



NLR-TP-2000-415

Niet-destructieve restlevensduurbepaling

H.J. Kolkman en C.J. Lof



NLR-TP-2000-415

Niet-destructieve restlevensduurbepaling

H.J. Kolkman en C.J. Lof

Dit rapport is gebaseerd op een presentatie te houden bij seminar "Test to match" tijdens "Het Instrument", te Utrecht op dinsdag 10 oktober 2000.

Uit dit rapport mag worden geciteerd onder de voorwaarde dat volledige bronvermelding plaatsvindt.

Hoofdafdeling:	Constructies en Materialen
Afgesloten:	8 augustus 2000
Rubricering van de titel:	Ongerubriceerd

Samenvatting

Op basis van veranderingen in de microstructuur kunnen uitspraken gedaan worden over de resterende levensduur van bij hoge temperatuur gebruikte componenten. Het simpelste geval is goedkeur of afkeur door vergelijk met een microstructuur-atlas. Fijnzinniger resultaten worden verkregen door uit de microstructuur verkregen gebruikstemperaturen in te voeren in een Eindige elementen berekening.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
2	Kwalitatief onderzoek	5
3	Replica's	6
4	Kwantitatief vastleggen van de microstructuur	7
5	Waarom Eindige elementenmethode ?	8
6	Resultaten Eindige elementenmethode	9
7	Conclusies	10
8	Dankbetuiging	10
9	Referenties	10

7 Figuren

(16 pagina's totaal)

1 Inleiding

De microstructuur – en daarmee de mechanische sterkte – van onderdelen van straalmotoren en industriële gasturbines degraderen onder invloed van de hoge temperaturen. Daar deze onderdelen kostbaar zijn, is het van belang hun (kruip)levensduur zoveel mogelijk te benutten. Aangezien de kruiplevensduur zeer sterk van de temperatuur afhangt, is het nodig de temperatuur nauwkeurig te bepalen om de (rest)levensduur uit te kunnen rekenen.

Turbineschoepen van straalmotoren en industriële gasturbines worden gemaakt van nikkelbasis “superlegeringen”. De mechanische sterkte berust vooral op de aanwezigheid van zogenaamde γ' (gamma prime) precipitaten. In de meeste superlegeringen zijn γ' precipitaten aanwezig zowel in de vorm van blokken (met een ribbe in de orde van 1 μm) en kleinere bolletjes (met een diameter in de orde van 50 nm). Blootstelling aan hoge temperatuur resulteert in groei van zowel de γ' bolletjes als blokken. Gezien genoemde grootte is Scanning Electron Microscopy (SEM) een voor de hand liggende waarnemingstechniek. Het onderzoek kan op verschillende manieren gebeuren:

- kwalitatief of kwantitatief
- destructief of niet-destructief.

2 Kwalitatief onderzoek

Omdat een straalmotor in brand had gestaan, rees de vraag of de componenten van een 4-traps turbine nog bruikbaar waren. Visueel leek alles in orde. Een krans turbineschoepen bestaat uit tientallen exemplaren, dus konden er wel twee exemplaren per krans worden opgeofferd voor het maken van doorsneden. Uit Fig. 1 blijkt dat de relatief koud gebleven voet nog de oorspronkelijke microstructuur heeft. Het “airfoil” (het deel dat met de hete gasstroom in contact is) is echter zo warm geweest, dat de γ' blokken gegroeid en afgerond zijn. De betrokken motorfabrikant geeft een microstructuuratlas uit, waarin voor een aantal superlegeringen met foto's is geïllustreerd welke microstructuren wel en niet toelaatbaar zijn. De betrokken krans schoepen moest worden afgekeurd. Op grond van soortgelijke onderzoeken konden de schoepen van de andere turbinetrappen echter worden goedgekeurd.

Dit voorbeeld betreft een relatief eenvoudig (maar zeer nuttig) onderzoek omdat destructief onderzoek was toegestaan en omdat het onderzoek als resultaat slechts “goedkeur” of “afkeur” kon opleveren.

3 Replica's

In straalmotoren en industriële gasturbines komen een aantal kostbare componenten – assen en turbinewielen - slechts in enkelvoud voor. Destructief onderzoek is dan uitgesloten. Bovendien hebben de meeste gebruikers van industriële gasturbines hoogstens enkele gasturbines, waarvoor dan vaak één complete krans schoepen in reserve is. Destructief onderzoek is niet aantrekkelijk, omdat het heel lastig is de krans weer compleet te krijgen.

Kleine turbineschoepen worden in hun geheel in een SEM geplaatst. Voor grotere schoepen is een goede oplossing het maken van afdrukken – zogenaamde “replica's” – van geëtste oppervlakken (Fig. 2). Weliswaar worden de superlegeringen meestal door een coating tegen corrosie beschermd, maar deze coating moet periodiek vervangen worden en dat is een uitstekende gelegenheid om replica's van het basismateriaal te maken. Het medium is een hars die in vloeibare toestand wordt opgebracht en op het oppervlak uithardt of een met een oplosmiddelbevochtigde kunststoffilm. De replicatechniek is al oud en wordt bijvoorbeeld gebruikt om kruipholtes in stoomketels vast te leggen. Meestal is daarvoor optische microscopie toereikend. Veel hogere vergrotingen zijn vereist voor het bestuderen van replica's van breukvlakken met behulp van Transmissie Elektronen Microscopie. De replica's moeten daarbij heel dun zijn omdat de elektronen erdoor moeten kunnen. Daarom worden 2-traps replica's gebruikt: er wordt een dunne laag koolstof op de replica opgedampt, waarna de replicahars wordt opgelost. Deze toepassing is echter vrijwel verdrongen door de opkomst van SEM, waarmee breukvlakken rechtstreeks bekeken kunnen worden

Om de microstructuur van componenten van straalmotoren en industriële gasturbines niet-destructief te kunnen bekijken, gebruikt het NLR vooral 1-traps replica's die met SEM worden vastgelegd (Ref. 1). (Een 1-traps replica is een negatief van het geëtste oppervlak; een 2-traps een positief). Om de replica geleidend te maken wordt een laag platina opgebracht. De dikte van die laag is een kritische parameter: bij een te dikke laag gaat het oplossend vermogen achteruit; bij een te dunne laag vervormt de replica vanwege de door de SEM elektronenbundel ingebrachte warmte.

Fig. 3 vergelijkt de grootte van direct met SEM waargenomen γ' met die van precies dezelfde via replica's met SEM waargenomen γ' deeltjes. Waarnemingen voor het middendeel van de rechte ontbreken, omdat er weinig γ' deeltjes met een grootte tussen die van bollen en blokken voorkomen. Het blijkt dat de hier toegepaste replica's de γ' altijd wat in grootte overschatten. Daarom wordt de via replica's bepaalde γ' via lineaire regressie (de gestreepte lijn in Fig. 3) omgerekend naar directe waarneming. De waarnemingen liggen niet allemaal exact op de gestreepte lijn in Fig. 3, dus de replica introduceert een zekere fout in de grootte van een individueel γ' deeltje. Voor de bepaling van de temperatuur worden per locatie meer dan honderd deeltjes gebruikt, zodat deze fouten zullen uitmiddelen.

4 Kwantitatief vastleggen van de microstructuur

Het voorbeeld in Fig. 1 betreft een grote verandering in de γ' verdeling. De vraag was alleen of deze verandering acceptabel was. Doorgaans zijn de veranderingen fijnzinniger.

Bij lang verblijf gedurende tijd t op temperatuur T geldt voor de gemiddelde equivalente straal van een γ' deeltje met een te verwaarlozen begingrootte:

$$r^3(t) = K(T) \cdot t \quad (1)$$

waarin $K(T)$ de temperatuurafhankelijke groeiconstante is. Wanneer de begingrootte niet te verwaarlozen is, geldt een wat ingewikkelder formule. De procedure is nu:

- 1) $r(t)$ wordt op diverse plaatsen op het oppervlak voor een groot aantal γ' deeltjes gemeten. Vanwege het grote aantal γ' deeltjes wordt beeldanalyse toegepast. Het grijswaarden-beeld van de SEM wordt hierbij gedigitaliseerd. De γ' deeltjes worden hierbij bijvoorbeeld wit en het witte oppervlak van elk deeltje wordt gemeten. Van belang is het instellen van de drempelwaarde tussen wit en zwart. Het resultaat wordt in formule (1) ingevuld.
- 2) De tijd t wordt in formule (1) ingevuld. Hierbij wordt aangenomen dat gedurende de hele periode t dezelfde temperatuur T gehoorst heeft.
- 3) $K(T)$ wordt berekend.
Voor een aantal materialen is het verband tussen $K(T)$ in T in de literatuur bekend (Ref. 2). Voor andere materialen kan $K(T)$ bepaald worden door stukjes bij diverse tijden t en temperaturen T te gloeien, voor ieder stukje de γ' grootte te bepalen en formule (1) toe te passen.
Uit de gevonden waarde van K blijkt via het bekende verband tussen $K(T)$ en T de bijbehorende temperatuur T .

Ter controle werd van kruipstaven uit de tijdens de kruipproef vergroefde γ' de temperatuur bepaald. In het voorbeeld in Fig. 4 kloppen de op die manier in de meetsectie gevonden temperaturen (1001 en 1005 °C) uitstekend met de ingestelde temperatuur van de oven (1008 °C). Als voorbeeld van een toepassing is in Fig. 5 een via γ' vergroving bepaalde temperatuurverdeling in een schoep uit een industriële gasturbine gegeven. Hoewel het hete gas van links naar rechts stroomt, is de metaaltemperatuur op de achterrand het hoogst. Het is inderdaad bekend dat de inwendige koeling van dit type schoep ontoereikend is. De levensduur is daardoor beperkt. Het ontwerp is daarom gewijzigd. Voor schoepen van dit gewijzigde ontwerp werd inderdaad een lagere temperatuur op de achterrand gevonden.

5 Waarom Eindige elementenmethode ?

Bij hoge temperatuur T vervormt een materiaal langzaam plastisch (het “kruipt”) bij spanningen die lager zijn dan de vloeigrens. Voor kruipstaven wordt de kruiptijd tot breuk als functie van T en σ in kruipwetten beschreven. In een schoep variëren T en σ met de plaats. De T verdeling is in Fig. 5 uit de γ' vergroving bepaald. σ lijkt – in benadering – eenvoudig te berekenen: verdeel een schoep (letterlijk of denkbeeldig) in een aantal plakken, bepaal het gewicht van elke plak (door weging of berekening) en bereken de middelpuntvliedende kracht uit dit gewicht, de afstand tot de hartlijn van de gasturbine en het toerental. σ in een plak is de kracht op die plak plus de krachten op de verder van de hartlijn gelegen plakken, gedeeld door het oppervlak van de beschouwde plak. Wanneer nu de T en σ voor een bepaalde plaats in de schoep in een kruipwet worden ingevuld, volgt de tijd tot breuk voor die plaats. Men zou nu kunnen denken dat de schoep gaat breken op de plaats en tijd waar voor het eerst de kruiptijd tot breuk overschreden wordt. Doet men dit voor het voorbeeld in Fig. 5 dan zou dit – niet geheel verrassend – gebeuren aan de achterrand op ongeveer halve hoogte. Wel verrassend is dat hier al na 2100 uur de kruiptijd tot breuk zou worden overschreden, in het licht van het feit dat de schoep meer dan 18.000 uur in bedrijf was geweest en nog geen scheuren vertoonde. De eenvoudige benadering is dus onbruikbaar conservatief.

In de eenvoudige aanpak was σ in een doorsnede constant. Zou nu T ook in een doorsnede constant zijn, dan zou zowel het thermisch uitzetten en als het kruipen van de schoep de spanningstoestand niet beïnvloeden. Uit Fig. 5 blijkt echter dat T allerminst constant is over een doorsnede.

Wanneer men nu in dezelfde doorsnede een warmer gebied vergelijkt met een kouder, dan zal het warmere gebied:

- a) meer willen uitzetten;
- b) meer willen kruipen.

Omdat de rek in lengterichting van genoemde gebieden ongeveer gelijk moet zijn, zal het warmere gebied bij het verlengen belemmerd worden door het koudere gebied en dus onder een extra drukspanning worden gezet. Hierdoor vermindert de totale spanning op het warmere gebied en de kruipreksnelheid is er dus minder dan op grond van temperatuur en centrifugaalspanning gedacht. Daarentegen wordt het koudere gebied onder een extra trekspanning gezet. Fig. 6 geeft de totale spanningen zodra de schoep op temperatuur is gekomen. Hierin is ook de invloed van de koelkanalen te zien. Op de koude wanden daarvan heersen hoge trekspanningen, die gecompenseerd worden door drukspanningen op een groot deel van het buitenoppervlak. Door kruip relaxeren de spanningen gedeeltelijk. De in Fig. 6 gegeven spanningsverdeling zal dus in de loop van de levensduur van de schoep veranderen. Het zal duidelijk zijn dat een en ander niet meer eenvoudig te berekenen is.

6 Resultaten Eindige elementenmethode

Er werd gebruik gemaakt van het programma MARC. De schoep werd verdeeld in 10890 elementen. Voor ieder element werd de temperatuur bepaald door het stroken van een temperatuurverdeling door de via de γ bepaalde temperaturen, zoals al in Fig. 4 werd aangegeven. Die temperaturen werden gebruikt voor:

- a) Het bepalen van de uitzettingscoëfficiënt en elasticiteitsmodulus voor elk element
- b) Het berekenen van de thermische spanningen. Die werden opgeteld bij de berekende centrifugaalspanningen, zoals al in Fig. 6 geïllustreerd werd.
- c) Het berekenen van de verplaatsing per element door kruip door het invoeren in een kruipwet van de temperatuur, de onder b) bepaalde σ en een zeker tijdsinterval. Bedoelde kruipwet geeft de kruipreksnelheid als $f(\sigma, T)$.

Na genoemd tijdsinterval is de spanningsverdeling veranderd (de temperatuurverdeling niet) zodat de stappen b) en c) voor een volgend tijdsinterval herhaald werden, etc. In Fig. 7 is te zien dat (na 5 jaar) de kruiprek maximaal is nabij de achterrand van het blad, vlakbij de overgang naar de voet. Deze kritieke plaats is dus een andere dan op grond van de eenvoudige berekening werd verwacht.

De eindige elementenanalyse levert interessante uitkomsten, zoals de spanning (Fig. 6) en rek (Fig. 7) als functie van plaats en tijd en ook de totale verlenging van de schoep (van belang voor het aanlopen). Die totale verlenging bestaat uit een blijvend verlenging door kruip plus de verlenging door thermische uitzetting en de elastische verlenging onder invloed van de centrifugaalbelasting. Het belangrijkste is het bepalen van de (rest)levensduur. Dit kan in principe op twee manieren, namelijk via:

- de maximale lokale blijvende rek (Fig. 7)
De schoep wordt dan als gebroken beschouwd zodra de kruiprek ergens de kruiprek bij breuk overschrijdt. De kruiprek bij breuk moet dan uit kruipproeven bekend zijn.
- de blijvende verlenging van de schoep
Handig is dat na een zekere tijd de blijvende verlenging lineair met de tijd blijkt te verlopen. Berekend werd dat de schoep na circa 28.000 uur een verlenging van 1 % van de schoeplengte bereikt had. Dit kwam goed overeen met een lengtemeting van een gebruiker (1% na 24.000 uur). Men kan dit vergelijken met het ontwerpcriterium van de fabrikant. Voor de als voorbeeld gebruikte schoep is dat 0.5 %. De achtergrond is het ontstaan van kruitscheuren aan het oppervlak. De schoep bezwijkt hierdoor nog lang niet, maar de coating scheurt met het basismateriaal mee, waardoor er corrosie zal optreden. Bij reparatie moet dan een laag gescheurd en gecorrodeerd basismateriaal verwijderd worden, waardoor de schoep (te) dun wordt. Volgens genoemd criterium zou voor de beschouwde schoep de levensduur dus al na 14.000 uur verstreken zijn. Door warmtebehandeling kan echter de kruitschade

grotendeels worden weggenomen (d.w.z. de γ' verdeling weer in de oorspronkelijke toestand worden terug gebracht). Na recoaten kan de schoep dan weer 14000 uur mee.

7 Conclusies

- a) Bedrijfstemperaturen in gebruikte schoepen kunnen niet-destructief uit de γ' vergroving bepaald worden.
- b) Vervolgens kan hiermee via een eindige elementenanalyse de (rest)levensduur bepaald worden.

8 Dankbetuiging

De gegevens zijn grotendeels ontleend aan het project “Conditiebepaling Turbinebladen”. Dit wordt uitgevoerd door Elbar in Lomm, Babcock Borsig Power in Rheden en het NLR, in opdracht van het Nederlands Instituut voor Vliegtuigontwikkeling en Ruimtevaart (NIVR). Gebruikte schoepen werden ter beschikking gesteld door het Elektriciteitsbedrijf Zuid-Holland (EZH), de Elektriciteits-Produktiemaatschappij Oost- en Noord-Nederland (EPON) en Dow Benelux.

9 Referenties

- 1. Kolkman, H.J.; Kool, G.A., *Zerstörungsfreie Untersuchung der Kondition von Gasturbinenschaufeln/Non destructive investigation of the condition of gas turbine blades*, Material-wissenschaft und Werkstofftechnik 29 (1998) 1-15.
- 2. Takanari Okamura; Akinori Kogo; Yomei Yoshioka; Kazanuri Fuliyaama; Nagatoshi Okabe, *Analysis of heat transfer on moving turbine blades using microstrcutural changes due to ageing*; Heat Transfer-Japanese Research 24 (1995) 209-226.

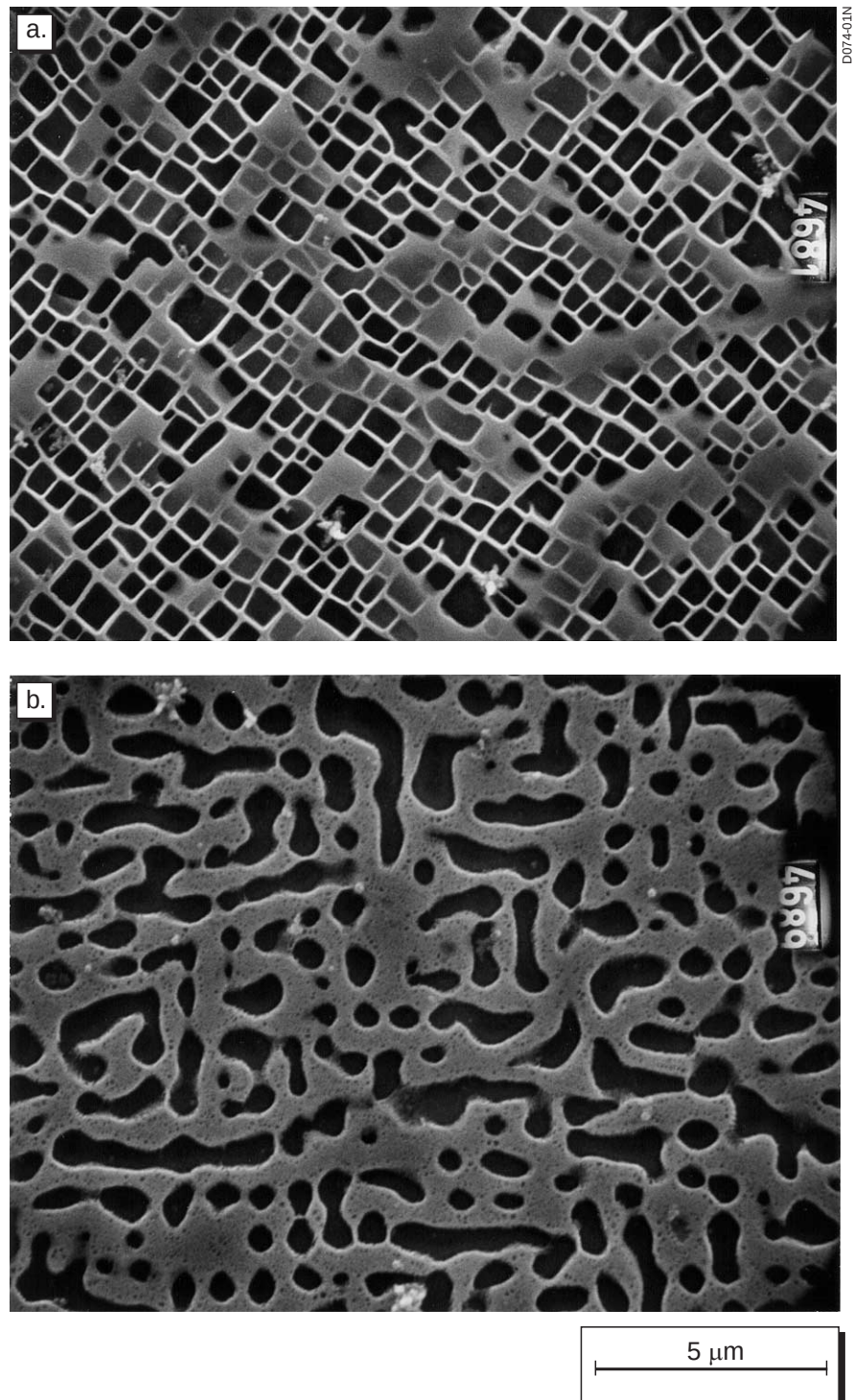


Fig. 1 Microstructuur van een turbineschoep, voor (a) en na (b) een brand.
De zwarte deeltjes zijn γ' precipitaten (SEM)

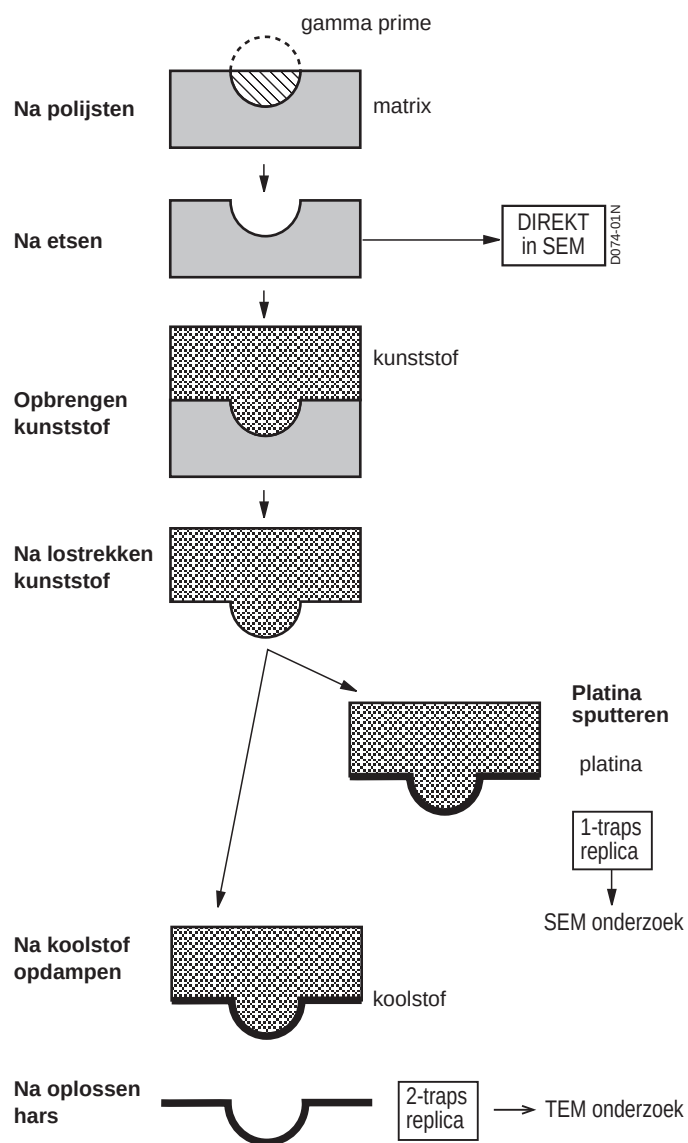


Fig. 2 Het maken van replica's

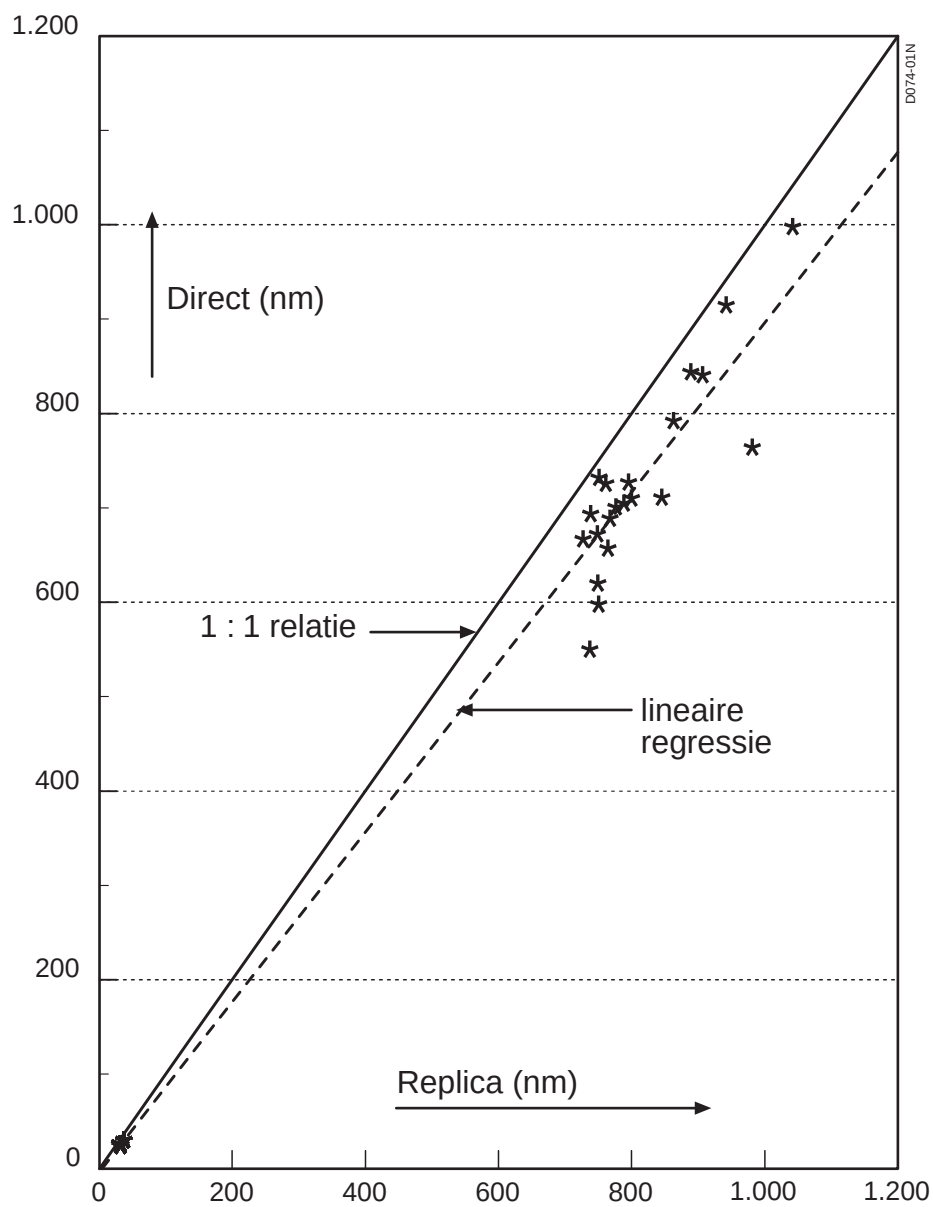


Fig. 3 γ' deeltjesgrootte waargenomen met SEM: direct en via replica's

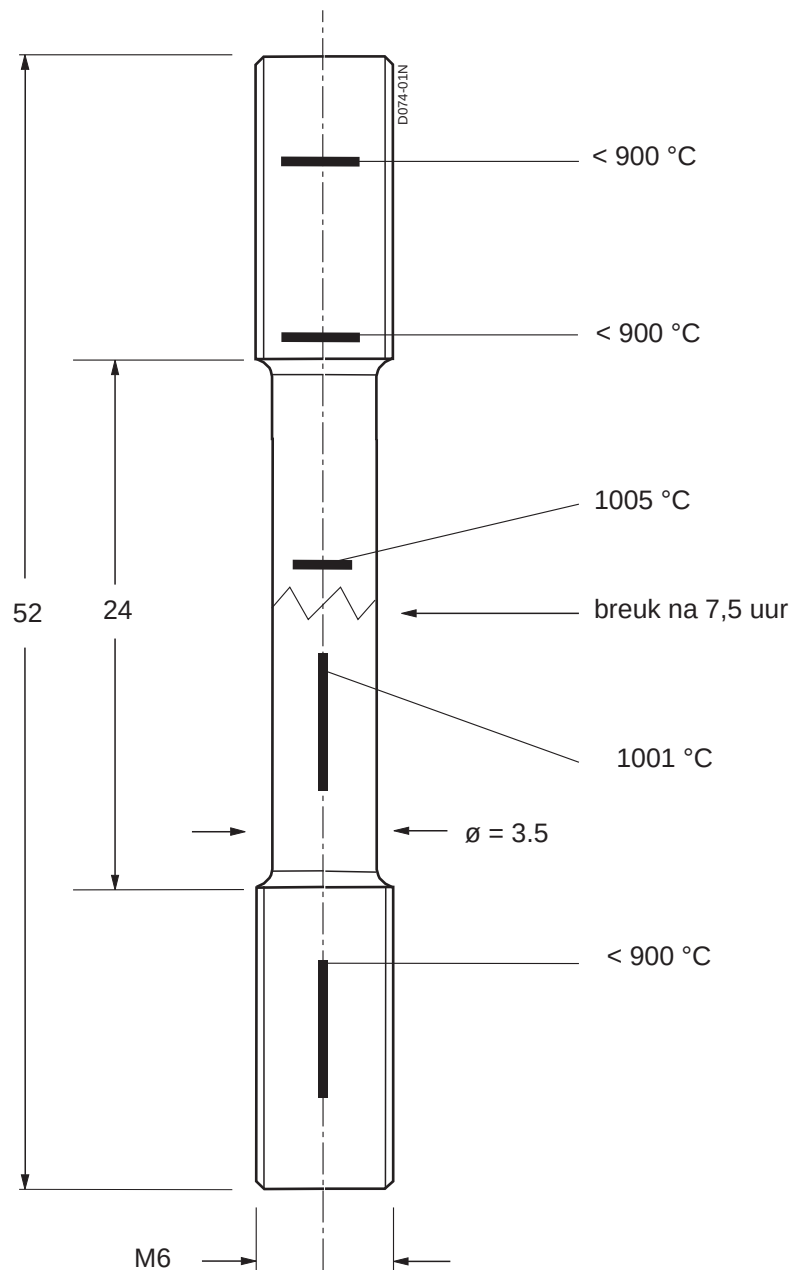


Fig. 4 Via γ' vergroving bepaalde temperaturen in een op $1008\text{ }^{\circ}\text{C}/200\text{ MPa}$ beproefde kruipstaaf. Omdat de proef in een inductie-oven plaats vond, zijn de temperaturen bij de inklemming aanzienlijk lager (zodat aan de inklemming geen zware eisen hoeven te worden gesteld).

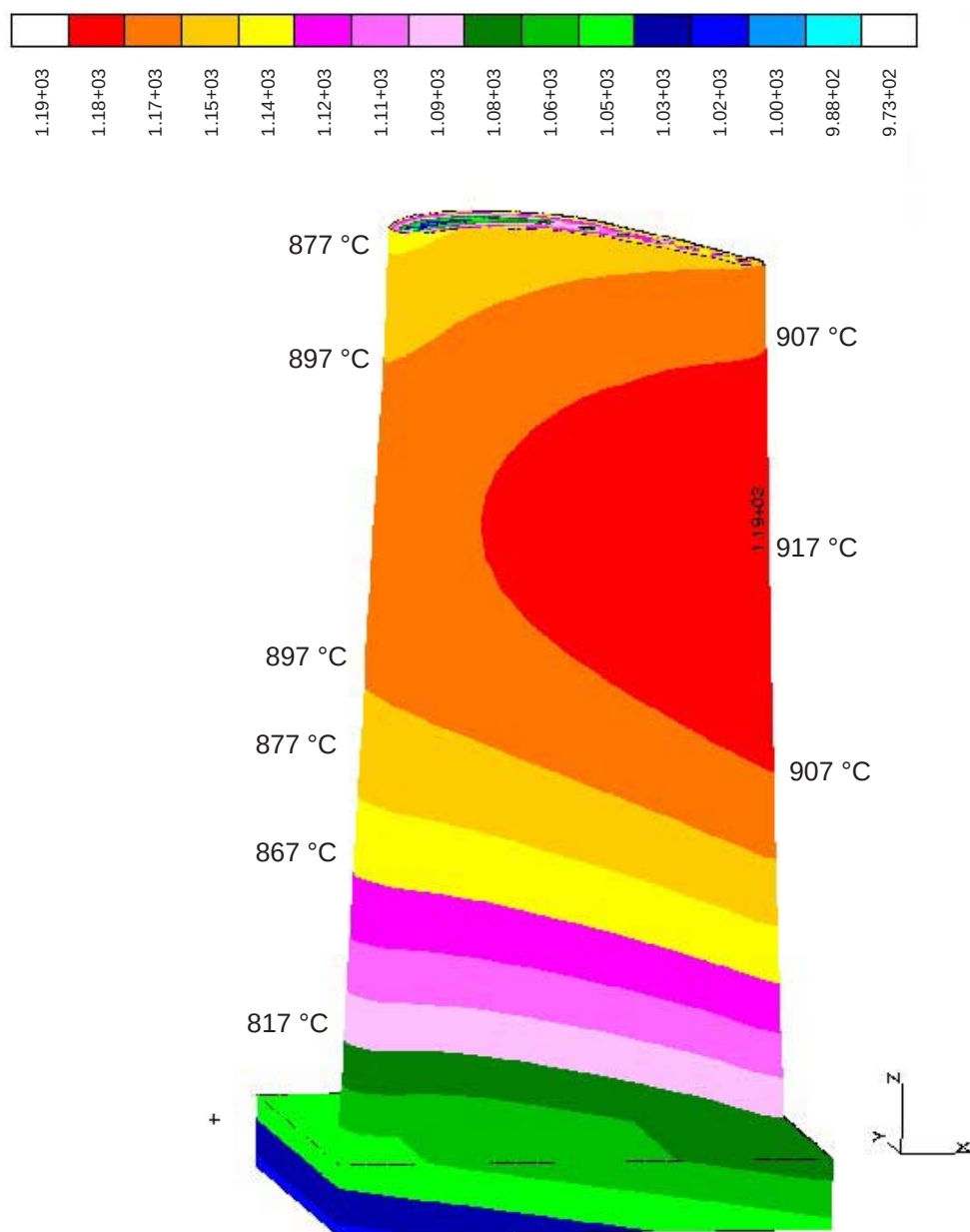


Fig. 5 *Temperatuurverdeling in een schoep van een industriële gasturbine, gestrookt door op een twaalfstal plaatsen via replica's bepaalde temperaturen*

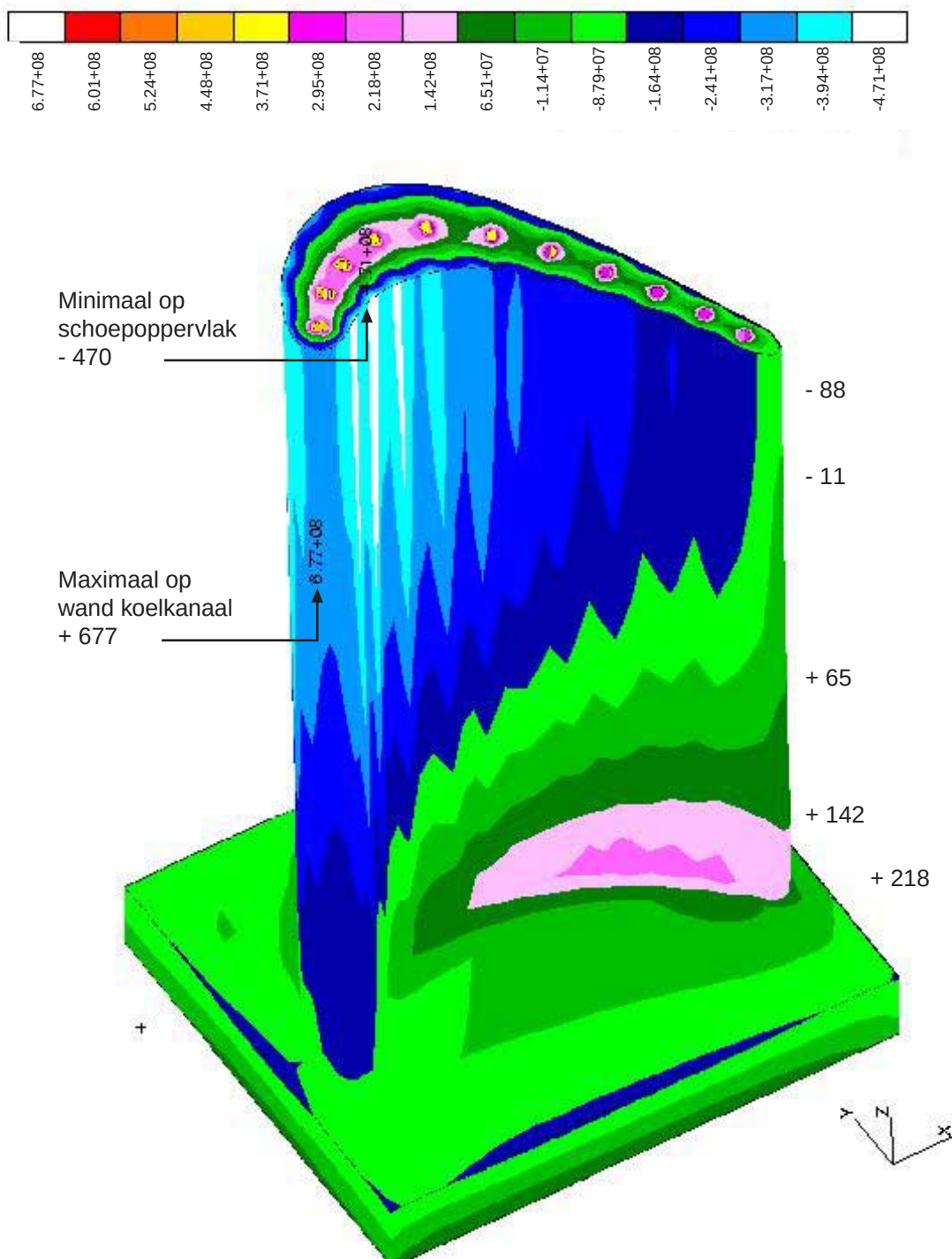


Fig. 6 Spanningen in de lengterichting van de schoep (in MPa) ten tijde $t=0$ ten gevolge van middelpuntvliedende kracht en thermische gradiënten

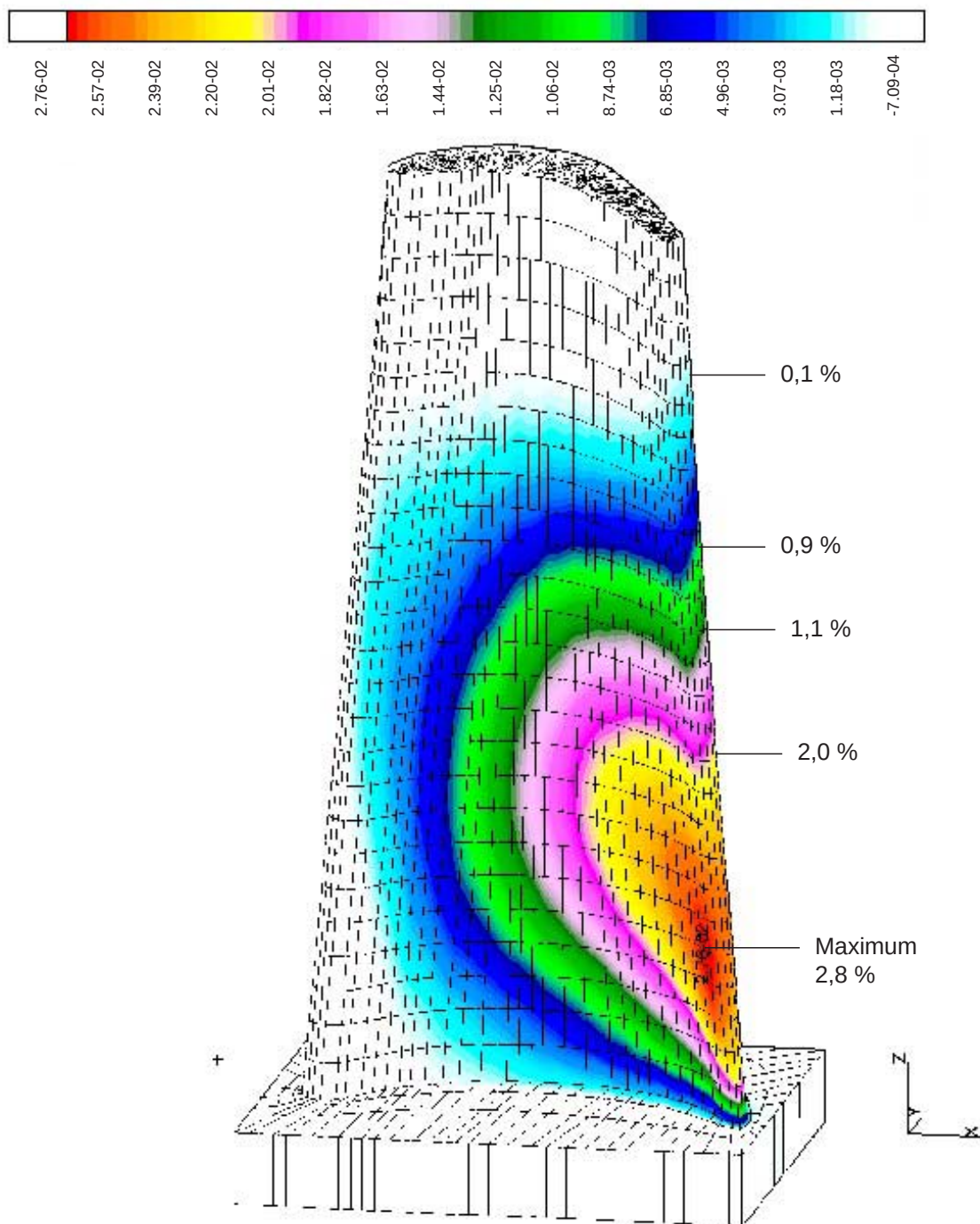


Fig. 7 Kruiprek (in lengterichting) na 5 jaar gebruik