



Politechnika
Śląska



RESEARCH
UNIVERSITY
EXCELLENCE INITIATIVE



FACULTY OF ELECTRICAL
ENGINEERING
UNIVERSITY OF WEST BOHEMIA

Silesian University of Technology

Faculty of Materials Engineering

Doctoral Thesis

Analysis of Thermal Stresses in Steel Workpiece Heated by Induction

Author: Debela Geneti Desisa

Promoters: Assoc. Prof. Albert Smalcerz, Ph.D., DSc.

Department of Industrial Informatics, Silesian University of Technology, Poland

Assoc. Prof. Václav Kotlan, Ph.D.

Department of Electrical and Computer Engineering, University of West Bohemia,
Czech Republic

A Thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Joint PhD) in the Faculty of Materials Engineering, Department of Industrial Informatics, and the Faculty of Electrical Engineering, Department of Electrical and Computer Engineering.

Academic Year: 2023 – 2024

Streszczenie

Ograniczenia zewnętrzne lub wewnętrzne materiału uniemożliwiają mu swobodne rozszerzanie się lub kurczenie się wraz ze zmianą temperatury stąd, pod wpływem zmian temperatury powstają w tym elemencie naprężenia termiczne. Ich zadaniem jest zapewnienie niezawodności konstrukcji i zmniejszenie niedokładności w materiałach poddawanych obróbce cieplnej. Analiza naprężeń termicznych obejmuje badanie układu termomechanicznego, w którym następuje wytwarzanie i wymiana ciepła (np. przez nagrzewanie indukcyjne). W związku z tym odpowiednim podejściem rozwiązywania tego typu zagadnień jest analiza wielokryterialna z wykorzystaniem metod numerycznych. Analiza składa się z dwóch etapów: kontroli parametrów nagrzewania oraz następującego po nim chłodzenia (hartowania). Każdy etap analizy jest oddzielnym projektem i posiada własne mechanizmy kontrolne, ale każdy z nich wpływa na oczekiwane właściwości mechaniczne materiału.

Opracowanie precyzyjnego modelu numerycznego opisującego zdarzenia zachodzące na powierzchni przedmiotu obrabianego podczas nagrzewania indukcyjnego (IH), a także zmiany temperatury wewnątrz przedmiotu obrabianego, stanowi bardzo trudne wyzwanie. Aby sprostać temu wyzwaniu, w modelu zastosowano trzy różne algorytmy wykorzystywane do analizy rozkładu temperatury od powierzchni do rdzenia wsadu: jawne i niejawne algorytmy sterowania procesami oraz dyskretne sterowanie częstotliwością prądu cewki wzbudnika. Osiąga się to poprzez automatyczną kontrolę mechanizmów sprzężenia zwrotnego, które dostosowują parametry wejściowe. Kontrolowanie rozkładu temperatury poprzez regulację parametrów wejściowych jest uważane za sposób zarządzania całym systemem nagrzewania indukcyjnego.

Model hartowania indukcyjnego kół zębatach kalibrowany jest w celu zapewnienia wysokiej precyzji, w oparciu o rzetelny model matematyczny i prawidłowy dobór parametrów wejściowych. Celem doboru kluczowych parametrów jest osiągnięcie optymalnego rozwiązania, z punktu widzenia przepływu ciepła i efektywności energetycznej. Jednak niektóre z tych parametrów są często znane tylko z pewną niepewnością (np. właściwości fizyczne materiału i ich zależności temperaturowe, parametry chłodzenia nagranych zębów itp.). Dlatego model musi zostać odpowiednio skalibrowany, aby osiągnąć akceptowalną zgodność pomiędzy wynikami obliczonymi, a danymi eksperymentalnymi. Szczegółowa metodologia kalibracji została opisana i zilustrowana typowym przykładem.

Zbadano termiczne naprężenia szczytkowe wynikające ze zmian objętości spowodowanych zmianami temperatury i przemianami fazowymi oraz ich wpływ na inne właściwości mechaniczne. Przeanalizowano ogólny model indukcyjnego hartowania powierzchniowego na podstawie sprzężonych zjawisk elektromagnetycznych, termicznych, mechanicznych i metalurgicznych. Określono rozkład odkształceń i naprężeń mechanicznych w warstwach powierzchniowych materiałów stalowych poddanych hartowaniu indukcyjnemu. Na rozkład ten wpływają nie tylko procesy termosprężyste, ale także odkształcenia plastyczne odsłoniętych warstw i przemiany fizyczne stali. Przedstawiony przykład pokazuje metodologię rozwiązywania układu osiowo-symetrycznego.

Trudnym wyzwaniem jest wyodrębnienie odkształcenia plastycznego wywołanego transformacją (TRIP) z całkowitego odkształcenia za pomocą eksperymentu. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu metody elementów skończonych (FEM), umożliwiającą rozwiązywanie układów, w których występują sprzężone ze sobą zjawiska fizyczne. Jako przykład takiego układu został opracowany model cylindrycznego przedmiotu obrabianego o długości 100 mm i promieniu 20 mm. Model ten dobrze ilustruje, w jaki sposób odkształcenia związane z przemianą fazową powodują naprężenia i odkształcenia, czyli łączy przemiany fazowe zależne od temperatury z analizą elastoplastyczną.

Głównym celem tej pracy jest zminimalizowanie niepewności przy opracowywaniu modeli, optymalizacja procesów i zapewnienie efektywności energetycznej. Minimalizacja niepewności jest szczególnie istotne dla nowych modeli, zwłaszcza w przypadku procesów obejmujących wiele zjawisk fizycznych, a takim jest hartowanie indukcyjne. W niniejszej pracy model numeryczny został opracowany przy użyciu oprogramowania COMSOL Multiphysics, a analiza danych została przeprowadzona przy użyciu oprogramowania MATLAB połączonego przez LiveLink. Algorytmy kontroli temperatury zostały opracowane w celu jawnego lub niejawnego definiowania zdarzeń w procesie nagrzewania i kontrolowania ich za pomocą pętli sprzężenia zwrotnego. Do wyznaczenia innych parametrów zastosowano metodę polegającą na zdefiniowaniu funkcji celu. Metoda ta jest kluczowa dla zidentyfikowania parametrów mających największy wpływ na proces i wybrania optymalnych wartości.

Zaprezentowano elastoplastyczne modele powstawania martenzytu. W prezentowanym w pracy podejściu, zaimplantowano MES do analizy: szczytkowych naprężeń termicznych, powstawania odkształceń i odkształceń plastycznych.