

Modelowanie procesu hartowania

LESZEK CZECHOWSKI
JACEK JANKOWSKI
TOMASZ KUBIAK*

Przedstawiono wyniki badań, które są następstwem wstępnych analiz i – w efekcie końcowym – mają służyć do optymalizacji procesu hartowania (doboru odpowiednich parametrów nagrzewania i chłodzenia w piecu hartowniczym – krzywa opisująca szybkość chłodzenia) w taki sposób, aby otrzymać strukturę martenzytyczną na odpowiedniej głębokości oraz jak najmniejsze odkształcenia lub odkształcenia równomierne, powodujące że zostanie zachowany kształt detalu.

Procesy zachodzące podczas hartowania są bardzo skomplikowane i interesujące nie tylko z punktu widzenia inżynierii materiałowej. Równie interesujący i trudny do opisanego jest proces powstawania naprężeń i odkształceń hartowniczych. Naprężenia własne wywołane procesem mogą okazać się niebezpieczne przy dalszym użytkowaniu hartowanego przedmiotu, a odkształcenia, jakie powstaną podczas procesu hartowania, mogą dyskwalifikować element lub wymagana może być dalsza obróbka ubytkowa poprawiająca jego kształt. Z drugiej strony naprężenia powierzchniowe podczas eksploatacji danej części konstrukcyjnej mogą redukować się, co w rezultacie może korzystnie wpływać na trwałość.

Wielkoseryjne przemysłowe procesy w zakresie inżynierii powierzchni ulegają ciągłym modyfikacjom, mającym na celu ich doskonalenie pod względem technicznym, ekonomicznym i ekologicznym. Obecnie innowacyjnym rozwiązaniem w tym zakresie, stanowiącym niewątpliwie rewolucję technologiczną na wielką skalę, jest nawęglanie próżniowe w kompaktowym rozwiązaniu zawierającym hartowanie w gazach obojętnych pod wysokim ciśnieniem [1]. Gazowe ośrodki oziębiające (głównie oparte na azocie, helu, wodorze lub ich mieszaninach) nie powodują zagrożenia skażeniem środowiska naturalnego i gwarantują czystość obrabianych przedmiotów, które po hartowaniu zachowują połysk metaliczny. Oprócz niezwykle istotnej zalety czystości procesu technologicznego i jego ekologicznego bezpieczeństwa, hartowanie w ośrodkach gazowych o podwyższonym ciśnieniu powoduje zmniejszenie, a przede wszystkim ujednoczenie odkształceń hartowniczych [2, 3]. Fakt powtarzalności odkształceń hartowniczych pozwala zmniejszyć naddatki na szlifowanie, co w konsekwencji wpływa korzystnie na ostateczny stan naprężeń własnych w warstwach wierzchnich.

Proces technologiczny, jakim jest hartowanie, pod względem sterowania takimi parametrami wejściowymi, jak: temperatura czynnika chłodzącego, głębokość warstwy nawęglonej i wyjściowymi, jak: twardość powierzchni, naprężenia i odkształcenia, w rzeczywistości jest procesem skomplikowanym, ponieważ uzyskany efekt nie zawsze jest zgodny z narzuconymi wymaganiami. Opracowanie numerycznego modelu hartowania w pewien sposób umożliwiłoby oszacowanie parametrów wyjściowych oraz podjęcie próby sterowania parametrami, jakie można narzucić w piecu hartowniczym.

Liczba prac, które zostały poświęcone analizie naprężeń, jest bardzo obszerna. Najistotniejsza jest praca [4] – zbiór artykułów dotyczących określenia naprężeń hartowniczych w oparciu o metodę elementów skończonych. W pracy [5] została zaprezentowana analiza wpływu parametrów obróbki cieplnej na naprężenia i odkształcenia hartowanego elementu cylindrycznego. Podano zależność parametrów hartowania od chwilowych i szczytkowych naprężeń. W pracy [6] wykorzystano metodę elementów skończonych do modelowania hartowania próbki walcowej, wprowadzając przemiany fazowe.

W tej pracy zajmowano się opracowaniem modelu numerycznego hartowania nawęglonej stali 16MnCr5 w oparciu o metodę elementów skończonych na przykładzie pojedynczej próbki walcowej. Obliczenia podzielono na dwa etapy: wyznaczenie w kolejnych krokach czasowych pola temperatur i szybkości chłodzenia w każdym elemencie skończonym (analiza termiczna) oraz wyznaczenie pola naprężeń i odkształceń (analiza strukturalna). W każdym kroku czasowym wprowadzono zmianę materiału elementu skończonego, zależnie od temperatury i szybkości chłodzenia, stężenia węgla, rodzaju i udziału procentowego faz. Baza materiałowa została przygotowana w oparciu o oprogramowanie JMatPro w taki sposób, aby uzależnić stałe materiałowe od określonych parametrów, przy założonej wielkości ziarna nr 6 w skali ASTM. W analizie termicznej wykorzystano przewodność cieplną, gęstość, ciepło właściwe, natomiast w strukturalnej założono „multiliniowe” charakterystyki materiałowe (uzależniające właściwości poszczególnych faz od temperatury, szybkości chłodzenia, stężenia węgla) i wprowadzono izotropowy współczynnik cieplnej rozszerzalności liniowej, uwzględniając przemianę austenit – martenzyt. W przyjętym modelu pominięto fazę austenitu szczytkowego. Obliczenia przeprowadzono w programie ANSYS 11.0. W celu kontroli zamiany własności materiałowych w danym elemencie, w zależności od prędkości chłodzenia, stworzono program realizujący algorytm obliczeniowy.

Model numeryczny

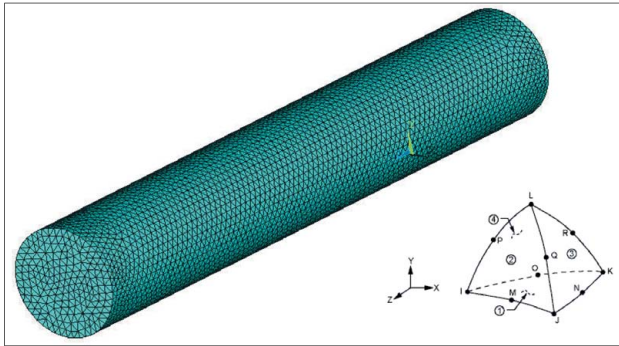
Do obliczeń przygotowano próbkę walcową o długości 150 mm i średnicy 25 mm. Objętość próbki podzielono na czworosiennie dziesięciowęzłowe elementy bryłowe. Do analizy termicznej użyto elementu, który w każdym węźle miał jeden stopień swobody – temperaturę, natomiast w analizie strukturalnej każdy węzeł modelu numerycznego miał trzy stopnie swobody – trzy prostopadłe przemieszczenia. Kształt, wielkości elementów oraz sposób podziału zarówno w analizie termicznej, jak i strukturalnej były jednakowe. Model dyskretny próbki okrągłej podlegającej procesowi hartowania przedstawiono na rys. 1.

W analizie termicznej na powierzchniach próbki ustalono warunek brzegowy Dirichleta:

$$T_1 = \text{const.}$$

natomiast w analizie strukturalnej założono zerowe wartości przemieszczeń, tak aby próbka jako całość nie mogła się przemieszczać, ale miała możliwość swobodnej zmiany wymiarów w każdym kierunku (odebrano możliwość przemieszczenia tylko w jednym węźle).

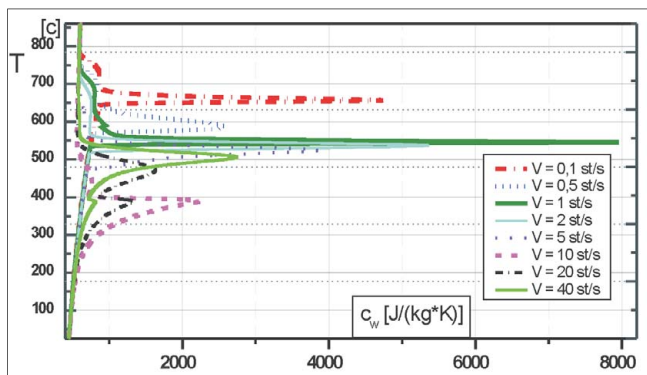
* Dr inż. Leszek Czechowski, dr inż. Jacek Jankowski, dr hab. inż. Tomasz Kubiak – Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji Politechniki Łódzkiej



Rys. 1. Kształt i model numeryczny próbki, model elementu skończonego: 1, 2, 3, 4 – punkty Gaussa

Analizę termiczną przeprowadzono w programie ANSYS CFX, a analizę strukturalną w programie ANSYS. Takie podejście umożliwiło w późniejszych analizach wykorzystanie warunków brzegowych wyznaczonych w analizie przepływu masy i ciepła w piecu hartowniczym.

Bazę materiałową – zawierającą dane materiałowe zarówno na potrzeby analizy termicznej, jak i strukturalnej – zbudowano wykorzystując wiedzę i doświadczenie kolegów z Inżynierii Materiałowej Politechniki Łódzkiej oraz program JMatPro. Przykładowe wykresy ciepła właściwego dla stali 16MnCr5 uzyskane z JMatPro w zależności od temperatury i prędkości chłodzenia pokazano na rys. 2.

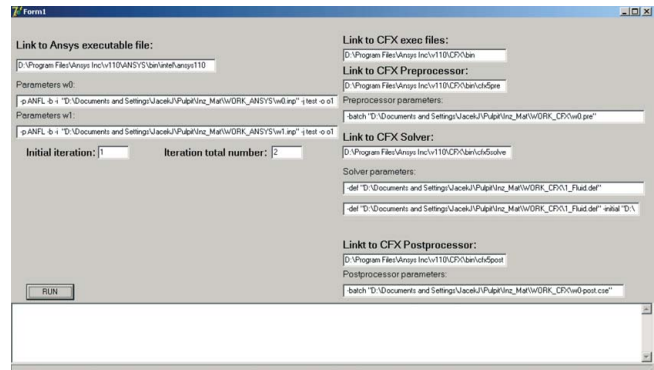


Rys. 2. Ciepło właściwe dla stali 16MnCr5 w zależności od temperatury i szybkości chłodzenia

W analizie termicznej wzięto pod uwagę 27 szybkości chłodzenia w zakresie $0,1 \div 60$ %/s. Własności termiczne materiałów zmieniały się w analizowanym zakresie co 5° , tworząc charakterystyki składające się ze 168 punktów. W symulacji termicznej uwzględniono w materiale: przewodność cieplną, ciepło właściwe oraz gęstość. W przypadku analizy strukturalnej bazę materiałową należało wielokrotnie poszerzyć, tworząc w ten sposób około 4500 charakterystyk rozciągania (do każdej temperatury i prędkości chłodzenia była przypisana krzywa naprężenie – odkształcenie). W zakresie sprężysto-plastycznym przyjęto charakterystykę multiliniową składającą się z dwudziestu punktów (ograniczenie to wynika z programu Ansys). W analizie strukturalnej zmieniano następujące parametry: moduł Younga w zakresie sprężystym oraz moduł styżny w zakresie sprężysto-plastycznym, początkową granicę plastyczności, liczbę Poissona oraz współczynnik rozszerzalności cieplnej. Wyznaczone właściwości materiałowe uzależnione były również od poszczególnych faz i ich udziału dla odpowiednich temperatur i szybkości chłodzenia (zgodnie z wykresami CTP).

Do obsługi obu programów, przepływu danych i wyników oraz wyboru odpowiednich danych materiałowych z przygotowanej bazy opracowano zewnętrzny program napisany w języku Delphi. Jego zadaniem było sterowanie

procesem chłodzenia próbki od temperatury hartowania 860°C do temperatury otoczenia 20°C . Na rys. 3 pokazano wygląd interfejsu użytkownika programu, przystosowanego do zarządzania wymianą danych CFX-ANSYS.

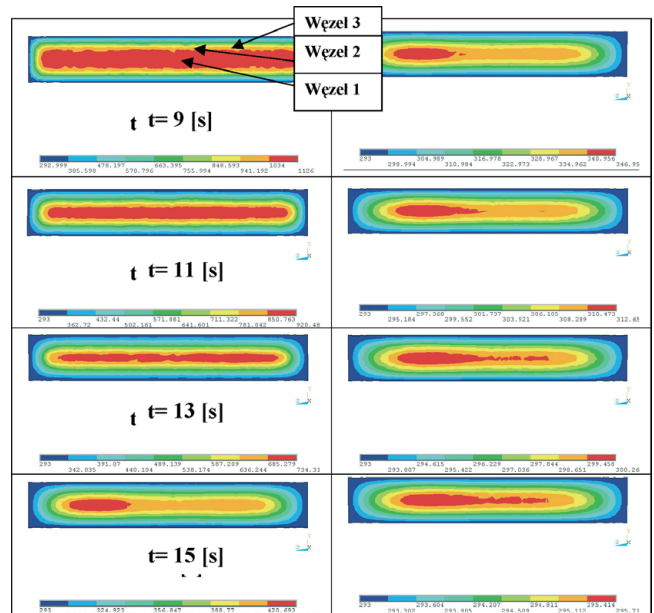


Rys. 3. Interfejs użytkownika programu autorskiego

Każdy krok składał się z analizy termicznej, w której wyznaczano rozkład temperatur w próbce po upływie 15 s. Znając zmianę średniej temperatury elementu, wyznaczoną jako wartość średnią zmian temperatury (porównanie wartości temperatur z kroku bieżącego i poprzedniego) w jego węzłach, wyznaczano szybkość chłodzenia. Takie podejście pozwoliło uniknąć bardzo dużych wartości szybkości chłodzenia, które pojawiały się w węzłach na powierzchni próbki w chwili rozpoczęcia analizy. Znając szybkość chłodzenia w każdym elemencie oraz średnią temperaturę, wyszukiwano z przygotowanej bazy materiałowej odpowiednie dane i przypisywano je każdemu elementowi. Tak przygotowany model wczytywano do programu ANSYS i przeprowadzano analizę strukturalną. W ten sposób po jednym kroku czasowym otrzymywano rozkład temperatur w próbce, jak również stan naprężeń i odkształceń, które były wielkościami wejściowymi w kolejnym kroku czasowym. Opisane postępowanie powtarzano do momentu, aż temperatura w próbce się wyrównała do temperatury otoczenia.

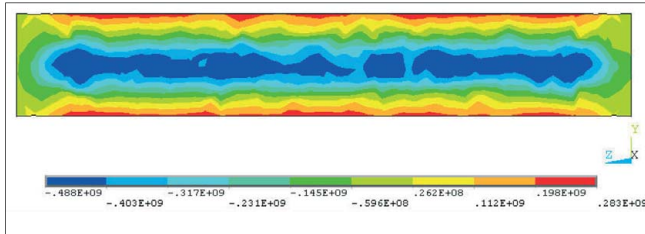
Wyniki obliczeń

Wykonane obliczenia pozwoliły wyznaczyć rozkłady temperatur (rys. 4) oraz rozkłady naprężeń wzdłużnych (rys. 5),

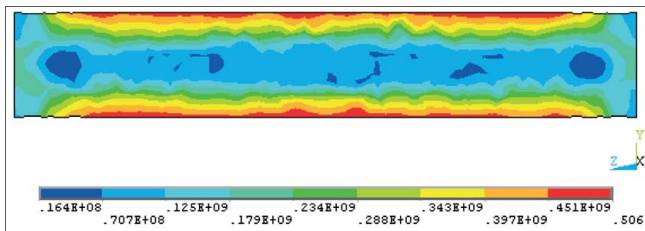


Rys. 4. Rozkład temperatury w płaszczyźnie przechodzącej przez os próbki (analiza termiczna)

zredukowanych (rys. 6) i odkształceń (rys. 7) w wybranych krokach czasowych. Temperatura na rysunkach podana jest w kelwinach. Wyrównanie temperatury w całej objętości próbki trwało 15 s. Na kolejnych mapach rozkładu temperatury widać jej spadek w czasie, choć ze względu na sposób podziału na elementy skończone nie uzyskano całkowicie symetrycznego rozkładu temperatury.

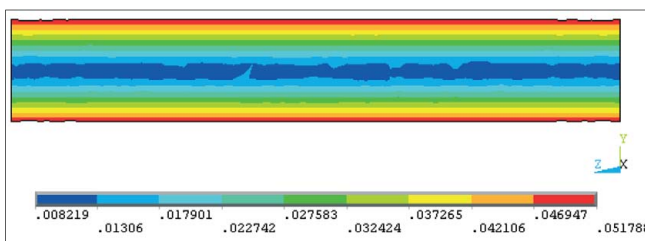


Rys. 5. Rozkład naprężeń wzdłużnych (w kierunku osi Z) po 15 s czasu chłodzenia



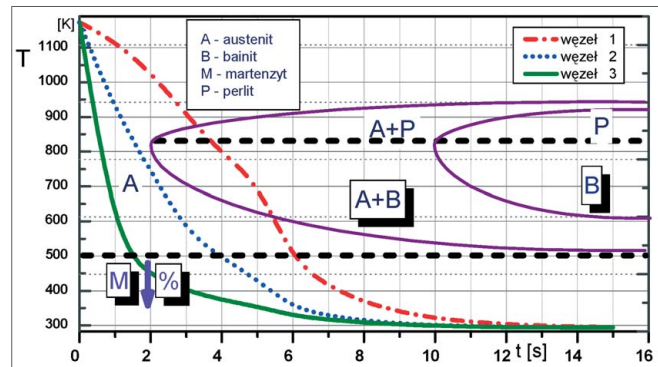
Rys. 6. Rozkład naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa-Hencky'ego po 15 s czasu chłodzenia

Głównym celem przedstawionej analizy było wyznaczenie naprężeń i odkształceń, których wielkość może być większa od wartości dopuszczalnych i eliminować próbkę z eksploatacji po procesie hartowania. Na rys. 5, 6 i 7 pokazano rozkład naprężeń i odkształceń w temperaturze końcowej (otoczenia). Największe naprężenia



Rys. 7. Rozkład odkształceń wypadkowych (analiza strukturalna) po 15 s czasu chłodzenia

wzdłużne, jakie uzyskano w warstwie wierzchniej, wyniosły ok. 290 MPa, natomiast zredukowane – ok. 450 MPa. Na podstawie literatury [8], w przypadku stali nawęglanej i zahartowanej, naprężenia własne w warstwie wierzchniej mogą wynosić nawet 800 MPa. Należy jednak podkreślić, że prezentowane wyniki są przykładowe, a autorzy w dalszym ciągu rozbudowują i ulepszają możliwości modelowania procesu hartowania. Ta praca, dotycząca jedynie modelu numerycznego procesu hartowania, jest częścią większego projektu realizowanego w Instytucie Materiałoznawstwa Politechniki Łódzkiej, w ramach którego przeprowadzone będą badania eksperymentalne. W wyniku tych badań zamierza się pomierzyć zmiany temperatur w czasie oraz zmiany wymiarów próbek w procesie hartowania. Otrzymane wyniki badań eksperymentalnych pozwolą sprawdzić przygotowany model numeryczny oraz wprowadzić niezbędne zmiany, poprawiając jego dokładność.



Rys. 8. Krzywe chłodzenia temperatura – czas dla wybranych 3 węzłów

Dla wybranych węzłów wykreślono krzywe chłodzenia (rys. 8) oraz wykres CTP, aby zlokalizować miejsca zahartowania. Z wykresu wynika, że przemiana martenzytyczna miała miejsce w węźle nr 2 i 3. W taki sam sposób można określić krzywą zmiany temperatury w każdym elemencie skończonym, co pozwoli stwierdzić, w jakich miejscach próbki dokonała się przemiana martenzytyczna.

Wnioski

Zaprezentowana symulacja przedstawia możliwość modelowania numerycznego procesu hartowania przy założeniu istnienia bazy materiałowej, która uwzględnia przemiany fazowe oraz zależność własności materiałowych poszczególnych faz od temperatury, szybkości chłodzenia i stężenia węgla. Przedmiotem pracy było zamodelowanie procesu chłodzenia próbki walcowej z temperatury ok. 860°C do temperatury bliskiej temperaturze otoczenia w celu wyznaczenia maksymalnych naprężeń i odkształceń hartowniczych. Ze względu na wielu przemian, zjawisko hartowania nie jest jeszcze dopracowane w MES i będzie przedmiotem dalszych prac autorów publikacji. Przedstawione wyniki są pierwszym etapem pracy nad złożoną analizą procesu hartowania z uwzględnieniem rzeczywistych warunków panujących w piecu hartowniczym zamodelowanych we współpracujących programach CFX/ANSYS.

LITERATURA

1. P. KULA, R. PIETRASIK, K. DYBOWSKI, M. KORECKI, J. OLEJNIK: Prenit LPC – the modern technology for automotive. *New Challenges In Heat Treatment and Surface Engineering*. Dubrownik-Cavtat, Croatia 2009, s. 165÷170.
2. F.T. HOFFMANN, T. LÜBBEN, P. MAYR: Innovations in Quenching Systems and Equipment: Current Status and Future Developments. *Heat Treatment of Metals*, 3, 1999, s. 63÷67.
3. Z. GAWROŃSKI, B. KRUSZYŃSKI: Complex influence of thermochemical treatment and superabrasive grinding in gears; manufacturing. *Inżynieria Materiałowa*, 3(140), 2004, 583÷585.
4. J. MACKERLE: Finite element analysis and simulation of quenching and other heat treatment processes. *Comp. Mat. Sci.* (2003), *Elsevier* 27 (2003), s. 313÷332.
5. J. ZIELNICA: Wpływ parametrów hartowania na naprężenia w procesach hartowania elementów maszyn. *Modelowanie Inżynierskie* 34 (2007), s. 167÷172.
6. P. PACHECO, L. SOUZA: Modeling of quenching process in steel cylinders. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2007, s. 445÷468.
7. Z. GAWROŃSKI, T. KUBIAK: Numerical modeling of internal stress in the surface layer of steel subjected to surface induction hardening. *Int. J. Mechanics and Mechanical Engineering* Vol. 5, No 2, 2001.
8. Z. GAWROŃSKI: Technologiczna warstwa wierzchnia w kołach zębatych i mechanizmach krzywkowych. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej Łódź 2006. ■