

University of Groningen

Plasticity in Aluminum Alloys at Various Length Scales

Wouters, Onne

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

2006

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Wouters, O. (2006). *Plasticity in Aluminum Alloys at Various Length Scales*. s.n.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Samenvatting

Plastische deformatie van metalen wordt bepaald door de mobiliteit van lijnfouten, die dislocaties worden genoemd. In een zuiver metaal ondervinden de dislocaties weinig hinder, met als gevolg een lage vloeispanning en een lage hardheid. Door aan het metaal onzuiverheden toe te voegen kunnen de mechanische eigenschappen drastisch veranderd worden. Opgeloste onzuiverheden, precipitaten en korrelgrenzen vormen obstakels voor de dislocatiebeweging, die de kritische afschuifspanning en daarmee de hardheid van de legering verhogen. Door op de juiste manier te legeren en door met warmtebehandeling de microstructuur te beïnvloeden, kunnen de mechanische eigenschappen van het metaal worden aangepast aan de uiteindelijke toepassing. Om dit proces te optimaliseren is een gedegen kennis van de mechanismen, die de plasticiteit regeren noodzakelijk. Microscopische technieken kunnen hierin een grote bijdrage leveren. In dit proefschrift wordt de plasticiteit van diverse aluminiumlegeringen op verschillende lengteschalen bestudeerd. Op atomair niveau is het aluminium-scandium systeem onderzocht. Deze binaire precipitatie-geharde legering is een ideaal modelsysteem om dislocatie-precipitaat interactie te bestuderen. Op een grotere lengteschaal zijn de statistische eigenschappen van de ruwheid, die op het oppervlak van een plastisch gedeformeerd materiaal ontstaat, onderzocht. Tenslotte is op een macroscopische schaal gekeken naar de ultieme consequentie van plasticiteit: breuk.

Microstructuur en eigenschappen van Al-Sc legeringen

Recentelijk is er een sterk groeiende interesse ontstaan vanuit de industrie voor kleine toevoegingen van scandium aan conventionele aluminiumlegeringen. Geen enkel element heeft een vergelijkbaar versterkend effect als scandium, wanneer het in gelijke mate aan aluminium wordt toegevoegd. Naast dit versterkende effect op kamertemperatuur hebben de legeringen ook uitstekende eigenschappen bij hogere temperaturen, waarop andere aluminiumlegeringen vaak snel verouderen. Bovendien zorgen de toevoegingen van scandium ervoor dat het rekristallatiegedrag drastisch verandert. In deze dissertatie worden de uitstekende eigenschappen van aluminium-

SAMENVATTING

scandium legeringen beschreven en aan de hand van een uitgebreide karakterisatie van de microstructuur verklaard.

Tijdens het verouderen van de legeringen worden zeer kleine Al_3Sc -precipitaten gevormd. Deze deeltjes met een diameter van slechts enkele nanometers hebben een geordende L1_2 -structuur en zijn coherent met de aluminium matrix. Door een beeldbewerkingoperatie kan de grootte van de precipitaten bepaald worden aan de hand van opnamen gemaakt met behulp van hoge-resolutie transmissie elektronenmicroscopie (TEM). Na 24 uur verouderen op $350\text{ }^\circ\text{C}$ groeien de precipitaten nog slechts zeer langzaam, wat de stabiele eigenschappen van de legeringen bij hoge temperaturen verklaart. De homogene dispersie van nano-deeltjes verhindert rekristallisatie tot zeer hoge temperaturen. Gedeformeerde en daardoor hardere microstructuren kunnen door de vorming van de precipitaten behouden blijven. Al na enkele minuten gloeien op $350\text{ }^\circ\text{C}$ wordt de piekhardheid bereikt die aanzienlijk hoger is dan de hardheid van de legering zonder precipitaten. Gezien de minimale hoeveelheid scandium is deze versterking opvallend.

Aan de hand van ex-situ en in-situ gedeformeerde monsters kunnen in de TEM de dislocatiestructuren geanalyseerd worden. Hieruit blijkt dat zelfs zeer kleine precipitaten een grote barrière vormen voor de dislocatiemobiliteit. Al bij precipitaten van enkele nanometers is de kritische afschuifspanning voor doorsnijding van de precipitaten zo hoog dat het voordeliger is de deeltjes te passeren met behulp van het zogenaamde Orowan mechanisme. In de TEM opnames van gedeformeerde structuren zijn bijgevolg vele Orowan dislocatielussen te zien. De toename in de kritische afschuifspanning als gevolg van de vorming van een antifasegrens is erg hoog en vormt de voornaamste verklaring voor de toename in hardheid.

Het toevoegen van kleine hoeveelheden scandium aan warmtebehandelbare aluminiumlegeringen is problematisch, omdat de temperaturen die voor het oplossingsgloeien en verouderen van deze materialen gangbaar zijn, niet overeenkomen met de temperaturen, waarop de scandiumatomen enerzijds oplossen en anderzijds precipiteren. Scandiumaddities aan niet-warmtebehandelbare legeringen zijn echter veelbelovend. Deze legeringen missen vaak een versterkende fase en berusten voor hun eigenschappen dikwijls op een gedeformeerde microstructuur, die het gebruik bij hogere temperaturen onmogelijk maakt. Door scandium toe te voegen en te laten precipiteren, wordt de legering een stuk harder en kan de microstructuur behouden blijven door het remmende effect dat de

SAMENVATTING

precipitaten hebben op herstel en rekristallisatie. Dit wordt in dit proefschrift geïllustreerd door de hardheid van een Al-Mg-Sc te meten. Door het gecombineerde effect van oplossings- en precipitatieversteving heeft deze legering een hardheid die, afhankelijk van de mate van verouderen, minstens 100 MPa hoger is dan de hardheid van de binaire Al-Sc legering.

Oppervlakteruwheid van gedeformeerde metalen

Het oppervlak van metalen verruwt wanneer deze worden gedeformeerd. Enerzijds komt dit door dislocaties die bij het verlaten van het rooster een stap op het oppervlak achterlaten. Anderzijds ontstaat er ruwheid door de polykristalliniteit van het metaal. De verschillen in oriëntatie zorgen ervoor dat er spanningen ontstaan tussen de korrels, die kunnen leiden tot oppervlakverruwing op een korrelschaal. In deze dissertatie wordt een statistische analysemethode geïntroduceerd die vele voordelen biedt in vergelijking met conventionele technieken. Een hoogte-hoogtecorrelatie functie wordt berekend uit de oppervlakteruwheid die voornamelijk verkregen is met behulp van confocale microscopie. De analyse produceert drie parameters, die het oppervlak gedetailleerd beschrijven. De ruwheidsexponent α is een maat voor de correlatie tussen naburige posities. Deze correlatie blijkt voor vele ruwe oppervlakken constant totdat deze boven een bepaalde separatie, de correlatielengte ζ , geheel verdwijnt. De rms-ruwheid w tenslotte, is de meest intuïtieve karakterisering van het oppervlak. Uit de metingen in dit proefschrift blijkt dat deze beschrijving waardevolle informatie oplevert over met name de lengteschalen, waarop de ruwheid zich manifesteert. Metingen aan aluminiumlegeringen laten een zeer hoge correlatie van $\alpha = 0.9$ zien tussen punten die binnen de correlatielengte ζ liggen, die gelijk is aan de grootte van de korrels in het metaal. De rms-ruwheid schaalte lineair met zowel de rek als de korrelgrootte. Ditzelfde gedrag wordt waargenomen op het bcc-metaal ijzer en zink, dat een hcp roosterstructuur bezit. Deze beide metalen laten wel duidelijk lagere waarden voor α zien, wat zou kunnen worden verklaard door de celvorming in aluminium. De rms-ruwheid voor zink is bij gelijke rek duidelijk hoger dan voor de andere twee metalen, die vrijwel even ruw worden. Dit wordt verklaard door het geringere aantal slipsystemen dat aangewend kan worden in het hexagonale rooster. Hierdoor ontstaan er grotere verschillen tussen naburige korrels en dit leidt tot meer ruwheid.

Oriëntatie microscopie is gebruikt om de relatie tussen de oriëntatie van de korrels en de ruwheid te onderzoeken. Aangetoond wordt dat er een correlatie bestaat, maar

SAMENVATTING

dat vele korrels moeten worden meegenomen om de uiteindelijke oppervlaktestructuur te kunnen verklaren.

Loodverbrossing in aluminiumlegering AA6262

Aan de 6262 aluminiumlegering zijn kleine hoeveelheden lood toegevoegd om het metaal gemakkelijker te kunnen bewerken. De Pb-additie geeft de legering goede eigenschappen tijdens bewerkingen bij hoge reksnelheid en kamertemperatuur, bijvoorbeeld bij het verspanen. Bij hogere temperaturen en lage reksnelheid kan het lood de mechanische eigenschappen van de legering echter dramatisch verslechteren. Het lood lost niet op in de aluminiummatrix en wordt vooral aangetroffen rond intermetallische deeltjes en op korrelgrenzen. Onder trekkrachten is er in gebieden met een spanningsconcentratie een drijvende kracht voor looddiffusie naar korrelgrenzen. Hier kan het lood voor verbrossing zorgen. Deze dynamische verbrossing vindt plaats bij temperaturen onder het smeltpunt van lood. Bij temperaturen boven dit smeltpunt (327 °C) wordt het lood vloeibaar, wat kan leiden tot verschillende vormen van verbrossing, afhankelijk van de mate van bevochtiging van de korrelgrens.

In dit onderzoek wordt bestudeerd hoe het breukgedrag van de legering wordt beïnvloed door de temperatuur, reksnelheid en spanningstoestand. Hiertoe worden teststaven met verscheidene kerfvormen en diktes met wisselende reksnelheden en bij verschillende temperaturen getrokken. In een raster elektronenmicrocoop worden vervolgens de breukvlakken geanalyseerd. Doorgaans breekt de legering transgranulair maar door hoge temperaturen, lage reksnelheden en een vlakke spanningstoestand kan het metaal intergranulair breken.