

بررسی میزان بهبود رسوبات نانومتری بر خواص دیسک‌های توربینهای نیروگاهی

محسن رفیعی، محمد جزینی، مسعود سرپاک، مهدی جزینی، محسن جزینی

وزارت نیرو، شرکت برق منطقه ای تهران باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب

تهران، ایران

Smartgridblackbox@gmail.com

سوپراآلیاژی متأثر از چهار عامل جهت گیری فازهای کاربیدی، مورفولوژی و توزیع رسوبات (گاما پرایم) و ساختار زمینه نیز می باشد. براساس تحقیقات و آزمایشهای صورت گرفته، توسط روش‌های کنترل اندازه دانه می‌توان سه عامل اول از موارد بالا را کنترل کرد. به علت وجود شرایط خاص، استفاده از روش‌های انجماد جهت‌دار و رشد تک بلور همواره با محدودیت‌های زیادی روبه‌رو است.

بنابراین اصلاح ساختار دانه‌بندی سوپراآلیاژها یکی از بهترین روش‌ها جهت افزایش خواص بشمار می‌رود. به طور کلی پنج روش برای اصلاح شکل و اندازه‌دانه‌ها در سوپراآلیاژ وجود دارد:

الف) تغییر پارامترهای ریخته‌گری

ب) ارتعاش مکانیکی

ج) استفاده از مواد جوانه‌زا

د) عملیات حرارتی

ه) عملیات ترمومکانیکی.

بوسیله روش‌های یادشده می‌توان سوپراآلیاژهای پایه نیکل را ریزدانه و بر مورفولوژی کاربیدها تأثیر گذاشت. با ریزتر شدن دانه‌ها، مرزدانه‌ها افزایش پیدا کرده و موانع لغزش نابه‌جایی‌ها بیشتر شده که سبب افزایش استحکام آلیاژ و همچنین شکسته شدن ذرات کاربیدی و کوچکتر شدن اندازه‌ی آنها (که در مرزها تجمع دارند) می‌گردد. به عنوان یکی از

چکیده — سوپراآلیاژهای پایه نیکل، دسته‌ای از مواد مهندسی با قابلیت کار و تحمل تنش در دماهای بالا می‌باشند. این مواد در قطاعی نظیر دیسک توربین‌های تولید برق در دمایی کمتر از دمای خزش (حدود 700°C) به کار می‌روند. در این شرایط اندازه‌ی دانه ریز و یکنواخت به منظور افزایش خواص خستگی کم‌چرخه و مقاومت به رشد ترک مطلوب است. با ریزتر شدن دانه‌ها، مرزدانه‌ها افزایش پیدا کرده و موانع لغزش نابه‌جایی‌ها بیشتر شده که سبب افزایش استحکام آلیاژ و همچنین شکسته شدن ذرات کاربیدی و کوچکتر شدن اندازه‌ی آنها (که در مرزها تجمع دارند) می‌گردد. در این مقاله ما به بررسی رسوبات نانومتری بر خواص دیسک‌های توربین‌های نیروگاهی می‌پردازیم.

واژه‌های کلیدی — رسوبات؛ نانومتر؛ توربین؛ دیسک؛ سوپراآلیاژ؛

۱. مقدمه

سوپراآلیاژهای پایه نیکل دسته‌ای از مواد مهندسی با قابلیت کار و تحمل تنش در دماهای بالا می‌باشند. این مواد در قطاعی نظیر چرخ توربین در موتور هواپیما، دیسک توربین‌های تولید برق در دمایی کمتر از دمای خزش (حدود 700°C) به کار می‌روند. در این شرایط اندازه‌ی دانه ریز و یکنواخت به منظور افزایش خواص خستگی کم‌چرخه و مقاومت به رشد ترک مطلوب است. علاوه بر اندازه‌ی دانه، خواص قطعات

شکل (۱): مقایسه خستگی

جدول ۱، ترکیب شیمیایی چند آلیاژ دیسک توربین با کاربرد در توربین-های گازی را نشان میدهد. بدیهی است که ترکیب شیمیایی دارای اهمیت بحرانی است هرچند برای بهترین خواص، باید ریزساختار در شرایط بهینه باشد. فاکتور دیگر، مرزدهانه‌ها است که باید به دقت بررسی شود. بدین ترتیب ترکیبی از آنالیز شیمیایی و ریزساختار برای رسیدن به خواص بهینه لازم است. تجارب نشان می‌دهد که موارد ذیل باید مد نظر واقع شوند.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی چند آلیاژ دیسک توربین

| Alloy | Cr | Co | Mo | W | Nb | Al | Ti | Ta | Fe | Hf | C | B | Zr | Ni |
|-------------|------|------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-----|
| Alloy 10 | 11.5 | 15 | 2.3 | 5.9 | 1.7 | 3.8 | 3.9 | 0.25 | — | — | 0.030 | 0.020 | 0.05 | Bal |
| Auroloy | 15.0 | 17.0 | 5.3 | — | — | 4.0 | 3.5 | — | — | — | 0.06 | 0.030 | — | Bal |
| Inconel 706 | 16.0 | — | — | — | 2.5 | 0.2 | 1.8 | — | 40.0 | — | 0.03 | — | — | Bal |
| Inconel 718 | 19.0 | — | 3.0 | — | 5.1 | 0.5 | 0.9 | — | 18.5 | — | 0.04 | — | — | Bal |
| MD | 13.1 | 18.2 | 3.8 | 1.9 | 1.4 | 3.5 | 3.5 | 2.7 | — | — | 0.030 | 0.030 | 0.050 | Bal |
| MIRL-76 | 12.4 | 18.6 | 3.3 | — | 1.4 | 0.2 | 4.3 | — | — | 0.35 | 0.050 | 0.03 | 0.06 | Bal |
| NH | 11.5 | 15.7 | 6.5 | 0.6 | — | 4.35 | 4.35 | — | — | 0.45 | 0.015 | 0.015 | 0.01 | Bal |
| Ree 18DT | 16.0 | 13.0 | 4.0 | 4.0 | 0.7 | 2.1 | 3.7 | — | — | — | 0.03 | 0.015 | 0.03 | Bal |
| Ree 95 | 14.0 | 8.0 | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 2.5 | — | — | — | 0.05 | 0.010 | 0.05 | Bal |
| Ree 104 | 13.1 | 18.2 | 3.8 | 1.9 | 1.4 | 3.5 | 3.5 | 2.7 | — | — | 0.030 | 0.030 | 0.050 | Bal |
| RE100 | 15.0 | 18.5 | 5.0 | — | 1.3 | 3.0 | 3.6 | 2.8 | — | 0.5 | 0.027 | 0.015 | 0.06 | Bal |
| Ultra 500 | 18.0 | 18.5 | 4.0 | — | — | 2.9 | 2.9 | — | — | — | 0.08 | 0.006 | 0.05 | Bal |
| Ultra 520 | 19.0 | 12.0 | 6.0 | 1.0 | — | 2.0 | 3.0 | — | — | — | 0.05 | 0.005 | — | Bal |
| Ultra 700 | 15.0 | 17.0 | 5.0 | — | — | 4.0 | 3.5 | — | — | — | 0.06 | 0.030 | — | Bal |
| Ultra 710 | 18.0 | 15.0 | 3.0 | 1.5 | — | 2.5 | 5.0 | — | — | — | 0.07 | 0.020 | — | Bal |
| Ultra 720 | 17.9 | 14.7 | 3.0 | 1.25 | — | 2.5 | 5.0 | — | — | — | 0.035 | 0.033 | 0.03 | Bal |
| Ultra 730HJ | 16.0 | 15.0 | 3.0 | 1.25 | — | 2.5 | 5.0 | — | — | — | 0.025 | 0.018 | 0.05 | Bal |
| Waspoy | 19.5 | 13.5 | 4.3 | — | — | 1.3 | 3.0 | — | — | — | 0.08 | 0.006 | — | Bal |

۳. استحکام تسلیم

برای رسیدن به استحکام و مقاومت خستگی، فاز γ همچون (Al، Ti و Ta) بایستی در محدوده ۴۵-۵۵ درصد بهینه شود و عملیات حرارتی برای توزیع یکنواخت ذرات γ به کار رود.

تنش تسلیم آلیاژهای دیسک توربین با نسبت فازهای استحکام دهنده γ و γ'' بیشتر می‌شود، از این رو در طراحی آلیاژ باید، مقدار عناصر تشکیل این فازها مد نظر قرار گیرد. با نرم افزار Thermo-Calc می‌توان اجزاء فازهای γ و γ'' آلیاژ را تخمین زد و با نتایج حاصل مقایسه کرد. نتایج نشان می‌دهد که تنش تسلیم در 650°C با فازهای استحکام دهنده بسیار افزایش می‌یابد (شکل ۲). شکل (۲)، نمودار تغییرات تنش تسلیم در 650°C با نسبت های مختلف γ و γ'' در چند آلیاژ متداول دیسک توربین است. همین رفتار در دمای محیط نیز صدق می‌کند. رفتار خزشی برای ۱۰۰۰ ساعت در 700°C داری رفتار مشابهی است. شکل (۳)، نمودار تغییرات استحکام گسیختگی خزش ۱۰۰۰ ساعت در 700°C با نسبت های مختلف γ و γ'' در چند آلیاژ متداول دیسک توربین است.

مکانیزم‌های مهم در ریزدانه‌گی سوپراآلیاژها به روش های یاد شده می‌توان استفاده از تحت تبریدهای بالا، شکسته شدن دندریتها و افزایش تنش‌های پسماند داخلی به وسیله‌ی عملیات ترمومکانیکی حین تبلور مجدد اشاره کرد. دیسک های توربین بحرانی ترین اجزا در توربین‌ها می باشند. در توربوفن صنعتی پیشرفته همچون Trent 800 که دیسک های توربین در حدود ۲۰٪ وزن کل آن و ۱۰٪ قیمت موتور را به خود اختصاص می دهند. وظیفه‌ی اصلی دیسک های توربین تامین بست برای پره های توربین است که در بخار گازی قرار بگیرند که از آن انرژی مکانیکی حاصل می شود. بدین ترتیب مجموعه کامل دیسک ها و پره ها قابلیت انتقال قدرت به فن و کمپرسور را از طریق شفت ها دارند.

۲. ترکیب ریزساختار و خواص آلیاژهای

دیسک توربینی

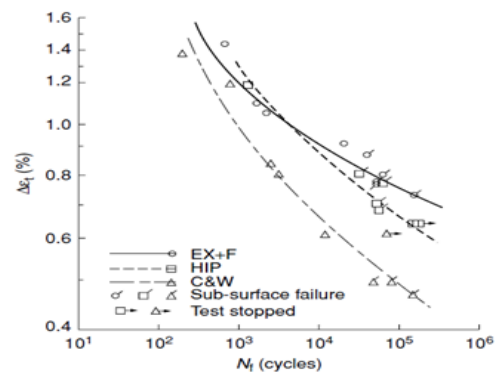
مطالعات نشان می‌دهد که دمای کارکردی دیسک های توربین بسیار کمتر از پره های توربین است، اما تنش های اعمالی بر آنها بسیار بیشتر است. بدین ترتیب خواص لازم برای یک دیسک توربین می‌تواند چنین باشد: الف) تنش تسلیم و استحکام کششی بالا برای جلوگیری از تسلیم و شکست

ب) چکش خواری و چقرمگی شکست برای توزیع عیوب

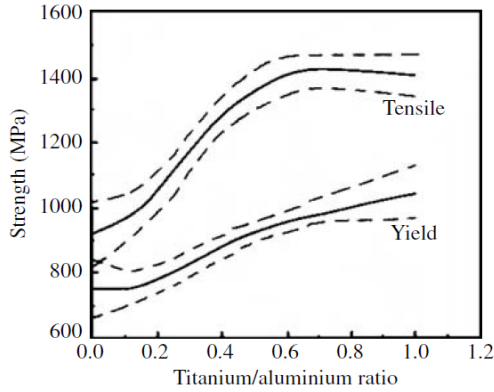
ج) مقاومت به ایجاد ترک خستگی

د) کمینه سرعت انتشار ترک خستگی. مقاومت خزشی نیز مهم است.

اما معمولاً به دلیل دمای کارکردی پایین و وجود قابلیت آزادسازی تنش در شکاف ها و تمرکز تنشی مطلوب، کمتر مورد تاکید قرار می‌گیرد. در شکل (۱) مقایسه خستگی چرخه کم RENE95 در 650°C درجه سانتیگراد در شکل‌های ریخته گری و کار شده، EX+F: آهنگری اکستروژن و همدمای و HIP: پرس ایزواستاتیک گرم است.

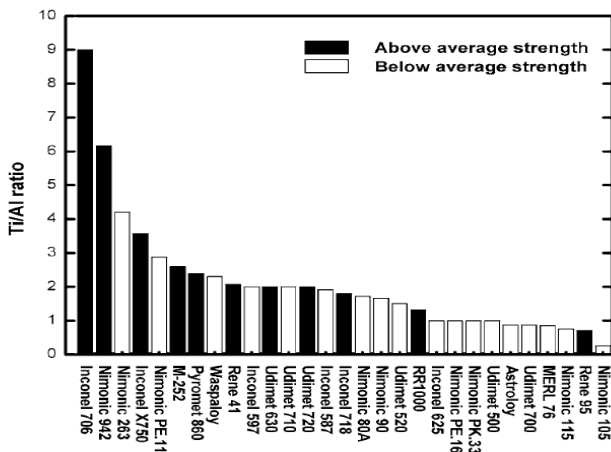


وقتی شبکه عصبی بعد از آموزش مورد بررسی قرار گرفت، پیش بینی کرد که نسبت بالاتر Ti/Al نقش مهمی را در استحکام دارد (شکل ۵) که سازگار با تئوری سختی کردن است که در آن انرژی APB با افزایش نسبت Ti/Al بیشتر می شود (۳). شکل (۵)، نمودار استحکام تسلیم و کشش دمای محیط با نسبت Ti/Al با آنالیز شبکه عصبی است.



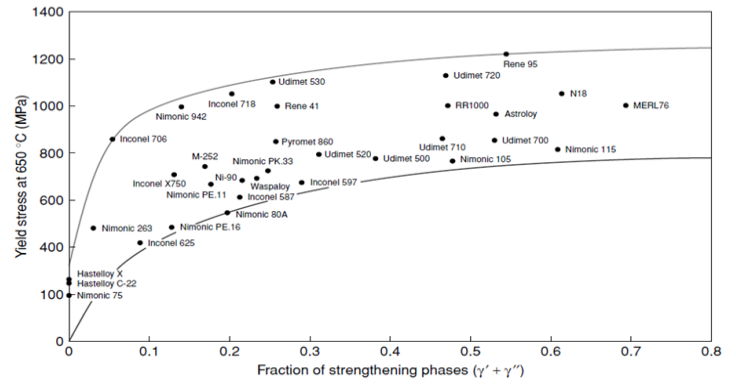
شکل (۵): نمودار استحکام تسلیم و کشش دمای محیط با نسبت Ti/Al با آنالیز شبکه عصبی

کیالت اثر جزئی بر خواص تسلیم دارد، اما افزایش مقدار مولیدن مفید است. مثلاً در Astroloy با افزودن Mo تا ۲۰٪ وزنی، تنش تسلیم تا حدود 500MPa بهبود می یابد. اثر مفید مولیدن به بهینه سازی ترکیب

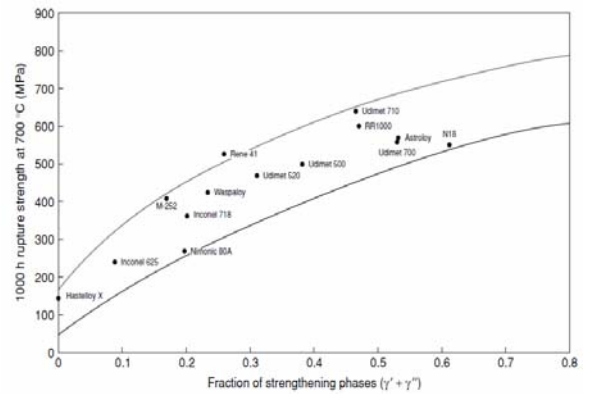


شکل (۶): نسبت Ti/Al در چند سوپرآلیاژ چند بلوری

سوپرآلیاژ RR1000 کمک می کند. اهمیت نسبت بالای Ti/Al در افزایش استحکام، با اطلاعات بیشتر قابل بررسی است. با رسم تنش تسلیم برحسب جذر مجموع فازهای استحکام دنده، خط مستقیمی حاصل می شود که حد رفتار آلیاژ را نشان می دهد (شکل ۶).

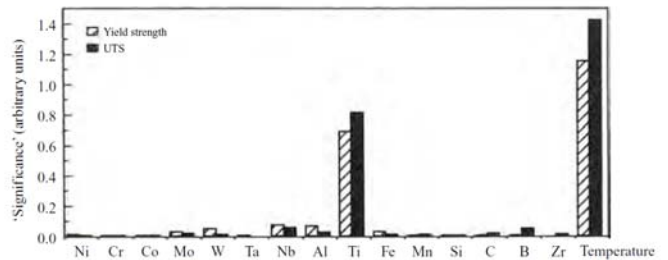


شکل (۷): تنش تسلیم آلیاژهای دیسک توربین با نسبت فازهای استحکام دهنده γ' و γ''



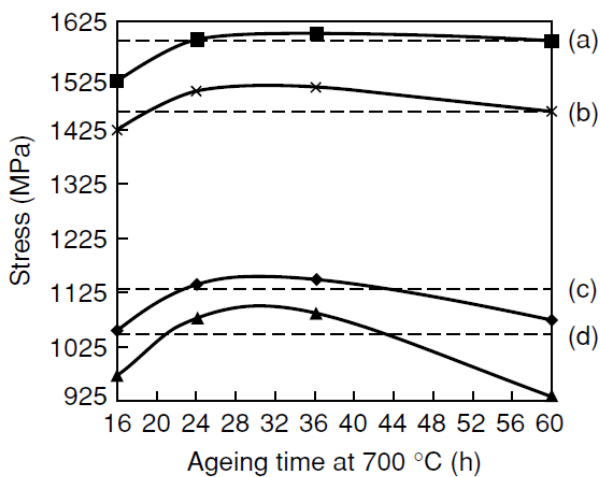
شکل (۸): نمودار تغییرات استحکام گسیختگی خزش ۱۰۰۰ ساعت در ۷۰۰ °C با نسبت های مختلف γ' و γ'' در چند آلیاژ متداول دیسک توربین

این یافته ها با الگوریتم شبکه عصبی در مجموعه اطلاعات ترکیب شیمیایی و استحکام برای بیش از ۲۰۰ سوپر آلیاژ چند بلوری تایید شده است که نشان می دهد عناصر Al، Ti و Nb بیشترین تاثیر را در تقویت خواص تسلیم ایفا می کنند. شکل (۴)، نمودار اثر غلظت عناصر و دما برای آنالیز شبکه عصبی استحکام تسلیم و نهایی سوپرآلیاژ دیسک توربین است.



شکل (۹): نمودار اثر غلظت عناصر و دما برای آنالیز شبکه عصبی استحکام تسلیم و نهایی سوپرآلیاژ دیسک توربین

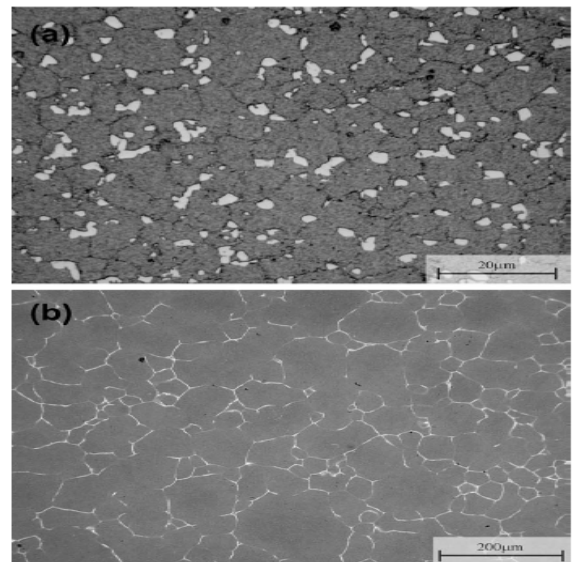
γ حاضر هستند که معمولاً به ترتیب به قطر حدود ۱۰۰ و ۵۰ نانومتر می‌رسند. توزیع دو نمایی به دلیل سینتیک جوانه زنی، رشد و درشت شدن ذرات γ طی عملیات حرارتی محلولی همدم و پیرسازی رخ می‌دهد، به دلیل آنکه جزء تعادلی γ به ندرت تشکیل می‌شود. سرعت سرد کردن نیز مهم است که معمولاً در حدود 700°C به مدت چند ساعت انجام گرفته است و سخت کردن پیرسازی رخ می‌دهد. شکل ۸ تنش تسلیم و استحکام کشش نهایی سوپرآلیاژ Udimet720Li را نشان می‌دهد که در آن عملیات حرارتی در مدت بهینه ۳۰ ساعت انجام می‌شود. نمودار شکل (۸)، پاسخ سخت کردن سوپرآلیاژ Udimet720Li با عملیات حرارتی در 700°C است: (a) استحکام کششی نهایی دردمای محیط (b) تنش در ۰/۲٪ کرنش در دمای محیط، (c) استحکام کشش نهایی در 600°C (d) تنش در ۰/۲٪ کرنش در 600°C .



شکل (۸): پاسخ سخت کردن سوپرآلیاژ Udimet720Li با عملیات حرارتی در 700°C است

همانگونه که در شکل (۹) ملاحظه می‌شود اندازه ذرات γ دومی با عملیات حرارتی تغییر نمی‌کند. (شکل (۹)). به عبارتی دیگر γ سومی درشت شده و بدیهی است که استحکام را کنترل می‌کند. مشخص است که برای دستیابی به خواص بهینه باید عملیات حرارتی به دقت انتخاب شود. بیدن ترتیب برای استحکام استاتیک مطلق، دمای محلولی بالاتر ترجیح داده می‌شود، برای این که نسبت γ اولیه کاهش می‌یابد تا مقدار بیشتری از γ در محدوده ۵۰ تا ۱۰۰ نانومتر قرار گیرد که بیشترین تاثیر را دارند.

همانگونه که مشاهده می‌شود آلیاژهای با نسبت Ti/Al بالا، دارای بیشترین استحکام هستند. درعمل، تنش تسلیم آلیاژ دیسک توربین به عملیات حرارتی انجام شده بر آن، به ویژه عملیات محلولی که در مجاورت دمای انحلال γ انجام می‌شود، بستگی زیادی دارد. به همین دلیل است که اندازه ذرات γ نیز در حد جزء حجمی عامل تعیین کننده ی مقاومت به حرکت نابجایی است. در بیش تر آلیاژهای دیسک توربین، دمای انحلال γ بین 1050°C و 1200°C است که مقدار دقیق به ترکیب شیمیایی بستگی دارد. اگر دمای عملیات حرارتی محلولی کمتر از دمای انحلال باشد، رسوب γ حل نشده یا اولیه مانع رشد دانه γ می‌شود (شکل (۷)). شکل (۷): تصویر میکروسکوپ نوری سوپرآلیاژ RR1000 الف) عملیات حرارتی زیر انحلال به مدت ۴ ساعت در 1130°C (ب) عملیات حرارتی بالای انحلال به مدت ۴ ساعت در 1170°C (دمای انحلال در حدود 1150°C است)

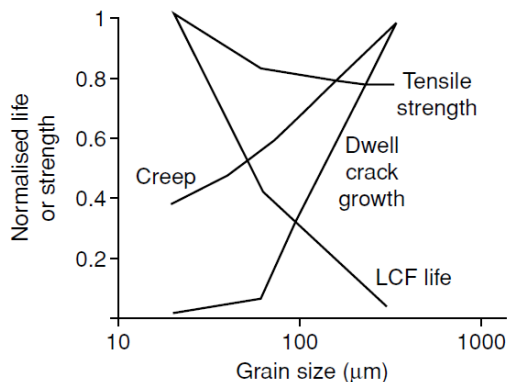


شکل (۷): تصویر میکروسکوپ نوری سوپرآلیاژ RR1000 الف) عملیات حرارتی زیر انحلال به مدت ۴ ساعت در 1130°C (ب) عملیات حرارتی بالای انحلال به مدت ۴ ساعت در 1170°C (دمای انحلال در حدود 1150°C است)

عملیات حرارتی در دمای بیش از دمای انحلال، γ اولیه را بین برده و دانه های γ درشت تر می‌شوند که با توزیع پیچیده فاز γ همراه است. (شکل (۸)). علاوه بر γ اولیه ذرات γ دوم و سوم بین دانه ای درون ذرات

شکل (۱۰-۲): (a) سرد کردن در کوره بدون عملیات محلولی مجدد، (b) سرد کردن در هوان بدون عملیات محلولی مجدد (c) سرد کردن در هوا با عملیات محلولی زیر انحلال در $C^{\circ} 1171$.

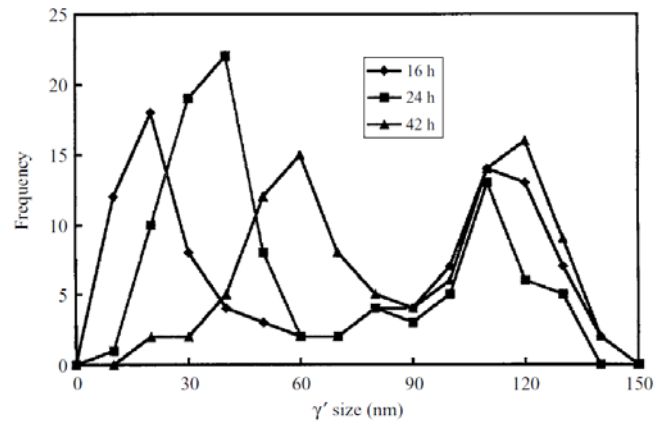
ترکیب عملیات حرارتی بالای انحلال اولیه با عملیات حرارتی پایین انحلال بسیار مضر خواهد بود. چنان که سرعت انتشار ترک خستگی کمینه ۳ برابر می شود که این امر به انحلال ذرات بزرگ تر γ' و رسوب ذرات کوچکتر طی سرد کردن منجر شود. بدین ترتیب به نظر می رسد بهینه سازی توزیع اندازه ذرات γ' برای مقاومت انتشار ترک مشکل تر از تعیین آن باری استحکام استاتیکی بهینه است. البته در عمل تغییر توزیع اندازه ذرات γ امکان پذیر نیست، چرا که در حین عملیات حرارتی سوپرآلیاژ دیسک توربین مشکل ایجاد می کند. استحکام کششی و عمر خستگی کم چرخه (که بیش تر با شروع خستگی کنترل می شود) با کوچک شدن اندازه دانه بهترین نتایج را دارند اما خواص خزشی و سرعت انتشار ترک خستگی بهینه نیستند که در اندازه دانه های بزرگتر بهتر هستند. (شکل ۱۱)



شکل (۱۱): نمودار خواص آلیاژهای دیسک توربین و وابستگی آنها به اندازه دانه

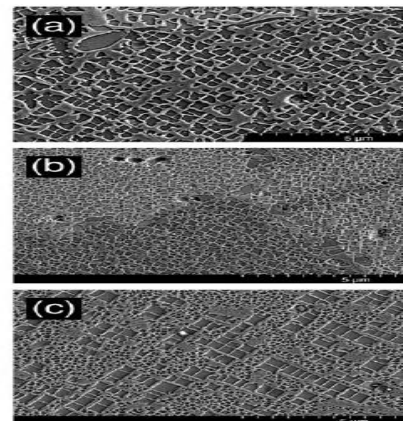
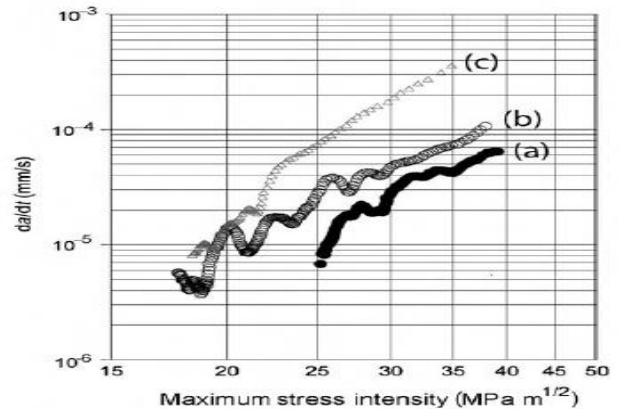
نتیجه گیری

۱- با ریزتر شدن دانه ها، مرزدانه ها افزایش پیدا کرده و موانع لغزش نابه جایی ها بیشتر شده که سبب افزایش استحکام آلیاژ و همچنین شکسته شدن ذرات کاربیدی و کوچکتر شدن اندازه ی آنها (که در مرزها تجمع دارند) می گردد.



شکل (۹): نمودار ویژگی توزیع دونمایی γ' در سوپر آلیاژ Udimet720Li و پاسخ آن طی پیرسازی در دمای $C^{\circ} 700$

با این حال، با توجه به ملاحظه خواص خستگی، وضعیت پیچیده خواهد بود. توزیع رسوب γ' اثر مهمی بر سرعت انتشار ترک خستگی دارد. با عملیات حرارتی در دمای بیش از انحلال، سرعت سرد کردن نیز در اندازه دانه γ موثر خواهد بود. سرعت انتشار ترک خستگی در K_{max} برابر $25MPam^{1/2}$ با سرد کردن در هوا نسبت به سرد در کوره، با فاکتور ۴ افزایش می یابد به گونه ای که اندازه ذرات γ' از ۲۵۰ نانومتر به ۱۷۰ نانومتر کاهش می یابد. (شکل ۱۰-۱)



۲- برای توازن بین خواص، نیاز است که کاربرد محصول شناخته شود تا توازنی بین استحکام استاتیکی مطلق و انتشار ترک خستگی برقرار شود.

منابع

- [1] D. Furrer and H. Fecht, Ni-based superalloys for turbine discs, *Journal of Metals*, **51** (1999), 14-17.
- [2] J. Jones and D. J. C. Mackay, Neural network modelling of the mechanical properties of nickel base superalloys, in R. D. Kissinger, D. J. Deye, D. L. Anton *et al.*, eds, *Superalloys 1996* (Warrendale, PA: The Minerals, Metals and Materials Society (TMS), 1996), pp. 417-424.
- [3] D. Raynor and J. M. Silcock, Strengthening mechanisms in γ precipitating alloys, *Metal Science*, **4** (1970), 121-129.
- [4] M. P. Jackson and R. C. Reed, Heat treatment of Udimet 720Li: the effect of microstructure on properties, *Materials Science and Engineering*, **A259** (1999), 85-97.
- [5] J. Telesman, P. Kantzos, J. Gayle, P. J. Bonacuse and A. Presenzi, Microstructural variables controlling time-dependent crack growth in a P/M superalloy, in K. A. Green, T. M. Pollock, H. Harada *et al.*, eds, *Superalloys 2004* (Warrendale, PA: The Minerals, Metals and Materials Society (TMS), 2004), pp. 215-224.