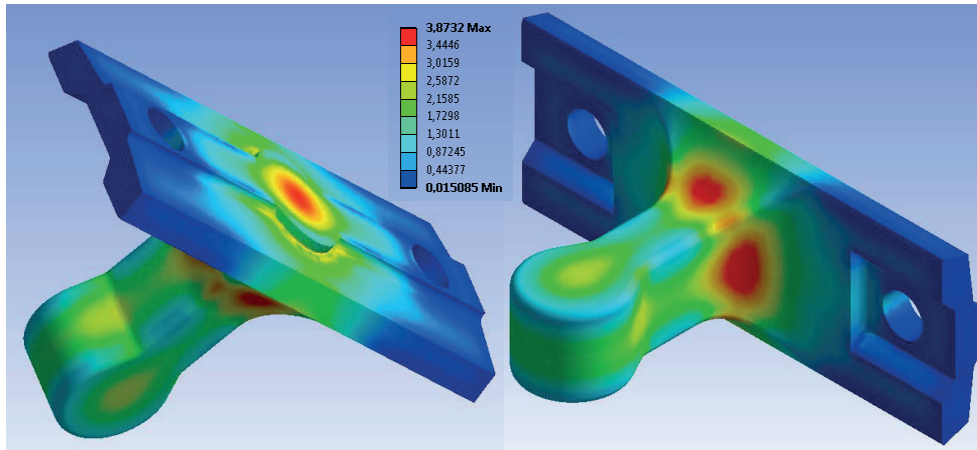
Fig. 15. The distribution of temperature in the casting of Bolt BJA1 for two time steps, with both cycles of ferritising annealing

uzyskane w symulacji wyżarzania według drugiego cyklu dla tego samego kroku czasowego, nie odbiegają znacznie od wartości przemieszczeń dla pierwszego cyklu. Rozkład pól maksymalnych wartości naprężeń zredukowanych określonych w symulacji według hipotezy H-M-H, przedstawiono na rysunku 18, natomiast maksymalne wartości przemieszczeń uogólnionych zaprezentowano na rysunku 19, w obydwu przypadkach dla takich samych kroków czasowych jak dla wyników symulacji wyżarzania ferrytyzującego określonych według pierwszego cyklu.

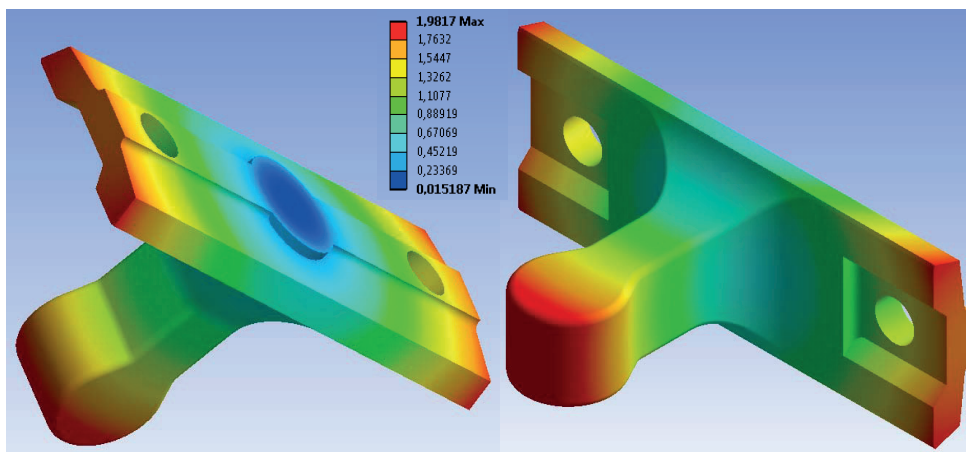
W przypadku odlewu Bolca BJA1, analiza rozkładu naprężeń cieplnych w odlewie w przypadku obróbki według cyklu pierwszego i drugiego, wykazała analogiczny schemat rozkładu maksymalnych wartości

simulation of annealing according to the second cycle for the same time step do not significantly diverge from the values of displacements for the first cycle. The distribution of fields of maximum values of reduced stresses defined during the simulation according to the H-M-H hypothesis, is presented in Figure 18, whereas maximum values of generalised displacements are presented in Figure 19, in both cases for the same time steps as it was for the results of the simulation of ferritising annealing defined according to the first cycle.

In case of the casting of Bolt BJA1, the analysis of the distribution of heat stresses in the casting in case of treatment according to the first and second cycle proved an analogous scheme of the distribution of maximum values of both stresses and displacements to



Rys. 16. Rozkład naprężeń zredukowanych występujących w odlewie Bolca BJA1 po czasie około 9 godzin, dla pierwszego cyklu wyżarzania ferrytyzującego
 Fig. 16. The distribution of reduced stresses which occur in the casting of Bolt BJA1 after approx. 9 hours during the first cycle of ferritising annealing

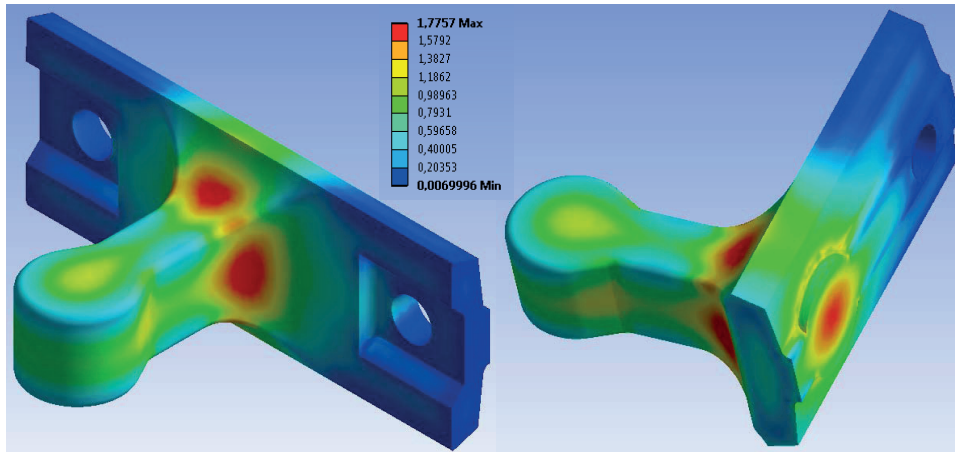


Rys. 17. Rozkład przemieszczeń uogólnionych występujących w odlewie Bolca BJA1 po czasie około 8,5 godzin, dla pierwszego cyklu wyżarzania ferrytyzującego
 Fig. 17. The distribution of generalised displacements which occur in the casting of Bolt BJA1 after approx. 8.5 hours during the first cycle of ferritising annealing

Tabela 6. Maksymalne wartości naprężeń uogólnionych i przemieszczeń w kolejnych krokach czasowych pierwszego cyklu wyżarzania dla odlewu Bolca BJA1

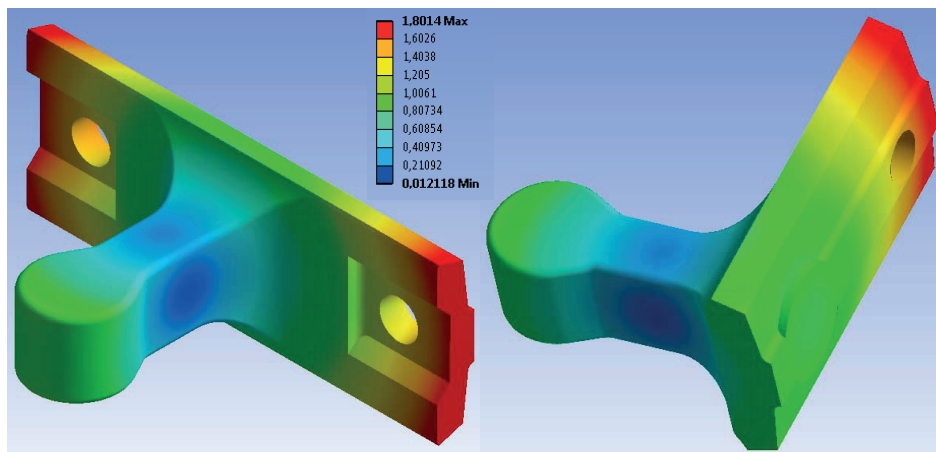
Table 6. Maximum values of generalised stresses and displacements in the consecutive time steps of the first cycle of annealing for the casting of Bolt BJA1

Krok czasowy cyklu / Cycle's time step, h	Temperatura/ Temperature, °C	Maksymalne naprężenie / Maximum stress, MPa	Maksymalne przemieszczenie / Maximum displacement, mm
5,5	950	1,9233	0,6187
8,5	950	0,0019	1,9817
9	780	3,8732	1,8632
12	690	0,2066	0,8073
28	400	0,2117	1,4202



Rys. 18. Rozkład naprężeń uogólnionych występujących w odlewie po czasie około 9 godzin, dla drugiego cyklu wyżarzania ferrytyzującego

Fig. 18. The distribution of generalised stresses which occur in the casting after approx. 9 hours during the second cycle of ferritising annealing



Rys. 19. Rozkład przemieszczeń uogólnionych występujących w odlewie Bolca BJA1 po czasie około 8,5 godzin, dla drugiego cyklu wyżarzania ferrytyzującego

Fig. 19. The distribution of generalised displacements which occur in the casting after approx. 8.5 hours during the second cycle of ferritising annealing

Tabela 7. Maksymalne wartości naprężeń uogólnionych i przemieszczeń w kolejnych krokach czasowych drugiego cyklu wyżarzania dla odlewu Bolca BJA1

Table 7. Maximum values of generalised stresses and displacements in the consecutive time steps of the second cycle of annealing for the casting of Bolt BJA1

Krok czasowy cyklu / Cycle's time step, h	Temperatura/ Temperature, °C	Maksymalne naprężenie / Maximum stress, MPa	Maksymalne przemieszczenie / Maximum displacement, mm
6	860	1,5501	1,8008
8,5	860	0,0029	1,8014
9	780	1,7757	1,6301
12	690	0,3332	1,4361
19	400	0,4592	0,8127
28	200	0,2464	0,3827

zarówno naprężeń, jak i przemieszczeń, do wyników analizy dla odlewu Bolca BJA1a. Otrzymana w analizie korelacja wyników do poprzednio prowadzonej symulacji, wynika z bardzo podobnego kształtu obydwu odlewów, a więc jak należało się spodziewać, w wielkości i rozkładzie pól maksymalnych wartości szacowanych wartości nie będzie znaczących rozbieżności.

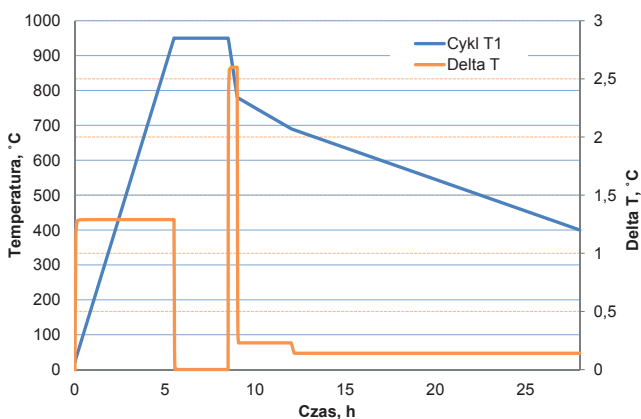
Ostatnim analizowanym elementem jest odlew Łożyska LOa1, którego konstrukcja przedstawiona na rysunku 2c, zawiera dwa wystające elementy robocze, w odróżnieniu do poprzednio analizowanych odlewów Bolca. Numeryczna analiza cieplna nagrzewania i chłodzenia odlewu Łożyska LOa1, prowadzona według pierwszego i drugiego schematu nagrzewania, wykonywana była przy takich samych warunkach umieszczenia odlewu w piecu, bez uwzględniania interakcji pomiędzy innymi elementami. W przypadku prowadzonych analiz numerycznych rozkładu naprężeń cieplnych nie uwzględniano również wad struktury odlewów oraz istniejących pól naprężeń resztkowych akumulowanych po procesie odlewania.

Analiza rozkładu maksymalnych wartości temperatur w trakcie procesu wyżarzania ferrytyzującego oraz gradientu temperatury maksymalnej i minimalnej występującej w objętości analizowanego odlewu, prowadzona według schematu założonego dla pierwszego cyklu przedstawiona została na rysunku 20, natomiast dla drugiego cyklu na rysunku 21. W obydwu analizowanych przypadkach, dla pierwszego i drugiego cyklu, rozkłady gradientów temperatury w odlewie są bardzo zbliżone, podobnie jak w przypadku poprzednich symulacji. Z przeprowadzonej analizy wynika charakter równomiernego nagrzewania odlewu według przyjętego schematu temperaturowego w całej jego objętości.

the results of the analysis for the casting of Bolt BJA1a. In the analysis, the achieved correlation of results for the previously conducted simulation results form a very similar shape for both castings, and as was expected, in the size and distribution of fields of maximum values of estimated values there will be no considerable discrepancies.

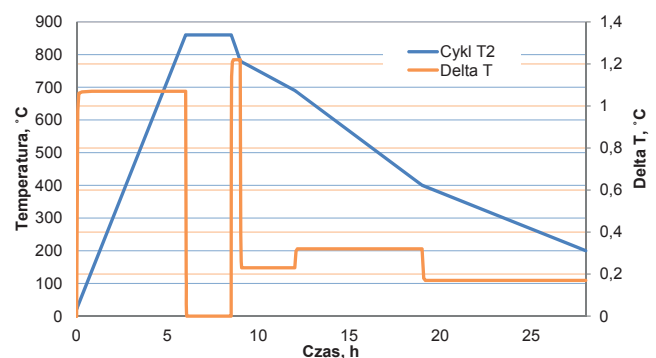
The last analysed element is the casting of Bearing LOa1, whose construction is presented in Figure 2c; it consists of two protruding working elements, as opposed to previously analysed castings of Bolt. The numerical thermal analysis of heating and cooling the casting of Bearing LOa1, conducted according to the first and second scheme of heating, was carried out with the same conditions of placing the casting in the furnace, without taking into account the interaction between other elements. In the case of conducted numerical analyses the distribution of heat stress defects of the structure of castings and existing residual stresses accumulated after the process of pouring were not accounted for.

The analysis of the distribution of maximum temperature values during the process of ferritising annealing and the gradient of maximum and minimum temperature which occurs in the volume of the analysed casting, conducted according to the scheme assumed for the first cycle is presented in Figure 20, whereas for the second cycle in Figure 21. In both analysed cases, for the first and second cycle the distributions of temperature gradients in the casting are more similar, as was the case of previous simulations. From the conducted analysis results the character of uniform heating of the casting is in accordance with the assumed temperature scheme in its entire volume.



Rys. 20. Maksymalna wartość temperatury procesu oraz gradient temperatury w odlewie Łożyska LOa1 dla pierwszego cyklu wyżarzania

Fig. 20. The maximum value of temperature of the process and the temperature gradient in the casting of Bearing LOa1 for the first cycle of annealing



Rys. 21. Maksymalna wartość temperatury procesu oraz gradient temperatury w odlewie Łożyska LOa1 dla drugiego cyklu wyżarzania

Fig. 21. The maximum value of temperature of the process and the temperature gradient in the casting of Bearing LOa1 for the second cycle of annealing

Rozkład temperatury w przekroju poprzecznym odlewu Łożyska LOa1, dla wybranego kroku czasowego, w trakcie nagrzewania odlewu według pierwszego cyklu do temperatury 950°C, zaprezentowano na rysunku 22, natomiast dla podobnego kroku czasowego przy założeniu nagrzewania według drugiego cyklu przedstawiono na rysunku 23.

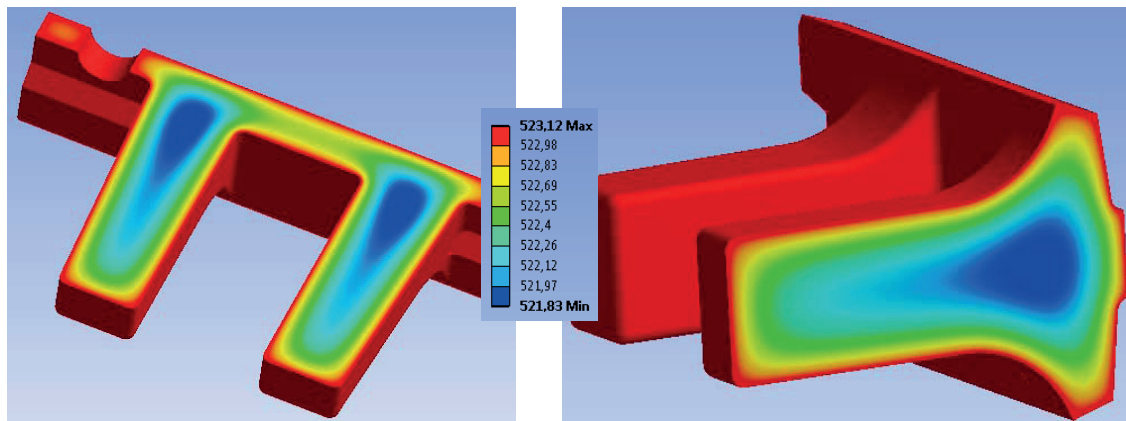
Na podstawie analizy termicznej rozkładu temperatur przeanalizowano rozkład naprężeń cieplnych zredukowanych i przemieszczeń cieplnych, występujących w odlewie Łożyska LOa1, obrabianego według obu krzywych wyżarzania ferrytyzującego. Maksymalne wartości naprężeń i przemieszczeń dla wybranych kroków czasowych odlewu Łożyska LOa1 przedstawiono w tabeli 8, porównując wartości maksymalne dla obydwu przyjętych cykli prowadzonego procesu obróbki cieplnej.

Wyniki rozkładu naprężeń cieplnych zredukowanych oraz przemieszczeń w odlewie Łożyska LOa1 przedstawiono na rysunku 24.

The distribution of temperature in the cross-section of the casting of Bearing LOa1 for the selected time step when the casting was heated according to the first cycle to 950°C is presented in Figure 22, whereas the distribution for a similar time step with the assumption of heating according to the second cycle is presented in Figure 23.

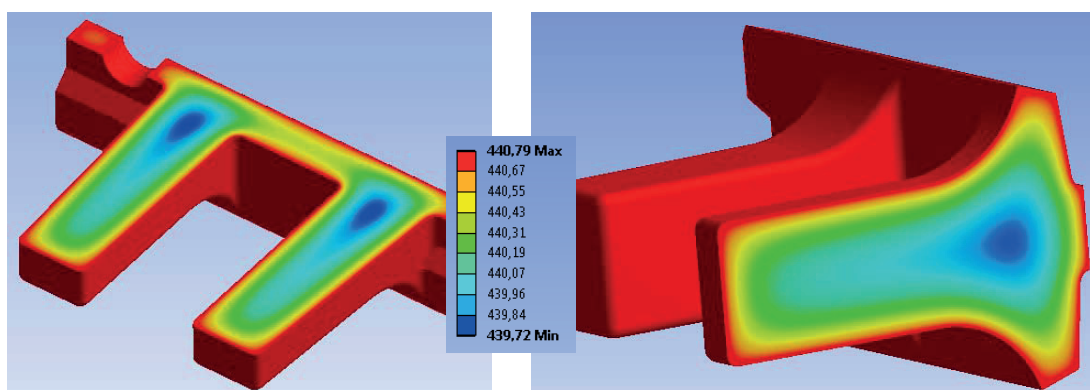
On the basis of the thermal analysis of the distribution of temperature analysed was the distribution of reduced heat stresses and displacements, which occur in the casting of Bearing LOa1, which were processed according to both curves of ferritising annealing. Maximum values of stresses and displacements for the selected time steps for the casting of Bearing LOa1 are presented in Table 8, compared are maximum values for both assumed cycles of the conducted heat treatment.

The results of the distribution of reduced heat stresses and displacements in the casting of Bearing LOa1 are presented in Figure 24.



Rys. 22. Rozkład temperatury w odlewie Łożyska LOa1 określony dla kroku czasowego $t = 3$ h, dla pierwszego cyklu wyżarzania ferrytyzującego

Fig. 22. The distribution of temperature in the casting of Bearing LOa1 defined for the time step $t = 3$ h, for the first cycle of ferritising annealing



Rys. 23. Rozkład temperatury w odlewie Łożyska LOa1 określony dla kroku czasowego $t = 3$ h, dla drugiego cyklu wyżarzania ferrytyzującego

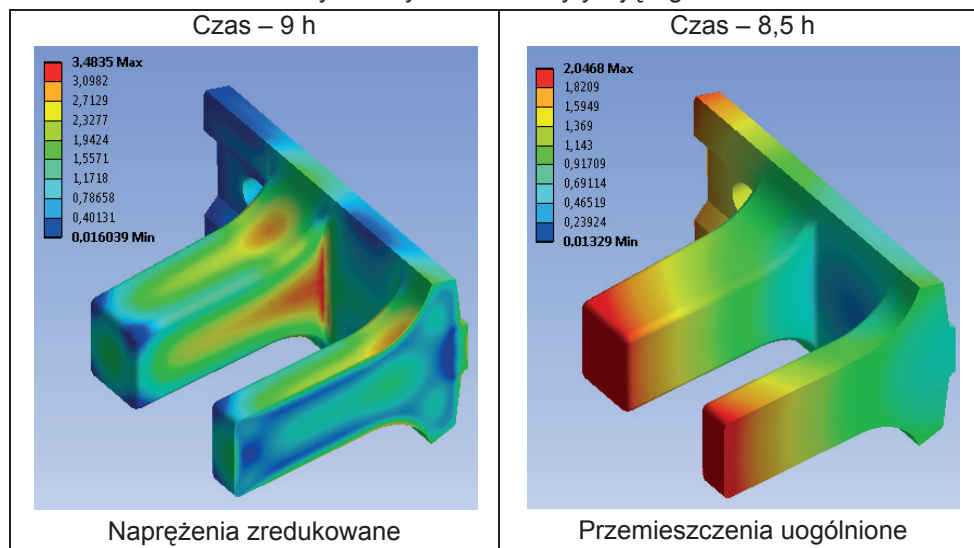
Fig. 23. The distribution of temperature in the casting of Bearing LOa1 defined for the time step $t = 3$ h, for the second cycle of ferritising annealing

Tabela 8. Maksymalne wartości naprężeń uogólnionych i przemieszczeń w kolejnych krokach czasowych dla obydwu cykli wyżarzania dla odlewu Łożyska LOa1

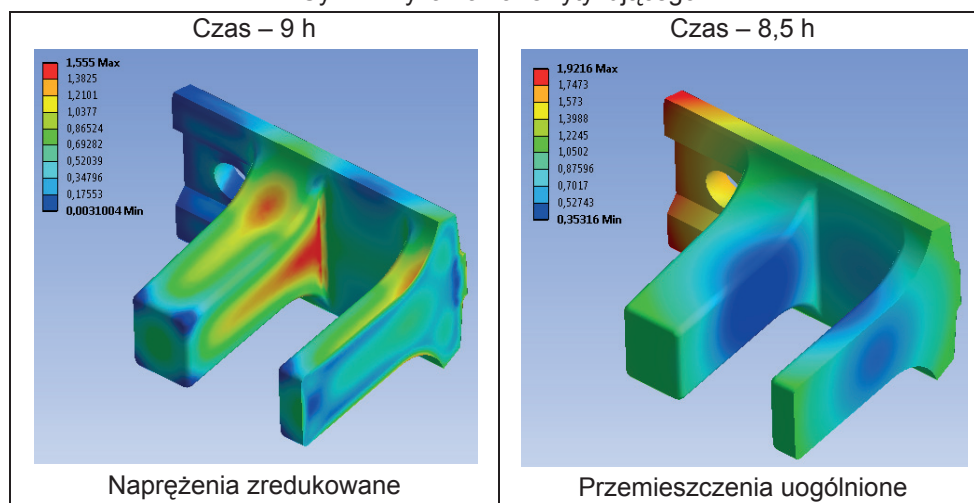
Table 8. Maximum values of generalised stresses and displacements in the consecutive time steps for both cycles of annealing for the casting of Bearing LOa1

Krok czasowy cyklu / Cycle's time step, h		Temperatura/ Temperature, °C		Maksymalne naprężenie / Maximum stress, MPa		Maksymalne przemieszczenie / Maximum displacement, mm	
Cykl 1.	Cykl 2.	Cykl 1.	Cykl 2.	Cykl 1.	Cykl 2.	Cykl 1.	Cykl 2.
5,5	6	950	860	1,7299	1,3572	0,6391	1,9208
8,5	8,5	950	860	0,0013	0,0024	2,0468	1,9216
9	9	780	780	3,4835	1,5551	1,9242	1,7391
12	12	690	690	0,3078	0,2919	1,6151	1,5319
28	19	400	400	0,1896	0,4018	1,4668	0,8671
-	28	-	200	-	0,2161	-	0,4083

Cykl 1. wyżarzania ferrytyzującego



Cykl 2. wyżarzania ferrytyzującego



Rys. 24. Rozkład cieplnych naprężeń zredukowanych i przemieszczeń uogólnionych w odlewie Łożyska LOa1 określony według przyjętych cykli wyżarzania

Fig. 24. The distribution of generalised heat stresses in the casting of Bearing LOa1 determined according to assumed cycles of annealing

Z przeprowadzonych analiz widać, że naprężenia są znacznie mniejsze dla drugiego cyklu nagrzewania, przy założeniu tego samego kroku czasowego. Analizując maksymalne wartości przemieszczeń uogólnionych, obserwujemy dla kroku czasowego $t = 8,5$ h nieco niższe wartości maksymalne, jednak charakter rozkładu pól przemieszczeń w znaczący sposób różni się w obu krokach czasowych. Nagrzewanie do niższej temperatury i wolniejsze studzenie odlewu do temperatury 200°C , powoduje znacznie mniejsze odkształcanie się dwóch wystających ramion odlewu w stosunku do powierzchni swobodnej odlewu modelowego.

3. Podsumowanie

Symulacje numeryczne rozkładu naprężeń cieplnych, przy założeniu wpływu rodzaju obróbki cieplnej – wyżarzania ferrytyzującego, przeprowadzono przy pewnych uproszczeniach przyjmowanych warunków brzegowych i założeń odnośnie dyskretyzacji modelu MES. Analizy te nie uwzględniały rozkładu naprężeń resztkowych istniejących w odlewie po procesie odlewania, a zaimplementowany model siatki MES uwzględniał optimum pomiędzy kosztem numerycznym obliczeń a ich jakością.

Analizy rozkładu naprężeń cieplnych i przemieszczeń uogólnionych przeprowadzone dla wytypowanych cykli wyżarzania wskazują na znacznie mniejsze wartości maksymalnych analizowanych wielkości w przypadku drugiego cyklu, tzn. nagrzewania do temperatury maksymalnej 860°C i chłodzenia do temperatury 200°C . Przeprowadzone symulacje w przypadku wszystkich analizowanych detali wskazują na występowanie maksymalnych wartości naprężeń zredukowanych dla kroku czasowego $t = 9$ h, odpowiadającego punktowi osiągnięcia maksymalnej wartości temperatury analizowanego cyklu. Schematy rozkładu pól naprężeń cieplnych i przemieszczeń uogólnionych są bardzo zbliżone, niezależnie od wybranego cyklu wyżarzania. Znaczne różnice zaobserwować można jednak w przypadku rozkładu pól wartości przemieszczeń uogólnionych dla odlewu Łożyńska LOa1, gdzie drugi schemat wyżarzania powoduje występowanie mniejszych gradientów przemieszczeń wystających ramion odlewu w odniesieniu do bryły detalu rzeczywistego.

Podsumowując uzyskane rezultaty analizy naprężeń i uzyskane maksymalne wartości naprężeń zredukowanych (około 2 MPa) i przemieszczeń uogólnionych (około 1,8 mm), można stwierdzić, że powstające w trakcie obróbki cieplnej naprężenia nie będą powodowały pęknięć w odlewach.

Podziękowania

Praca powstała w ramach projektu celowego CI NOT ROW-III-297/2012 pt.: „Uruchomienie produkcji

From the conducted analyses it can be seen that stresses are considerably lower for the second cycle of heating with the assumption of the same time step. Analysing maximum values of generalised displacements we can observe for the time step $t = 8.5$ hours slightly higher maximum values, however the character of the distribution of the displacement field significantly differs in both time steps. Heating to a lower temperature and slower cooling of the casting to 200°C causes much lower deformation of two protruding elements of the casting in relation to the surface of the solid model.

3. Summary

Numerical simulations of the distribution of heat stresses with the assumption of the impact of heat treatment – ferritising annealing was carried out with certain simplifications of the assumed boundary conditions and assumptions regarding the discretisation of the MES model. These analyses did not account for the distribution of residual stresses which exist in the casting after the process of pouring and the implemented model of the MES grid accounted for the balance between the numerical cost of calculations and their quality.

The analyses of the distribution of heat stresses and generalised displacements carried out for selected cycles of annealing indicate much lower maximum values of the analysed values in the case of the second cycle, i.e. heating to the maximum temperature of 860°C and cooling to 200°C . The conducted simulations in the case of all analysed elements indicate the occurrence of maximum values of reduced stresses for the time step $t = 9$ h corresponding to the point of achieving the maximum value of temperature of the analysed cycle. The schemes of the distribution of fields of heat stresses and generalised displacements are very similar, regardless of the selected annealing cycle. However, considerable differences can be observed in case of the distribution of fields of generalised values of displacements for the casting of Bearing LOa1, where the second scheme of annealing causes the occurrence of lower gradients of displacements of the protruding elements of the casting in relation to the shape of the real element.

Summing up, the achieved results of the analysis of stresses and the obtained maximum values of reduced stresses (approx. 2 MPa) and generalised displacements (approx. 1.8 mm) it can be stated that stresses which are created during the heat treatment will not cause cracking in castings.

Acknowledgements

The present publication was created within the framework of the targeted project CI NOT ROW-

odlewów dla przemysłu kolejowego z wysokojakościowego żeliwa z grafitem kulkowym”.

III-297/2012 entitled: ‘The launch of the production of castings for the rail industry manufactured of high-quality spheroidal graphite cast iron’.

Literatura/References

1. Raport końcowy z realizacji projektu celowego nr ROW-438-2008 „Uruchomienie produkcji armatury przemysłowej z żeliwa o gwarantowanej udarnośći w niskich temperaturach”. (2005). Kraków: Instytut Odlewnictwa, Jasło: Jafar S.A.
2. Burbielko A.A., Kapturkiewicz W. (2001). Analiza termiczna izotermicznego hartowania żeliwa. *Arch. Foundry Eng.*, 1(1), 54–62.
3. Fletcher A.J. (1989). *Thermal Stress and Strain Generation in Heat Treatment*. London: Elsevier.
4. Kulawik A. (2005). Analiza numeryczna zjawisk cieplnych i mechanicznych w procesach hartowania stali 45. Częstochowa (praca doktorska).
5. Meckerle J. (2003). Finite element analysis and simulation of quenching and other heat treatment processes. A bibliography (1976–2001). *Comput. Mater. Sci.*, 27, 313–332.
6. Chaouch D., Guessasma S., Sadok A. (2012). Finite element simulation coupled to optimization stochastic process to assess the effect of heat treatment on the mechanical properties of 42CrMo4 steel. *Mater. Des.*, 34, 679–684.

