

**Magdalena Pokrzywa, Rafał Niewiedzielski, Piotr Kula,
Radomir Atraszkiewicz, Sebastian Lipa ¹⁾, Leszek Czechowski,
Jacek Jankowski ²⁾, Tomasz Wajman, Krzysztof Sobczak ³⁾**

NUMERYCZNA ANALIZA PROCESU HARTOWANIA W PIECU RUROWYM Z ZIMNĄ KOMORĄ CHŁODZENIA

Streszczenie: W artykule przedstawiono zagadnienie wymiany ciepła pomiędzy stalowym wsadem poddanym uprzednio obróbce cieplno-chemicznej (nawęglanie próżniowe) a przepływającym gazem pod wysokim ciśnieniem. Problem naukowy rozwiązano wykorzystując stworzony w środowisku Delphi, specjalnie dla tego typu zagadnień, zewnętrzny program nadrzędny, umożliwiający połączenie oprogramowania opartego na metodzie objętości skończonej – ANSYS CFX 12.0 i metodzie elementów skończonych – ANSYS 12.0. Do programu zaimplementowane zostały dwa modele: przepływowy i termiczny. Stworzony program pozwala na analizę tempa chłodzenia w każdym punkcie objętości i optymalizację procesu chłodzenia z intensywnie i turbulentnie przepływającym gazem. Dla poprawnego zdefiniowania i modelowania zjawiska wymiany ciepła pomiędzy wsadem a medium chłodzącym stworzono bazę danych materiałowych, obejmującą wielkości fizyczne pozwalające stworzyć model numeryczny uwzględniający przemiany fazowe w tzw. ciepłem utajonym oraz wpływ szybkości chłodzenia na zmiany zachodzące w strukturze detalu. Przy tworzeniu baz materiałowych posłużono się programem JMatPro.

Słowa kluczowe: analiza numeryczna, modelowanie, obróbka cieplna, hartowanie

WSTĘP

O ile stan wiedzy dotyczący teoretycznych aspektów przeprowadzania procesów cieplno – chemicznych jest na ogół znany, o tyle złożoność parametrów fizycznych, mających wpływ na rzeczywisty proces, uzależniona jest od wielu czynników technicznych i technologicznych. W pracy przedstawione zostało rozwiązanie numeryczne tempa chłodzenia w gazie wsadu stalowego po procesie nawęglania próżniowego. W technologii nawęglania próżniowego, kształtowanie warstwy wierzchniej odbywa się w dwóch etapach: pierwszym z nich jest dyfuzyjne nasycanie stali węglem, drugim zaś chłodzenie w gazach. Przy założeniu, iż proces hartowania przebiega przy wyższej szybkości chłodzenia niż krytyczna, wówczas uzyskuje się na powierzchni elementu przemianę martenzytyczną.

¹ Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Instytut Inżynierii Materiałowej.

² Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji.

³ Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Instytut Maszyn Przepływowych.

W wyniku przeprowadzonego procesu świadomie wprowadza się w strukturę powierzchni ściskające naprężenia własne, które korzystnie wpływają na własności wytrzymałościowe i eksploatacyjne wykonywanych detali. Niemniej jednak, generowane podczas obróbki cieplnej naprężenia powodują powstawanie odkształceń w geometrii obrabianego detalu, które w niektórych przypadkach wymagają stosowania dodatkowych zabiegów wykańczających. Usunięcie niepożądanego deformacji jest nie tylko czasochłonne, ale również generuje niepotrzebne koszty. Możliwość przewidywania końcowego efektu, jak również możliwość kontrolowania przeprowadzonego procesu stało się głównym celem poszukiwania właściwego narzędzia symulacji.

Dla większości przypadków kluczowym, decydującym o końcowych właściwościach i geometrii, procesem w obróbce cieplno – chemicznej jest hartowanie [1, 2]. Ograniczenie symulacji do modelowania procesu hartowania miało na celu analizę wpływu szybkości i nierównomierności chłodzenia w gazach na końcową postać elementu. Etap nawęglania uwzględniono jedynie przy tworzeniu złożonej struktury gradientowej o zmiennej zawartości węgla na przekroju wybranego detalu (rozkład węgla). W badaniach modelowych dla poprawnego zdefiniowania środowiska fizycznego, w którym przeprowadzono proces hartowania uwzględniono współczynniki termodynamiczne opisujące przemiany fazowe w stalach, jak również zmiany energii cieplnej przy przejściach fazowych. Wykorzystując znane równanie różniczkowe dla nieustalonego przepływu ciepła (1):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v(x, y, z, t) \quad (1)$$

gdzie: $T(x,y,z,t)$ – funkcja opisująca pole temperatur,

q_v – objętościowe źródło ciepła,

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – ortropowe współczynniki przewodzenia ciepła,

ρ – gęstość,

c – ciepło właściwe.

obliczono rozkład i gradient temperatur wewnątrz analizowanego detalu. Bazując na uzyskanym rozkładzie temperatur dla trójwymiarowego analizowanego przypadku określono wektor odkształceń termicznych w postaci (2):

$$\varepsilon_T = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xT} \\ \varepsilon_{yT} \\ \varepsilon_{zT} \\ \gamma_{xyT} \\ \gamma_{yzT} \\ \gamma_{xzT} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha \Delta T \\ \alpha \Delta T \\ \alpha \Delta T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

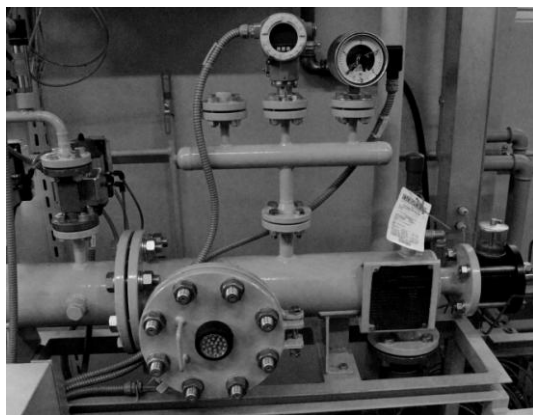
gdzie: α jest liniowym współczynnikiem rozszerzalności termicznej zależnym między innymi od zawartości węgla w strukturze, a ΔT – zmianą temperatury. Do modelowania zjawisk zachodzących wewnątrz detalu użyto metody elementów

skończonych, w których dana wielkość fizyczna jest interpolowana na obszar całej struktury poprzez połączenie wszystkich elementów skończonych węzłami.

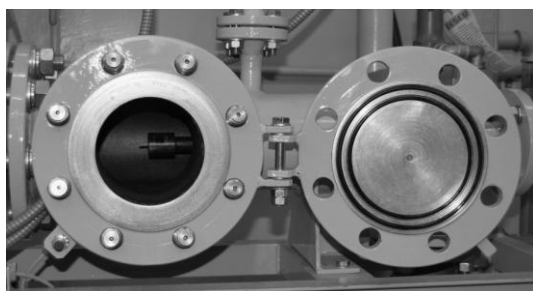
MODEL NUMERYCZNY

Analiza numeryczna procesu hartowania w urządzeniu laboratoryjnym do obróbki cieplnej z chłodzeniem w gazach pod wysokim ciśnieniem (rys. 1 oraz rys. 2), zwanym ‘piecem rurowym’, wymagała przyjęcia założeń wstępnych zarówno pod względem geometrii wytypowanej do analizy, jak i warunków początkowych i brzegowych.

Geometria przestrzeni komory przyjętej do symulacji, odwzorowuje symetryczny przekrój rzeczywistej komory. Elementem wsadu jest próbka walcowa o wymiarach $\varnothing 25$ mm, $L=150$ mm z warstwą nawęgloną o grubości 0,4 mm, która to podzielona została na 12 warstw.



Rys. 1. Urządzenie laboratoryjne do obróbki cieplnej z chłodzeniem w gazach pod wysokim ciśnieniem
Fig. 1. The laboratory equipment for heat treatment with cooling in gases at high pressure



Rys. 2. Widok komory przyjętej do obliczeń
Fig. 2. Chamber view for calculation purposes

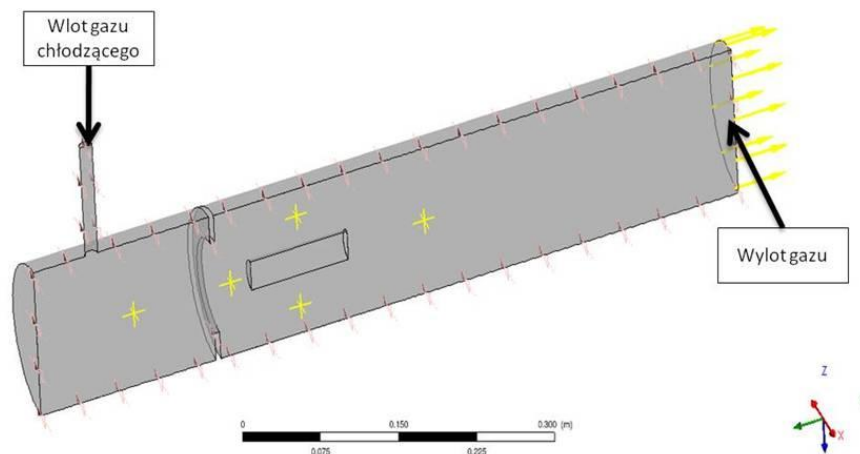
Na podstawie modelu geometrycznego odwzorowującego urządzenie stworzono model dyskretny oparty o metodę objętości skończonych. W miejscach szczególnie istotnych dla przemian strukturalnych oraz termicznych nastąpiło zagęszczenie siatki [3, 4].

Analizę strukturalną przeprowadzono w programie ANSYS 12.0, natomiast analizę termiczno-przepływową w programie ANSYS CFX 12.0. Podstawą wy-

konania analiz przepływu masy i ciepła w piecu rurowym było wykorzystanie warunków brzegowych zadanych w programie ANSYS CFX 12.0, natomiast podstawą do wykonania analiz strukturalnych, było wykorzystanie warunków brzegowych zadanych w programie ANSYS 12.0 oraz bazy materiałowej wykonanej w oparciu o program JMatPro.

MODEL PRZEPLÝWOWY PROCESU CHŁODZENIA

W programie ANSYS CFX 12.0 stworzona została definicja modelu pieca rurowego (rys.3), w której przyjęte zostały następujące warunki początkowe: ciśnienie gazu chłodzącego $p=2 \times 10^6$ Pa i temperatura hartowania $T=1133,15$ K. Dopływ medium chłodzącego do wnętrza komory hartowniczej realizowany jest przez jeden wlot, usytuowany prostopadle do komory, natomiast wylot gazu chłodzącego znajduje się na tylnej ścianie pieca.



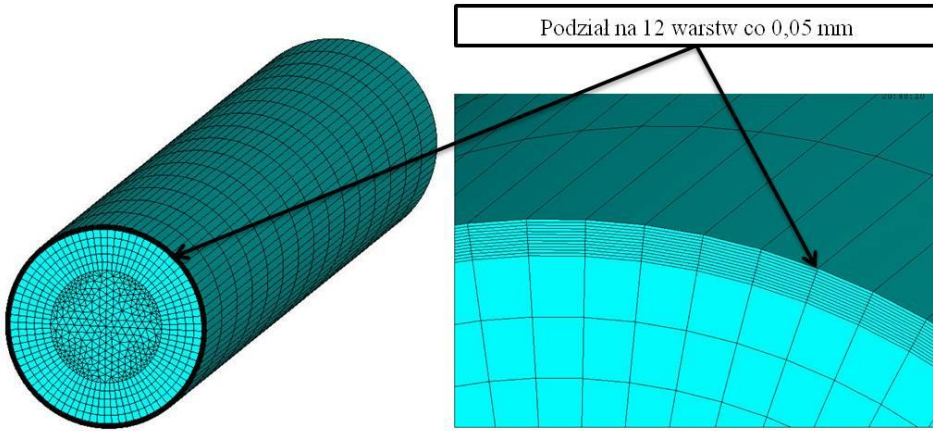
Rys.3. Model komory ze wsadem – ANSYS CFX
Fig. 3. Chamber model with the steel charge – ANSYS CFX

MODEL STRUKTURALNY PROCESU CHŁODZENIA

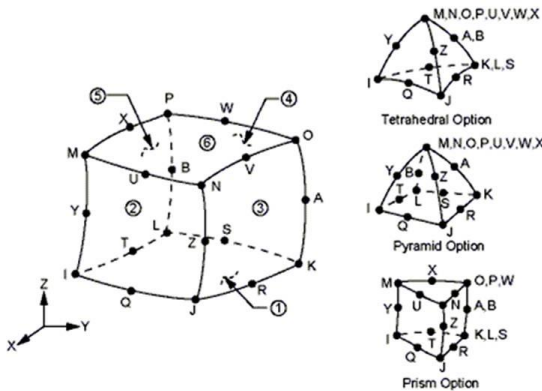
Próbkę walcową o wymiarach 150 x 25 podzielono na elementy skończone elementem typu Solid90/Solid186 (rys. 4). W analizowanej numerycznej próbce wyodrębniono warstwy wierzchnie (warstwa nawęglona – warstwowo zmienia się zawartość węgla) stopniując wysokość elementów wzdłuż promienia co 0,05 mm.

W każdej warstwie przyjęto odpowiednią zawartość węgla wynikającą z rzeczywistej próbki walcowej. Element skończony Solid90 dla analizy termicznej i

Solid186 dla analizy strukturalnej posiada w swojej budowie maksymalnie 20 węzłów (rys. 5) i jest to element trzeciego rzędu [5, 6].



Rys. 4. Model próbki walcowej ANSYS 12.0
 Fig. 4. Model of cylindrical samples ANSYS 12.0



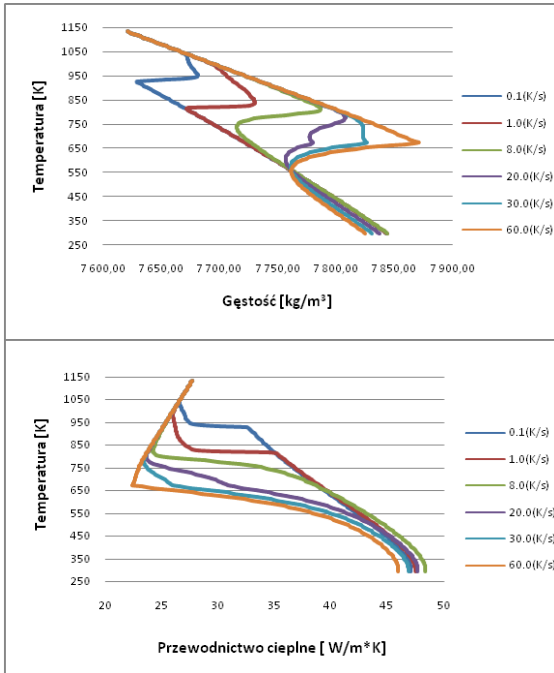
Rys. 5. Dwudziestowęzłowy element typu Solid 90/186
 Fig. 5. Twenty-nodal element type Solid 90/186

BAZA MATERIAŁOWA

Zaimportowana baza materiałowa do programu autorskiego zawiera zbiór właściwości materiałowych z procesu chłodzenia dla stali 16MnCr5. W skład tego zbioru wchodzi m.in. takie parametry jak gęstość oraz przewodnictwo cieplne.

Wszystkie dane zostały opracowane i przygotowane w postaci tablic, z których każda odpowiada innej zawartości procentowej węgla. Zmienna zawartość węgla związana jest z dyfuzyjnym nasyceniem węglem warstwy wierzchniej materiału. Dodatkowo każda z tablic uzależnia zmiany poszczególnych właściwości od temperatury oraz szybkości chłodzenia hartowanego elementu wsadu.

W przypadku zawartości procentowej węgla jest to zakres od zawartości w rdzeniu, (0,165%C), przez 0,2%C, aż do 1%C, z krokiem 0,05%. Temperatura zmienia się od 1133,15 K do 298,15 K, z krokiem 5 K.



Rys.6. Wykres zależności gęstości od temperatury dla różnych szybkości chłodzenia

Fig. 6. A graph of the density on temperature for different cooling rates

Rys. 7. Wykres zależności przewodnictwa cieplnego od temperatury dla różnych szybkości chłodzenia

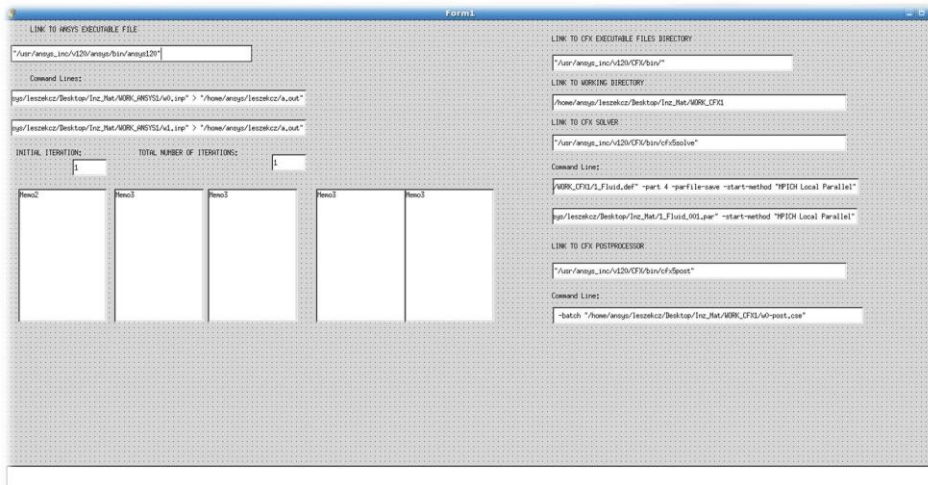
Fig. 7. A graph of the thermal conductivity on temperature for different cooling rates

Szybkość chłodzenia hartowanego materiału, zmienia się w zakresie od 0,1 K/s do 60 K/s. Ma ona pośredni wpływ na daną właściwość, która zależna jest od struktury jaką posiada hartowany materiał. W każdej tablicy znajduje się jednokowy zestaw 27-iu różnych szybkości chłodzenia (rys. 6 oraz rys. 7). Przyjęte wielkości, są ściśle związane z przyjętymi parametrami obróbki cieplno – chemicznej.

ZASTOSOWANE OPROGRAMOWANIE

Do przeprowadzenia symulacji hartowania wielowarstwowej próbki walcowej metodą elementów skończonych wykorzystano programy podrzędne tj. ANSYS CFX 12.0 i ANSYS 12.0. Aby umożliwić wymianę informacji o rozkładzie temperatury i strumienia cieplnego zaadoptowano autorski program napisany w języku Object Pascal w programie Lazarus w środowisku Linux. Program pełni nadrzędną rolę w sterowaniu procesem obliczeń chłodzenia gazowego azotem próbki wykonanej ze stali 16MnCr5 do temperatury 860 °C do temperatury otoczenia 25 °C: uruchamia programy podrzędne wraz z odpowiednimi makrami przygotowanymi w postaci plików tekstowych, archiwizuje informacje o rozkładach temperatur strumieni cieplnych dla każdego elementu skończonego na powierzchni wy-

miany w plikach wymiany informacji, zamiana numerację materiałów dla każdego elementu skończonego, która przypisana została do danego zakresu temperatur i szybkości spadku temperatury w elemencie skończonym w każdym kroku czasowym (rys.8).



Rys.8. Interfejs programu autorskiego
Fig. 8. The program interface copyright

Algorytm obliczeniowy w pierwszym kroku czasowym można przedstawić następująco: jako pierwszy uruchamiany jest Solver programu ANSYS CFX 12.0 wraz z zaimplementowanym modelem do obliczeń (w tym przypadku jest to piec rurowy). W tym czasie program nadrzędny sprawdza, czy Solver wykonał obliczenia. Gdy pojawi się plik rozwiązania program uruchamia CFD – Post 12.0 programu ANSYS CFX 12.0 z odpowiednim makrem do zebrania informacji o rozkładzie temperatury na powierzchni wymiany. Następnie wykonywane są czynności z transferem wartości temperatur do pliku, który będzie służył w dalszym etapie do wprowadzenia ich do elementów skończonych na powierzchni wymiany ANSYS 12.0. W pierwszym kroku czasowym zamiana numeracji materiałów nie jest realizowana. Na koniec uruchamiany jest program ANSYS 12.0. Po wykonaniu obliczeń następuje zapis strumieni cieplnych i szybkości chłodzenia. Ostatnia informacja służy w kolejnym kroku czasowym do zamiany numeracji materiałowej w pliku tekstowym z rozszerzeniem *.cdb.

PODSUMOWANIE

Na podstawie wstępnych symulacji chłodzenia próbki walcowej w ciśnieniu $p=2 \times 10^6$ Pa stwierdzono, iż przepływ medium chłodzącego przez komorę ma charakter silnie turbulentny. Prędkość medium chłodzącego ma duży wpływ na

wartość współczynnika przejmowania ciepła na powierzchni elementu chłodzącego, a w konsekwencji wpływa na odkształcenia badanego elementu.

Numeryczna analiza procesu hartowania w piecu walcowym możliwa jest dzięki stworzeniu bazy materiałowej, która to uwzględnia zależności własności materiałowych poszczególnych faz od temperatury, szybkości chłodzenia hartowanego elementu i zawartość procentową węgla w materiale.

Zaletą stosowania zewnętrznych programów sterujących jest możliwość rozwiązywania złożonych analiz przepływowo – wytrzymałościowych. Innowacyjny sposób połączenia dwóch programów oraz bazy materiałowej za pomocą autorskiego programu pozwoli na wykorzystanie metod numerycznych do optymalizacji procesów obróbki cieplno – chemicznej. Artykuł przedstawia jeden z pierwszych etapów prac nad złożonością analiz numerycznych procesu hartowania z uwzględnieniem przemian fazowych.

PIŚMIENNICTWO

1. Zagrajek T., Krzesiński G., Marek P.: Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji. OWPW Warszawa 2005.
2. Gorockiewicz R., Korecki M., Małdziński L., Olejnik J.: Stan i perspektywy hartowania gazowego na podstawie doświadczeń Seco/Warwick w obszarze obróbki cieplnej stali narzędziowych, HSLA oraz nawęglania próżniowego FineCarb®. MK „Nowoczesne Technologie w Inżynierii Powierzchni”. Spała 10 2006.
3. Pokrzywa M., Atraszkiewicz R., Kula P.: Założenia do analizy wymiany ciepła w procesie chłodzenia w przemysłowej gorącej komorze hartowniczej. Przegląd Mechaniczny. Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego. Warszawa 2010. Nr 12/10, 26-30.
4. Sawicki J., Górecki M.: „Zastosowanie metod numerycznych do analizy zjawisk cieplno-przepływowych procesu chłodzenia elementów o różnych kształtach”. Inżynieria Materiałowa, 2005, nr 5, str. 1207-1210.
5. Czechowski L., Jankowski J., Kubiak T.: Modelowanie procesu hartowania. Mechanik. Agenda Wydawnicza SIMP. Prószków 2010. Nr 7/2010, 484-486.
6. Pacheco P., Souza L.: Modeling of quenching process in steel cylinders, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2007, s. 445-468.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE QUENCHING PROCESS IN THE TUBULAR FURNACE WITH COLD COOLING CHAMBER

Summary

The following work presents the issue of heat transfer between the steel charge after vacuum carburizing process and gas which intensively flows through. The external managing program has been created in Delphi environment to solve the scientific research problem, which connect the Finite Volume Method – ANSYS CFX 12.0 with Finite Element Method – ANSYS 12.0. To the program there were implemented two models: flow and thermal. Created program allows to analyze cooling rate at each point of the volume and optimize the cooling process with gas intensively and turbulently flowing

through. For the correct definition and modeling of the phenomenon of the heat transfer between the steel charge and cooling gas, the database of material properties was created, which includes physical quantities that allow to create a numerical model taking into account the so-called phase transitions with latent heat and the influence of the cooling rate to changes in the structure of the detail. Thanks to JMatPro⁴ program, the application of different material properties database of material properties could be applied.

Keywords: numerical analysis, modeling, heat treatment, hardening

⁴ Program firmy Sente Software UK