

A. BOKOTA\*, A. KULAWIK\*

## MODEL AND NUMERICAL ANALYSIS OF HARDENING PROCESS PHENOMENA FOR MEDIUM-CARBON STEEL

### MODEL I ANALIZA NUMERYCZNA ZJAWISK PROCESU HARTOWANIA STALI ŚREDNIOWĘGLOWEJ

This paper refers to numerical modeling of thermal phenomena, phase transformations in solid state and mechanical phenomena occurring during hardening process of steel element (C45). In the algorithm heat transfer equation, equilibrium equations and macroscopic model of phase transformations basis of CCT diagrams are used. Coupling between basic phenomena of hardening process is considered, in particular the influence of latent heat on the temperature, and also thermal, structural and plastic strains – the transformation induced plasticity in the model of mechanical phenomena is taken into account as well.

Heat conductivity equation is used to estimate the temperature field in the process of heating and cooling. This equation is solved by finite element method in Galerkin formulation. Field of stresses and strains are obtained from solutions of finite element method equations of equilibrium in increment form. The influence of the temperature on material properties is also taken into account. To calculate of plastic strains the Huber-Mises condition with isotropic enhancement is used.

The method of calculating the phase transformation during heating applied by the authors uses data from the continuous heating diagram (CHT). Because start and finish of phase transformations strongly depends on the rate of heating or holding in specified temperature the dynamics curves  $A_{c1}$  and  $A_{c3}$  are used. The homogenization line of austenite determines the end of heating. The volume fraction of austenite during high rate of heating is determined by modified Koistinen-Marburger equation. The volume fractions of phase that emerge during cooling is determined by Avrami equation. The influence of austenitisation temperature on the kinetics of transformations is taken into account. To calculate the increase of martensite content Koistinen-Marburger formula is used.

The numerical model was implemented in the Borland C++Builder 5.0 Environment. Using presented model, simulation of hardening for the cubic steel element is made. The element was heated by superficial source, and then cooled in water. The obtained results confirmed correctness of developed model and numerical algorithms.

Praca dotyczy modelowania numerycznego zjawisk cieplnych, przemian fazowych w stanie stałym oraz zjawisk mechanicznych towarzyszących procesom hartowania elementów ze stali średniowęglowej (C45). W algorytmie wykorzystano równanie przewodzenia ciepła, równania równowagi oraz makroskopowy model przemian fazowych oparty na wykresach CTPc. Zostały uwzględnione sprzężenia pomiędzy podstawowymi zjawiskami procesu hartowania, a w szczególności: wpływ ciepła przemiany fazowej na temperaturę, a w modelu zjawisk mechanicznych uwzględniono oprócz odkształceń termicznych, strukturalnych i plastycznych – również odkształcenia transformacyjne. Do wyznaczania pól temperatury w procesie nagrzewania i chłodzenia wykorzystano równanie różniczkowe przewodzenia ciepła. Równanie to rozwiązano metodą elementów skończonych w sformułowaniu Galerkin. Pola naprężeń i odkształceń uzyskano z rozwiązania metodą elementów skończonych równań równowagi w formie przyrostowej. Stałe termofizyczne uzależniono od temperatury. Odkształcenia plastyczne wyznacza się stosując warunek Huber-Misesa ze wzmocnieniem izotropowym. W modelu przemian fazowych nagrzewania wykorzystuje się dane z wykresu CTPa. Ponieważ początek i koniec przemiany silnie zależy od prędkości nagrzewania bądź wytrzymania w określonej temperaturze, zastosowano dynamiczne krzywe  $A_{c1}$  i  $A_{c3}$ . Linia homogenizacji austenitu determinuje koniec nagrzewania. Do szacowania przyrostu fazy austenitycznej przy dużych szybkościach nagrzewania wykorzystano zmodyfikowany wzór Koistinen-Marburgera. Objętościowe udziały faz, mających miejsce podczas chłodzenia, szacuje się wzorem Avramiego. Przyrost udziału martenzytu wyznacza się natomiast zależnością Koistinen-Marburgera. Aplikacja będąca implementacją modelu numerycznego została wykonana w środowisku Borland C++Builder 5.0. Wykorzystując opracowany model wykonano symulację hartowania kostki stalowej. Element ten nagrzewano powierzchniowo, a następnie chłodzono wodą. Uzyskane wyniki potwierdzają poprawność zbudowanego modelu i algorytmów numerycznych.

\* INSTITUTE OF MECHANICS AND MACHINE DESIGN, CZĘSTOCHOWA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 42-200 CZĘSTOCHOWA, 73 ST. DĄBROWSKIEGO STR., POLAND