DFG-Projekt Schm-746/36-1 und 36-2 / BA-NR. 1192/1194

Mikromechanisches Verständnis des Verformungsverhaltens von ferritischen Gusseisen mit unterschiedlicher Graphitmorphologie

Projektbeginn:	01.01.2001
Projektende:	30.11.2004

Ziele

Das elastisch-plastische Verformungsverhalten von Gusseisenwerkstoffen hängt infolge der Kerbwirkung der Graphiteinschlüsse stark mit der Form, der Menge sowie mit der Anordnung des vorhandenen Graphits zusammen. Ziel dieses Projektes war, mit mikromechanischen Simulationsrechnungen das Verformungsverhalten von Gusseisen mit stark unterschiedlichen Graphitmorphologien zu untersuchen und die Korrelation zwischen der Graphitmorphologie und den elastisch-plastischen Eigenschaften von Gusseisen mit ferritischer Matrix zu ermitteln.

Untersuchungen mit mikromechanischen Simulationen

<u>Zellmodelle</u>

Konventionelles Zellmodell

Die Graphitpartikel wurden als Rotationsellipsoide in einer würfelförmigen α -Eisenmatrix eingebettet angenommen. Das hier verwendete Zellmodell ist allerdings in dieser Form nur begrenzt anwendbar, da das Graphitellipsoid bei großem Achsenverhältnis und gleichzeitig großem Volumenanteil den Rahmen des umgebenden α -Eisen-Würfels sprengen kann. Die verwendete Zelle stellt im allgemeinen keine Einheitszelle dar. Dementsprechend wurden die Würfelseitenflächen nicht, wie bei Einheitszellen üblich, durch Randbedingungen eben gehalten. Die Stirnflächen (Lastangriffsflächen) des Würfels wurden eben gehalten.

Selbstkonsistentes Zellmodell

Das beschriebene konventionelle Zellmodell wurde erweitert, um auch große Volumenanteile an extrem diskusförmigem oder nadelförmigem Graphit beschreiben zu können. Hierzu wurde das als rotationsellipsoidförmig angenommene Graphitteilchen von einem größeren Rotationsellipsoid aus α -Eisen-Matrix umgeben, welches wiederum in einer würfelförmigen Zelle in Verbundmaterial (Gusseisen) eingebettet war, <u>Bild 1a und 1b</u>. Die Rechnung wurde jetzt mit eben gehaltenen Würfelseitenflächen unter Verwendung vom iterativen, selbstkonsistenten Verfahren durchgeführt. Im ersten Schritt wurde der Elastizitäts-Modul und die Querkontraktionszahl des Verbunds den Werten der Matrix (α -Eisen) gleichgesetzt und hieraus neue Werte durch Mittelwertbildung von Spannung und Dehnung über die Integrationspunkte des äußeren Ellipsoids ermittelt. Diese revidierten Werte wurden im nächsten Schritt für den Verbund eingesetzt.

Zunächst wurde der axialsymmetrische Fall behandelt, so dass die Rotationsachse der konzentrischen Rotationsellipsoide in Zugrichtung zeigt. Der Spezialfall kugelförmigen

Graphits ist trivialerweise ebenfalls rotationssymmetrisch. Zusätzlich wurde zum Vergleich der ellipsoidförmige Graphit von kugelförmiger Matrix umschlossen.



Bild 1a: Selbstkonsistentes 3D-Zellmodell mit zwei konzentrischen Rotationsellipsoiden als Graphitteilchen in Eisenmatrix, eingebettet in einer würfelförmigen Zelle in Gusseisenverbundmaterial.



Bild 1b: Selbstkonsistentes 3D-Zellmodell, c und a sind die Halbachsenlängen des inneren Graphit-Ellipsoides, c/a ist das Längenverhältnis.

Für den allgemeinen dreidimensionalen Fall wurde ein Programm zur Steuerung einer parametrisierten FE-Netzerstellung (verschiedene Graphitvolumenanteile, Ellipsoidach-severhältnisse und Ellipsoidorientierungen) erstellt.

Matrizitätsmodell

Es wurden linear-elastische Testrechnungen mit Hilfe eines neuentwickelten Matrizitätsmodells durchgeführt. Neben dem Volumenanteil ermöglicht das Matrizitätsmodell, den Einfluss der Phasenanordnung im Verbund auf das mechanische Werkstoffverhalten anhand des Mikrostrukturparameters "Matrizität" zu berücksichtigen. Messwerte der Matrizität wurden anhand von jeweils einem Einzelbild vom Gefügeausschnitt ermittelt. Ein Vergleich zeigt, dass die von Gefügeausschnitten ermittelten Einzelwerte der Graphitvolumenanteile relativ zu den Durchschnittswerten zu hoch liegen. Dementsprechend können auch die ermittelten Matrizitäten nicht als repräsentativ für die Proben angesehen werden. Daraus lässt sich schließen, dass das Matrizitätsmodell den Effekt der Graphitmorphologie eher unterschätzt. Ein abschließendes Urteil kann jedoch erst bei genügender Messstatistik (Vorhandensein von Schliffen) erfolgen.

Simulationsrechnung mit Realgefügeausschnitten

Anstatt einzelne Graphitteilchen in einer Zelle zu modellieren, ist es realistischer, die Interaktionen mehrerer Teilchen in einem Realgefügeausschnitt zu betrachten, <u>Bild 2</u>. Die repräsentativen Gefügeausschnitte von GGG-B, GGV und GGG40-1AZ, GGG40-3AZ mit Graphitanteilen von 14,5 und 15,5 sowie 13,7 und 13,3 Vol.%, die im Vergleich höher als der Durchschnittswert von 11,5 (GGG-B) und 11,3 (GGV) sowie 11,4 (GGG40-1AZ) und 12 Vol% (GGG40-1AZ) sind, wurden mit einer an der MPA entwickelten FE-Netzgenerator-Routine zusammen mit dem Preprocessing-Programm PATRAN mit sechsknotigen Dreieckselementen mit quadratischem Verschiebungsansatz vernetzt.







Gefüge von GGG-40/3AZ [3] Volumenanteil vom Graphit 13,3% Matrizität vom Graphit 0,10



Gefüge von GGV [2]	
Volumenanteil vom Graphit	15,5%
Matrizität vom Graphit	0,25

Gefüge von GGG-B [2] Volumenanteil vom Graphit Matrizität vom Graphit 0,09

14,5%

Bild 2: Realgefügeausschnitte von Gusseisenwerkstoffen mit verschiedenen Graphitausbildungen und den für die Ausschnitte bestimmten Gefügeparametern.

Das FE-Modell der Realstruktur wurde durch Aufbringung einer Verschiebung auf der Oberseite in y-Richtung mechanisch beansprucht, Bild 3a. Das Modell des Realgefügeausschnitts ist zur x- und y-Achse symmetrisch und wird so verformt, dass die obere und die rechte Seite gerade bleiben. Diese Vorgehensweise bewirkt, dass die Ränder sich nicht frei verformen können und wird üblicherweise gewählt, um die Einbettung des Gefügeausschnittes in das Probenvolumen realitätsnäher abzubilden. Das Modell ist zweidimensional erstellt (Bild 3b) und im ebenen Dehnungszustand (EDZ) berechnet, um das Werkstoffinnere bzw. das globale Materialverhalten anzunähern. Die Berechnungen werden mit dem FE-Programmsystem ABAQUS durchgeführt.



<u>Bild 3</u>: Struktur (a) und FE-Modell (b) des Realgefügeausschnittes eines Gusseisenwerkstoffs (GGG-B) mit Belastung und Randbedingungen.

Ergebnisse

Der wirksame mittlere Graphit-Elastizitätsmodul ist bei den einzelnen Gusseisensorten unterschiedlich groß. Wegen der unterschiedlichen Anordnung innerhalb kugeliger, nadelförmiger und lamellarer Graphitteilchen ist es zu erwarten, dass der effektive Graphitelastizitätsmodul bei kugeligen Graphitteilchen größer ist als bei den anderen Graphitformen. Das bedeutet aber, dass der resultierende Elastizitätsmodul des Gusseisens bei lamellarer und nadelförmiger Graphitausbildung allein schon aufgrund des niedrigeren Graphitelastizitätsmoduls geringer sein muss als bei kugeligen Graphitteilchen. Dieser Effekt addiert sich zu dem gleichsinnig wirkenden geometrischen Effekt der Graphitausbildungsform, der mit finiten Elementen zu modellieren ist.

Für eine Lösung der gestellten Aufgabe erscheint es sinnvoll, den effektiven Elastizitätsmodul der als Rotationsellipsoide angenäherten quasiisotropen Graphitteilchen als Funktion des Achsenverhältnisses des Ellipsoids anzusehen. Hierzu wurde eine Rechnung mit dem konventionellen Zellmodell für einen Graphitvolumenanteil von 0,1 durchgeführt mit zwei verschiedenen für Graphit angenommenen elastischen Konstanten, nämlich $E_G = 25000$ MPa, $v_G = 0,29$ (Kugeln) bzw. $E_G = 4170$ MPa, $v_G = 0,29$ (Scheiben). Dies ergab die elastischen Eigenschaften des Gusseisens zu E = 177615 MPa (c/a = 1), E = 169741 MPa (c/a = 0,2) bzw. 171502 MPa (c/a = 1), E = 154424 MPa (c/a = 0,2). Bei entsprechender Zuordnung dieser Werte, nämlich hoher Wert von E_G für kugelförmige und niedriger Wert für E_G für scheibenförmige Graphitausbildung, ergibt sich also beim Übergang von Kugel zu Scheibe ein Abfall des E-Moduls des Gusseisens von 177615 MPa auf 154424 MPa. Dies entspricht am ehesten den experimentellen Befunden, so dass also beide Effekte - rein geometrischer Effekt der Graphitteilchenausbildung und die hieraus resultierende Beeinflussung der effektiven elastischen Konstanten der Graphitteilchen - zu berücksichtigen sind. Wiederholt man die Berechnung mit dem konventionellen Zellmodell unter der Annahme eben gehaltener Modell-Seitenflächen, so erhält man einen etwas verringerten Abfall des E-Moduls von 178835 MPa auf 159894 MPa. Dieses Ergebnis liegt ebenfalls noch im Streubereich der experimentellen Befunde. Die Absenkung des E-Moduls durch die Abweichung der Graphitform von der Kugelgestalt ist beim selbstkonsistenten Modell eher noch größer als beim konventionellen Zellmodell, wodurch experimentelle Befunde besser beschrieben werden können.

Das makromechanische elastisch-plastische Verformungsverhalten der Gusseisenwerkstoffe wurde mit Hilfe von Realgefügerechnungen und mit dem Matrizitätsmodell ermittelt. Dabei wurden die Matrizität und die Eigenspannungen berücksichtigt. Es zeigte sich für die vorliegenden Gusseisenwerkstoffe mit unterschiedlichen Graphitausbildungen, dass die Matrizität, d.h. die Anordnung und die Form der Phasen bei den betrachteten Gusseisenwerkstoffen ebenso wie die Eigenspannungen einen verschwindend kleinen Einfluss auf die makroskopischen Fließkurven haben. Die Ergebnisse belegen den Einfluss des Gefüges auf die qualitativ unterschiedlichen Spannung-Dehnungs-Verläufe. Die gewonnenen Ergebnisse weisen darauf hin, dass zukünftige mikromechanische Berechnungen dreidimensional angelegt sein und zusätzlich die im Verlauf der Verformung z.B. bei GGG40 und teilweise bei GGV auftretende Schädigung erfassen sollten. Die offenbar weniger schädigungsanfälligen Gefüge von GGG-B lassen sich hingegen gut durch Realgefügemodelle abbilden.

Abschlußbericht

Danksagung

Die Untersuchungen wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter Schm-746/36-1 und 36-2 gefördert. Für die finanzielle Unterstützung sei gedankt.

Publikation aus diesem Projekt

W. Gaudig, R. Mellert, U. Weber, S. Schmauder, "Self-consistent one-particle 3D unit cell model for simulation of the effect of graphite aspect ratio on Young's modulus of cast-iron", Computational Materials Science 28, pp. 654-662 (2003).

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Tan Nguyen Huy

Tel.: +49 / 711 685-5879

Fax: +49 / 711 685-3053

E-mail: huy-tan.nguyen@mpa.uni-stuttgart.de