



Łukasz GIERZ ORCID 0000-0003-4040-5718
Wiktor ŁYKOWSKI
Ksawery FRYCZYŃSKI
Poznan University of Technology (Politechnika Poznańska)

MODELING AND COMPUTER HEAT ANALYSIS OF THE PROPOSED SAMPLE FOR TESTING HARDENABILITY OF STEEL AS A SIMPLIFICATION OF GROSSMAN METHODS

Modelowanie i komputerowa analiza cieplna proponowanej próbki do badań hartowności stali jako uproszczenie metod badawczych

Abstract: *The article presents a calculation model of the proposed sample to test the hardenability of steel to replace a series of samples - one. Previous studies have not included this type of sample shape. The FEM simulation of the sample was also compared with that of a cylindrical cross-sectional sample. The calculations made it possible to verify the initial assumption and provided new opportunities to develop a simplification of real steel hardenability tests of steel. Test results may also allow for the simplification of the designed structure. The work also includes perspectives on the development of the method.*

Keywords: heat treatment, FEM, thermal conductivity, material testing

Streszczenie: *W artykule przedstawiono model obliczeniowy proponowanej próbki do badań hartowności stali celem zastąpienia serii próbek - jedną. Dotychczasowe badania nie obejmowały tego typu kształtu próbki. Symulacja MES próbki została także porównana z próbką cylindryczną na przekroju poprzecznym. Obliczenia pozwoliły na weryfikację przyjętego założenia początkowego i dostarczyły nowych możliwości opracowania uproszczenia badań rzeczywistych hartowności stali. Wyniki badań mogą pozwolić również na uproszczenie projektowanej konstrukcji. Praca zawiera także perspektywy rozwoju metody.*

Słowa kluczowe: obróbka cieplna, MES, przewodność cieplna, badania materiałów



1. Introduction

The hardenability test, the essence of which is to precisely determine the structure of the steel after the hardening process, depending on its conditions, is an important element in identifying the characteristics of the material. This knowledge allows for the precise selection of both steel hardening parameters (which in turn translates into reduced material consumption), thus extending the service life of assemblies and subassemblies [2]. The current trend of changes in the composition of alloy steels requires, at the same time, a precise selection of their heat treatment conditions. There are methods of testing the hardenability of steel to determine the critical diameter of the sample. The critical diameter can be 50% and 80% martensite content. Then, by using samples of different diameters, a series of plots of their dependence on the hardness or martensite percentage and position in the cross-sections are developed. Such an attempt is called the Grossman method and is characterized by high time and material consumption [1, 2, 4]. Using the Jominy method, the critical cooling rate is also determined for a sample of a specific diameter, the parameters of which are specified in the PN-EN ISO 642:2002 standard [9, 10]. Experimental methods, as already mentioned, require a significant financial outlay, while mathematical methods are only able to initially estimate the parameters of the hardening process. Reducing costs and time consumption will allow faster development of new materials and will enable the testing of steel hardenability by smaller laboratories and industrial plants with the appropriate facilities. Modern computer methods will not allow fully replace experimental methods because they do not yet cover the physicochemical phenomena accompanying the processes of, for example, heat treatment. However, they can fully show the behaviour of materials under specific conditions and correctly determine the temperature at a given point of the developed model after a certain time [3].

The purpose of this paper is to check the behaviour of a sample of a specific shape (Fig. 1) under sample cooling conditions. The temperature distribution depends on the cooling time. What is more, the differences in the temperature distribution over time for a cylindrical sample will be checked.

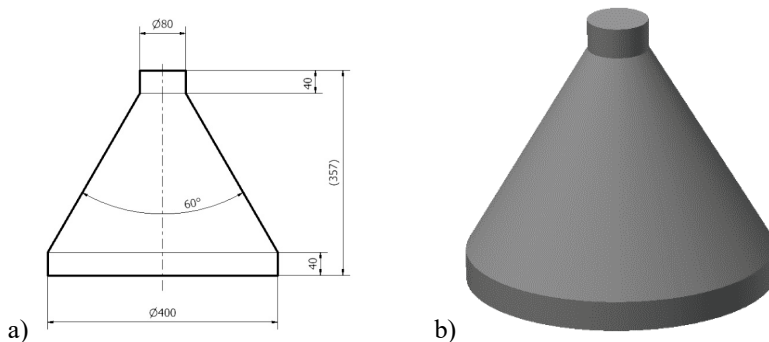


Fig. 1. Proposed sample: a) sample shape sketch with basic dimensions; b) a computational model prepared for the sample

Cylindrical specimens are used for hardenability tests. The Grossman test assumes several dozen cylindrical samples of various diameters. In turn, the Jominy test takes a cylindrical sample with a diameter of 25 mm and a length of 100 mm, but it is of little use for steels with low hardenability, e.g. tool and carbon steels. These shapes are dedicated to different cooling speed ranges. The computational model of the sample has the shape of a truncated cone with cylinders on both sides. This shape is intended to eliminate the thermal effect from the front. The derived cylinders are ultimately cut off during the actual planned hardening test so that only the truncated cone will remain. During the preparation of the calculation and mathematical model of the sample for the testing of the hardenability of steel, an emphasis was placed on the precision of the analysis, which involved the use of the smallest possible finite elements to best reflect the real conditions of the hardening process.

The computational model was made and developed using the ANSYS Fluent 2019 system. A discrete model was developed based on the model created in this program. Spatial elements were used for its construction. Execution, i.e. designing the sample directly in the program, allows for even more accurate analysis because the import of models always involves overlapping calculation errors.

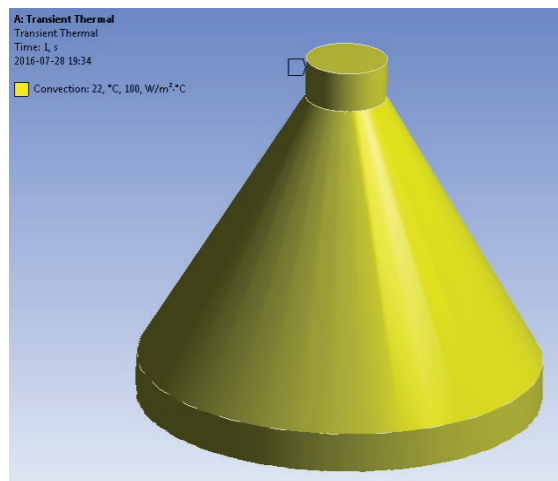


Fig. 2. Geometric model and heat conduction planes for the proposed sample

Development of model boundary conditions

When analyzing the nature of the heat conduction phenomena, the following boundary conditions were adopted:

- the ambient temperature, which is the cooling liquid, is 20°C,
- the temperature of the cooling liquid is constant in time, which means the assumption of an infinite volume of the cooling liquid;
- the cooling liquid that was selected for the simulation is quenching oil,
- the material for the sample is St3 carbon steel,

- the initial temperature of the cooling process of the steel sample is its hardening temperature, that is, 727°C.

An important value in heat transfer is thermal conductivity. The value of the heat transfer coefficient was set at 100 W/(m²·K) assuming the natural convection of the cooling liquid. Moreover, for the sake of simplification, the value of this coefficient was assumed at a constant level.

The calculated values of the geometrical parameters of the entire element, as well as the number of mesh elements, are presented in Table 1.

Table 1

Compiled geometrical and physical parameters of the prepared model

Properties of the proposed model	
Volume	1.96x10 ⁻² m ³
Mass	154 kg
Finite Elements	
Number of nodes	243949
Amount of elements	59856
Smoothing	High
Transitions	Mild
The normal angle of curvature	70.3950°
Minimum size	9.7662x10 ⁻⁵ m
Maximum size	1.9532x10 ⁻² m
Minimum edge length	0.251330 m
Cooling time	100 s
Number of samples	1300

3. Results of simulation tests

The thermal analysis of the model is extended in time; therefore, the results of model temperatures in characteristic time intervals are shown. In this paper, two analyses are included: the analysis of the proposed sample and the comparative analysis of the cylindrical sample. The analysis of the proposed sample was made in cross-section and compared with a comparative sample of the same diameter as in the cross-section of the proposed sample.

The analysis results show that after 100 seconds, the lowest temperature is 589.7°C at the edges of the narrow end of the sample, and the highest is 722.46°C at the center. In the further perspective of the research, it is planned to simulate the cooling of the sample to its room temperature; however, at the present stage, the performed cooling analysis is sufficient for the purpose of comparing the proposed sample with the cylindrical one. The first 100 seconds are crucial during physicochemical transformations in the sample structure. Fig. 3 shows the distribution of temperatures after 10 seconds and Fig. 4 after 100 seconds. At this stage, 100 seconds is the final simulation time.

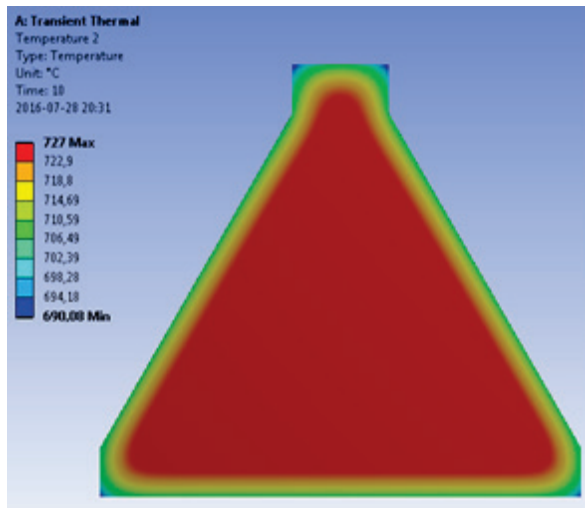


Fig. 3. Temperature distribution after 10 s - longitudinal section of the proposed sample

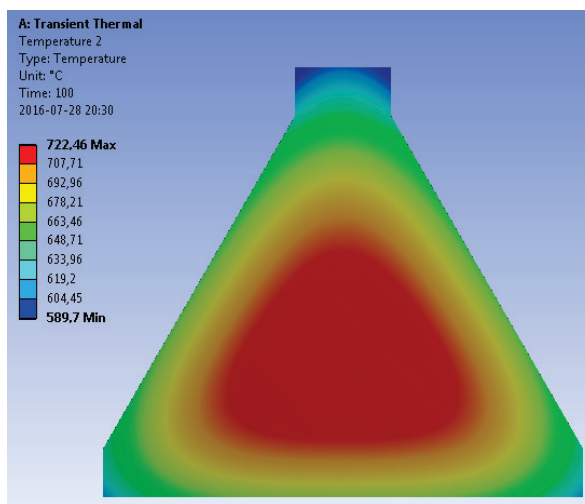


Fig. 4. Temperature distribution after 100 s

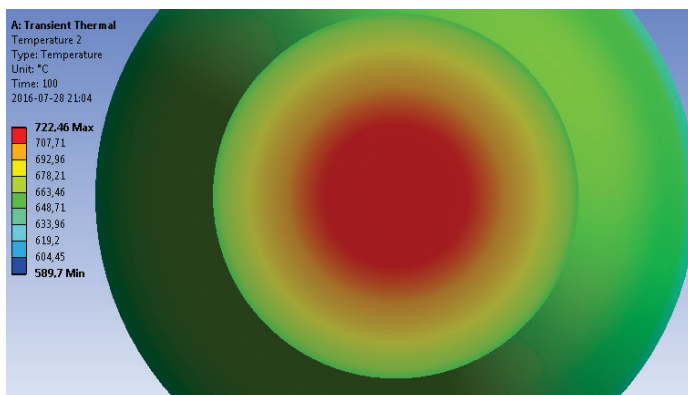


Fig. 5. Temperature distribution for the cross-section of the proposed sample with a diameter of 240 mm after 100 s

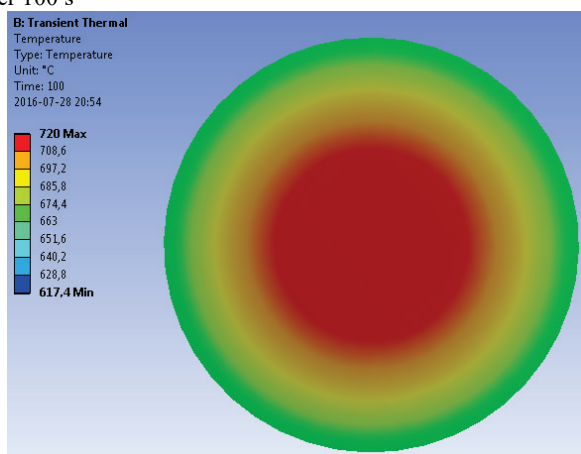


Fig. 6. Temperature distribution for the cross-section of the proposed cylindrical sample with a diameter of 240 mm after 100 s

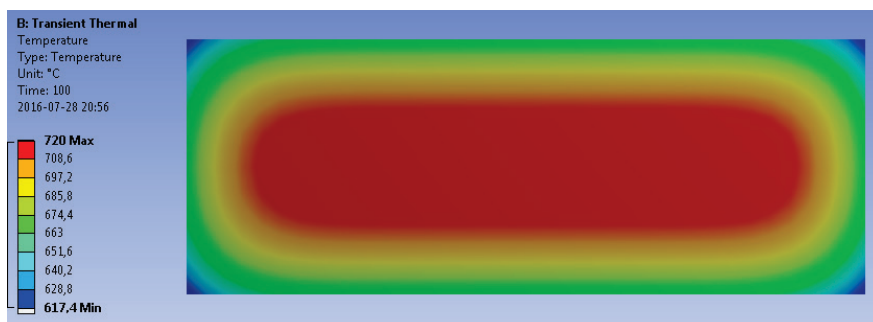


Fig. 7. Temperature distribution for a cross-section of a standard cylindrical sample with a diameter of 240 mm after 100 seconds

4. Summary

The main purpose of the presented analysis was to compare the heat distribution for the selected cross-section with an analogous comparative sample and to check the temperature gradient in the cross-section. According to the laws of thermodynamics and heat conduction, the lack of differences in heat distribution between one and the other samples has been proven. After observing the uniform distribution of heat in the longitudinal section, i.e. the distribution of isotherms parallel to the side edges of the section, it can be stated that each cross-section will maintain this tendency. The above simulation will require real tests. However, it is already possible to determine the possibilities of using such a sample in hardenability tests. Until the mid-19th century, conical samples were used, but at a sharper angle, and they were used to study the cooling properties of liquids [1, 4, 5]. They were not used to test the hardness of the steel. Using this sample for research allows for simpler, faster, and cheaper scientific research and creates the possibility of a more transparent presentation of results. After cutting off the ends, sectioning, and measuring the hardness at evenly distributed points, a graph analogous to the Ferret triangle can be drawn. Displaying the results of hardness measurements or the percentage distribution of martensite by specifying colour gradients will, in turn, make it easier for both the industrial and research sectors to determine the technology for hardening the designed elements. This will contribute to easier and faster design and production of new elements with a lower probability of making a technological error. However, it is necessary to check the sample with the proposed shape under real conditions, and it may be necessary to lengthen the ends if the levelling of the thermal effect from the front turns out to be too small.

5. References

1. W. Luty, Chłodziwa hartownicze. Warszawa: WNT, 1986.
2. L.A. Dobrzański, Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Warszawa: WNT, 2002.
3. O.C. Zienkiewicz, Metoda elementów skończonych. Warszawa: Arkady, 1972.
4. M.S.J. Hashmi, Comprehensive materials processing. Golden, USA, 2014.
5. G.E. Totten, Steel heat treatment - metallurgy and technologies. Portland, USA, 2007.
6. M. Victor, "A computational model for the prediction of steel hardenability". Metallurgical and materials transactions B, 1998.
7. L.A. Dobrzański, Kształtowanie struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013.
8. G.T. Brown, The accurate measurement, calculation, and control of steel hardenability, October 1973, Volume 4.

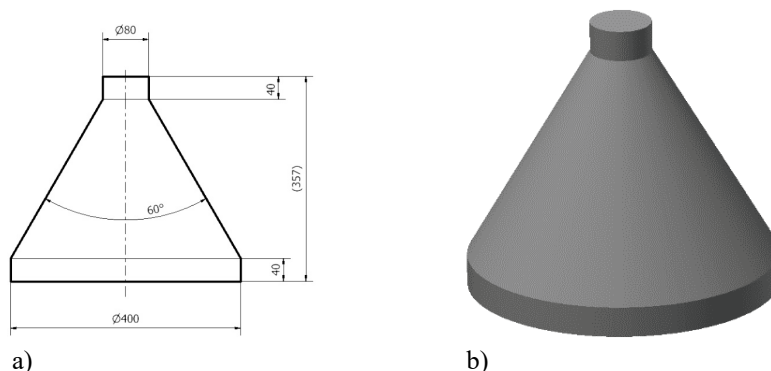
9. „Stal – Badanie hartowności metodą oziębiania od czoła (próba Jominy'ego)”, Polish Standard PN-EN ISO 642:2002.
10. „Stale do ulepszania cieplnego – Część 3: Warunki techniczne dostawy stali stopowych”, Polish Standard PN-EN 10083-3:2006.

MODELOWANIE I KOMPUTEROWA ANALIZA CIEPLNA PROPONOWANEJ PRÓBKII DO BADAŃ HARTOWNOŚCI STALI JAKO UPROSZCZENIE METOD BADAWCZYCH

1. Wprowadzenie

Badanie hartowności, którego istota polega na ścisłym określeniu struktury stali po procesie hartowania w zależności od jego warunków, jest ważnym elementem identyfikacji cech materiału. Wiedza ta pozwala na precyzyjny dobór zarówno parametrów hartowania stali (co z kolei przekłada się na zmniejszone zużycie materiałów), wydłużając w ten sposób czas eksploatacji zespołów i podzespołów [2]. Obecny trend zmian składu stali stopowych wymaga jednocześnie precyzyjnego doboru warunków ich obróbki cieplnej. Istnieją metody badań hartowności stali mające na celu wyznaczenie średnicy krytycznej próbki. Średnica krytyczna może dotyczyć zarówno 50%, jak i 80% zawartości martenzytu. Następnie poprzez zastosowanie próbek o różnych średnicach opracowuje się serię wykresów ich zależności od twardości lub zawartości procentowej martenzytu oraz położenia na przekrojach poprzecznych. Taka próba nosi nazwę metody Grossmana i odznacza się dużą czasochłonnością oraz materiałochłonnością [1, 2, 4]. Za pomocą metody Jominy'ego wyznacza się także krytyczną prędkość chłodzenia dla próbki o określonej średnicy, której parametry określa norma PN-EN ISO 642:2002 [9, 10]. Metody eksperymentalne, jak już wspomniano, wymagają znacznego nakładu finansowego, zaś metody matematyczne są w stanie jedynie wstępnie wyestymować parametry procesu hartowania. Obniżenie kosztów oraz czasochłonności pozwoli na szybszy rozwój nowych materiałów oraz umożliwi badania hartowności stali przez mniejsze laboratoria oraz zakłady przemysłowe z odpowiednim zapleczem. Współczesne metody komputerowe nie pozwolą w pełni zastąpić metod doświadczalnych, ponieważ nie obejmują one jeszcze zjawisk fizykochemicznych towarzyszących procesom np. obróbki cieplnej. Są one jednak w stanie w pełni ukazać zachowanie się materiałów w określonych warunkach oraz poprawnie określić temperaturę w danym punkcie opracowanego modelu po upływie określonego czasu [3].

Celem niniejszej pracy jest sprawdzenie zachowania się próbki o określonym kształcie (rys. 1) w warunkach chłodzenia. Sprawdzony zostanie rozkład temperatury w zależności od czasu chłodzenia oraz różnice rozkładu temperatur w czasie dla próbki cylindrycznej.



Rys. 1. Proponowana próbka: a) szkic kształtu próbki z podstawowymi wymiarami; b) przygotowany model obliczeniowy dla próbki

Do badań hartowności używa się próbek o kształcie walca. Próba Grossmana zakłada kilkadziesiąt próbek walcowych o różnych średnicach. Z kolei próba Jominy'ego przyjmuje próbkę walcową o średnicy 25 mm i długości 100 mm, ale mało przydatną dla stali o małej hartowności, np. narzędziowych i węglowych. Kształty te są dedykowane różnym przedziałom prędkości chłodzenia. Opracowany model obliczeniowy próbki ma kształt stożka ściętego z wyprowadzonymi po obu stronach walcami. Kształt taki ma na celu zniwelowanie wpływu cieplnego od czoła. Wyprowadzone walce docelowo mają zostać odcięte podczas planowanego rzeczywistego testu hartowania, tak iż pozostanie sam stożek ścięty. Podczas przygotowania modelu obliczeniowo-matematycznego próbki do badań hartowności stali położono nacisk na dokładność analizy, co wiązało się z zastosowaniem jak najmniejszych elementów skończonych, by jak najlepiej oddać rzeczywiste warunki procesu hartowania.

Model obliczeniowy wykonano i opracowano, używając systemu ANSYS Fluent 2019. Na bazie wykonanego w tymże programie modelu opracowano model dyskretny. Do jego budowy użyto elementów przestrzennych. Wykonanie, tj. zaprojektowanie próbki bezpośrednio w programie pozwala na jeszcze dokładniejszą analizę, ponieważ import modeli zawsze wiąże się z nakładaniem na siebie błędów obliczeniowych.

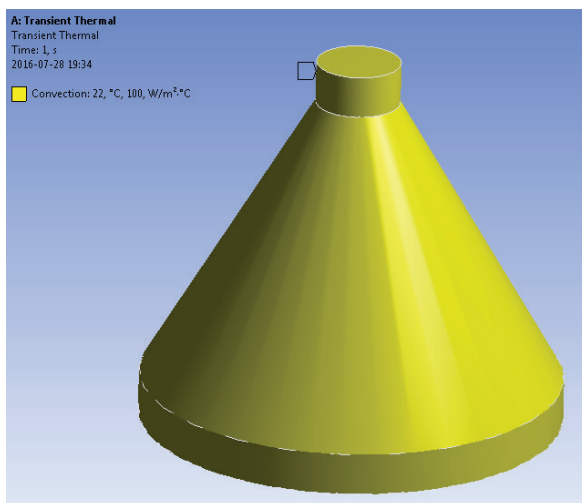
2. Opracowanie warunków brzegowych modelu

Podczas analizy charakteru zjawisk przewodzenia ciepła przyjęto następujące warunki brzegowe:

- temperatura otoczenia, którym jest ciecz chłodząca, wynosi 20°C,
- temperatura cieczy chłodzącej jest stała w czasie, co oznacza założenie nieskończonej objętości cieczy chłodzącej,
- cieczą chłodzącą, która została dobrana do symulacji, jest olej hartowniczy,

- materiałem do próbki jest stal węglowa St3,
- temperaturą początkową procesu chłodzenia próbki stalowej jest temperatura jego hartowania tzn. 727°C.

Istotną wartością podczas wymiany ciepła jest przewodność cieplna. Zakładając naturalną konwekcję cieczy chłodzącej, określono wartość współczynnika przenikania ciepła na 100 W/(m²·K). Ponadto dla uproszczeń założono wartość tego współczynnika na stałym poziomie.



Rys. 2. Model geometryczny i płaszczyzny przewodzenia ciepła dla proponowanej próbki

Wyliczone wartości parametrów geometrycznych całego elementu, jak i liczbę elementów siatki przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Zestawione parametry geometryczne i fizyczne przygotowanego modelu

Właściwości modelu	
Objętość	1,96x10 ⁻² m ³
Masa	154 kg
Elementy skończone	
Liczba węzłów	243949
Liczba elementów	59856
Wyglądanie	wysokie
Przejścia	łagodne
Kąt normalny krzywizny	70,3950°

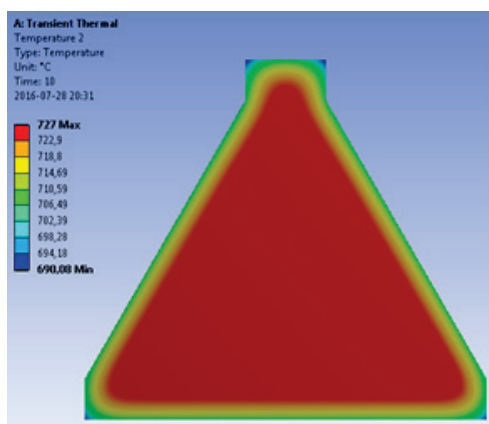
Tabela 1 cd.

Elementy skończone	
Minimalny rozmiar	$9,7662 \times 10^{-5}$ m
Maksymalny rozmiar	$1,9532 \times 10^{-2}$ m
Minimalna długość krawędzi	0,251330 m
Czas chłodzenia	100 s
Liczba próbkowań	1300

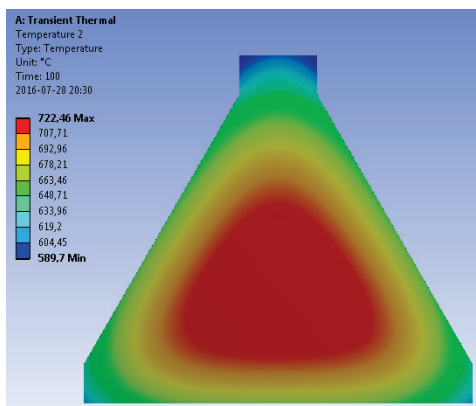
3. Wyniki badań symulacyjnych

Analiza cieplna modelu jest rozciągnięta w czasie, dlatego też wyniki temperatur modelu pokazano w charakterystycznych przedziałach czasowych. W niniejszej pracy zawarte są dwie analizy: analiza proponowanej próbki oraz porównawcza próbki cylindrycznej. Analiza proponowanej próbki została wykonana w przekroju poprzecznym i porównana z próbką porównawczą o tej samej średnicy co w przekroju próbki proponowanej.

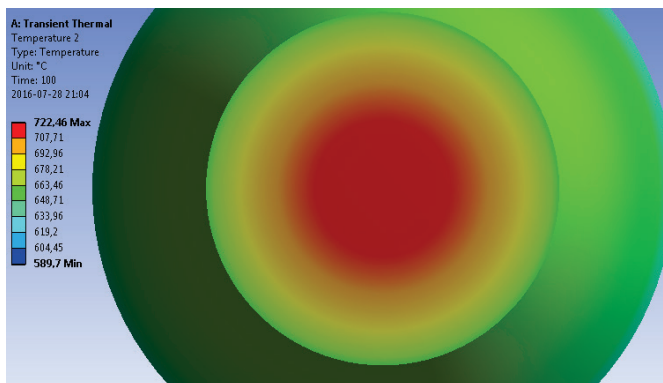
Wyniki analizy pokazują, że po 100 s najniższa temperatura wynosi $589,7^{\circ}\text{C}$ na krawędziach węższego końca próbki, a najwyższa $722,46^{\circ}\text{C}$ w środku. W dalszej perspektywie badań planowane jest przeprowadzenie symulacji chłodzenia próbki do jej temperatury pokojowej, jednakże na obecnym etapie wykonana analiza chłodzenia jest wystarczająca do celów porównawczych próbki proponowanej z cylindryczną. Pierwsze 100 s jest decydujące podczas przemian fizykochemicznych w strukturze próbki. Na rys. 3 zaprezentowano rozkład temperatur po upływie 10 s, na rys. 4 z kolei po upływie 100 s. Na tym etapie 100 s jest czasem końcowym symulacji.



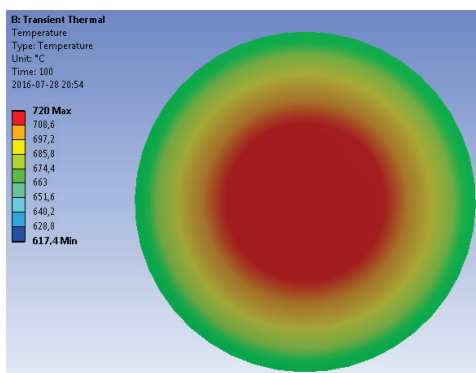
Rys. 3. Rozkład temperatur po upływie 10 s – przekrój wzdłużny proponowanej próbki



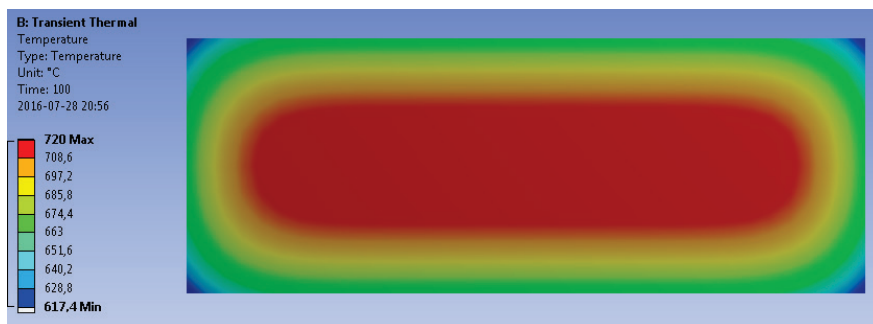
Rys. 4. Rozkład temperatur po upływie 100 s



Rys. 5. Rozkład temperatur dla przekroju poprzecznego proponowanej próbki o średnicy 240 mm po upływie 100 s



Rys. 6. Rozkład temperatur dla przekroju poprzecznego proponowanej próbki cylindrycznej o średnicy 240 mm po upływie 100 s



Rys. 7. Rozkład temperatur dla przekroju poprzecznego standardowej próbki cylindrycznej o średnicy 240 mm po upływie 100 s

4. Podsumowanie

Głównym celem przedstawionej analizy było porównanie rozkładu ciepła dla wybranego przekroju poprzecznego z analogiczną próbką porównawczą oraz sprawdzenie gradientu temperatur w przekroju poprzecznym. Zgodnie z prawami termodynamiki, a zwłaszcza przewodzenia ciepła, udowodniono brak różnic rozkładu ciepła między jedną a drugą próbką. Zwracając uwagę na równomierny rozkład ciepła w przekroju wzdłużnym, tzn. rozkład izoterm równoległych do bocznych krawędzi przekroju, można stwierdzić, że każdy przekrój poprzeczny zachowa tę tendencję. Powyższa symulacja wymagać będzie badań rzeczywistych, jednakże już teraz można określić możliwości, jakie dać może stosowanie takiej próbki w badaniach hartowności. Do połowy XX w. stosowano próbki stożkowe, lecz pod ostrzejszym kątem i służyły one badaniom własności chłodzących cieczy [1, 4, 5]. Nie stosowano ich do badań stali pod kątem hartowności. Zastosowanie tej próbki do badań pozwala na prostsze, szybsze i tańsze badania naukowe oraz stwarza możliwość bardziej przejrzystej prezentacji wyników. Po odcięciu końcówek, przekrojeniu i zmierzeniu twardości na równomiernie rozłożonych punktach można sporządzić wykres analogiczny do trójkąta Ferreta. Zobrazowanie wyników pomiarów twardości lub procentowego rozkładu martenzytu poprzez podanie gradientów kolorów pozwoli z kolei na ułatwienie sektorowi zarówno przemysłowemu, jak i badawczemu określenia technologii hartowania projektowanych elementów. Przełoży się to na łatwiejsze i szybsze projektowanie i wytwarzanie nowych elementów z mniejszym prawdopodobieństwem popełnienia błędu technologicznego. Konieczne jest jednak sprawdzenie próbki o proponowanym kształcie w warunkach rzeczywistych, a niezbędne okazać się może wydłużenie końcówek, jeśli niwelacja wpływu cieplnego od czoła okaże się zbyt mała.

5. Literatura

1. W. Luty, Chłodziwa hartownicze. Warszawa: WNT, 1986.
2. L.A. Dobrzański, Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Warszawa: WNT, 2002.
3. O.C. Zienkiewicz, Metoda elementów skończonych. Warszawa: Arkady, 1972.
4. M.S.J. Hashmi, Comprehensive materials processing. Golden, USA, 2014.
5. G.E. Totten, Steel heat treatment - metallurgy and technologies. Portland, USA, 2007.
6. M. Victor, "A computational model for the prediction of steel hardenability". Metallurgical and materials transactions B, 1998.
7. L.A. Dobrzański, Kształtowanie struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013.
8. G.T. Brown, The accurate measurement, calculation, and control of steel hardenability, October 1973, Volume 4.
9. „Stal – Badanie hartowości metodą oziębienia od czola (próba Jominy'ego)”, Polish Standard PN-EN ISO 642:2002.
10. „Stale do ulepszenia cieplnego – Część 3: Warunki techniczne dostawy stali stopowych”, Polish Standard PN-EN 10083-3:2006.

