

Grafitnoduler og lokale restspændinger i SG-jern: Thermo-mekanisk modellering og eksperimentel validering

Ovenstående er titlen på en netop afsluttet PhD-afhandling af Tito Andriollo ved DTU Mekanik. Projektet har været fra september 2013 til oktober 2016, og blev succesfuldt forsvaret 19. januar 2017. Herunder findes en sammenfatning af projektets formål samt vigtigste resultater.

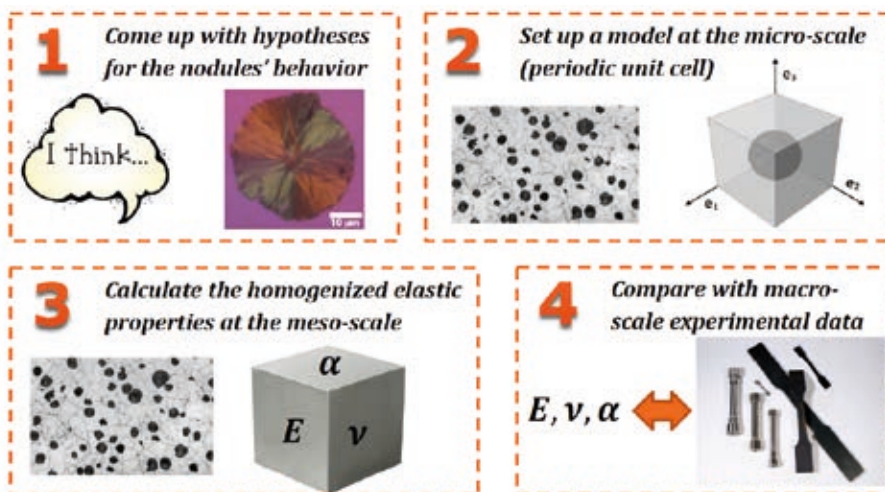
SG-jern, eller sejjern, er i dag meget udbredt i væsentlige industrielle sektorer som offshore, transport og energiproduktion, og som tegner sig for op til 25 % af den samlede støbeproduktion på globalt plan. Det er velkendt, at emner af SG-jern, afhængigt af størrelse, kan indeholde restspændinger der udvikles over afstande på få millimeter eller mere og som opstår på grund af begrænsninger, som forhindrer den frie termiske sammentrækning af materialet under afkøling. Heldigvis har målrettede studier, som er gennemført inden for de sidste årtier, sørget for en detaljeret forståelse af fænomenet og i dag findes der pålidelige værktøjer, som kan forudsige og håndtere problemer i næsten ethvert praktisk tilfælde.

På den anden side så tyder den indre kompositnatur af SG-jern på en mulig dannelse af en anden type af restspænding ved meget kortere længdeskalaer, og som er forbundet med misforholdet mellem den termiske sammentrækning af to primære metallurgiske faser, der danner mikrostrukturen af materialet: grafit kugler (noduler) og den metalliske matrice. Overraskende nok så har emnet ikke fået meget opmærksomhed tidligere, muligvis på grund af den

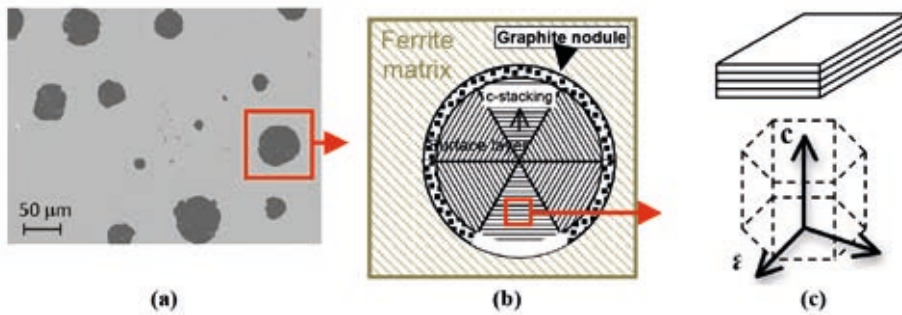
gængse forestilling om, at grafit partikler er meget bløde og ikke er i stand til at modstå nogen form for belastning. Faktisk findes der eksperimentelt bevis for deres mekaniske betydning, specielt ved relativt høje temperaturer og ved tryk-belastninger, som indikerer at grafitnodulerne i SG-jern muligvis ikke kun kan betragtes som "ikke-eksisterende materiale" i alle situationer.

Med det som udgangspunkt, fokuserer det aktuelle arbejde på at finde en tilfredsstillende beskrivelse af nodulernes termo-elastiske adfærd, som vises at være fraværende fra det publicerede

litteratur, ved hjælp af mikromekanisk homogeniserings analyse baseret på en repræsentativ enhedscelle (figur 1). Dette, kombineret med anvendelse af elastisk nedre-og øvre-værditeori for polykrystalline materialer, fører til den konklusion, at nodulerne ikke kan opfattes som homogene og isotropiske i den mikrostrukturelle skala. Derfor foreslås en ny strategi til at simulere nodulernes elastiske opførsel, og som består af modellering af dets karakteristiske interne struktur, som består af grafitplader (planer) arrangeret i koniske sektorer på en tydelig måde. Den resulterende



Figur 1 – Mikromekanisk metode anvendt på SG-jern.



Figur 2 – Anisotropiske model for grafitnoder.

anistropiske model (figur 2) viser sig at give homogeniserede værdier for det duktile støbejerns termoelastiske egenskaber på den makroskopiske skala, og som er i fremragende overensstemmelse med eksperimenter. Ydermere, indikerer det også at den gennemsnitlige termiske kontraktion af noderne sandsynligvis er 3 til 4 gange mindre i forhold til den omkringliggende matrice, og dermed bekræfter den forekommende drivkraft for formation af spændinger på den lokale skala.

For at undersøge det sidste aspekt, er de afsluttende stadier i fremstillingsprocessen simuleret numerisk ved at tage højde for de forskellige termiske udvidelser af noderne og af matricen, både under den eutektoide transformation og den efterfølgende afkøling til stuetemperatur. Resultaterne

viser dannelsen af betydelige restspændinger i jernmatricen tæt på noderne, som primært er deviatoriske (dvs. de afviger fra middelværdien af spændingerne) og stærkt påvirket af antallet af koniske sektorer, som danner grafitnoderne.

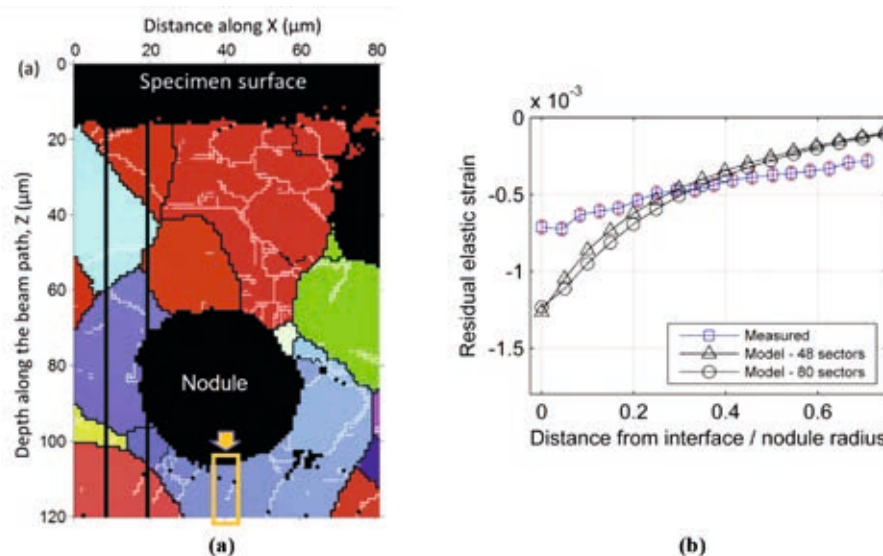
For at understøtte de numeriske resultater, hvor det giver mening at udføre passende eksperimentel vurdering, er der gjort brug af to metoder. Oliver-Pharr nano-indhak metoden er først taget i betragtning, med det formål om at opnå noget direkte viden om den grundlæggende opførsel af de individuelle grafitnoder. Desværre viser det sig, at metoden involverer et antal antagelser, som udgør en kraftig begrænsning til dets brug til skøre, inhomogene og anisotrope strukturer som grafitnoderne netop er.

Den anden metode er en ny 3D X-ray diffraktionsmetode baseret på synkrotron stråling. Denne gang er eksperimenterne vellykkede og fører til bestemmelse af restspændings tilstanden omkring en enkel nodul, som ligger under materiale overfladen (figur 3). Resultaterne er de første af den slags nogensinde og bekræfter de teoretiske forudsigelser, at lokale spændinger op til omkring det halve af den makroskopiske flydestyrke, forbliver i det duktile støbejerns mikrostruktur efter fremstillingen.

Den nye type restspænding forventes at spille en afgørende rolle ved bestemmelse af SG-jerns egenskaber. Viden om de faktorer der styrer egenskaberne vil give mulighed for yderligere optimering af materialets ydeevne ved belastninger under brug.

Publikationer i afhandlingen:

- T. Andriollo and J. Hattel, “On the isotropic elastic constants of graphite nodules in ductile cast iron: analytical and numerical micromechanical investigations”, *Mechanics of Materials*, vol. 96, pp. 138–150, 2016.
- T. Andriollo, J. Thorborg, and J. Hattel, “Modeling the elastic behavior of ductile cast iron including anisotropy in the graphite nodules”, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 100-101, pp. 523–535, 2016.
- T. Andriollo, J. Thorborg, N. Tiedje, and J. Hattel, “A micro-mechanical analysis of thermo-elastic properties and local residual stresses in ductile iron based on a new anisotropic model for the graphite nodules”, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, vol. 24, no. 5, p. 055012(19pp), 2016.
- Y. Zhang, T. Andriollo, S. Fæster, W. Liu, J. Hattel, and R. Barabash, “Three-dimensional local residual stress and orientation gradients near graphite nodules in ductile cast iron”, *Acta Materialia*, vol. 121, pp. 173–180, 2016.



Figur 3 – (a) Krystallografiske orienteringer i nærheden en grafitnodul bestemt via 3D X-ray diffraktion. (b) Resterende elastisk tøjning i ferrit, vinkelret på nodul-matrice-grænsefladen, i forhold til regionen angivet af den gule boks nederst den krystallografiske kortet i (a).